



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA  
ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO MECÁNICO**

**AUTOR: MANZANARES FLORES, HUGO AMADEO  
PALTÁN TACO, ANDRÉS FERNANDO**

**TEMA: “DISEÑO DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN, SIMULACIÓN E  
IMPLEMENTACIÓN DE LA CORONA DE BRONCE DEL MECANISMO  
ALIMENTADOR DEL DOBLE CAÑÓN ANTIAÉREO OERLIKON DE 35  
MM., UTILIZANDO EL CENTRO DE MECANIZADO VERTICAL FADAL  
VMC3016L DEL COMANDO LOGÍSTICO REINO DE QUITO, DEL  
EJÉRCITO ECUATORIANO”**

**DIRECTOR: ING. CULQUI, BORYS  
CODIRECTOR: ING. CASTELLANOS, SANTIAGO**

**SANGOLQUÍ, ENERO 2014**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS****CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA****CERTIFICADO DE ELABORACIÓN DEL PROYECTO**

Ing. Borys Hernán Culqui Culqui e Ing. Santiago David Castellanos Villa.

Certifican que el trabajo titulado “DISEÑO DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LA CORONA DE BRONCE DEL MECANISMO ALIMENTADOR DEL DOBLE CAÑÓN ANTIAÉREO OERLIKON DE 35 MM., UTILIZANDO EL CENTRO DE MECANIZADO VERTICAL FADAL VMC 3016L DEL COMANDO LOGÍSTICO REINO DE QUITO, DEL EJÉRCITO ECUATORIANO” fue realizado en su totalidad por los señores Hugo Amadeo Manzanares Flores y Paltán Taco Andrés Fernando, como requerimiento para la obtención del título de ingeniero mecánico.

El mencionado trabajo ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple con las normas establecidas en el reglamento de estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas.

---

Ing. Borys H. Culqui C.

DIRECTOR

---

Ing. Santiago D. Castellanos V.

CODIRECTOR

Sangolquí, 24 de Enero del 2014

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS****CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA****DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, Hugo Amadeo Manzanares Flores y Andrés Fernando Paltán Taco

Declaramos que el trabajo titulado “DISEÑO DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LA CORONA DE BRONCE DEL MECANISMO ALIMENTADOR DEL DOBLE CAÑÓN ANTIAÉREO OERLIKON DE 35 MM., UTILIZANDO EL CENTRO DE MECANIZADO VERTICAL FADAL VMC 3016L DEL COMANDO LOGÍSTICO REINO DE QUITO, DEL EJÉRCITO ECUATORIANO”, ha sido desarrollado en base a la investigación exhaustiva, respetando los derechos intelectuales de terceros, cuyas fuentes se citan en bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

ELABORADO POR:

---

Sr. Hugo A. Manzanares F.

AUTOR.

---

Sr. Andrés F. Paltán T.

AUTOR.

Sangolquí, 24 de Enero del 2014

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**AUTORIZACIÓN**

Nosotros, Hugo Amadeo Manzanares Flores y Andrés Fernando Paltán Taco

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas, la publicación en la biblioteca virtual de la institución, el proyecto titulado: “DISEÑO DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LA CORONA DE BRONCE DEL MECANISMO ALIMENTADOR DEL DOBLE CAÑÓN ANTIAÉREO OERLIKON DE 35 MM., UTILIZANDO EL CENTRO DE MECANIZADO VERTICAL FADAL VMC 3016L DEL COMANDO LOGÍSTICO REINO DE QUITO, DEL EJÉRCITO ECUATORIANO”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sr. Hugo A. Manzanares F.

AUTOR.

Sr. Andrés F. Paltán T.

AUTOR.

Sangolquí, 24 de Enero del 2014

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS****CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA****LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO.**

DISEÑO DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LA CORONA DE BRONCE DEL MECANISMO ALIMENTADOR DEL DOBLE CAÑÓN ANTIAÉREO OERLIKON DE 35 MM., UTILIZANDO EL CENTRO DE MECANIZADO VERTICAL FADAL VMC 3016L DEL COMANDO LOGÍSTICO REINO DE QUITO, DEL EJÉRCITO ECUATORIANO”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

ELABORADO POR:

---

Sr. Hugo A. Manzanares F.

---

Sr. Andrés F. Paltán T.

---

Ing. Carlos Naranjo

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Sangolquí, 24 de Enero del 2014

## DEDICATORIA

Dedico el desarrollo de la presente tesis con todo mi amor y cariño:

A ti DIOS que me diste la oportunidad de vivir y de regalarme una familia maravillosa, por bendecirme y cuidarme durante toda mi vida.

A mis padres principalmente: Mery y Nervo quienes me dieron la vida, los valores y principios morales: Amor y Educación para lograr cualquier meta que me proponga en la vida.

A mi amor eterno: Merly por estar siempre a mi lado, brindándome todo su amor, entrega, dedicación y sobre todo su esfuerzo por entender mis locuras.

A mi querida hija: Analia que es el regalo maravilloso que me dio la vida.

A mis hermanos: Nury y Cristian por su constante amor inexplicable, motivación y ejemplo de esfuerzo de cada día que me ayudan para mi superación personal.

A mis tíos: Ibelia, Celia, Mariana, Carmen, Orfa, Eudaldo, Jorge, José y René, por la confianza que depositan en mi, para poder realizar todos los proyectos que me propongo.

Hugo Amadeo Manzanares Flores

**DEDICATORIA**

Este logro es en homenaje a Dios, quien me bendijo dándome unos padres maravillosos y quien iluminó mi camino todos los días de mi vida cuidándome y dándome la salud necesaria para cumplir con este sueño.

Lo dedico a mis padres, el pilar más importante de mi vida, quienes siempre me brindan su amor incondicional.

A mis tíos, primos y demás familiares quienes me alentaron y me brindaron su apoyo en todo momento.

Andrés Paltán

## AGRADECIMIENTO

A mi Dios, creador del universo y dueño de mi vida que me permite soñar y realizar todos los proyectos que me propongo.

A mis padres, Mery Flores y Nervo Manzanares por el apoyo incondicional que me dieron a lo largo de la carrera. Gracias por todo mama y papa, los quiero con todo mi corazón y este trabajo que nos llevó un año realizarlo les dedico a ustedes, así les devuelvo una pequeñísima parte de lo que ustedes hicieron por mí.

A mi querido amigo y compañero de tesis Andrés por su constante perseverancia y apoyo incondicional, gracias por confiar en mi persona para juntos haber sacado adelante este proyecto.

Al CEMMG por la gran apertura que tuvieron al facilitarnos toda la información necesaria para nuestra tesis, al Mayor Wilfrido Suárez, al Cap. Baldeón, a los Cabos: Panchi, Tingo, Dávila, Chuquimarca, a los Sgts: Villegas, García, Torres y a Don Vladimir Yunga por toda su ayuda prestada durante todo el tiempo que hemos pasado en el CNC.

Al Tesud por su servicio prestado para la fabricación de la fresa madre, al Ing. Byron Criollo, al señor Lorenzo Criollo y Wilmer.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, hago extensivo mi agradecimiento.

Hugo Amadeo Manzanares Flores



## AGRADECIMIENTO

Gracias Dios por derramar tus bendiciones sobre mi familia y sobre mí, por realizarme como persona y como profesional, por permitirme hacer realidad todos mis sueños. Gracias Dios, porque siempre me escuchas.

A mis padres José y Gloria por darme un hogar lleno de amor, pero sobre todo a mi madre por darme el regalo de la vida y a mi padre porque me ha dado todo y nunca me ha faltado nada.

A mi novia Carla por su apoyo incondicional en todo momento.

A mi amigo, Hugo, por su arduo trabajo en este proyecto y sobre todo por la sincera amistad cultivada en estos años.

A la escuela Politécnica del Ejército y en especial a todos mis maestros de ingeniería que han compartido sus conocimientos, para formarnos como personas y como profesionales.

Andrés Paltán

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO</b>	<b>II</b>
<b>LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO</b>	<b>III</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>VI</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>VII</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b>	<b>VIII</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b>	<b>IX</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>XXIV</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>XXV</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>1</b>
<b>GENERALIDADES</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.	1
1.2 ANTECEDENTES.	2
1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.	3
1.4 OBJETIVOS.	4
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.	4
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	4
1.5 ALCANCE DEL PROYECTO.	4
1.6 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.	4

<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>6</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>6</b>
2.1 DOBLE CAÑÓN ANTIAÉREO OERLIKON.	6
2.1.1 DEFINICIÓN.	6
2.1.2 PARTES.	7
2.1.3 MECANISMO AUTOMÁTICO DE CARGA (MAC).	8
2.1.3.1 PARTES.	9
2.1.4 MECANISMO TRANSPORTADOR DE CARGADORES.	10
2.1.4.1 FUNCIONAMIENTO.	11
2.2 MECANISMO SINFIN CORONA.	12
2.2.1 DEFINICIÓN.	12
2.2.2 GEOMETRÍA.	12
2.2.3 FUERZAS.	21
2.2.4 ESFUERZO DE FLEXIÓN EN LOS DIENTES DE LA CORONA.	27
2.3 ANÁLISIS DE FALLA.	28
2.3.1 DEFINICIÓN.	28
2.3.2 FALLA ESTRUCTURAL.	28
2.3.3 FALLAS EN ENGRANAJES.	29
2.3.4 MÉTODO DE ANÁLISIS DE FALLA.	32
2.3.5 DIAGRAMA CAUSA – EFECTO.	32
2.3.6 MÉTODO DE COLANGELO Y HEISER.	33
2.4 PROCESOS DE MANUFACTURA.	34
2.4.1 FRESADO.	35
2.4.1.1 FRESADO DE ROSCAS.	36

	XII
2.4.2 CENTRO DE MECANIZADO CNC.	36
2.4.2.1 TALLADO DE CORONAS POR GENERACIÓN.	37
2.5 MODELADO 3D, SIMULACIÓN Y MANUFACTURA.	39
2.5.1 DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA (CAD).	39
2.5.2 INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADORA (CAE).	40
2.5.3 MANUFACTURA ASISTIDA POR COMPUTADORA (CAM).	41
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>43</b>
<b>ANÁLISIS DE FALLA EN EL MECANISMO SINFIN CORONA</b>	<b>43</b>
3.1 INTRODUCCIÓN.	43
3.2 DIAGRAMA CAUSA EFECTO.	44
3.2.1 CONDICIONES DE SERVICIO.	44
3.2.2 SELECCIÓN DE MATERIAL.	46
3.2.2.1 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS.	46
3.2.2.2 APLICACIONES.	46
3.2.3 PROCESO DE FABRICACIÓN.	47
3.2.4 MONTAJE.	47
3.2.5 RESULTADOS DEL DIAGRAMA CAUSA – EFECTO.	48
3.3 METODO COLANGELO Y HEISER.	49
3.3.1 ENTREVISTA.	50
3.3.2 MACROGRAFÍA.	54
3.3.2.1 RECONSTRUCCIÓN.	55
3.3.2.2 SUPERFICIES DE FALLA.	56
3.3.3 MEDICIONES DE DUREZA.	57
3.3.4 ANÁLISIS QUÍMICO POR ESPECTROMETRÍA.	59
3.3.5 DOCUMENTOS TÉCNICOS.	61

3.3.6	SIMULACIÓN EN CONDICIONES DE FALLA.	62
3.3.6.1	FASE DE PRE PROCESADO.	63
3.3.6.2	FASE DE SOLUCIÓN.	64
3.3.6.3	FASE DE POST PROCESADO.	65
3.4	DESCRIPCIÓN DE LA POSIBLE FALLA.	66
3.5	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE FALLA.	68
<b>CAPÍTULO 4</b>		<b>73</b>
<b>CÁLCULOS</b>		<b>73</b>
4.1	INTRODUCCIÓN.	73
4.2	GEOMETRÍA DEL LA CORONA.	73
4.2.1	CORONA.	74
4.2.2	SINFÍN.	75
4.3	MATERIAL DE LA CORONA.	76
4.4	MODELADO 3D DE LA CORONA.	77
4.5	CÁLCULO DE TENSIÓN POR ESFUERZO DE FLEXIÓN.	79
4.6	SIMULACIÓN DE ESFUERZOS EN LA CORONA.	80
4.6.1	FASE DE PRE PROCESADO.	81
4.6.2	FASE DE SOLUCIÓN.	82
4.6.3	FASE DE POST PROCESADO.	83
4.7	CONCLUSIÓN.	84
4.8	PLANOS.	84
<b>CAPÍTULO 5</b>		<b>85</b>
<b>CONSTRUCCIÓN DE LA CORONA</b>		<b>85</b>
5.1	INTRODUCCIÓN.	85

	XIV
GEOMETRÍA.	87
5.2.2 MATERIAL.	89
5.3 CONSTRUCCIÓN DE LA FRESA MADRE.	90
5.3.1 OPERACIONES DE MECANIZADO.	90
5.3.1.1 MECANIZADO DEL CUERPO DE LA FRESA MADRE. (TORNO)	90
5.3.1.1 MAQUINADO DE FILOS DE CORTE. (FRESADORA UNIVERSAL)	91
5.3.2 HERRAMIENTAS UTILIZADAS	94
5.3.3 VELOCIDADES DE CORTE.	95
5.3.4 PLANOS.	99
5.3.4 HOJAS DE PROCESO.	99
5.4 CONSTRUCCIÓN DE LA CORONA.	99
5.4.1 OPERACIONES DE MECANIZADO.	99
5.4.1.1 MECANIZADO DEL CUERPO DE LA CORONA. (TORNO)	100
5.4.1.2 GENERACIÓN DE LOS DIENTES (CNC)	102
5.4.1.3 MAQUINADO DEL PERFIL CONCÉNTRICO. (CNC)	105
5.4.2 HERRAMIENTAS EN EL CNC.	111
5.4.3 HOJAS DE PROCESO.	112
5.4.4 VELOCIDADES DE CORTE.	112
<b>CAPÍTULO 6</b>	<b>115</b>
<b>PRUEBAS</b>	<b>115</b>
6.1 INTRODUCCIÓN	115
6.2 PRUEBAS DIMENSIONALES.	115
6.3 PRUEBAS FUNCIONALES.	117
<b>CAPITULO 7</b>	<b>124</b>

	XV
<b>ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO</b>	<b>124</b>
7.1 INTRODUCCIÓN.	124
7.2 ANÁLISIS ECONÓMICO.	124
7.3 ANÁLISIS FINANCIERO.	128
<b>CAPÍTULO 8</b>	<b>129</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>129</b>
8.1 CONCLUSIONES.	129
<b>ANEXOS</b>	¡Error! Marcador no definido.
<b>A.1 ANÁLISIS QUÍMICO EN LA CORONA.</b>	¡Error! Marcador no definido.
<b>A.2 ENSAYO DE DUREZA EN LA CORONA.</b>	¡Error! Marcador no definido.
<b>A.3 MANUAL DEL CAÑÓN OERLIKON.</b>	¡Error! Marcador no definido.
<b>A.4 NORMA DIN (BRONCES AL ALUMINIO).</b>	¡Error! Marcador no definido.
<b>A.5 ANALISIS TÍPICO DEL BS 1400 AB 2.</b>	¡Error! Marcador no definido.
<b>A.6 PROPIEDADES DEL BS 1400 AB 2.</b>	¡Error! Marcador no definido.
<b>A.7 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL BS 1400 AB 2.</b>	¡Error! Marcador no definido.
<b>A.8 RESISTENCIA A LA FATIGA DEL BRONCE AL ALUMINIO.</b>	¡Error! Marcador no definido.
<b>A.9 COEFICIENTES DE POISSON DE MATERIALES.</b>	¡Error! Marcador no definido.

**A.10 VELOCIDAD DE CORTE PARA EL BRONCE AL ALUMINIO.** ¡Error!  
Marcador no definido.

**A.11 VELOCIDADES EN EL CNC.** ¡Error! Marcador no definido.

**A.12 ACERO ARNE O DF-2.** ¡Error! Marcador no definido.

**A.13 ACERO AISI 4340.** ¡Error! Marcador no definido.

**A.14 INFORME DE PRUEBAS REALIZADAS EN LA CORONA.** ¡Error!  
Marcador no definido.

**A.16 HUELLAS DE DESPLAZAMIENTO AXIAL DE LA CORONA.** ¡Error!  
Marcador no definido.

**A.17 ANÁLISIS DE RUGOSIDAD DE LA CORONA**¡Error! Marcador no  
definido.

**A18 TABLA DE CALIDADES SUPERFICIALES.**¡Error! Marcador no  
definido.

**A.19 FACTURA DE REALIZACIÓN DE TRATAMIENTO TÉRMICO  
LUGAR: BHOLER** ¡Error! Marcador no definido.

**A.20 PROFORMA DE FABRICACIÓN DE 200 CORONAS**¡Error! Marcador  
no definido.

**A.21 GRÁFICA DE TENSIÓN DEL MOTOR DE MUELLES.**¡Error! Marcador  
no definido.

**B.1 GEOMETRÍA DEL SINFÍN Y CORONA.** ¡Error! Marcador no definido.

**B.2 GEOMETRÍA DE LA FRESA MADRE.** ¡Error! Marcador no definido.



- B.3 ANÁLISIS DE FUERZAS EN EL MECANISMO SINFÍN CORONA.**      ¡Error! Marcador no definido.
- B.4 CÁLCULO DE TENSIÓN POR ESFUERZO DE FLEXIÓN.**      ¡Error!  
**Marcador no definido.**
- C.1 MECANISMO AUTOMÁTICO DE CARGA IZQUIERDO.**      ¡Error!  
Marcador no definido.
- C.2 MECANISMO SINFÍN CORONA.**      ¡Error! Marcador no definido.
- C.3 PLANO DEL SINFÍN.**      ¡Error! Marcador no definido.
- C.4 PLANO DE LA CORONA.**      ¡Error! Marcador no definido.
- C.5 HOJA DE PROCESOS DE LA CORONA.** ¡Error! Marcador no definido.
- C.6 POST-PROCESADO DEL PERFIL CONCÉNTRICO.**¡Error!      Marcador  
no definido.
- C.7 PLANO DE LA FRESA MADRE.**      ¡Error! Marcador no definido.
- C.8 HOJA DE PROCESO FRESA MADRE.**      ¡Error! Marcador no definido.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Corona de bronce. ....	3
Figura 2. Doble cañón Oerlikon. ....	6
Figura 3. Partes del doble cañón Oerlikon. [9].....	7
Figura 4. Ubicación del MAC en el cañón Oerlikon.....	8
Figura 5. Partes del MAC. [9].....	9
Figura 6. Mecanismo transportador de Cargadores.....	10
Figura 7. Mecanismo sinfín corona. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 8. Geometría del sinfín. [2].....	12
Figura 9. Geometría de la corona. [2] .....	15
Figura 10. Geometría de la corona. [2] .....	18
Figura 11. Coeficientes de fricción. [3].....	23
Figura 12. Fuerza que ejerce la corona sobre el sinfín. [3] .....	25
Figura 13. Fallas en engranajes. [8].....	29
Figura 14. Tipos de falla ocasionadas por fatiga. [8].....	30
Figura 15. Tipos de falla ocasionadas por impacto. [8].....	30
Figura 16. Tipos de falla ocasionadas por desgaste. [8].....	31
Figura 17. Tipos de falla ocasionadas por Tensión de ruptura. [8] .....	31
Figura 18. Diagrama Causa – Efecto. [7].....	32
Figura 19. Procesos de manufactura. ....	35
Figura 20. Mecanizado del tornillo sinfín. [1] .....	36
Figura 21. Centro de mecanizada vertical Fadal.....	37
Figura 22. Método de generación por talla con fresa madre. [1].....	38
Figura 23. Corona mecanizada en CNC. ....	38

Figura 24. Diagrama Espina de Pescado. ....	44
Figura 25. Daño en el diente originado por sobrecarga. ....	45
Figura 26. Inexistencia de defectos en la superficie. ....	47
Figura 27. Subconjunto del mecanismo transportador de cargadores. ....	48
Figura 28. Resultados del diagrama causa – efecto. ....	49
Figura 29. Vista lateral del MAC. ....	55
Figura 30. Eje donde se encuentra alojada la corona. ....	55
Figura 31. Fallas presentes en la corona. ....	56
Figura 32. Superficies de falla en la corona. ....	56
Figura 33. Puntos de análisis de dureza en la corona. ....	57
Figura 34. Mecanismo sinfín corona en 3D. ....	63
Figura 35. Asignación de material al sinfín y corona. ....	63
Figura 36. Mallado y refinado de la corona. ....	64
Figura 37. Restricción del movimiento de la corona. ....	64
Figura 38. Gráfica de convergencia del modelo. ....	65
Figura 39. Esfuerzos máximos de Von Mises. ....	66
Figura 40. Secuencia de la falla. ....	68
Figura 41. Geometría de la corona. ....	74
Figura 42. Geometría del sinfín. ....	75
Figura 43. Geometría del sólido. ....	77
Figura 44. Barrido de corte en la corona. ....	77
Figura 45. Involuta del diente. ....	78
Figura 46. Modelado 3D de la corona. ....	78
Figura 47. Diente de la corona particionado. ....	81

Figura 48. Asignación de material al sinfín y corona.....	81
Figura 49. Mallado y refinado de la corona.....	82
Figura 50. Restricción del movimiento de la corona. ....	82
Figura 51. Gráfica de convergencia del modelo.....	83
Figura 52. Esfuerzos máximos de Von Mises.....	83
Figura 53. Fresa madre. ....	86
Figura 54. Geometría Fresa madre.....	87
Figura 55. Acero DF2.....	90
Figura 56. Inclinación de la mesa. ....	91
Figura 57. Primer entrada en la fresa madre. ....	91
Figura 58. Fresa madre de 8 entradas.....	92
Figura 59. Una entrada de corte en la fresa. ....	92
Figura 60. Entradas de corte en la fresa.....	93
Figura 61. Destalonamiento de los dientes.....	93
Figura 62. Modelado del sólido.....	106
Figura 63. Transparencia de la materia prima. ....	107
Figura 64. Manufactura.....	107
Figura 65. Especificación de los parámetros de la fresa madre.....	108
Figura 66. Creación de operación Zlevel Profile. ....	108
Figura 67. Simulación 2D.....	109
Figura 68. Ventana post process. ....	109
Figura 69. Material en bruto.....	100
Figura 70. Refrentado del eje.....	100
Figura 71. Agujero central.....	101

Figura 72. Geometría del eje “nariz”. .....	101
Figura 73. Corona montada en nariz y cilindrado final.....	102
Figura 74. Mecanizado de dientes de la corona. ....	103
Figura 75. Pulido de los dientes de la corona. ....	103
Figura 76. Mecanizado de perfil concéntrico de la Corona.....	110
Figura 77. Corona terminada. ....	110
Figura 78. Tolerancias Normalizadas ISO 2768.¡Error! Marcador no definido.	
Figura 79. Corona después de realizada las pruebas.....	123

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Ángulos de presión en función del ángulo de avance. [3].....	24
Tabla 2. Factor de forma de Lewis para dientes de la corona. [3] .....	27
Tabla 3. Método de Colangelo y Heiser. [7].....	34
Tabla 4. Datos de dureza.....	58
Tabla 5. Composición Química de la Corona de Bronce. ....	59
Tabla 6. Composición química de los bronce.....	61
Tabla 7. Parámetros a ingresar en Software Inventor Autodesk.....	62
Tabla 8. Simulación en condiciones de impacto. ....	66
Tabla 9. Geometría de la corona. ....	74
Tabla 10. Geometría del sinfín.....	75
Tabla 11. Características mecánicas del Bronce al Aluminio. ....	76
Tabla 12. Propiedades mecánicas del Bronce al Aluminio. ....	76
Tabla 13. Resumen de fuerzas en el mecanismo sinfín corona. ....	79
Tabla 14. Resultados del método AGMA.....	79
Tabla 15. Parámetros a ingresar en Software Inventor Autodesk.....	80
Tabla 16. Simulación en condiciones normales.....	84
Tabla 17. Geometría de la fresa madre. ....	88
Tabla 18. Análisis típico del acero DF2.....	89
Tabla 19. Características físicas del acero DF2.....	89
Tabla 20. Geometría de la cuchilla cuadrada para torneado .....	94
Tabla 21. Geometría de la fresa modular. ....	94
Tabla 22. Geometría de la fresa cola de milano. ....	95
Tabla 23. Geometría de la fresa de vástago.....	95

Tabla 24. Parámetros de cilindrado (acabado) del acero DF2. ....	96
Tabla 25. Velocidades del torno.....	97
Tabla 26. Parámetros de fresado (acabado) del acero DF2. ....	98
Tabla 27. Velocidades del torno.....	98
Tabla 28. Parámetros de cilindrado (acabado) del Br Al. ....	112
Tabla 29. Parámetros de fresado del bronce.....	113
Tabla 30. Generación de dientes en la corona. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Tabla 31. Geometría de la fresa madre.....	111
Tabla 32. Geometría de la fresa de vástago. ....	111
Tabla 33. Verificación de la geometría de la corona. ....	116
Tabla 34. Protocolo de pruebas.....	117
Tabla 35. Protocolo de prueba 1.....	118
Tabla 36. Protocolo de prueba 2.....	119
Tabla 37. Protocolo de prueba 3.....	120
Tabla 38. Protocolo de prueba 4.....	121
Tabla 39. Inspección visual de la superficie del diente. ....	122
Tabla 40. Costos de materiales. ....	125
Tabla 41. Costos de máquinas herramientas. ....	126
Tabla 42. Mano de obra para construcción de la fresa madre.....	126
Tabla 43. Costos de diseño de la fresa madre. ....	127
Tabla 44. Costo total del proyecto .....	127
Tabla 45. Tabla comparativa de costos de fabricación de la pieza.....	128

## RESUMEN

El presente artículo se refiere al estudio de la corona de bronce que es parte del mecanismo de alimentación del cañón antiaéreo Oerlikon de 35 mm del ejército ecuatoriano y se divide en las siguientes etapas: análisis de falla, cálculo mediante el método AGMA, simulación, fabricación y pruebas. El Análisis de Falla se lo realiza para determinar cuál es la causa que provoca la fractura en los dientes de la corona . El cálculo se lo realiza para determinar la geometría de la corona y los esfuerzos generados en la misma. Como siguiente paso se realiza la simulación por el método de elementos finitos en el Software Inventor Autodesk para analizar su comportamiento mecánico en condiciones de falla y en condiciones normales de funcionamiento. Luego se ejecuta la fabricación de la corona, la misma que involucra las fases de generación de los dientes, con la herramienta denominada fresa madre sincronizada con el 4to eje y la fase de generación del perfil concéntrico, todo en el CNC Fadal VMC 3016L. Finalmente se realizan las pruebas geométricas y funcionales a fin de verificar el correcto funcionamiento de la corona.

Palabras claves:

Análisis de falla

CNC

Fresa madre

Procesos de Manufactura

Elementos finitos.



## ABSTRACT

This article refers to the study of bronze worm well which is part of the feeding mechanism of the anti-aircraft gun 35mm Oerlikon Ecuadorian army and is divided into the following stages: failure analysis , calculation using the AGMA method , simulation , manufacturing and testing. The Failure Analysis is performed to determine what is the underlying cause of the fracture in the teeth worm well mechanism . The calculation is done to determine the geometry of the worm well and the stresses generated in the same . As a next step the simulation is performed by the finite element method in the Autodesk Inventor Software to analyze their mechanical behavior under fault conditions and under normal operating conditions. After making the worm well is divided in generation of the teeth, with the hobbing tool called, synchronized with the 4th axis and concentric phase profile generation , particularly in the CNC Fadal VMC 3016L . Finally geometric and functional in order to verify the correct operation of the corona tests are performed.

### Key words:

Failure Analysis

CNC

Cut hob

Manufacturing Process

Finite element

## SIMBOLOGÍA

MAC	Mecanismo Automático de Carga
F.F.A.A	Fuerzas armadas
CEMMG	Centro de Mantenimiento de Material de Guerra
CNC	Control Numérico Computarizado
CAD	Diseño Asistido por Computador
CAM	Manufactura Asistida por Computadora
CAE	Ingeniería Asistida por Computadora
M	Módulo del sinfín y la corona
$p_a$ _sinfín	Paso axial del sinfín
h	Altura total del diente del sinfín
$D_p$ _sinfín	Diámetro de paso del sinfín
$D_E$ _sinfín	Diámetro exterior del sinfín
$D$ _sinfín	Diámetro al fondo del hilo del sinfín
$L$ _sinfín	Desplazamiento del sinfín
$N$ _sinfín	Número de dientes del sinfín
$\lambda$	Ángulo de avance del sinfín
$\alpha$	Ángulo de hélice del sinfín
$\Phi_n$	Ángulo de presión normal del sinfín
$p_n$ _sinfín	Paso normal del sinfín
$e$	Espesor del filete del sinfín
$T$	Ancho en el fondo del filete del sinfín
M	Módulo de la corona

$p_c$	Paso circular de la corona
$p_n$	Paso normal de la corona
$h$	Altura total del diente de la corona
$DE$	Diámetro exterior de la corona en
$N_c$	Número de dientes de la corona
$D_p$	Diámetro de paso de la corona
$\alpha_c$	Ángulo de hélice de la corona
$\lambda_c$	Ángulo de avance de la corona
$R$	Concavidad periférica de la corona
$D_2$	Diámetro mayor sobre aristas de la corona
$C$	Distancia entre centros del sinfín y la corona
$i$	Relación de transmisión entre el sinfín y la corona
$N_c$	Número de dientes de la corona
$N_{\text{sinfín}}$	Número de entradas del sinfín
$T$	Torque
$Pot$	Potencia del motor
$\omega$	Velocidad angular
$F$	Fuerza aplicada en un diente de engrane
$V_{t_{\text{sinfín}}}$	Velocidad de línea de paso del sinfín
$V_{\text{sinfín}}$	Velocidad que gira el sinfín
$D_{p_{\text{sinfín}}}$	Diámetro de paso del sinfín
$V_{t_{\text{corona}}}$	Velocidad de línea de paso de la corona
$V_{\text{corona}}$	Velocidad que gira la corona
$D_{p_{\text{corona}}}$	Diámetro de paso de la corona

VS	Velocidad de deslizamiento
$\eta$	Eficiencia del mecanismo sinfín corona
f	Coefficiente de fricción
$W_{wt}$	Fuerza tangencial en el sinfín
$W_{Ga}$	Fuerza axial en la corona
$W_{wr}$	Fuerza radial en el sinfín
$W_{Gr}$	Fuerza radial en la corona
$W_{wa}$	Fuerza axial en el sinfín
$W_{Gt}$	Fuerza tangencial en la corona
$P_{\text{sinfín}}$	Potencia del sinfín
W	Fuerza resultante en la corona
$\sigma_{\text{diente}}$	Esfuerzo a flexión de los dientes de la corona
$F_t$	Fuerza tangencial en los dientes de la corona
Y	Factor de forma de Lewis
F	Ancho de la corona
$F_s$	Factor de seguridad
$S_y$	Esfuerzo a la fluencia

## GLOSARIO DE TÉRMINOS.

Cadencia de tiro	La cadencia de tiro es la cantidad de proyectiles disparados por un arma en un minuto. Se dice que un arma tiene mayor cadencia de tiro cuando es capaz de disparar un mayor número de proyectiles por minuto. Se especifica usualmente en “disparos por minuto” (d.p.m.)
Repotenciar	Es el reacondicionamiento de equipos realizando modificaciones o remplazos de sus componentes. Se cambian partes dañadas o deficientes y se conserva la estructura mecánica en buen estado..
Cañón	Es una pieza de artillería para disparar un proyectil.
Analista de Fallas	Es la persona encargada de determinar las causas que provocaron la falla de un elemento estructural.
Corona	Es el elemento mecánico que trabaja sincronizada con el tornillo sinfín.
Husillo	Es el elemento donde se alojan ejes o herramientas en la fresadora.
Carraca	Es una llave accionada por la mano con un movimiento de vaivén, que se introduce a un costado del MAC, permitiendo tensar el motor de muelles.
MAC	Mecanismo Automático de Carga. Es el dispositivo que alimenta de proyectiles al cañón

# **CAPÍTULO 1**

## **GENERALIDADES**

### **1.1 INTRODUCCIÓN.**

El proyecto comprende realizar el análisis de falla, diseño del proceso de construcción, simulación e implementación de la corona de bronce, del mecanismo transportador de cargadores y este a su vez parte del mecanismo de alimentación de proyectiles del doble cañón Oerlikon de 35 mm, usando el centro de mecanizado vertical Fadal VMC3016l del Comando Logístico Reino de Quito, del Ejército Ecuatoriano.

El Análisis de Falla de la corona de bronce, comprende el estudio del funcionamiento del mecanismo de alimentación de proyectiles, un estudio de la geometría, de las fuerzas, del tipo de material, además se realiza ensayos destructivos, no destructivos de la corona, entrevistas al personal técnico, etc, a fin de determinar las causas que provocan la falla en este elemento mecánico.

La simulación de esfuerzos y cargas, que soporta la corona de bronce se realiza a través de un software de ingeniería, el mismo que permite predecir cómo funcionará y reaccionará la corona, bajo un entorno real, y en el cual se obtienen resultados que complementan el análisis de falla.

Posterior al análisis de falla, se diseña el proceso de construcción de la corona de bronce, tomando en cuenta que el objetivo del proyecto es realizarlo en el centro de mecanizado Fadal VMC3016L , mismo que simulará las funciones de una máquina entalladora. Para su posterior construcción. Finalmente se realiza las respectivas pruebas geométricas y de funcionamiento para demostrar que el método de construcción diseñado es confiable.

## **1.2 ANTECEDENTES.**

El Comando Logístico Reino de Quito tiene por misión brindar apoyo logístico integral a la Fuerza Terrestre con eficiencia, eficacia y calidad, contando con un sistema de administración moderno y personal profesional para satisfacer las demandas de la institución; sus batallones de transporte, intendencia y material de guerra.

El Batallón de material de guerra dispone de un centro de mantenimiento para material de guerra CEMMG, equipado en su totalidad para brindar servicios de mantenimiento hasta V escalón en las áreas de: mecánica de patio, electromecánica, motores, etc. Además cuenta con el apoyo del Centro de Mecanizado “25 Bal.”, el cual mecaniza y provee ciertos repuestos que ya no disponen en stock, como es el caso de la corona de bronce. Ya que está provisto de diferentes máquinas herramientas como tornos, fresadoras, tornos CNC, centros de mecanizado CNC.

Aprovechando mencionados recursos el CEMMG tiene como objetivo principal repotenciar parte del armamento bélico que dispone en todo el país, siendo parte de

este armamento el cañón antiaéreo Oerlikon y por ende la construcción de la corona de bronce.

### 1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

Actualmente el Ejército Ecuatoriano realiza un programa de repotenciación de material bélico. Este programa incluye un mantenimiento de V escalón a los 28 cañones Oerlikon del ejército, cada 2 años. De la repotenciación surge la necesidad de construir diferentes piezas que ya cumplieron su vida útil o se encuentran en malas condiciones, debido a que el Ejército no dispone de estos elementos en stock, y tampoco se encuentran en el mercado por la antigüedad de sus versiones.

Entre las piezas mencionadas, está la corona de bronce, la misma que por su diseño (28 dientes para un sinfín de 8 entradas) y geometría, no existen herramientas ni procedimientos conocidos en nuestro medio que lo fabriquen, convirtiéndose en un problema para los técnicos del centro de mecanizado “25 Bal”. En la figura 1 se muestra la corona de bronce en malas condiciones.



**Figura 1.** Corona de bronce.



## **1.4 OBJETIVOS.**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL.**

Diseñar el proceso de construcción, simular e implementar la corona de bronce del mecanismo alimentador del doble cañón antiaéreo Oerlikon de 35 mm., y realizar la construcción en el centro de mecanizado vertical Fadal VMC3016l del Comando Logístico Reino de Quito, del Ejército Ecuatoriano.

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Definir los parámetros requeridos para la obtención de la corona.
- Analizar el comportamiento de la corona en condiciones normales de operación.
- Demostrar el correcto funcionamiento de la corona de bronce.

## **1.5 ALCANCE DEL PROYECTO.**

Diseñar el proceso de construcción, simular e implementar la corona de bronce del mecanismo alimentador del doble cañón antiaéreo Oerlikon de 35 mm., utilizando el centro de mecanizado vertical Fadal VMC3016l del Comando Logístico Reino de Quito, del Ejército Ecuatoriano.

## **1.6 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.**

El presente proyecto pretende, mediante un análisis de falla y simulación de esfuerzos, identificar las causas que provocan la fractura de los dientes de la corona.

Se realizará el diseño y construcción de una Fresa Madre, herramienta que servirá para el mecanizado de coronas de bronce, en el centro de mecanizado Fadal, cubriendo así el déficit de coronas que el Centro de Mantenimiento del Material de Guerra (CEMMG) necesita para reemplazar en los 28 Oerlikon.

Además el CEMMG pasará a obtener toda la información de este proyecto como es: cálculos de diseño, hojas de proceso, procedimiento de construcción, planos, herramienta de construcción (Fresa Madre), y capacitación al personal técnico sobre todos los detalles de la construcción ya que será el personal técnico quien en el futuro construya la corona, teniendo como respaldo esta información. Por tales motivos, el presente proyecto servirá como un documento de apoyo para el personal técnico del CMMG, que estará en la capacidad de desarrollar y construir nuevas coronas y de distintas dimensiones ya que en teoría el procedimiento es el mismo.

## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 DOBLE CAÑÓN ANTIAÉREO OERLIKON.

##### 2.1.1 DEFINICIÓN.

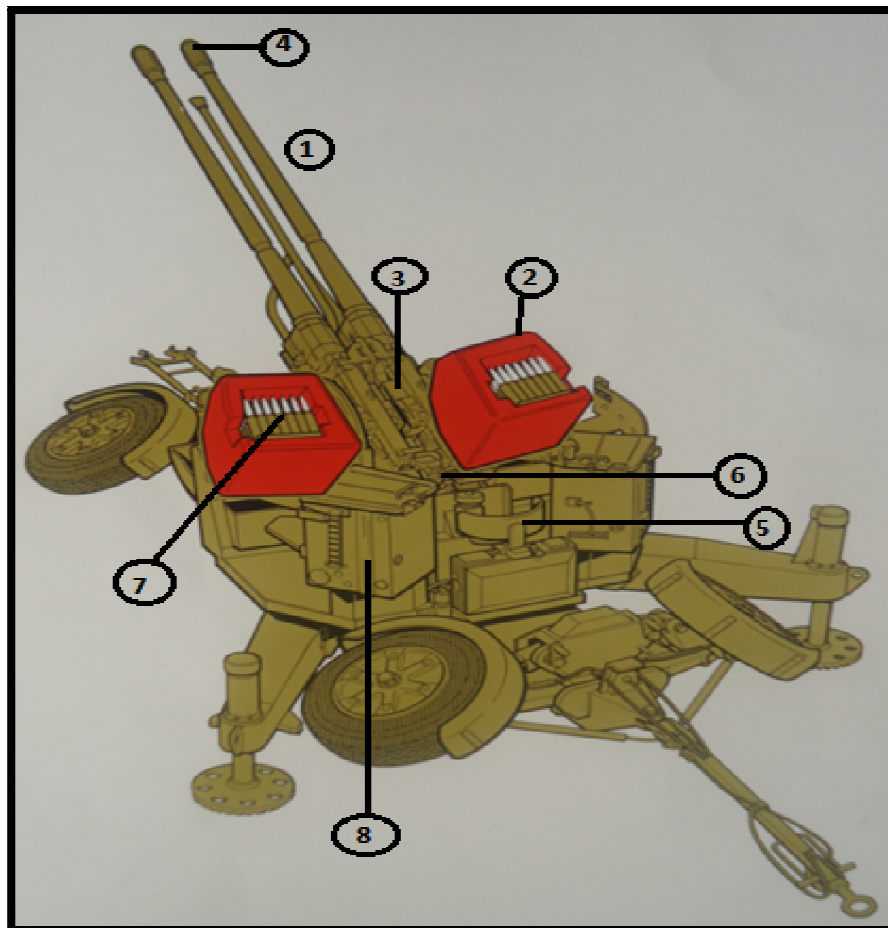
El doble cañón Oerlikon de 35 mm es un arma antiaérea de alta cadencia de tiro, que las Fuerzas Armadas Ecuatorianas la usan para la defensa del espacio aéreo. La versión del cañón que se encuentra en el Ejército Ecuatoriano es la serie Gdf-002 de 35 mm.



**Figura 2.** Doble cañón Oerlikon.

### 2.1.2 PARTES.

Para su estudio, el doble cañón Oerlikon se divide en las siguientes partes:



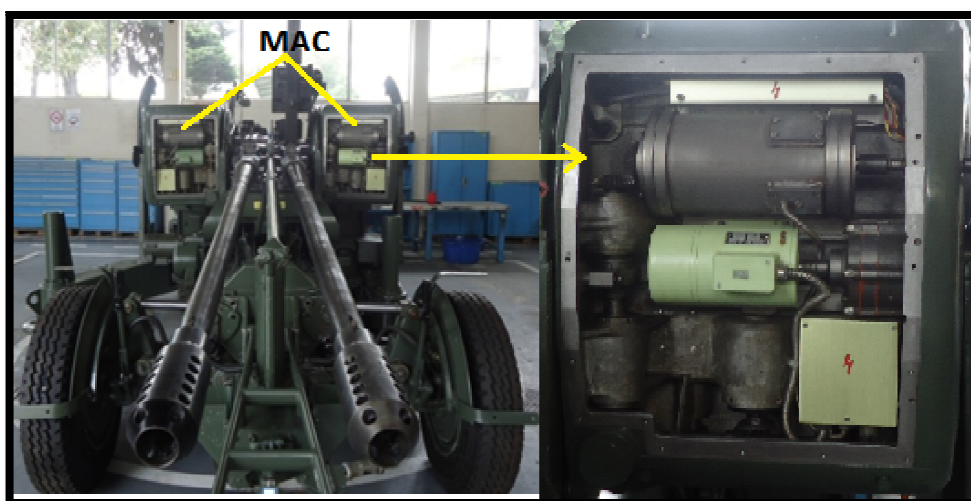
**Figura 3.** Partes del doble cañón Oerlikon. [9]

- 1 Las Armas o Cañón Bitubo.
- 2 Mecanismos Automáticos de Carga (MAC).
- 3 Ajuste Superior.
- 4 Aparatos de Puntería.
- 5 Caja de Control del Jefe de Pieza.
- 6 Ajuste Inferior.
- 7 Munición.
8. Depósito de cargadores

### 2.1.3 MECANISMO AUTOMÁTICO DE CARGA (MAC).

Las alimentadoras o mecanismos automáticos de carga son una parte fundamental del cañón y su misión es alimentar de munición a las dos armas que posee este material de guerra.

Los MAC, se encuentran montados en ambos costados del Cañón Bitubo y giran al mismo tiempo que las armas, tomando con ellas los ángulos de elevación y dirección según sea el disparo, en la figura 4, se muestra la posición del MAC en el cañón Oerlikon.

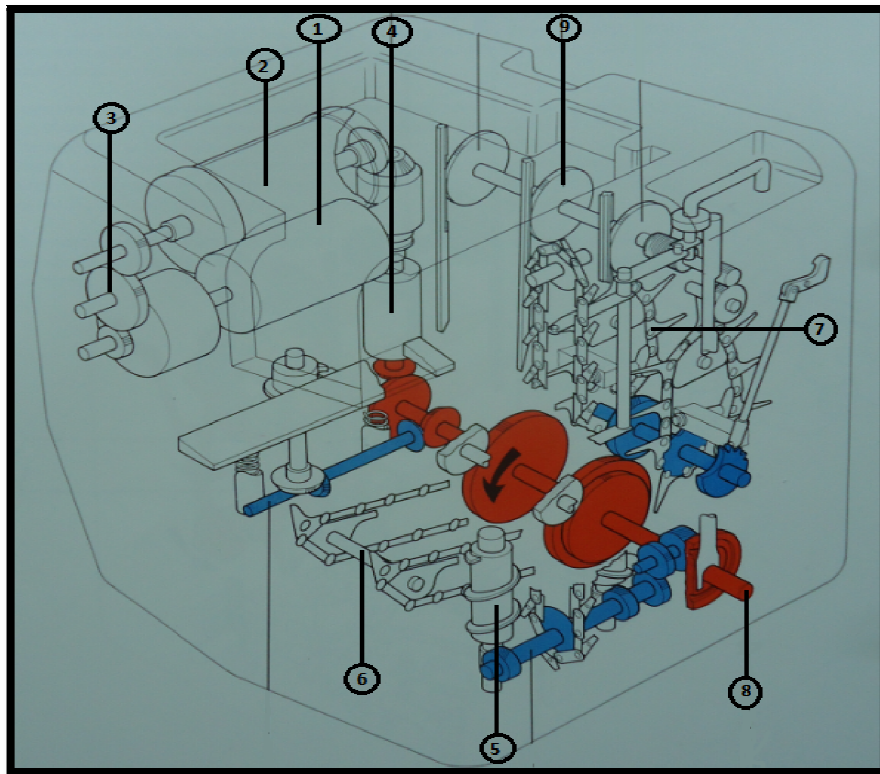


**Figura 4.** Ubicación del MAC en el cañón Oerlikon.

Ambos MAC disponen de idénticos sistemas para guiar los cargadores de munición y posteriormente, transportar e introducirlos en los correspondientes mecanismos de alimentación de cada arma. Cada MAC (izquierdo o derecho) admite un máximo de 7 cargadores, y en cada cargador 7 municiones.

### 2.1.3.1 PARTES.

El MAC consta de las siguientes partes:



**Figura 5.** Partes del MAC. [9]

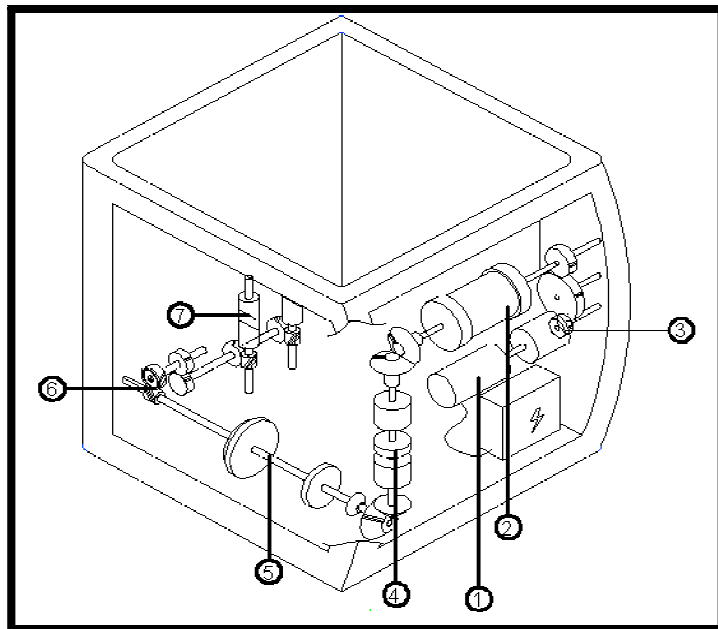
- 1 Motor Eléctrico.
- 2 Motor de Muelles.
- 3 Engranaje Reductor.
- 4 Mecanismo de Embrague.
- 5 Mecanismo Transportador de Cargadores.
- 6 Mecanismo de Alimentación.
- 7 Mecanismo de Elevación.
- 8 Eje Principal.
- 9 Mecanismo de Retención.

Este estudio se enfoca en el mecanismo transportador de cargadores, lugar donde se encuentra el mecanismo Tornillo Sinfín Corona.

#### 2.1.4 MECANISMO TRANSPORTADOR DE CARGADORES.

El mecanismo transportador de cargadores consta de las siguientes partes:

- 1 Motor Eléctrico.
- 2 Motor de Muelles.
- 3 Reductor.
- 4 Embrague.
- 5 Eje Principal.
- 6 Mecanismo Tornillo Sinfín Corona.
- 7 Tornillos Sinfín Transportadores de Carga.



**Figura 6.** Mecanismo transportador de Cargadores.

#### **2.1.4.1 FUNCIONAMIENTO.**

A continuación se describe el funcionamiento del mecanismo transportador de cargadores de la figura 6.

El motor eléctrico (1) tensa automáticamente al motor de muelles (2). Siempre que la tensión del motor de muelles descienda (Anexo A.21), se cierra un microconmutador que pone en funcionamiento al motor eléctrico (1) para volver a enrollar y tensar el muelle.

Ambos motores (eléctrico y de muelles) están conectados entre sí por intermedio de un reductor (3). El motor de muelles (2) proporciona el movimiento a todos los sistemas de transporte del MAC.

El mecanismo de embrague (4) transfiere su energía, en forma de movimiento, a los distintos sistemas de transporte del MAC.

El eje principal (5) va desde el mecanismo de embrague (4), en la parte frontal del MAC, a la parte posterior de este. Al extremo del eje principal se tiene acoplado un tornillo sinfín, que engrana con una corona de bronce que está montada a un eje perpendicular al eje principal, conformando el mecanismo tornillo sinfín corona (6) que a la vez transmiten el movimiento a los tornillos sinfín transportadores de carga (7).



## 2.2 MECANISMO SINFÍN CORONA.

### 2.2.1 DEFINICIÓN.

“Es un mecanismo diseñado para transmitir grandes esfuerzos. Se utiliza como reductor de velocidad aumentando la potencia de transmisión. Este mecanismo está formado por el tornillo sinfín y una rueda dentada. En las construcciones de mayor calidad la corona está fabricada de bronce al aluminio y el tornillo sinfín de acero templado, con el fin de reducir el rozamiento”. [1]

### 2.2.2 GEOMETRÍA.

A continuación se describe la geometría del sinfín corona, lo que constituye el primer paso para el diseño y fabricación del mecanismo.

#### SINFÍN.

En la figura 7 se indica los principales parámetros de cálculo a considerarse en un sinfín y que se detallan a continuación.

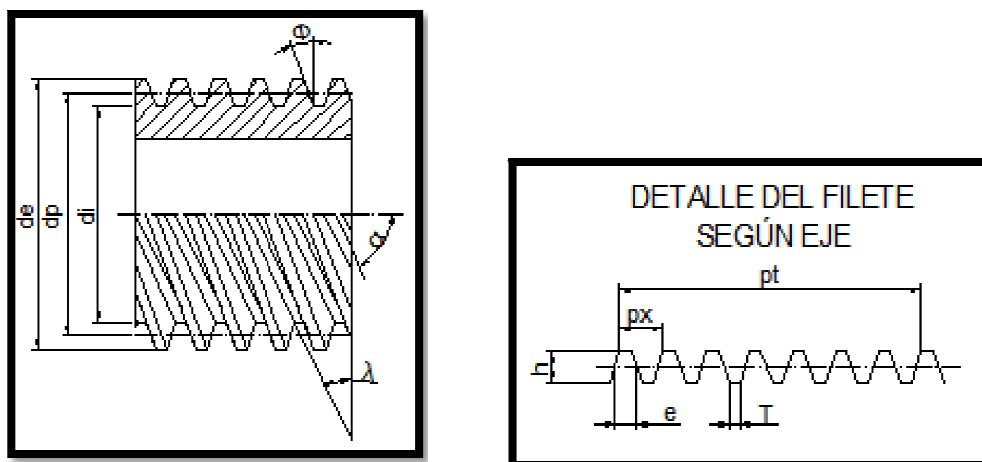


Figura 7. Geometría del sinfín. [2]

El módulo del sinfín viene dado por la ecuación 2.1. [2]

$$M = \frac{p_a_{sinfín}}{\pi} \quad \text{Ecuación 2. 1}$$

Donde:

M: es el módulo del sinfín en (mm)

p\_a\_sinfín: es el paso axial del sinfín en (mm)

La altura total del diente del sinfín viene dado por la ecuación 2.2. [2]

$$h = 2.167 \times M \quad \text{Ecuación 2. 2}$$

Donde:

h: es la altura total del diente del sinfín en (mm)

El diámetro de paso del sinfín viene dado por la ecuación 2.3. [2]

$$Dp_{sinfín} = DE_{sinfín} - 2M \quad \text{Ecuación 2. 3}$$

Donde:

Dp\_sinfín: es el diámetro de paso del sinfín en (mm)

DE\_sinfín: es el diámetro exterior del sinfín en (mm)

El diámetro al fondo del hilo viene dado por la ecuación 2.4. [2]

$$D_{sinfín} = DE_{sinfín} - 2h \quad \text{Ecuación 2. 4}$$

Donde:

D\_sinfín: es el diámetro al fondo del hilo del sinfín en (mm)

El desplazamiento del sinfín viene dado por la ecuación 2.5. [2]

$$L_{sinfín} = N_{sinfín} \times p_a_{sinfín} \quad \text{Ecuación 2. 5}$$

Donde:

L\_sinfín: es el desplazamiento del sinfín en (mm)

N\_sinfín: es el número de dientes del sinfín en (mm)

El ángulo de avance del sinfín viene dado por la ecuación 2.6. [2]

$$\lambda = \mathit{atan} \left( \frac{L_{\mathit{sinfin}}}{\pi \times D_{p_{\mathit{sinfin}}}} \right) \quad \text{Ecuación 2. 6}$$

Donde:

$\lambda$ : es el ángulo de avance del sinfín en (grados)

El ángulo de hélice del sinfín viene dado por la ecuación 2.7. [2]

$$\alpha = 90 - \lambda \quad \text{Ecuación 2. 7}$$

Donde:

$\alpha$ : es el ángulo de hélice del sinfín en (grados)

El ángulo de presión normal del sinfín viene dado por la ecuación 2.8. [3]

$$\mathit{tan}(\Phi_n) = \mathit{tan}(\Phi) * \mathit{cos}(\lambda) \quad \text{Ecuación 2. 8}$$

Donde:

$\Phi_n$ : es el ángulo de presión normal del sinfín en (grados)

El paso normal del sinfín viene dado por la ecuación 2.9. [2]

$$p_{n_{\mathit{sinfin}}} = p_{a_{\mathit{sinfin}}} * \mathit{sin}(\alpha) \quad \text{Ecuación 2. 9}$$

Donde:

$p_{n_{\mathit{sinfin}}}$ : es el paso normal del sinfín en (mm)

El espesor del filete del sinfín viene dado por la ecuación 2.10. [2]

$$e = p_{a_{\mathit{sinfin}}}/2 \quad \text{Ecuación 2. 10}$$

Donde:

$e$ : es el espesor del filete del sinfín en (mm)

El ancho en el fondo del filete del sinfín viene dado por la ecuación 2.11. [2]

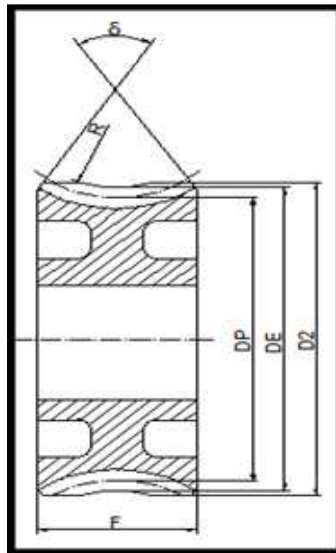
$$T = \left( \frac{p_a \sin \phi}{4 \tan(\phi)} - 1.167 * M \right) * 2 * \tan(\phi) \quad \text{Ecuación 2. 11}$$

Donde:

$T$ : es el ancho en el fondo del filete del sinfín en (mm)

## CORONA.

En la figura 8 se indica los principales parámetros de cálculo a considerarse en una corona y que se detallan a continuación.



**Figura 8.** Geometría de la corona. [2]

El módulo de la corona viene dado por la ecuación 2.12. [2]

$$M = \frac{p_c \text{ corona}}{\pi} \quad \text{Ecuación 2. 12}$$

Donde:

$M$ : es el módulo de la corona en (mm)

$p_c \text{ corona}$ : es el paso circular de la corona en (mm)

El paso normal de la corona viene dado por la ecuación 2.13. [2]

$$p_{n\_corona} = p_{n\_sinfin} \quad \text{Ecuación 2. 13}$$

Donde:

$p_{n\_corona}$ : es el paso normal de la corona en (mm)

La altura total del diente de la corona viene dado por la ecuación 2.14. [2]

$$h = 2.167 \times M \quad \text{Ecuación 2. 14}$$

Donde:

h: es la altura total del diente de la corona en (mm)

El diámetro exterior de la corona viene dado por la ecuación 2.15. [2]

$$DE_{corona} = (N_{corona} + 2) \times M \quad \text{Ecuación 2. 15}$$

Donde:

DE\_corona: es el diámetro exterior de la corona en (mm)

N\_corona: es el número de dientes de la corona

El diámetro de paso de la corona viene dado por la ecuación 2.16. [2]

$$Dp_{corona} = N_{corona} * M \quad \text{Ecuación 2. 16}$$

Donde:

Dp\_corona: es el diámetro de paso de la corona en (mm)

El ángulo de hélice de la corona viene dado por la ecuación 2.17. [2]

$$\alpha c = \lambda \quad \text{Ecuación 2. 17}$$

Donde:

$\alpha c$ : es el ángulo de hélice de la corona en (grados)

El ángulo de avance de la corona viene dado por la ecuación 2.18. [2]

$$\lambda c = \alpha \quad \text{Ecuación 2. 18}$$

Donde:

$\lambda c$ : es el ángulo de avance de la corona en (grados)

La concavidad periférica de la corona viene dado por la ecuación 2.19. [2]

$$R = 0.5 * Dp\_sinfin - M \quad \text{Ecuación 2. 19}$$

Donde:

R: es la concavidad periférica de la corona en (mm)

El diámetro mayor sobre aristas de la corona viene dado por la ecuación 2.20. [2]

$$D2\_corona = 2(R - R * \cos(\alpha)) + DE\_corona \quad \text{Ecuación 2. 20}$$

Donde:

D2\_corona: es el diámetro mayor sobre aristas de la corona en (mm)

La distancia entre centros de la corona y el sinfín viene dado por la ecuación 2.21. [2]

$$C = \frac{(Dp\_corona + Dp\_sinfin)}{2} \quad \text{Ecuación 2. 21}$$

Donde:

C: es la distancia entre centros del sinfín y la corona en (mm)

La relación de transmisión entre el sinfín y la corona viene dado por la ecuación 2.22. [3]

$$i = \frac{N\_corona}{N\_sinfin} \quad \text{Ecuación 2. 22}$$

Donde:

$i$ : es la relación de transmisión entre el sinfín y la corona

$N_{\text{corona}}$ : es el número de dientes de la corona

$N_{\text{sinfin}}$ : es la número de entradas del sinfín

La relación de contacto que existe entre el sinfín y la corona viene dado por la ecuación 2.23. [3]

$$rc = \frac{\sqrt{re_{\text{sinfin}}^2 - rb_{\text{sinfin}}^2} + \sqrt{RE_{\text{corona}}^2 - RB_{\text{corona}}^2} - C \cdot \sin(\Phi)}{p_a_{\text{sinfin}} \cdot \cos(\Phi)} \quad \text{Ecuación 2. 23}$$

Donde:

$rc$ : es la relación de contacto entre el sinfín y la corona

$RE_{\text{corona}}$ : es el radio exterior de la corona en (mm)

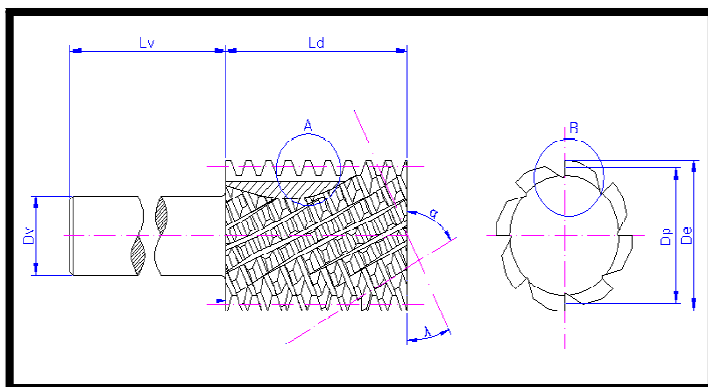
$RB_{\text{corona}}$ : es el radio base de la corona en (mm)

$re_{\text{sinfin}}$ : es el radio exterior del sinfín en (mm)

$rb_{\text{sinfin}}$ : es el radio base del sinfín en (mm)

### FRESA MADRE.

En la figura 9 se indica los principales parámetros de cálculo a considerarse para la fresa madre, siendo estos parámetros semejantes a los del sinfín, tal como se detallan a continuación:



**Figura 9.** Geometría de la corona. [2]

El módulo de la fresa es igual al módulo del sinfín y viene dado por la ecuación 2.24.

[2]

$$M = \frac{p_{a\_fresa}}{\pi} \quad \text{Ecuación 2.24}$$

Donde:

M: es el módulo de la fresa en (mm)

p<sub>a\_fresa</sub>: es el paso axial de la fresa en (mm)

La altura total del diente de la fresa viene dado por la ecuación 2.25. [2]

$$h = 2.167 \times M \quad \text{Ecuación 2.25}$$

Donde:

h: es la altura total del diente de la fresa en (mm)

El diámetro de paso de la fresa viene dado por la ecuación 2.26. [2]

$$Dp_{fresa} = DE_{sinfin} - 2M \quad \text{Ecuación 2.26}$$

Donde:

Dp<sub>fresa</sub>: es el diámetro de paso de la fresa en (mm)

El diámetro al fondo del hilo de la fresa viene dado por la ecuación 2.27. [2]

$$D_{fresa} = DE_{sinfin} - 2h \quad \text{Ecuación 2.27}$$

Donde:

D<sub>fresa</sub>: es el diámetro al fondo del hilo de la fresa en (mm)

El desplazamiento de la fresa viene dado por la ecuación 2.28. [2]

$$L_{fresa} = N_{fresa} \times p_{a\_fresa} \quad \text{Ecuación 2.28}$$

Donde:

L<sub>fresa</sub>: es el desplazamiento de la fresa en (mm)

N<sub>fresa</sub>: es el número de dientes o entradas de la fresa en (mm)



El ángulo de avance de la fresa viene dado por la ecuación 2.29. [2]

$$\lambda = \mathit{atan} \left( \frac{L_{fresa}}{\pi \times Dp_{fresa}} \right) \quad \text{Ecuación 2. 29}$$

Donde:

$\lambda$ : es el ángulo de avance de la fresa en (grados)

El ángulo de hélice de la fresa viene dado por la ecuación 2.30. [2]

$$\alpha = 90 - \lambda \quad \text{Ecuación 2. 30}$$

Donde:

$\alpha$ : es el ángulo de hélice de la fresa en (grados)

El ángulo de presión normal de la fresa viene dado por la ecuación 2.31. [2]

$$\mathit{tan}(\Phi n) = \mathit{tan}(\Phi) * \mathit{cos}(\lambda) \quad \text{Ecuación 2. 31}$$

Donde:

$\Phi n$ : es el ángulo de presión normal de la fresa en (grados)

El paso normal de la fresa viene dado por la ecuación 2.32. [2]

$$p_{n\_fresa} = p_{a\_fresa} * \mathit{sin}(\alpha) \quad \text{Ecuación 2. 32}$$

Donde:

$p_{n\_fresa}$ : es el paso normal de la fresa en (mm)

El espesor del filete de la fresa viene dado por la ecuación 2.33. [2]

$$e = p_{a\_fresa} / 2 \quad \text{Ecuación 2. 33}$$

Donde:

$e$ : es el espesor del filete de la fresa en (mm)

El ancho en el fondo del filete de la fresa viene dado por la ecuación 2.34. [2]

$$T = \left( \frac{p_{a\_fresa}}{4 * \tan(\Phi)} - 1.167 * M \right) * 2 * \tan(\Phi) \quad \text{Ecuación 2. 34}$$

Donde:

$T$ : es el ancho en el fondo del filete de la fresa en (mm)

El paso de la espiral de corte de la fresa viene dado por la ecuación 2.35. [2]

$$SP = \frac{Dp_{fresa} * \pi}{\tan(\lambda)} \quad \text{Ecuación 2. 35}$$

Donde:

$SP$ : es el paso de la espiral de corte de la fresa en (mm)

El número de entradas de corte de la fresa viene dado por la ecuación 2.36. [2]

$$ND = \frac{DE_{fresa} * 3}{2 * p_{a\_fresa}} \quad \text{Ecuación 2. 36}$$

Donde:

$ND$ : es el número de entradas de corte de la fresa

### 2.2.3 FUERZAS.

Previo al cálculo de fuerzas en el mecanismo sinfín corona, es necesario realizar el cálculo de torques, relación de transmisión y la velocidad de línea de paso en el sinfín y la corona. El torque viene dado por la ecuación 2.37. [3].

$$T = Pot \times \frac{6600}{\omega} \quad \text{Ecuación 2. 37}$$

Donde:

$T$ : es el torque en (lb.plg)

$Pot$ : es la potencia del motor en (hp)

$\omega$ : es la velocidad angular en (rad/s)

La fuerza viene dada por la ecuación 2.38. [3]

$$F = \frac{T}{D_p} \quad \text{Ecuación 2. 38}$$

Donde:

F: es la fuerza aplicada en un diente de engrane en (lb)

D<sub>p</sub>: es el diámetro primitivo del engrane en (plg)

La relación de transmisión viene dado por la ecuación 2.39. [3]

$$i = \frac{W_1}{W_2} \quad \text{Ecuación 2. 39}$$

Donde:

i: es la relación de transmisión entre engranes

W<sub>1</sub>: es la velocidad del engrane conductor en (rpm)

W<sub>2</sub>: es la velocidad del engrane conducido en (rpm)

La velocidad de línea de paso es la velocidad lineal de un punto en la línea de paso para el sinfín o la corona y viene dado por la ecuación 2.40. [3]

$$V_{t\_sinfín} = \frac{\pi * D_{p\_sinfín} * V\_sinfín}{12} \quad \text{Ecuación 2. 40}$$

Donde:

V<sub>t\_sinfín</sub>: es la velocidad de línea de paso del sinfín en (pies/min)

V\_sinfín: es la velocidad que gira el sinfín en (rpm)

D<sub>p\_sinfín</sub>: es el diámetro de paso del sinfín en (plg)

La velocidad de línea para la corona viene dado por la ecuación 2.41. [3]

$$V_{t\_corona} = \frac{\pi * D_{p\_corona} * V\_corona}{12} \quad \text{Ecuación 2. 41}$$

Donde:

$V_{t\_corona}$ : es la velocidad de línea de paso de la corona en  
(pies/min)

$V_{corona}$ : es la velocidad que gira la corona en (rpm)

$D_{p\_corona}$ : es el diámetro de paso de la corona en (plg)

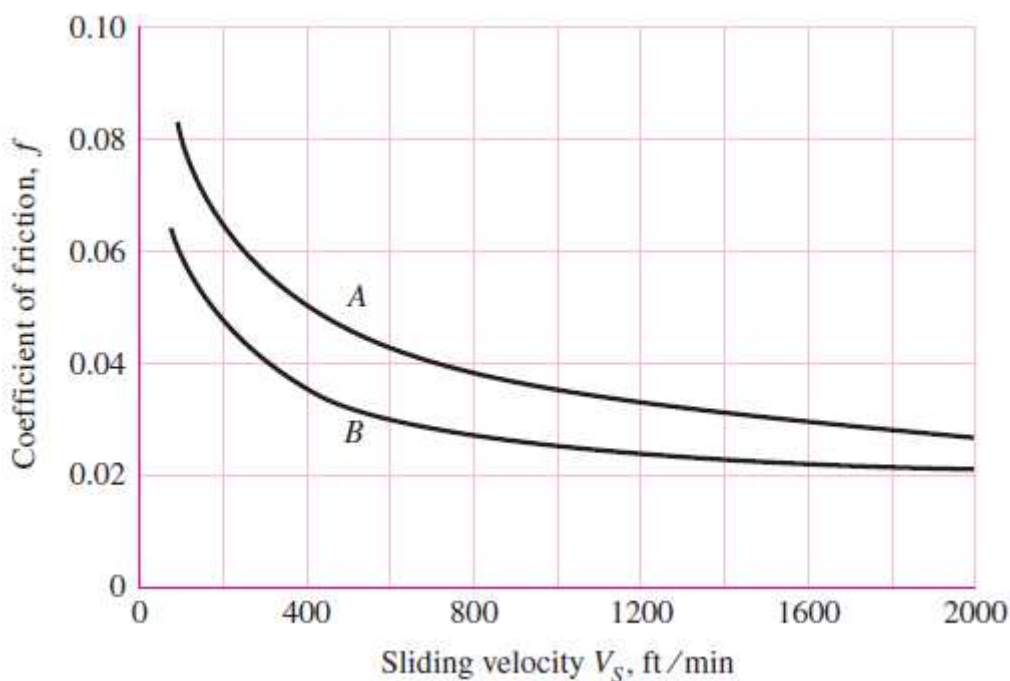
La velocidad de deslizamiento viene dado por la ecuación 2.42. [3]

$$VS = \frac{V_{t\_sinfin}}{\cos \lambda} \quad \text{Ecuación 2. 42}$$

Donde:

VS: es la velocidad de deslizamiento en (pies/min)

El coeficiente de fricción depende al acabado de las superficies y los materiales del tornillo sinfín corona. En la figura 10 se indican los distintos valores del coeficiente de fricción.



**Figura 10.** Coeficientes de fricción. [3]

La curva A se emplea cuando se espera mayor fricción, como es el caso de un sinfín acoplado con rueda helicoidal hechos de fundición de hierro y la curva B se utiliza para materiales de alta calidad (en nuestro caso calidad superficial N4, Anexo A.16), como un sinfín con endurecimiento superficial acoplado con una rueda helicoidal de bronce fosforado.

Para calcular la eficiencia del mecanismo, se necesita conocer el ángulo de presión normal. En la tabla 1 se indica los diferentes valores que adopta el ángulo de presión en función del ángulo de avance.

ÁNGULO DE $\lambda$ AVANCE EN GRADOS	ÁNGULO DE PRESIÓN $\phi_n$ , GRADOS
0 – 15	14 ½
15 – 30	20
30 – 35	25

**Tabla 1.** Ángulos de presión en función del ángulo de avance. [3]

La eficiencia  $\eta$  puede definirse por la ecuación 2.43. [3]

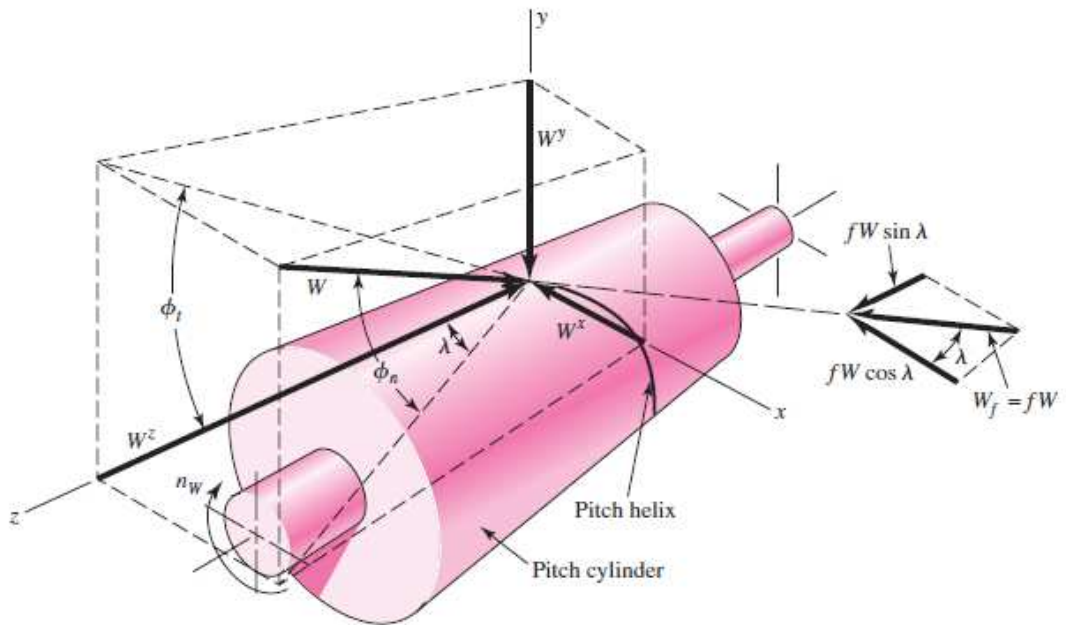
$$\eta = \frac{\cos \phi_n - f \tan \lambda}{\cos \phi_n + f \cot \lambda} \quad \text{Ecuación 2. 43}$$

Donde:

$\eta$ : es la eficiencia del mecanismo sinfín corona

f: es el coeficiente de fricción

Luego, se estudia el sistema de fuerzas que actúan sobre el sinfín corona, tal como se indica en la figura 11.



**Figura 11.** Fuerza que ejerce la corona sobre el sinfín. [3]

Se observa que  $W^Y$  es la fuerza radial o de separación para el sinfín y la corona. La fuerza tangencial es  $W^X$  y sobre la corona es  $W^Z$ , suponiendo que el ángulo entre ejes es de  $90^\circ$ . La fuerza axial sobre el sinfín es  $W^Z$  y sobre el engrane  $W^X$ . Puesto que las fuerza en el engrane son opuestas a las que actúan en el sinfín, estas relaciones se resumen en las ecuaciones 2.44, 2.45, 2.46. [3]

$$W_{wt} = -W_{Ga} = W^x \quad \text{Ecuación 2. 44}$$

Donde:

$W_{wt}$ : es la fuerza tangencial en el sinfín en (lbf)

$W_{Ga}$ : es la fuerza axial en la corona en (lbf)

$$W_{wr} = -W_{Gr} = W^y \quad \text{Ecuación 2. 45}$$

Donde:

$W_{wr}$ : es la fuerza radial en el sinfín en (lbf)

$W_{Gr}$ : es la fuerza radial en la corona en (lbf)

$$W_{wa} = -W_{Gt} = W^z \quad \text{Ecuación 2. 46}$$

Donde:

$W_{wa}$ : es la fuerza axial en el sinfín en (lbf)

$W_{Gt}$ : es la fuerza tangencial en la corona en (lbf)

La fuerza  $W^x$  se calcula por medio de la ecuación 2.47. [3]

$$Wx = 33000 * \frac{P_{\text{sinfin}} * Fd * ka}{Vt_{\text{sinfin}} * n} \quad \text{Ecuación 2. 47}$$

Donde:

$P_{\text{sinfin}}$ : es la potencia del sinfín en (hp)

Fd: factor de diseño

ka: factor de sobrecarga

La fuerza W se calcula por medio de la ecuación 2.48. [3]

$$W = \frac{W^x}{(\cos\phi_n \text{sen}\lambda + f \cos\lambda)} \quad \text{Ecuación 2. 48}$$

Donde:

W: es la fuerza resultante en la corona en (lbf)

La fuerza  $W^y$  se calcula por medio de la ecuación 2.49. [3]

$$W^y = W \text{sen}\phi_n \quad \text{Ecuación 2. 49}$$

La fuerza  $W^z$  se calcula por medio de la ecuación 2.50. [3]

$$w^z = w(\cos\phi_n \cos\lambda - \mu \text{sen}\lambda) \quad \text{Ecuación 2. 50}$$

## 2.2.4 ESFUERZO DE FLEXIÓN EN LOS DIENTES DE LA CORONA.

A continuación se explica el método para calcular la tensión por esfuerzo de flexión en los dientes de la corona. Como los dientes del sinfín son intrínsecamente mucho más fuertes que los dientes de la corona, no se consideran. Los dientes de la corona son cortos y gruesos sobre los bordes de la cara; a medio plano son más delgados. Buckingham adaptó la ecuación de Lewis para este caso a partir de la ecuación 2.51. [3]

$$\sigma_{diente} = \frac{F_t}{p_n \times B \times y} \quad \text{Ecuación 2. 51}$$

Donde:

$\sigma_{diente}$ : es el esfuerzo a flexión de los dientes de la corona en (psi)

$F_t$ : es la fuerza tangencial en los dientes de la corona en (lbf)

$y$ : es el factor de forma de Lewis

$B$ : es la longitud de cuerda de un diente de la corona en (plg)

$p_n$ : es el paso normal de la corona en (plg)

En la tabla 2 se muestra el factor de Lewis en función del ángulo  $\emptyset$ .

$\emptyset$	$y$
<b>14 1/2°</b>	0.100
<b>20°</b>	0.125
<b>25°</b>	0.150

**Tabla 2.** Factor de forma de Lewis para dientes de la corona. [3]



Por último puede estimarse el factor de seguridad a través de la ecuación 2.54. [3]

$$F_s = \frac{S_y}{\sigma_{diente}} \quad \text{Ecuación 2. 52}$$

Donde:

Fs: es el factor de seguridad

Sy: es el esfuerzo a la fluencia en (psi)

## 2.3 ANÁLISIS DE FALLA.

### 2.3.1 DEFINICIÓN.

“El análisis de falla es un método que lleva a la determinación y descripción de las causas de fallas en piezas, componentes, partes o equipos de manera que conociendo estas causas, se pueda tomar distintas acciones correctivas para evitar posteriores irregularidades en estas”. [7]

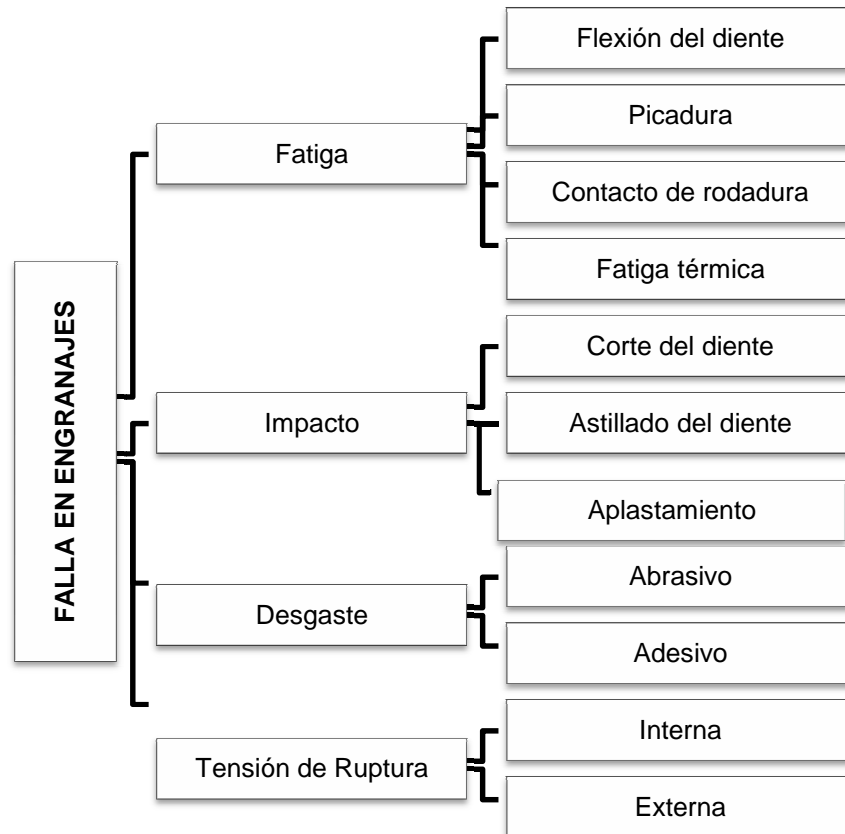
### 2.3.2 FALLA ESTRUCTURAL.

“Se considera que una parte (componente estructural), o todo el conjunto de una estructura, falla cuando:

- La estructura queda totalmente inutilizada.
- Esta aún puede ser utilizada pero ya no es capaz de desempeñar su función satisfactoriamente.
- Un serio deterioro de la misma la torna insegura para continuar desempeñándose en servicio”. [7]

### 2.3.3 FALLAS EN ENGRANAJES.

Los engranajes pueden sufrir múltiples deterioros durante su funcionamiento, no obstante las fallas más comunes se las clasifica en la figura 12.

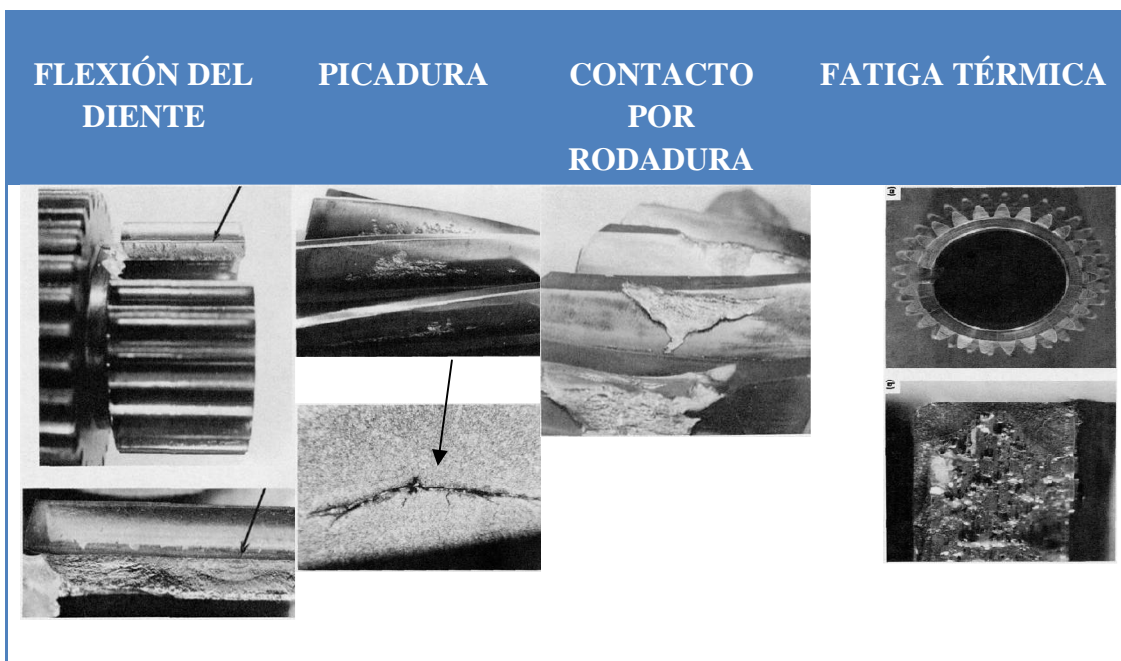


**Figura 12.** Fallas en engranajes. [8]

#### **FATIGA.**

Las “fallas por fatiga” son ocasionadas por tensión extremadamente elevada en el diente del engrane por un período de tiempo. [8]

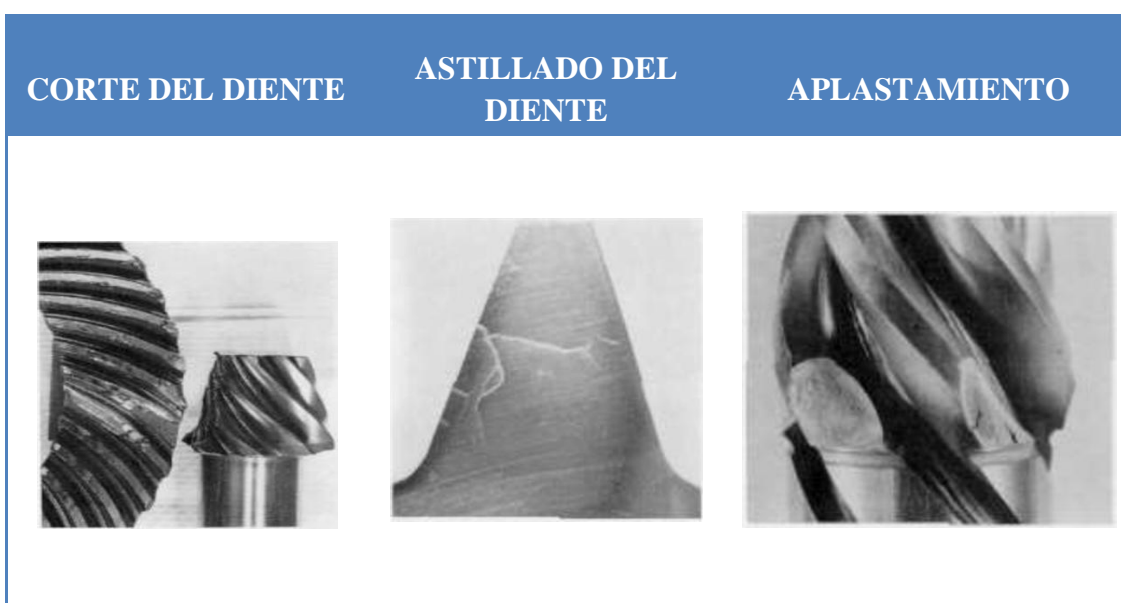
En la figura 13 se muestra las principales fallas por fatiga.



**Figura 13.** Tipos de falla ocasionadas por fatiga. [8]

### IMPACTO.

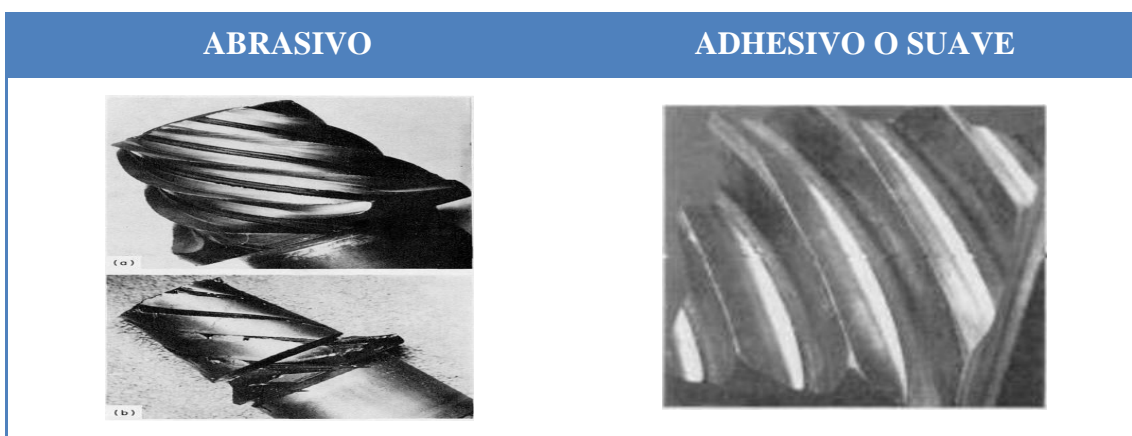
Las “fallas por impacto” son ocasionadas por una carga de choque repentino grave o bien por un objeto extraño que pasa a través del perfil del diente y no muestra las estrías comunes al modo de fallo por fatiga. En la figura 14 se muestra las principales fallas por Impacto. [8]



**Figura 14.** Tipos de falla ocasionadas por impacto. [8]

## DESGASTE.

Esta falla es propia de las transmisiones no lubricadas, y se caracteriza por la disminución del espesor del diente en la zona de la cabeza y del pie, que es donde existe mayor velocidad de deslizamiento. En la figura 15 se indican dos modos distintos de desgaste. [8]

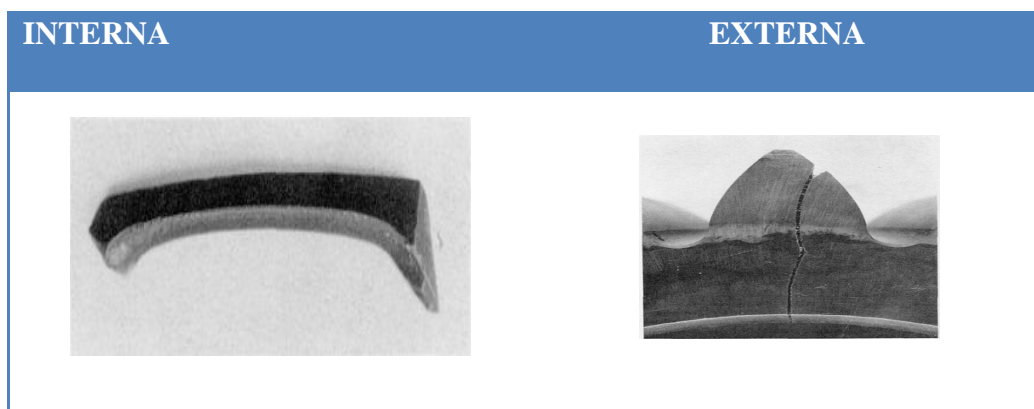


**Figura 15.** Tipos de falla ocasionadas por desgaste. [8]

## TENSIÓN DE RUPTURA.

Cuando las tensiones residuales internas se producen a una magnitud más allá de la resistencia del material, la pieza seguro se rompe. La ruptura se producirá en el punto donde se supera este valor crítico, ya sea internamente o externamente. [8]

En la figura 16 se muestra los tipos de ruptura.



**Figura 16.** Tipos de falla ocasionadas por Tensión de ruptura. [8]

### 2.3.4 MÉTODO DE ANÁLISIS DE FALLA.

La metodología para desarrollar un análisis de fallas es muy variada, y es adaptada en función de las particularidades del elemento estudiado. En este caso se muestra los métodos de: Diagrama Causa – Efecto y Colangelo – Heiser, que servirán de ayuda para determinar la causa raíz de la falla.

### 2.3.5 DIAGRAMA CAUSA – EFECTO.

También conocido como “Diagrama de Espina de Pescado”, es una técnica que nos permite identificar la causa raíz de la falla, en la figura 17 se muestra el diagrama Causa – Efecto.

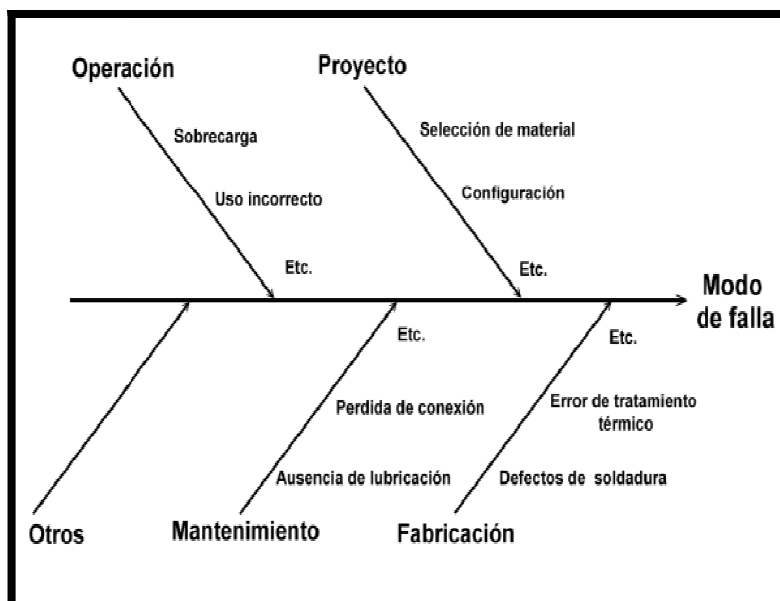


Figura 17. Diagrama Causa – Efecto. [7]

### 2.3.6 MÉTODO DE COLANGELO Y HEISER.

Es una técnica alternativa que nos lleva a la determinación de las causas de falla de un elemento o conjunto mecánico. En la tabla 3 se indica el método de Colangelo y Heiser. [7]

<b>MÉTODO COLANGELO Y HEISER</b>	
<b>HISTORIA DE UTILIZACIÓN</b>	
<b>A. EVIDENCIA DOCUMENTAL</b>	<b>B. PARÁMETROS DE SERVICIO</b>
1. Certificados de ensayos 2. Datos de ensayos mecánicos 3. Especificaciones pertinentes 4. Correspondencia 5. Entrevistas 6. Declaraciones e interrogatorios	1. Parámetros operacionales de proyecto y de servicio 2. Condiciones de servicio actuales 3. Registros de temperatura 4. condiciones ambientales
<b>ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS</b>	
<b>A. ANÁLISIS MACROSCÓPICO DE LA SUPERFICIE DE FRACTURA</b>	<b>B. CARACTERÍSTICAS SUPERFICIALES</b>
1. Presencia de cambios de coloración 2. Textura 3. Oxidación 4. Productos de corrosión	1. Tracción 2. Marcas de playa (beach marks) 3. Marcas de sargento (ratchet marks) 4. Especiales (otros) 5. Cavidades y/o inclusiones 6. Grietas secundarias 7. Dirección de propagación

Continúa...

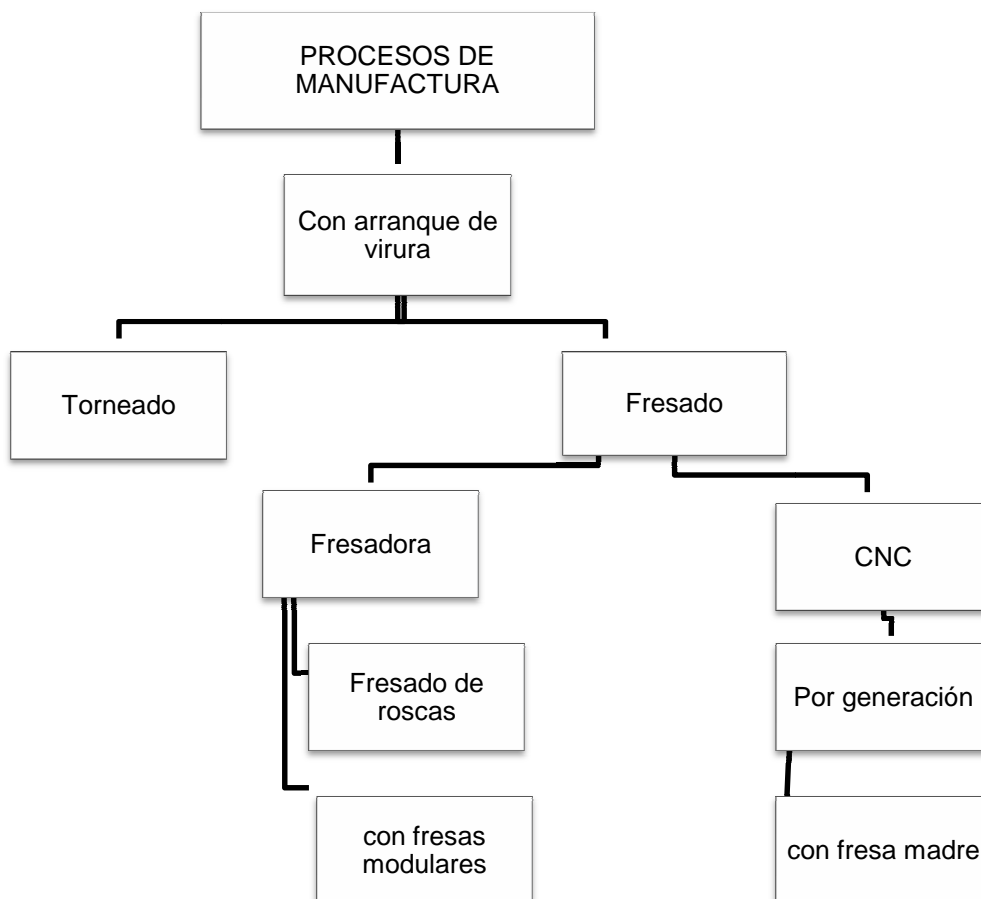
C. MEDICIONES DE DUREZA	D. ANÁLISIS QUÍMICOS DE LAS PARTES FRACTURADAS
1. Macroscópica	1. Análisis vía húmeda
2. Microscópica	2. Análisis por espectroscopia de emisión óptica
	3. Difracción de rayos X, Fluorescencia
<b>ENSAYOS DESTRUCTIVOS</b>	
A. METALOGRAFÍA	B. ENSAYOS MECÁNICOS A. “LABIOS” DE CIZALLAMIENTO
1. Macroscópica	1. Impacto
2. Microscópica	2. Tenacidad a fractura
3. Estructura	3. Rugosidad por deformación plástica
4. Tamaño de grano	
5. Contenido inclusionario	

**Tabla 3.** Método de Colangelo y Heiser. [7]

#### **2.4 PROCESOS DE MANUFACTURA.**

Los procesos de manufactura son todos los procesos químicos y no químicos utilizados para conformar o transformar la materia prima en un componente que cumplirá una determinada función práctica en un sistema.

Este estudio se centra en los procesos por arranque de viruta para construir la fresa madre y la corona, tal como se indica en la figura 18.



**Figura 18.** Procesos de manufactura.

### 2.4.1 FRESADO.

El fresado es un proceso de maquinado en el cual el metal es removido por la rotación cortante de múltiples dientes, cada diente remueve una pequeña cantidad de material con cada revolución del husillo.

La pieza de trabajo es desplazada con movimiento rectilíneo bajo la herramienta en varias direcciones dependiendo del tipo de herramienta y su ángulo de corte.



### 2.4.1.1 FRESADO DE ROSCAS.

El fresado de roscas requiere una fresadora capaz de realizar interpolación helicoidal simultánea en dos grados de libertad: la rotación de la pieza respecto al eje de la hélice de la rosca y la traslación de la pieza en la dirección de dicho eje. El perfil de los filos de corte de la fresa debe ser adecuado al tipo de rosca que se mecanice. En la figura 19 se muestra el mecanizado del tornillo sinfín mediante una fresa frontal y bicónica. [1]

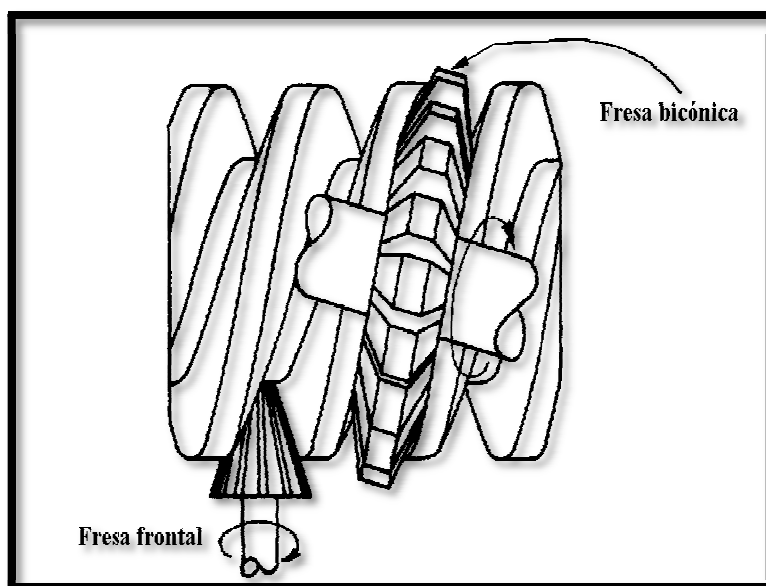
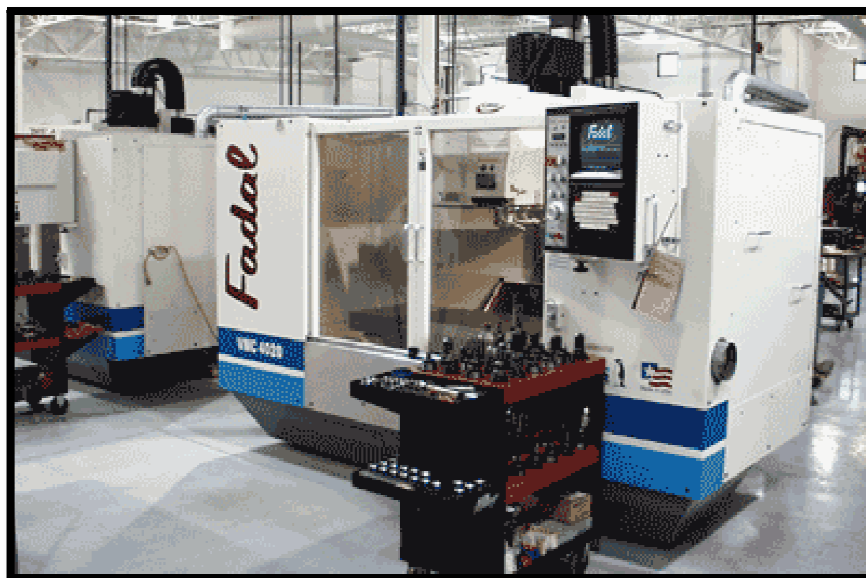


Figura 19. Mecanizado del tornillo sinfín. [1]

### 2.4.2 CENTRO DE MECANIZADO CNC.

Un centro de mecanizado, es una máquina de gran automatización que es capaz de realizar diversas operaciones de maquinado dentro de una instalación bajo CNC (Control Numérico Computarizado). En una máquina CNC una computadora controla el movimiento de la mesa, el carro y el husillo.

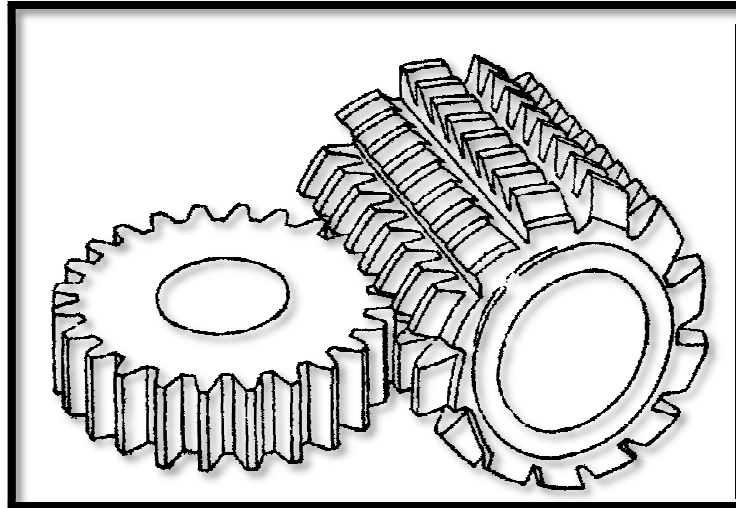
Una vez programada la máquina, ésta ejecuta todas las operaciones por sí sola, ventaja que será aprovechada para mecanizar la corona, utilizando el método de generación que se detalla a continuación.



**Figura 20.** Centro de mecanizado vertical Fadal.

#### **2.4.2.1 TALLADO DE CORONAS POR GENERACIÓN.**

Este método de tallado por generación de ruedas dentadas consisten en la utilización de una herramienta de corte llamada fresa madre, la misma que tiene una forma similar a la de un tornillo sinfín. En la figura 21 se puede apreciar el método de generación tallado con fresa madre. [1]



**Figura 21.** Método de generación por talla con fresa madre. [1]

El objetivo de este proyecto es mecanizar la corona en un centro de mecanizado CNC programando el husillo principal con el cuarto eje consiguiendo el método de generación por talla, tal como se indica en la figura 22.



**Figura 22.** Corona mecanizada en CNC.

## **2.5 MODELADO 3D, SIMULACIÓN Y MANUFACTURA.**

Para cumplir con el objetivo de este proyecto, se debe realizar un modelado, simulación y manufactura de la corona en un centro de mecanizado vertical, motivo por el cual se estudia la programación de dicha maquina mediante el uso de los sistemas CAD, CAE, CAM.

### **2.5.1 DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA (CAD).**

CAD (Diseño Asistido por Computadora). Se trata de la tecnología implicada en el uso de ordenadores para realizar tareas de creación, modificación, análisis y optimización de un diseño. De esta forma, cualquier aplicación que incluya una interfaz gráfica y realice alguna tarea de ingeniería se considera software de CAD. Para el cumplimiento de los objetivos de dicha tesis se utilizó el módulo de diseño Autodesk Inventor 2013, que se describe a continuación.

#### **SOFTWARE AUTODESK INVENTOR.**

Es un programa de diseño asistido por computadora para modelado mecánico.

Las herramientas de CAD de este programa abarcan desde herramientas de modelado geométrico hasta aplicaciones a medida para el análisis u optimización de un producto específico. Entre estos dos extremos se encuentran herramientas de modelado y análisis de tolerancias, cálculo de propiedades físicas (masa, volumen, momentos, etc.), modelado y análisis de elementos finitos, ensamblado, etc.

La función principal en estas herramientas es la definición de la geometría del diseño (pieza mecánica) ya que la geometría es esencial para las actividades subsecuentes en el ciclo de producto.

### **2.5.2 INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADORA (CAE).**

CAE (Ingeniería Asistida por Computadora). La tecnología CAE es una alternativa a los procedimientos de cálculo convencionales que comúnmente se pueden encontrar en Handbooks de Ingeniería. Un progreso sustancial se ha realizado en los sistemas CAE que permite a los ingenieros diseñar, analizar, simular y visualizar la representación de las estructuras y procesos más complicados mediante el Método de Elementos Finitos. En este proyecto, se utilizó el módulo de Simulación Autodesk Inventor 2013.

### **SOFTWARE AUTODESK INVENTOR.**

Es un software de simulación ingenieril, desarrollado para funcionar bajo la teoría de elemento finito. Los pasos involucrados para el análisis por elemento finito de un sólido son los siguientes:

#### **FASE DE PRE PROCESADO.**

- 1.- Crear y discretizar el dominio de la solución en elementos finitos; esto es, subdividir el problema en nodos y elementos.

2.- Asumir una ecuación de forma para representar la conducta física de un elemento, esto es, una función aproximada continua asumiendo que representa la solución de un elemento.

3.- Desarrollar las ecuaciones para elemento.

4.- Ensamblar los elementos para representar la totalidad del problema. Construir la matriz global de rigidez.

5.- Aplicar las condiciones límites o de borde, condiciones iniciales y las cargas.

### **FASE DE SOLUCIÓN.**

6.- Resolver una serie de ecuaciones algebraicas lineales o no lineales simultáneamente para obtener los resultados nodales, tales como los valores de desplazamiento en los diferentes nodos.

### **FASE DE POST PROCESADO.**

7.- Obtener otra información importante. En este punto, se puede estar interesado en los valores de esfuerzos principales para ser comparados con los teóricos.

### **2.5.3 MANUFACTURA ASISTIDA POR COMPUTADORA (CAM).**

CAM (Manufactura Asistida por Computadora). Esta tecnología involucra sistemas de computadora que planifican, administran, y controlan la fabricación las operaciones mediante la interfaz de computadora con los recursos de producción de planta.

Por lo general, los equipos CAM conllevan la eliminación de los errores del operador y la reducción de los costes de mano de obra. En este proyecto, se utilizó el módulo de manufactura NX5, que se describe a continuación.

## **NX5.**

Es un software de manufactura asistida por computadora. Los pasos involucrados para la manufactura de un sólido son los siguientes:

### **MODELADO.**

1. Se realiza el modelado 3D del elemento con las herramientas de NX o desde un programa de modelado y se lo importa a NX:

### **PRE-PROCESADO CAM.**

- Elección del tipo de manufactura que se desea realizar en el elemento.
- Selección del elemento y la materia prima.
- Se crea las herramientas necesarias especificando sus dimensiones para mecanizar el elemento.
- Creación de la operación más adecuada para el mecanizado del elemento, escogiendo los parámetros más adecuados para dicha operación.

### **POST-PROCESADO CAM.**

- Se realiza el pos-procesado de las operaciones, guardo tal archivo con el post-procesador en que se vaya a realizar dicha operación.

## CAPÍTULO 3

### ANÁLISIS DE FALLA EN EL MECANISMO SINFIN CORONA

#### 3.1 INTRODUCCIÓN.

Las principales fallas que surgen en sistemas de engranajes están relacionadas con problemas existentes en los dientes, en el eje, o una combinación de ambos. Las fallas relacionadas con los dientes pueden tener su origen en sobrecargas, desgaste o grietas, mientras que las fallas relacionadas con el eje pueden deberse al desalineamiento o desbalance del mismo.

Como se trató en el capítulo 2, existen diversos métodos y herramientas que son de gran ayuda al realizar un análisis de falla, en este proyecto se realizará los siguientes métodos:

- **Diagrama Causa – Efecto**

Método gráfico que determina las causas de falla en engranajes y el efecto que provocan.

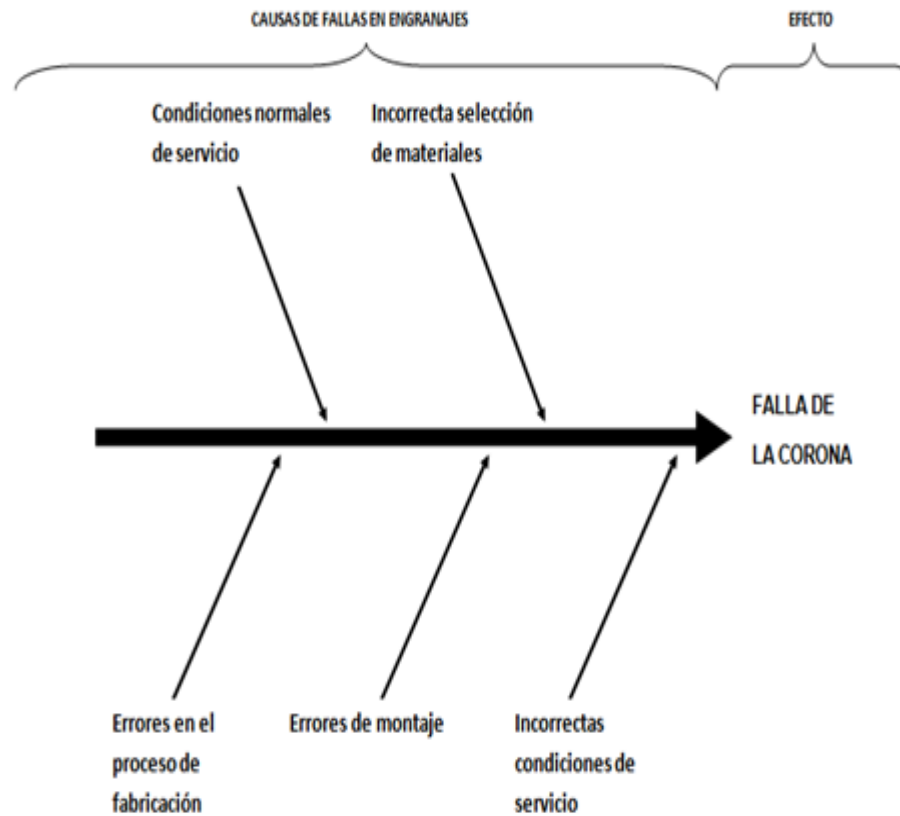
- **Método Colangelo y Heiser.**

Método que permite indagar las causas de falla por medio de: recolección de toda la información existente respecto a la falla, entrevistas con el personal técnico, investigaciones de laboratorio, etc.



### 3.2 DIAGRAMA CAUSA EFECTO.

En la figura 23 se detalla las causas que provocan la falla en los engranes.



**Figura 23.** Diagrama Espina de Pescado.

A continuación, se analiza cada una de las causas presentadas en la figura 23, a fin de determinar cuáles provocan la falla del elemento.

#### 3.2.1 CONDICIONES DE SERVICIO.

Dentro de este grupo de causas puede mencionarse la aplicación de cargas más elevadas que las de diseño (sobrecarga), el sometimiento a elevadas temperatura (más altas que la de diseño), la aplicación de cargas repentinas del choque,

el sometimiento a vibraciones anormales, el uso de aceites de viscosidad insuficiente, el fallo en el suministro de aceites, el funcionamiento a velocidades muy altas o muy bajas, etc.

Las sobrecargas de dientes muy rígidos también pueden conducir a varios tipos de deformaciones plásticas del material en la superficie de los dientes. Se presenta principalmente en los piñones de las ruedas hipoides cementadas y tornillos sinfín de bronce y se caracteriza por líneas o surcos diagonales sobre toda la superficie del diente, aparentando una espina de pescado. Por las características que presenta la superficie dañada del diente, se presume que la falla fue provocada por una sobrecarga repentina o una carga de choque, la misma que es más elevada a la del diseño, originando la deformación plástica en el diente. En la figura 24 se observa la superficie de la corona dañada.



**Figura 24.** Daño en el diente originado por sobrecarga.

### **3.2.2 SELECCIÓN DE MATERIAL.**

La corona fue sometida a un análisis químico de espectrometría de chispa, el cual estableció que está construida de un bronce al aluminio, y a continuación se examina si este material es apto para este tipo de elementos mecánicos.

#### **3.2.2.1 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS.**

Los bronce de aluminio son más valorados debido a su resistencia más alta, a la sollicitación mecánica y a la corrosión con respecto a la de otros bronce. Estas aleaciones son resistentes al deslustre y muestran índices bajos de corrosión en condiciones atmosféricas, proporciones bajas de oxidación a temperaturas altas y reactividad baja con los compuestos de azufre y otros productos de combustión. También son resistentes a la corrosión en agua de mar.

#### **3.2.2.2 APLICACIONES.**

El bronce al aluminio se utiliza en la fabricación de: Coronas, engranajes, tornillos sinfín, ruedas helicoidales, hélices de barcos, cuerpos e impulsores de bombas. Por lo expuesto anteriormente se puede expresar que el material actual de la corona es el adecuado, debido a su alta resistencia mecánica, resistencia a la corrosión.

### 3.2.3 PROCESO DE FABRICACIÓN.

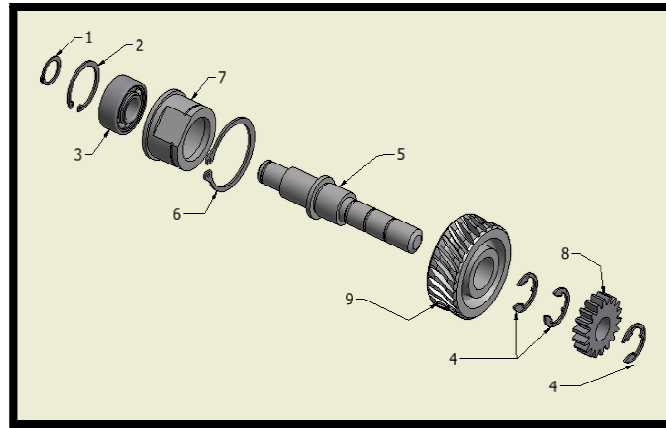
Dependiendo del proceso de fabricación se puede evidenciar la existencia de efectos superficiales, lo cual conduce a pérdidas de material en forma de escamas y lacas, o a una rotura por fatiga del diente. En la figura 25 se observa que la corona no presenta defectos en la superficie, lo que evidencia su alta calidad en su proceso de fabricación.



**Figura 25.** Inexistencia de defectos en la superficie.

### 3.2.4 MONTAJE.

Para comprobar si existen errores en montaje aquí se revisa como se realiza el procedimiento de montaje de la corona.



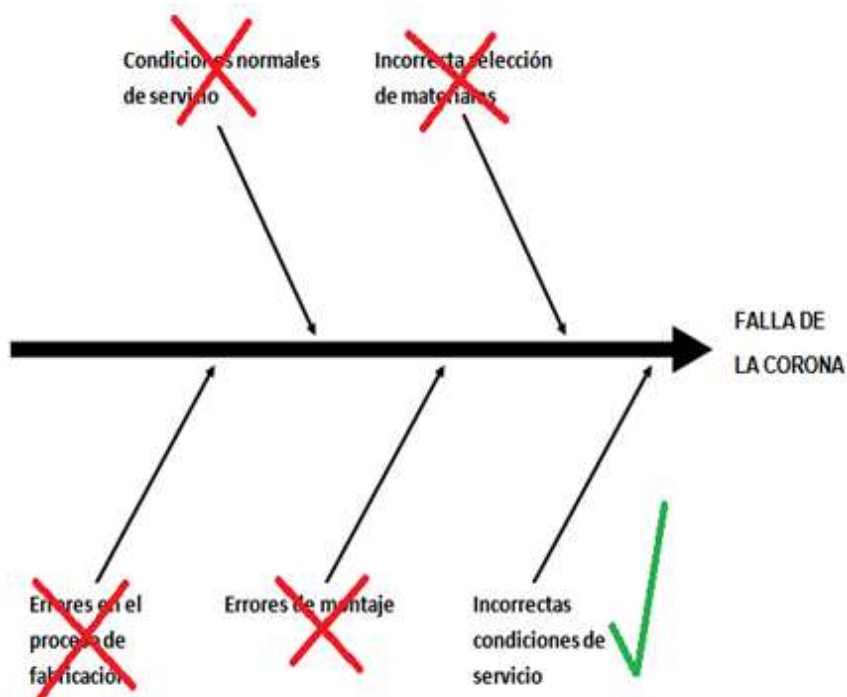
**Figura 26.** Subconjunto del mecanismo transportador de cargadores.

- Insertar el cojinete de bolas inclinado (3) en el casquillo (7) y asegurarlo con el anillo de retención interior (2).
- Introducir el eje (5) en el cojinete de bolas inclinado (3) y asegurarlo con el anillo de retención exterior (1).
- Poner el anillo de retención exterior (6) en el eje (5).
- Insertar en el eje (5) el piñón helicoidal (9) y la rueda dentada (8) y al mismo tiempo, empujar el eje para insertarlo en el casquillo y en la carcasa.
- Asegurar el piñón helicoidal (9) y la rueda dentada (8) con los anillos de fijación “Bencing” (4).

### 3.2.5 RESULTADOS DEL DIAGRAMA CAUSA – EFECTO.

Las posibles causas que provocan la falla como: condiciones normales de servicio, errores de diseño, incorrecta elección de materiales, errores en el proceso de fabricación, errores en el montaje e incorrectas condiciones de servicio, se resuelve que la falla es producida por las “incorrectas condiciones de servicio”, ya que por las características que presenta la superficie dañada del diente, se presume que la falla

fue provocada por una sobrecarga repentina o una carga de choque, la misma que es más elevada a la del diseño, originando la deformación plástica en el diente. En la figura 27, se puede observar los resultados del Diagrama Causa – Efecto.



**Figura 27.** Resultados del diagrama causa – efecto.

### 3.3 METODO COLANGELO Y HEISER.

En este método se presentan otras herramientas para la conducción de un análisis de falla, en adición a las técnicas de la causa raíz, y que son importantes como las siguientes:

#### A. EVIDENCIA DOCUMENTAL

Entrevista al personal técnico

Manuales del cañón

**B. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

Macrografía de superficies de la corona

**C. MEDICIONES**

Dureza del material de la corona

Análisis Químico de la corona por Espectrometría de Chispa

**3.3.1 ENTREVISTA.**

Entrevista dirigida al personal técnico encargado de la operación y mantenimiento del cañón Oerlikon, para registrar el historial y antecedentes de funcionamiento del equipo.

Entrevistadores: Hugo Manzanares, Andrés Paltán.

Experto: Sgto. Alfredo Villegas.

Lugar y Fecha: Quito, jueves 03 de mayo del 2012.

***1. ¿En qué año el Ejército adquirió el cañón Oerlikon de 35 mm y cuánto tiempo llevan en funcionamiento?***

- En el año de 1979, fueron adquiridos a Suiza.
- Están en funcionamiento desde 1980, con 32 años de funcionamiento.

***2. ¿Cuántos cañones Oerlikon posee el Ejército ecuatoriano, y en qué bases se encuentran distribuidos?***

- 24 cañones.
- Están distribuidos en cuatro bases: Salinas, Taura, Cuenca y Riobamba.

**3. *¿Dónde realizan el mantenimiento de estos cañones?***

- En el centro de mantenimiento de material de Guerra “CEMMG”, en Quito.

**4. *¿Cada cuánto tiempo realizan el mantenimiento de estos cañones?***

- Existen cuatro tipos de mantenimiento:

I ESCALÓN. = semanal.

II ESCALÓN. = semestral.

III ESCALÓN. = anual.

IV ESCALÓN = de 10 a 20 años (overhall).

**5. *De qué consta el mantenimiento del Oerlikon de 35 mm?***

- Mantenimiento de la parte mecánica.
- Mantenimiento eléctrico.
- Mantenimiento electrónico.
- Mantenimiento de grupos electrógenos.

**6. *¿El cañón trabaja de forma continua?* No.**

**7. *¿Cuál es ciclo de trabajo de los cañones?***

*(Cuantas veces al año, y tiempo de funcionamiento).*

- En tiros de comprobación y graduación; 4 veces por año, por 12 horas de funcionamiento, por 5 días.



8. *¿Sabe a qué temperaturas o bajo a qué condiciones ambientales operan estos cañones?*

En el Ecuador opera en temperaturas que oscilan entre los 8°C y los 35°C, bajo condiciones normales, ya que solamente funcionan una vez por año.

9. *¿Cree usted que el funcionamiento y operación del cañón es el adecuado? o ¿está sometido a algún tipo de sobre-esfuerzo?*

Por el momento y por razones de falta de repuestos, tanto en la parte eléctrica, como en la mecánica, se ha visto reducido el tiempo de operación al 50%, de lo que era hace unos 16 años.

10. *¿Puede mencionar algún síntoma del problema (falla de la corona de bronce)?*

El bloqueo de la munición en los mecanismos automáticos de carga (Alimentadoras de munición)

11. *¿Luego de ocurrida la falla que indicios o señales presenta el mecanismo sinfín-corona?*

Destrucción de los piñones de engranaje.

Ensanchamiento del perfil concéntrico del eje.

12. *¿Al reemplazar la corona dañada por una nueva, esta volvió a presentar el mismo problema, si esto sucede cuanto tiempo duró la nueva pieza?*

No es predecible el siguiente daño.

**13. Señale con una “X” su respuesta. ¿Del tiempo que usted lleva manipulando estos cañones diga la cantidad de las coronas del MAC que FALLAN?**

	Todas las coronas que he visto fallan
	Algunas coronas fallan
<b>X</b>	Muy pocas coronas fallan
	Ninguna corona falla

**14. ¿Cuál cree usted que podría ser la causa por la que se daña la corona de bronce?**

- Falla en la munición.
- Falla en los cargadores de la munición.
- Falla en la calibración del sistema de retenida. (Corredera).

**15. ¿Actualmente, cuantos repuestos (coronas de bronce), dispone el Ejército en su inventario?**

Ninguno.

**16. ¿Por qué cree usted, que es necesaria la construcción del repuesto del MAC?**

- Porque ya no existe en el Stock de repuestos.
- La construcción de este repuesto en Ecuador abrirá la posibilidad, de recuperar piezas, que se encuentran paradas por la falta de este repuesto.

**17. ¿Este problema (fallo de la corona) se ha generalizado a todos los cañones Oerlikon?**

No, porque de 24 cañones que disponemos en las fuerzas armadas, aproximadamente en 5 se ha producido este tipo de falla.

***18. ¿Tiene conocimiento si el problema se presentó desde su compra o que tiempo después de su adquisición?***

Este tipo de cañones tiene un tiempo aproximado de funcionamiento de 32 años, pero el fallo de la corona ha venido ocurriendo hace 4 años atrás.

### **3.3.2 MACROGRAFÍA.**

La macrografía consiste en un examen visual de una fractura, que ofrece información asociada con la historia de la producción y de la utilización del componente o estructura fallada, con el cual se puede obtener una comprensión general sobre el evento, determinar la secuencia de la ocurrencia de la falla, localizando el o los orígenes de la fractura.

Según el método propuesto por el IAS (Instituto Argentino de Siderurgia) en el documento Análisis de Falla de Materiales, propone 3 pasos para un Análisis Visual por Macrografía, los cuales son Reconstrucción, Superficies de Fractura y Análisis, dicho método se utilizó para realizar la macrografía en la corona.

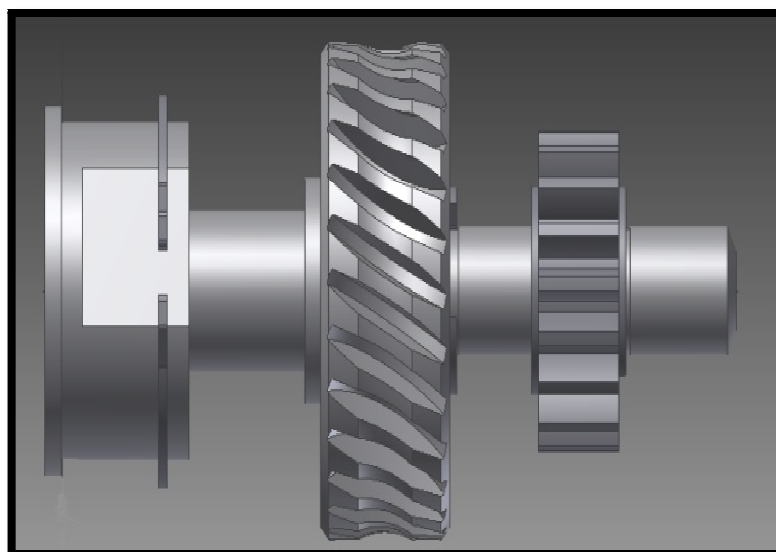
### 3.3.2.1 RECONSTRUCCIÓN.

En este paso se respalda de fotografías para reconstruir el mecanismo completo hasta llegar al conjunto o pieza que falla. En la figura 28 se muestra una vista general del MAC. Detallando el mecanismo sinfín corona.



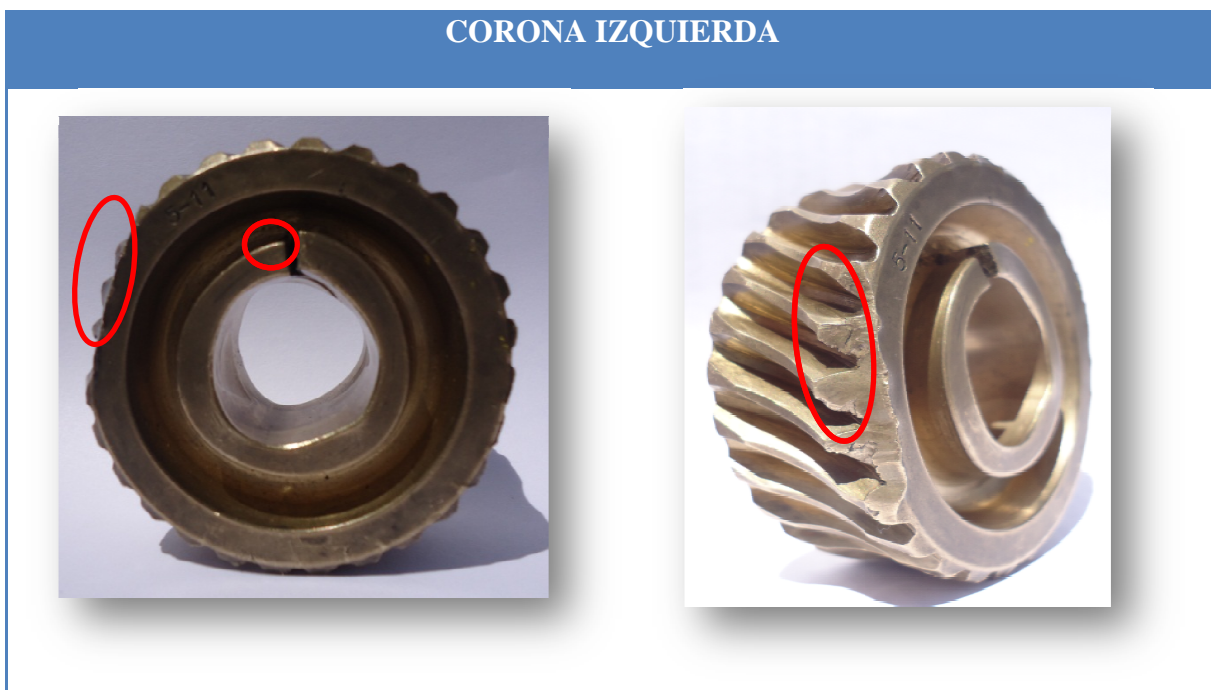
**Figura 28.** Vista lateral del MAC.

En la figura 29 se muestra el mecanismo sinfín corona:



**Figura 29.** Eje donde se encuentra alojada la corona.

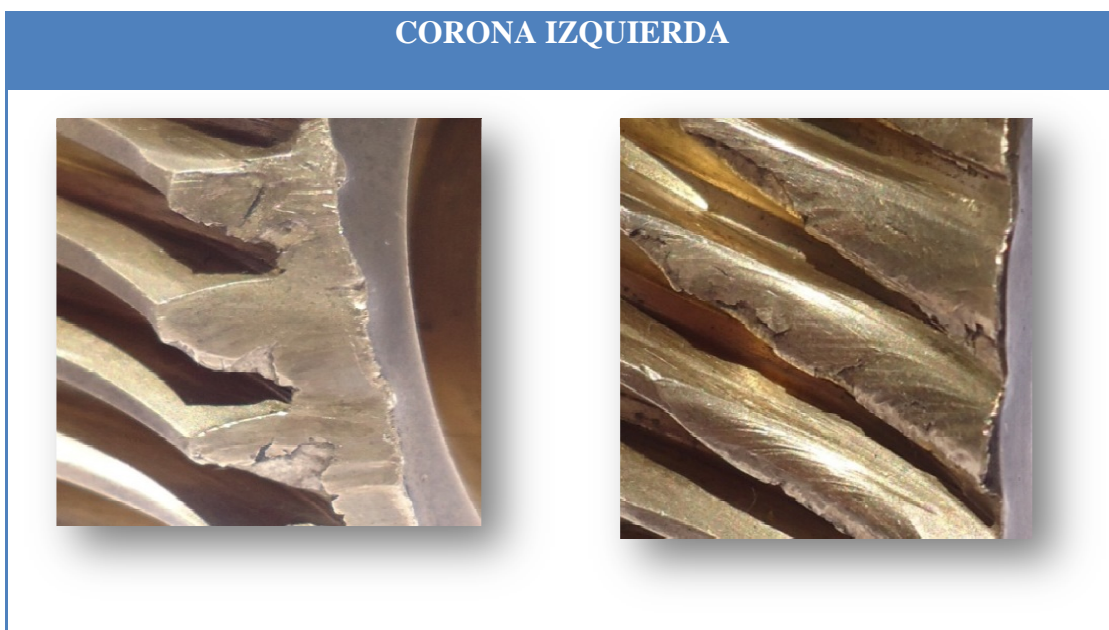
En la figura 30 se muestra en diferentes ángulos las fallas que presentan la corona:



**Figura 30.** Fallas presentes en la corona.

### 3.3.2.2 SUPERFICIES DE FALLA.

En este paso se indica a detalle las superficies donde se presenta la falla. En la figura 31 se muestran las superficies del estado de falla de la Corona de Bronce.



**Figura 31.** Superficies de falla en la corona.

### 3.3.3 MEDICIONES DE DUREZA.

La dureza es la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como la penetración, la abrasión, el rayado, la cortadura, las deformaciones permanentes; entre otras. El objetivo de este ensayo es determinar la dureza de la corona de bronce, para esto se realizó el ensayo de dureza ROCKWELL HRb, con un durómetro electrónico, en 8 puntos del elemento, como se indica en la figura 32 y con los siguientes parámetros de entrada (Ver informe completo en el Anexo A.2).

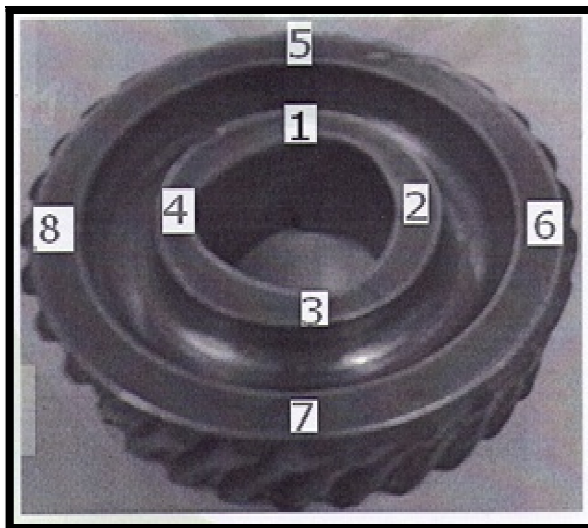


Figura 32. Puntos de análisis de dureza en la corona

Carga:	100 kg.
Precarga:	3 kg.
Penetrador:	de bola de 1/16".
Escala:	B.

Se obtuvo los siguientes datos que se indican en la tabla 4.

<b>IDENTACIONES DE DUREZA ROCKWELL (HRb)</b>	
<b>1</b>	85,3
<b>2</b>	85,5
<b>3</b>	87,2
<b>4</b>	88,5
<b>5</b>	88,6
<b>6</b>	84,7
<b>7</b>	85,6
<b>8</b>	86,4
<b>promedio</b>	86,5

**Tabla 4.** Datos de dureza.

Dureza promedio en la corona:

86,5 HRb (Dureza Rockwell b).                      165,5 HB (Dureza Brinell).

También se obtuvo la dureza del sinfín, pero en el presente proyecto no se presenta un informe de este examen por petición del ejército. Donde se determinó la dureza del sinfín de:

28 HRc (Dureza Rockwell c).                      271 HB (Dureza Brinell).

Por la dureza y por las aplicaciones de este material se asume que se trata de un acero bonificado AISI 4340.

### 3.3.4 ANÁLISIS QUÍMICO POR ESPECTROMETRÍA.

Este método consiste en detectar las longitudes de onda característica de cada elemento cuando sus electrones son excitados mediante una chispa, además este tipo de análisis permite determinar los elementos presentes en una muestra así como el porcentaje de cada uno de ellos. En la tabla 5 se muestran los resultados del análisis.

(Ver informe completo en el Anexo A.1.)

METALES	ALEACIONES
	%
Cobre (Cu)	86,51
Aluminio (Al)	8,409
Hierro (Fe)	3,825
Nique (Ni)	0,115
Plomo (Pb)	0,014
Estaño (Sn)	0,010
Zinc (Zn)	0,016
Manganeso (Mn)	0,835
Silicio (Si)	0,079
Magnesio (Mg)	<0,003
Cromo (Cr)	0,011
Antimonio (Sb)	0,014
Fosforo (P)	<0,002

**Tabla 5.** Composición Química de la Corona de Bronce.



A continuación en la tabla 6 se procede a comparar los resultados del análisis químico, con la norma DIN 1714 Fe-Al Bz (Anexo A.4) que es la norma Alemana que posiblemente usaron para su construcción por ser de mayor jerarquía en Europa y la norma BS 1400 AB2 por ser la norma del material disponible a la venta en Ecuador (Anexo A.5 Y A.6). Al mismo tiempo se observa que el material de fabricación BS 1400 AB 2, es el adecuado para la construcción de la corona ya que los porcentajes de los elementos de aleación son similares a los porcentajes del material de origen, con la excepción del porcentaje de níquel con un 4%-5% mismo que mejora sus propiedades mecánicas (resistencia a la tracción y a la fatiga), aumenta la dureza y resistencia al desgaste, así como también mejora la resistencia a la corrosión y buen comportamiento en trabajos de velocidad a altas temperaturas.

<b>COMPOSICIÓN QUÍMICA</b>			
<b>METALES</b>	<b>MATERIAL DE ORIGEN</b>	<b>NORMA DIN</b>	<b>MATERIAL DE FABRICACIÓN</b>
	-	<b>DIN 1714 Fe-Al Bz</b>	<b>BS 1400 AB2</b>
Cobre (Cu)	86,510%	83 - 89%	79% MIN
Aluminio (Al)	8,409%	8,7% - 10,5%	8,5% - 9,5%
Hierro (Fe)	3,825%	1,5% - 3,3%	3,5% - 4,5%
Níquel (Ni)	0,115%	<1,5%	4% - 5%
Plomo (Pb)	0,014%	<0,03%	0,05 MAX
Estaño (Sn)	0,010%	<0,20	0,10 MAX
Zinc (Zn)	0,016%	<0,50	0,50 MAX

**Continúa**

Manganeso (Mn)	<b>0,835%</b>	<b>&lt;1%</b>	<b>0,8 – 1,50%</b>
Silicio (Si)	0,079%	<0,15%	-
Magnesio (Mg)	<0,003%	-	-
Cromo (Cr)	0,011%	-	-
Antimonio (Sb)	0,014%	-	-
Fosforo (P)	<0,002%	-	-
<b>DUREZA</b>	165,5 HB	MIN 100 HB*	150-170 HB**

**Tabla 6.** Composición química de los bronce.

Además se comparan las durezas de estas normas con la dureza promedio de la corona. (Anexo A.4\*, Anexo A.6 \*\*). A fin de apreciar la semejanza entre los materiales expuestos.

### 3.3.5 DOCUMENTOS TÉCNICOS.

El Centro de Mantenimiento de Material de Guerra del Ejército permitió el acceso a los manuales de cañón a fin de obtener información más detallada sobre el funcionamiento del cañón, misma que nos permita detectar el origen de la falla de la corona. Obteniendo los siguientes resultados:

“Si el sistema transportador de MAC, quedara atascado por cualquier motivo hay que destensar el motor de muelles accionando con una llave de tuercas, especial para el desembrague”. Fotografías de los manuales ver Anexo A.3.

### 3.3.6 SIMULACIÓN EN CONDICIONES DE FALLA.

Para complementar el estudio de la falla, se realizó el análisis de esfuerzos en la corona de bronce (DIN 1714 Fe-Al Bz), mismo que simula el comportamiento físico de la corona en el momento de la falla, y permite determinar los valores de esfuerzos que se generan en ese momento. La simulación se realizó en el módulo AUTODESK INVENTOR 2013. Los parámetros de entrada para realizar la simulación son los siguientes:

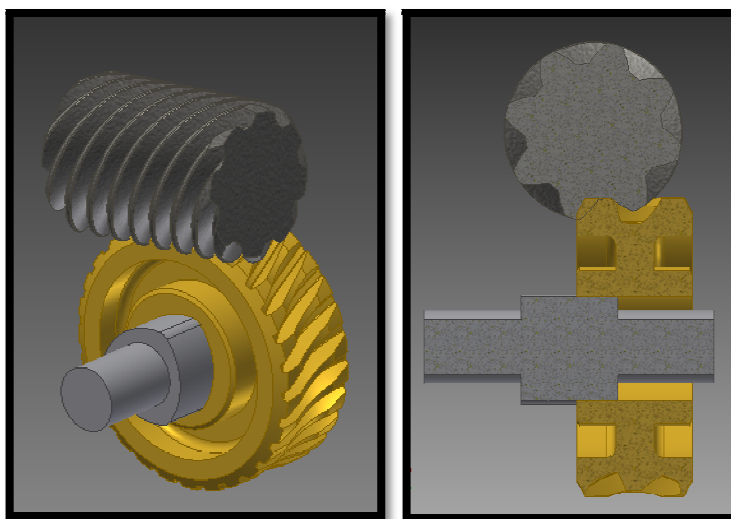
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
TIPO DE ANÁLISIS	Estático
CUERPO	Sinfín, Corona
MATERIAL	Bronce al aluminio (corona) Acero templado (sinfín)
TORQUE MÁXIMO (SINFÍN)	5084 N.mm-45 lbf.plg (Anexo B.3)
ESFUERZO ÚLTIMO	500 MPa (Anexo A.4)
DESPLAZAMIENTO DEL EJE DE LA CORONA	8,5 mm (Anexo A.16)
DENSIDAD	7.6 E-6 kg/mm <sup>3</sup> (Anexo A.7)
MÓDULO DE ELASTICIDAD	110 000 MPa (Anexo A.7)
COEFICIENTE DE POISSON	0.36 (Anexo A.9)

**Tabla 7.** Parámetros iniciales para simulación en Inventor Autodesk

### 3.3.6.1 FASE DE PRE PROCESADO.

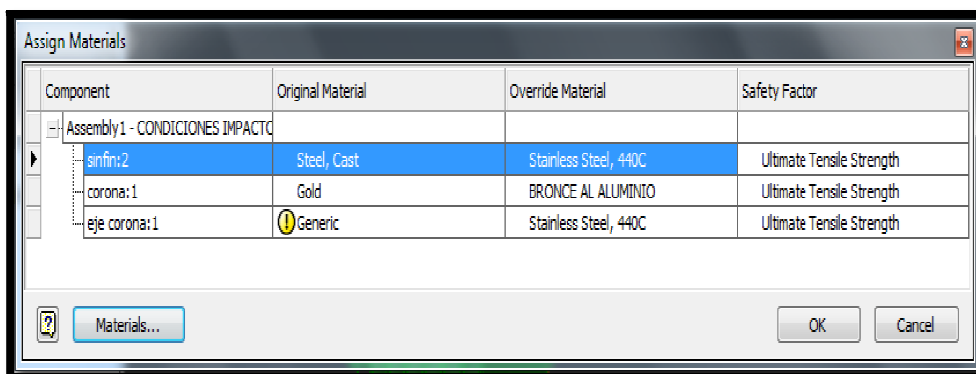
La fase de pre procesado está dividida en los siguientes pasos:

1. Para realizar la simulación se dibuja en Inventor, el mecanismo sinfín corona en 3D, con las dimensiones reales, estando el sinfín desplazado 8.5 mm del eje de la corona, tal como se evidencia en la falla (Anexo A.16).



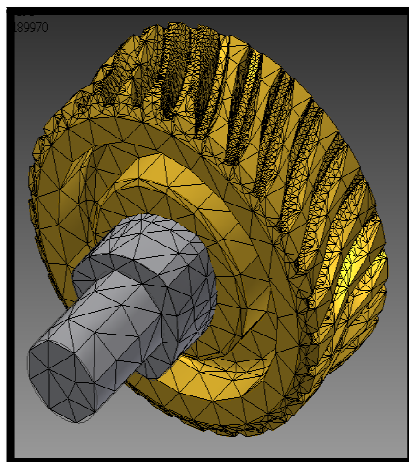
**Figura 33.** Mecanismo sinfín corona en 3D.

2. Luego se define las propiedades del bronce al aluminio, tal como se indica en la figura 34



**Figura 34.** Asignación de material al sinfín y corona.

3. Por último se realizó el mallado del sólido y se refinó el contorno del diente donde el sinfín transmite la carga a la corona, como se observa en la figura 35

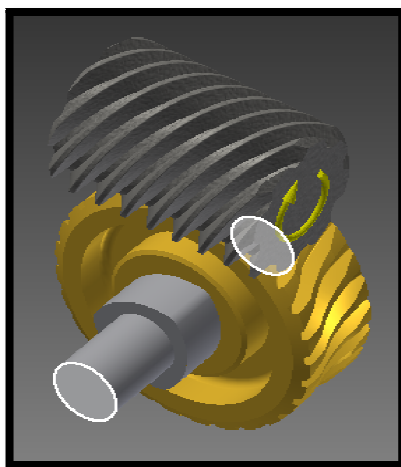


**Figura 35.** Mallado y refinado de la corona.

### 3.3.6.2 FASE DE SOLUCIÓN.

La fase de solución está dividida en los siguientes pasos:

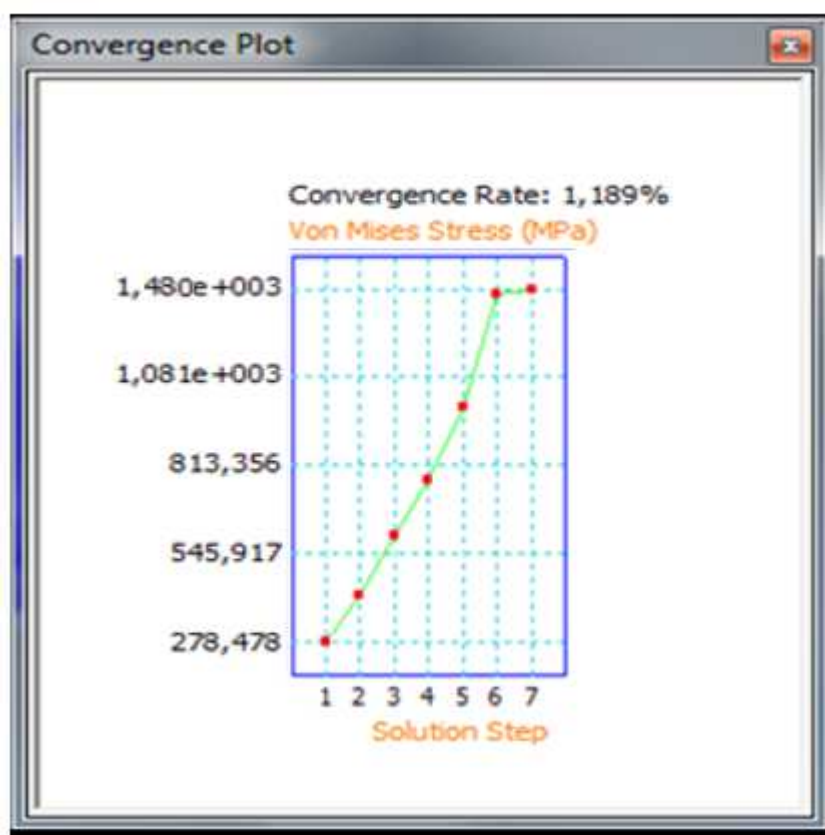
1. En la fase de solución se define el análisis como estático y se restringe el movimiento de la corona en el eje de la corona tal como si este se bloqueara, luego, se aplica el torque en el sinfín al momento del impacto (5084 N.mm), tal como se indica en la figura 36.



**Figura 36.** Restricción del movimiento de la corona.

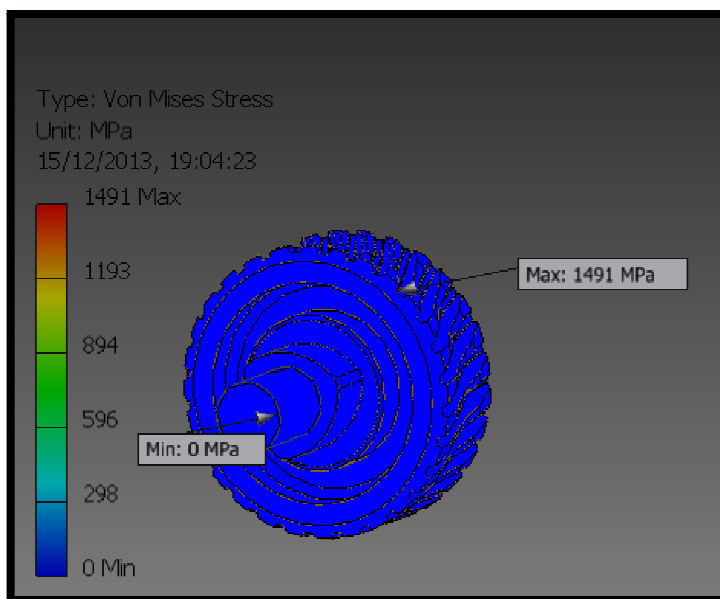
### 3.3.6.3 FASE DE POST PROCESADO.

1. Para obtener la convergencia de los resultados, se realizó el mallado de la corona, incrementando el refinado en el área del diente y en la leva interna, donde existe contacto la corona y el eje respectivamente; hasta obtener un esfuerzo de Von Mises constante tal como se indica en la figura 37.



**Figura 37.** Gráfica de convergencia del modelo.

2. En la fase de solución se imprime los esfuerzos máximos de Von Mises y el esfuerzo de seguridad que soporta el diente de la corona.



**Figura 38.** Esfuerzos máximos de Von Mises.

3. En la tabla 8 se resume el esfuerzo y factor de seguridad calculados por el método CAE.

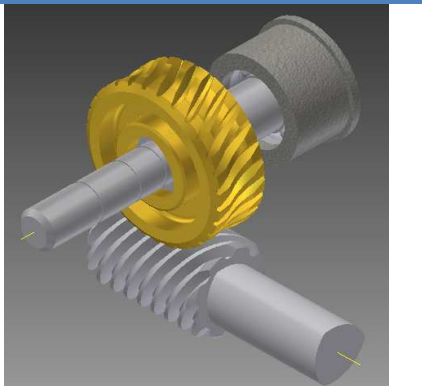
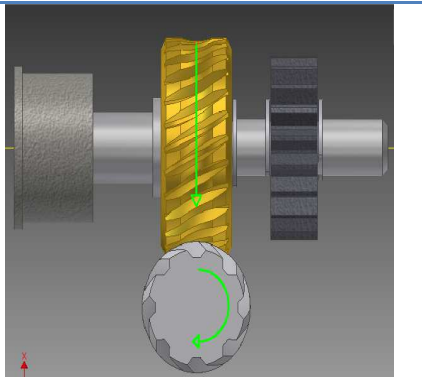
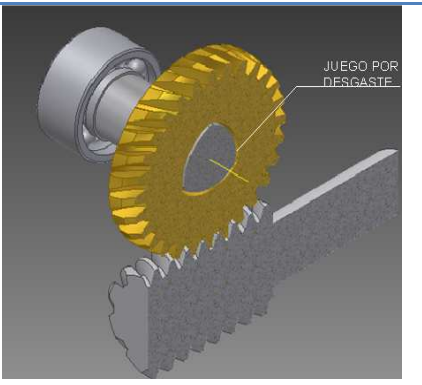
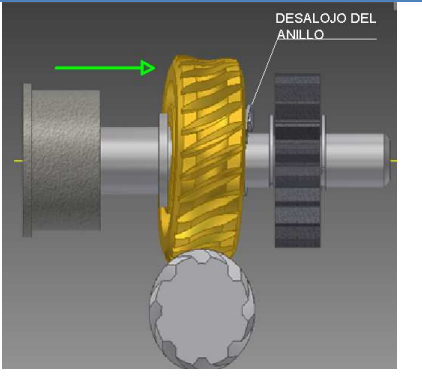
RESULTADO MÉTODO CAE		
MÉTODO	ESFUERZO MÁXIMO	ESFUERZO ÚLTIMO
	VON MISES (MPa)	(MPa)
CAE	1491	500

**Tabla 8.** Simulación en condiciones de impacto.

Se concluye que la corona falla, debido a que el esfuerzo de Von Misses obtenido sobrepasa al esfuerzo último del bronce al aluminio.

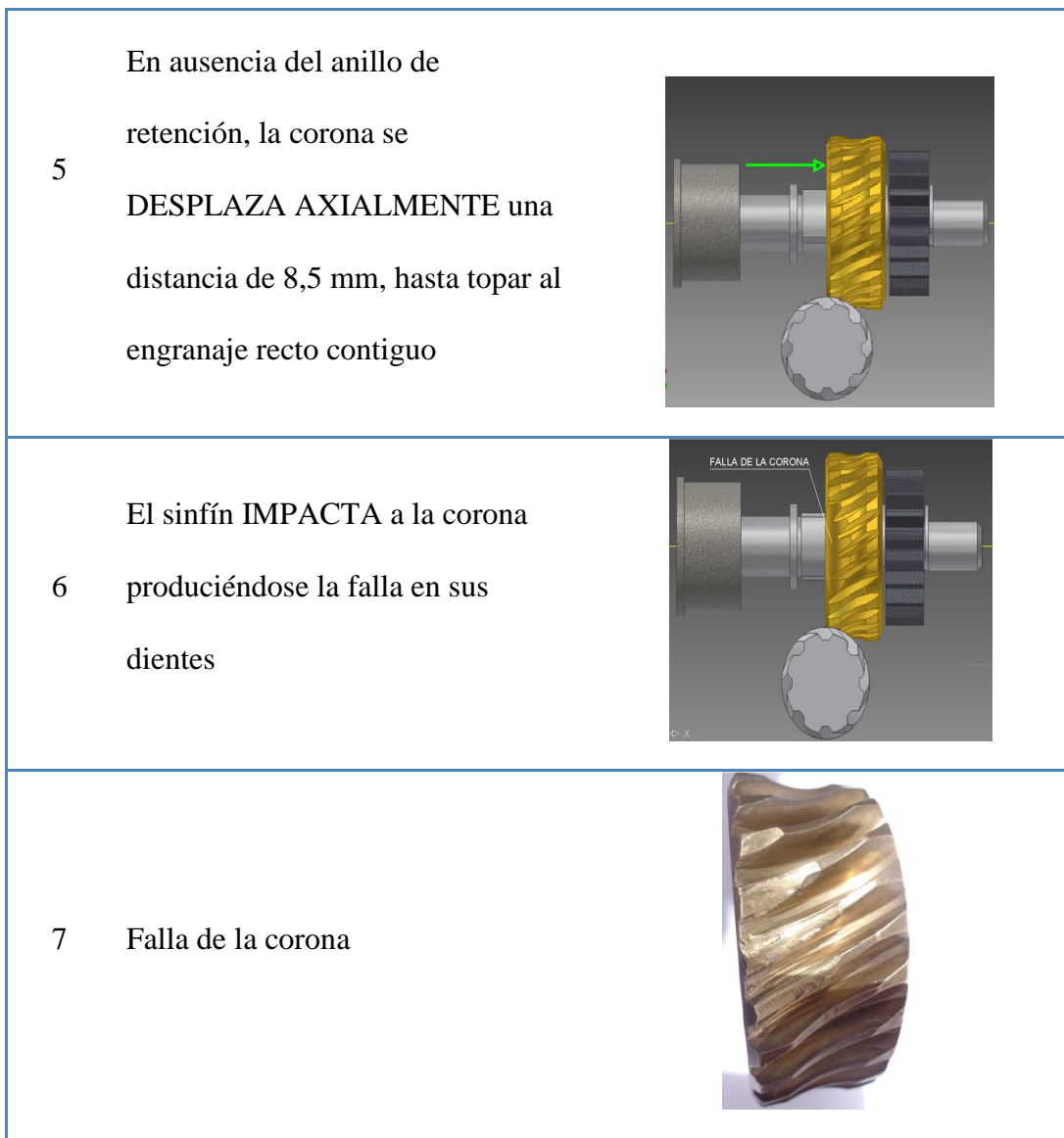
### 3.4 DESCRIPCIÓN DE LA POSIBLE FALLA.

En la figura 39 se indica mediante un diagrama la secuencia de falla de la corona.

NO.	DESCRIPCIÓN	ILUSTRACIÓN
1	<p>El tornillo sinfín, recibe el torque del motor de muelles, mismo que transmite el movimiento a la corona.</p>	
2	<p>El funcionamiento intermitente del motor de muelles hace que la corona, CHOQUE contra su eje.</p>	
3	<p>Este choque repetitivo, deriva en el DESGASTE INTERNO de la corona, provocando un JUEGO muy amplio entre el agujero y el eje.</p>	
4	<p>Por el juego existente, la corona trabaja desbalanceada y la fuerza axial de la misma supera la resistencia del anillo, sacándolo de su alojamiento</p>	

Continúa





**Figura 39.** Secuencia de la falla.

### 3.5 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE FALLA.

#### ENTREVISTA

- El ciclo de trabajo del cañón es: 4 veces al año, por veinte minutos de funcionamiento.
- El cañón no trabaja en forma continua.
- La falla se podría dar por las siguientes causas.
  - Falla en la munición.

- Falla en los cargadores de la munición
- Falla en la calibración del sistema del MAC.

## **CONCLUSIÓN**

Los ciclos de trabajo del cañón son muy cortos, en la actualidad se usa solo en tiros de comprobación y graduación, por tanto el desgaste de los dientes es mínimo.

## **MACROGRAFÍA**

- La corona presenta aplastamiento en sus dientes.
- Existencia de corte o cizallamiento de los dientes.
- Fractura en el perfil concéntrico.

## **CONCLUSIÓN**

La macrografía muestra que los dientes de la corona presentan aplastamiento y corte, característica de las “fallas por impacto”, mismas que son ocasionadas por una carga de choque repentina, por lo tanto se presume que el fallo es consecuencia del choque del sinfín contra la corona.

## EXAMEN DE DUREZA

DUREZA DE LA CORONA:

86,5 HRb (Dureza rockwell b).

165,5 HB (Dureza brinell).

Valores que confirman que se trata de un bronce al aluminio BS 1400 AB-2

DUREZA DEL SINFIN:

28 HRC (Dureza rockwell c).

271 HB (Dureza brinell).

## CONCLUSIÓN

La dureza del sinfín es 271 HB, mientras que la dureza de la corona es 165,5 HB, por tanto si el mecanismo sinfín corona se bloquea o se desalinea la corona falla, por ser el elemento más débil.

## ANÁLISIS QUÍMICO

Entre los principales componentes de la corona, destacan principalmente los siguientes elementos:

Cu = 86,510 %

Al = 8,409 %

Fe = 3,825 %

## CONCLUSIÓN

El porcentaje de los elementos químicos presentes en la corona, como el cobre (Cu), aluminio (Al) y hierro (Fe), determina que se trata de un Bronce al aluminio, material recomendado en este tipo de elementos para reducir el rozamiento, cuando funciona en conjunto con el sinfín que es de un material más duro.

## SIMULACIÓN EN CONDICIONES DE IMPACTO

$\sigma_{\text{MAX VON MISES}}$ : 1491 MPa (En los dientes de la corona)

## CONCLUSIÓN

Como el esfuerzo máximo de Von Mises (1491 MPa) es mucho mayor al esfuerzo último (500 MPa) en la parte superior de los dientes de la corona, se produce la rotura de los mismos. Análisis que corrobora la falla que presentan las coronas debido al choque que ejerce el sinfín.

Pese a los 30 años de funcionamiento del Cañón Oerlikon, se puede observar que el diente de la corona no presenta picadura superficial, motivo por el cual no se considera el verificar diseño por fatiga.

## **EVIDENCIA DOCUMENTAL**

Los manuales del Oerlikon son la evidencia documental, que permitió conocer más detalladamente a todos los mecanismos y elementos que forman parte del Mecanismo Automático de Carga (MAC)

- Descripción de todos los elementos y piezas que conforman los mecanismos del MAC.
- Explicación del funcionamiento de los mecanismos del MAC, así como recomendaciones para su buen manejo.
- Fotografías del montaje y desmontaje de los mecanismos del MAC.

## **CONCLUSIÓN**

Los manuales del Oerlikon son la evidencia documental, que permitió conocer más detalladamente los elementos del Mecanismo Automático de Carga (MAC), así como conocer el funcionamiento de cada uno de sus mecanismos internos.

## **CAPÍTULO 4**

### **CÁLCULOS**

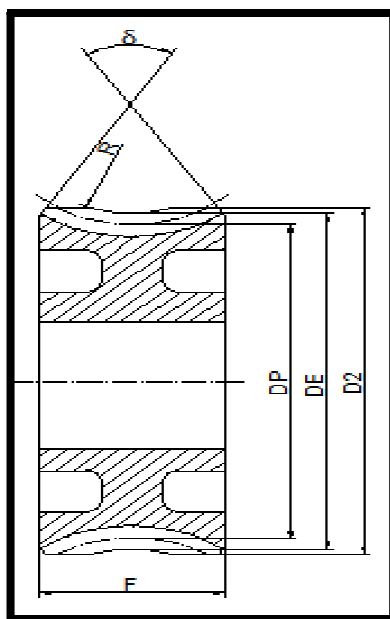
#### **4.1 INTRODUCCIÓN.**

Este capítulo tiene como objetivo obtener la geometría del sinfín corona, posteriormente se realiza el análisis cinemático del mecanismo transportador de cargadores obteniendo así las fuerzas en el mecanismo sinfín corona, y por último se realiza el análisis de esfuerzos en el diente de la corona por el método CAE, previo modelado 3D de la corona y por el método AGMA, con el fin de determinar el factor de seguridad de la corona en condiciones normales de operación.

#### **4.2 GEOMETRÍA DE LA CORONA.**

El diseño de la corona está relacionado directamente con el diseño del sinfín, por tal motivo los cálculos de este par de elementos son complementarios, ya que estos elementos funcionan en conjunto. En el Anexo B.1 se indica detalladamente los cálculos geométricos del sinfín y la corona.

#### 4.2.1 CORONA.



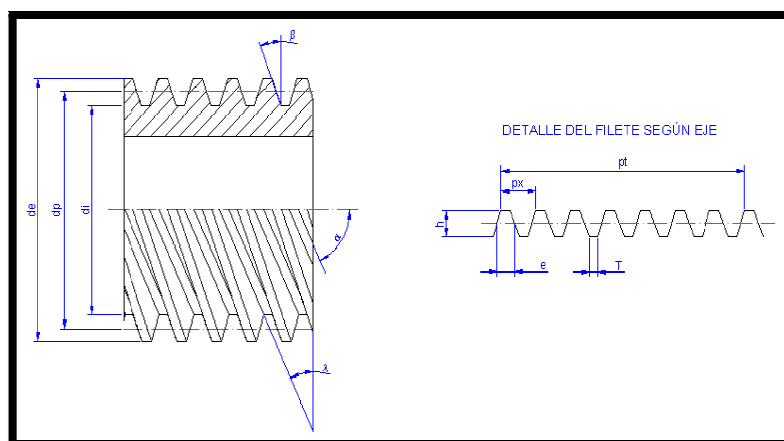
**Figura 40.** Geometría de la corona.

En la tabla 9 se resume los parámetros de la geometría de la corona. Símbolo

PARÁMETRO	SÍMBOLO	RESULTADOS
Paso circular	pc	6.283 mm
Paso normal	pn	5.654 mm
Número de dientes	N	28
Módulo	M	2 mm
Diámetro mayor sobre aristas	D2	62
Diámetro exterior	DE	60 mm
Diámetro primitivo	Dp	56 mm
Altura del diente	h	4.4 mm
Ángulo de la hélice	$\alpha$	26 °
Ángulo de presión normal	$\phi_n$	20 °
Concavidad periférica	R	14.5 mm
Distancia entre centros	c	44.5 mm

**Tabla 9.** Geometría de la corona.

#### 4.2.2 SINFÍN.



**Figura 41.** Geometría del sinfín.

En la tabla 10 se resume los principales parámetros de la geometría del sinfín.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	RESULTADOS
Paso axial	px	6.283 mm
Paso normal	pn	5.654 mm
Número de dientes	n	8
Módulo	M	2 mm
Diámetro exterior	de	37 mm
Diámetro primitivo	dp	33 mm
Diámetro al fondo del hilo	di	28.2 mm
Altura del diente	h	4.4 mm
Ángulo de inclinación de la hélice	$\alpha$	64°
Ángulo de avance	$\lambda$	26°
Ángulo de presión normal	$\phi_n$	20°
Desplazamiento del sinfín	pt	50 mm
Espesor del filete	e	3.142 mm
Ancho en el fondo del filete	T	1.45 mm
Distancia entre centros	c	44.5 mm

**Tabla 10.** Geometría del sinfín.



En el Anexo C.3 y C.4 se indica los planos del sinfín y la corona con sus respectivas acotaciones y tolerancias.

### 4.3 MATERIAL DE LA CORONA.

Después de realizar el análisis químico, se determinó que el material del que está construida la corona es: un Bronce al Aluminio DIN 1714 Al-Fe-Bz en norma Alemana y BS 1400 AB2, en estándar Británico, las cuales, son norma internacionales con las que se le conoce a este tipo de bronce al aluminio.

El estándar disponible en Ecuador es BS 1400 AB2 en la distribuidora de materiales IVÁN BOHMAN, a continuación se muestra las características de este material tomado del estándar británico BS 1400 AB2. (Ver Anexo A.6, A.7 y A.8)

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS					
ESFUERZO FLUENCIA [MPa]	RESISTENCIA TRACCIÓN [MPa]	RESISTENCIA FATIGA [MPa]	ELONGACIÓN [%]	DUREZA [HB]	MÓDULO ELÁSTICO [MPa]
240 - 260	590 - 655	220	18 - 25	150-170	110 000

**Tabla 11.** Características mecánicas del Bronce al Aluminio.

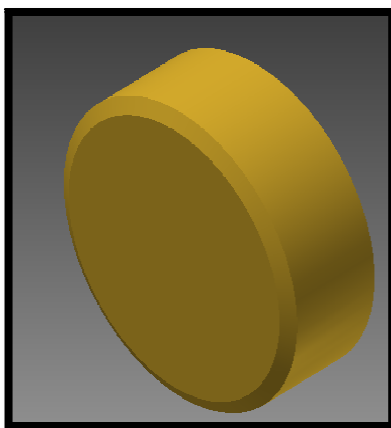
PROPIEDADES FÍSICAS			
DENSIDAD [Kg/m3]	CALOR ESPECÍFICO [I/G.K]	EXPANSIÓN TÉRMICA [10-6K]	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA [m/(Ohm.mm2)]
7600	0,418	17 a 19	4 a 6

**Tabla 12.** Propiedades mecánicas del Bronce al Aluminio.

#### 4.4 MODELADO 3D DE LA CORONA.

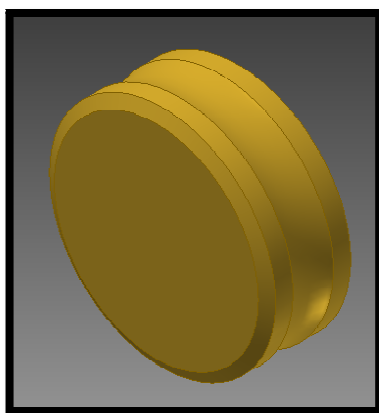
Las dimensiones de la corona en el modelado son las mismas que la corona real y se pueden encontrar en el Anexo C.4. Para el modelado de la corona se utilizó el módulo de diseño Autodesk Inventor 2013, que se indica en los siguientes pasos:

1. En un nuevo archivo de Inventor, se dibuja un círculo de diámetro 60 mm y se extruye a 25 mm, tal como se indica en la figura 42.



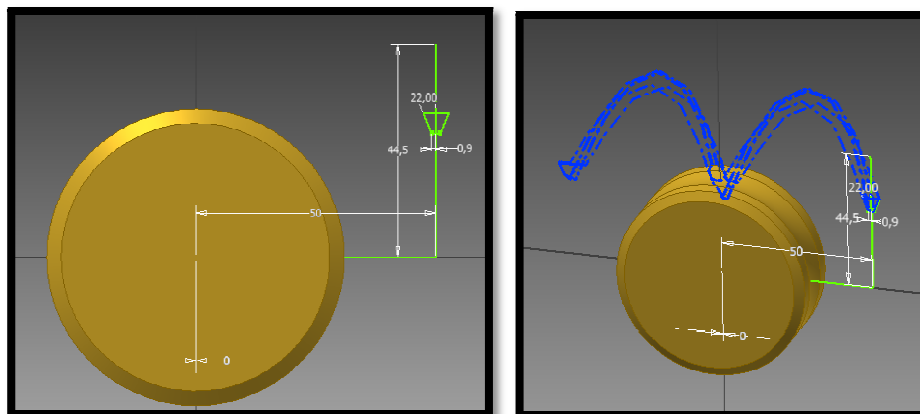
**Figura 42.** Geometría del sólido.

2. Se realiza un barrido y chaflanado de 3mm (Anexo C.4) en el elemento, tal como se indica en la figura 43.



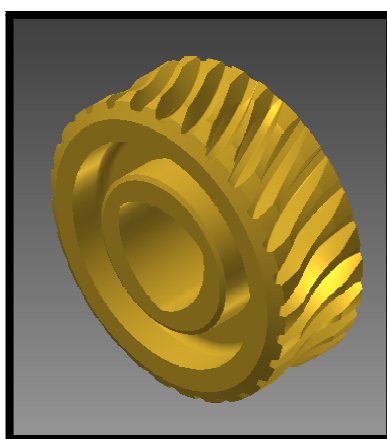
**Figura 43.** Barrido de corte en la corona.

3. En un nuevo plano se genera la involuta del diente de la corona, se dibuja una espiral de las mismas dimensiones del paso total del sinfín, manteniendo la distancia entre centros tal como si estuviera engranando con la corona, luego se selecciona el perfil del diente con la trayectoria espiral y mediante la operación barrido se genera el primer diente en la corona, tal como se indica en la figura 44



**Figura 44.** Involuta del diente.

4. Por último mediante la operación matriz se genera los 28 dientes en la corona, luego se genera la leva interna y las ranuras laterales en la corona y se obtiene un modelado 3D de la corona, tal como se observa en la figura 45



**Figura 45.** Modelado 3D de la corona.

#### 4.5 CÁLCULO DE TENSIÓN POR ESFUERZO DE FLEXIÓN.

Para validar que la nueva corona, construida de bronce al aluminio BS 1400 AB2 soporta los esfuerzos de trabajo generados en condiciones normales de funcionamiento, se realiza el cálculo de los esfuerzos que se generan en los dientes de la corona.

En la tabla 13 se resume las fuerzas que actúan en los dientes del mecanismo sinfín corona, en el Anexo B.3 se indica detalladamente el cálculo de fuerzas de dicho mecanismo.

FUERZA	TANGENCIAL (N)	RADIAL (N)	AXIAL (N)
Corona	1 192	448.57	681.85
Sinfín	681.85	448.57	1 192

**Tabla 13.** Resumen de fuerzas en el mecanismo sinfín corona.

A continuación se indica el esfuerzo máximo que soportan los dientes de la corona por el método AGMA, en el Anexo A.8 se indica la resistencia a la fluencia y en el Anexo B.4 se indica detalladamente el cálculo de dicho esfuerzo.

RESULTADO MÉTODO AGMA			
Método	Esfuerzo Máximo [MPa]	Resistencia a la Fluencia [MPa]	Factor de seguridad
AGMA	62,446	240	3.843

**Tabla 14.** Resultados del método AGMA.

#### 4.6 SIMULACIÓN DE ESFUERZOS EN LA CORONA.

Para la simulación de esfuerzos en los dientes de la nueva corona (Bronce al Aluminio BS 1400 AB 2) se utilizó el módulo AUTODESK INVENTOR 2013. Los parámetros de entrada para realizar la simulación en condiciones normales son los siguientes:

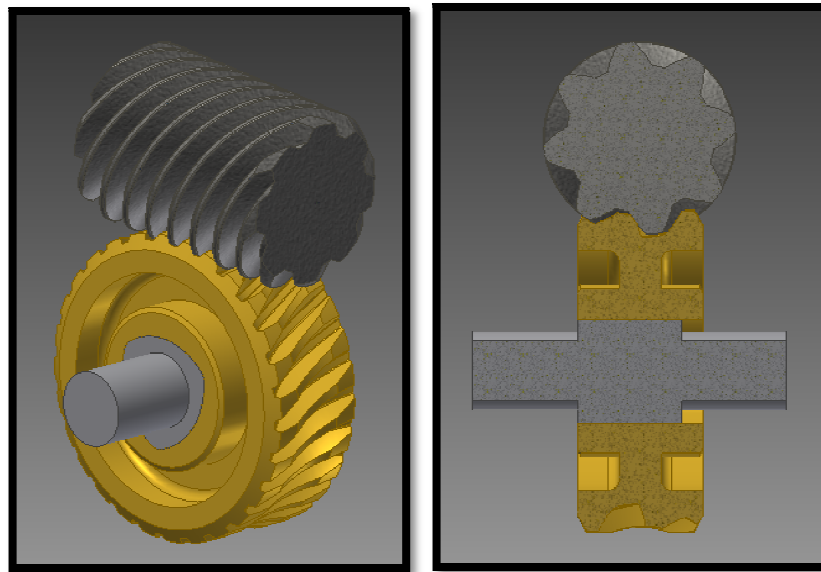
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
TIPO DE ANÁLISIS	Estático
CUERPO	Corona
MATERIAL	Bronce al aluminio Acero templado (sinfín)
TORQUE MÁXIMO (SINFÍN)	5084 N.mm - 45 lbf.plg (Anexo B.3)
RESISTENCIA A LA FLUENCIA	240 MPa (Anexo A.6)
DENSIDAD	7.6 E-6 kg/mm <sup>3</sup> (Anexo A.7)
MÓDULO DE ELASTICIDAD	110 000 MPa (Anexo A.7)
COEFICIENTE DE POISSON	0.36 (Anexo A.9)

**Tabla 15.** Parámetros iniciales para simulación en Inventor Autodesk

#### 4.6.1 FASE DE PRE PROCESADO.

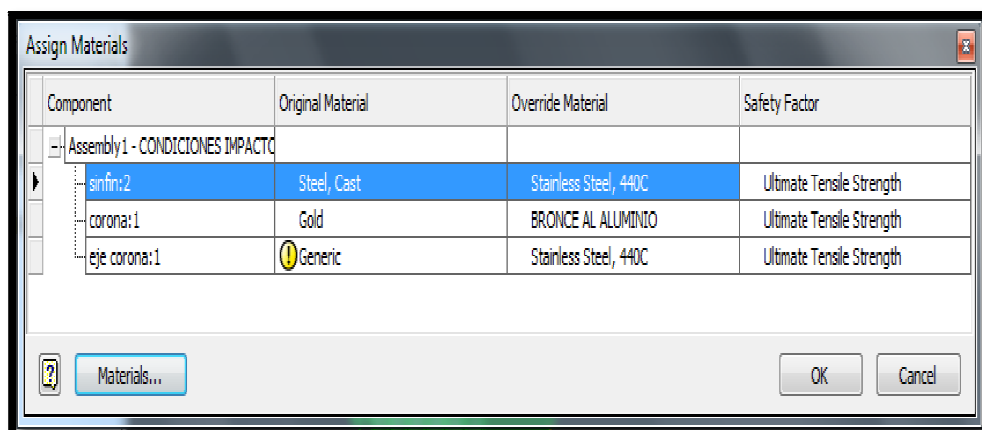
La fase de pre procesado está dividida en los siguientes pasos:

1. Para realizar la simulación se dibuja en Inventor, el mecanismo sinfín corona en 3D, con las dimensiones reales (Anexo B1).



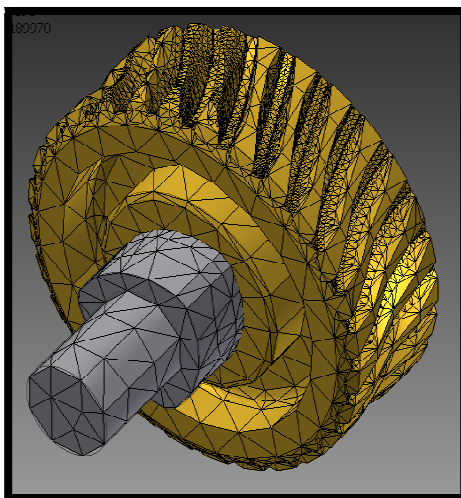
**Figura 46.** Diente de la corona particionado.

2. Luego se define las propiedades del bronce al aluminio, tal como se indica en la figura 47



**Figura 47.** Asignación de material al sinfín y corona.

3. Por último se realizó el mallado del sólido y se refinó el contorno del diente donde el sinfín transmite la carga a la corona, como se observa en la figura 48.

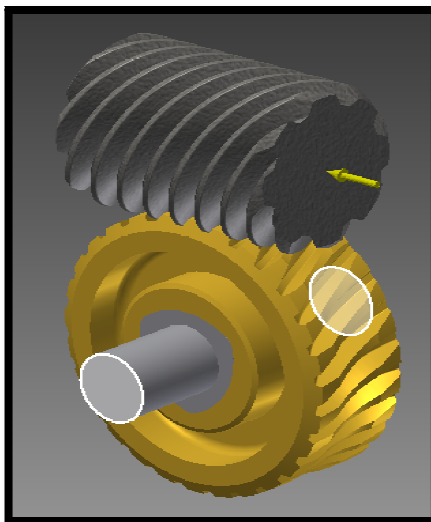


**Figura 48.** Mallado y refinado de la corona.

#### 4.6.2 FASE DE SOLUCIÓN.

La fase de solución está dividida en los siguientes pasos:

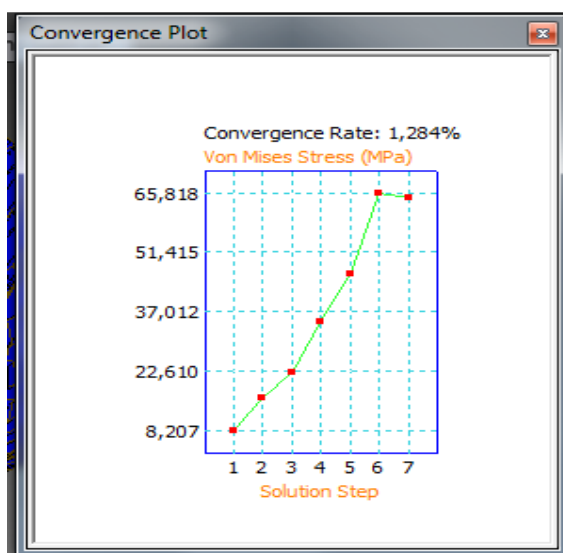
1. En la fase de solución se define el análisis como estático y se restringe el movimiento de la corona en el eje de la corona, luego, se aplica la fuerza tangencial en un extremo del sinfín, tal como se indica en la figura 49.



**Figura 49.** Restricción del movimiento de la corona.

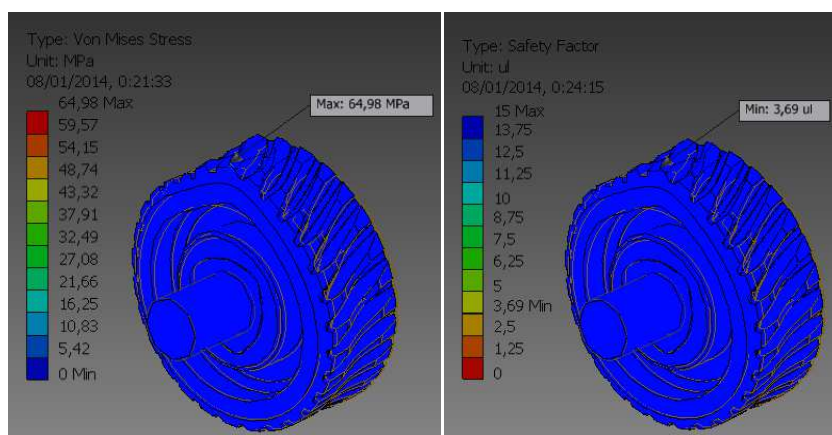
### 4.6.3 FASE DE POST PROCESADO.

1. Para obtener la convergencia de los resultados, se realizó el mallado de la corona, incrementando el refinado en el área del diente donde se aplica la carga hasta obtener un esfuerzo de Von Mises constante como se indica, figura 50.



**Figura 50.** Gráfica de convergencia del modelo.

2. En la fase de solución se imprime los esfuerzos máximos de Von Mises y el factor de seguridad que soporta el diente de la corona.



**Figura 51.** Esfuerzos máximos de Von Mises.



3. En la tabla 16 se resume los esfuerzos y factor de seguridad, calculados por el método CAE, en el Anexo B.4 se indica el cálculo de dicho esfuerzo.

RESULTADO MÉTODO CAE			
Método	Esfuerzo Máximo (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Factor de seguridad
CAE	64,98	240	3.69

**Tabla 16.** Resultado método CAE.

#### 4.7 CONCLUSIÓN.

- Analizando los factores de seguridad obtenidos por el método AGMA (F.S.= 3.843) y CAE (F.S.=3.69) en condiciones normales de operación, se verifica que ambos factores están por encima de la unidad, lo cual indica que en condiciones normales de operación los dientes de la nueva corona (Bronce al aluminio BS 1400 AB 2) resisten con seguridad las cargas transmitidas por el sinfín.
- Comparando los resultados de esfuerzo máximo obtenidos por ambos métodos, se observa un aumento del 4.06% del método CAE con respecto al AGMA, lo cual corrobora la validez de dichos cálculos. La variación entre los dos métodos se justifica ya que el Método por Elementos Finitos no considera factores de corrección al momento de calcular el esfuerzo.

#### 4.8 PLANOS.

Los planos de la corona se muestran en el Anexo C.4.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONSTRUCCIÓN DE LA CORONA**

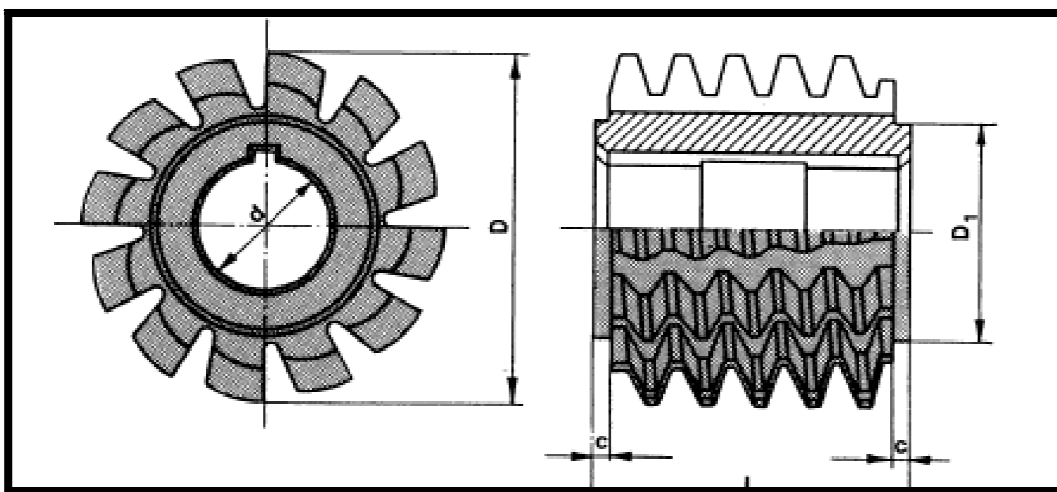
#### **5.1 INTRODUCCIÓN.**

El mecanizado es un proceso mecánico que consiste en la fabricación de piezas de gran precisión. El método se basa en el arranque de material de un bloque inicial de materia prima, mediante una herramienta, hasta la obtención de la geometría de la pieza final.

Existen numerosas familias de arranque de material, pero este trabajo, se centra en particular en los procesos de mecanizado con herramientas de filo geoméricamente definido, básicamente de dos tipos: el torneado y el fresado. Estos dos tipos de mecanizados son los más frecuentemente utilizados hoy en día.

Controlar el proceso de mecanizado no es una tarea fácil de conseguir. Los mecanismos físicos que definen el arranque de material son complejos porque engloban todo un conjunto de procesos que son objetos de estudio por parte de las disciplinas de la mecánica y de las ciencias de los materiales así como cambiando alguna de las condiciones de corte, por ejemplo la velocidad de corte, la profundidad de corte, etc.

Este capítulo tiene como objetivo describir la construcción de la corona, y para cumplir con dicho objetivo primero se realiza el diseño y construcción de la fresa madre (herramienta para construir la corona) en una fresadora universal, luego se utiliza el centro de mecanizado vertical CNC, donde se realiza la programación manual para construir los dientes de la corona con la generación de códigos en el módulo NX5 para maquinar la leva interna en la corona.



**Figura 52.** Fresa madre.

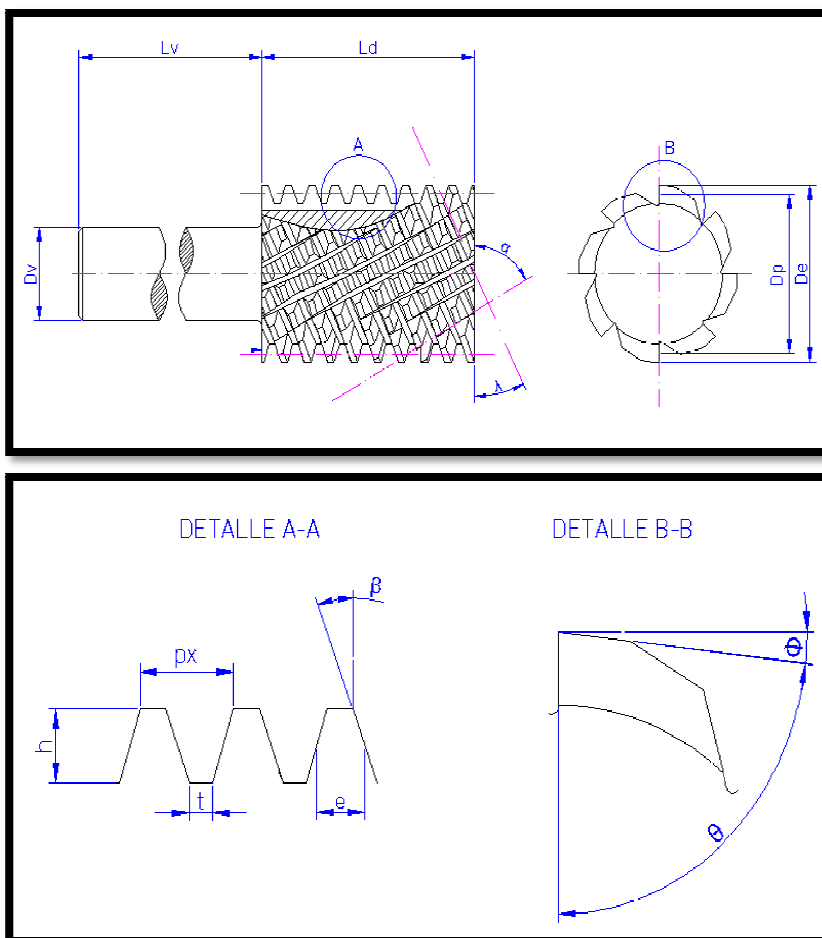
La necesidad de diseñar la fresa madre de módulo 2 mm, se da porque en el centro de mecanizado del Comando Logístico del Reino de Quito no poseen el método ni la herramienta necesaria para la construcción de la corona de bronce.

El diseño de la fresa madre está compuesta de dos partes principales las cuales son la geometría de la pieza y la especificación del material del cual se va a construir, a fin de ver el funcionamiento de dicha herramienta de corte. Además para el diseño de la fresa madre se utilizó la siguiente recomendación:

“El diámetro primitivo de la fresa madre debe ser el mismo que el diámetro primitivo del sinfín, así mismo, todas las variables de la geometría del tornillo sinfín deben ser iguales a las variables de la geometría de la fresa madre, en otras palabras la fresa madre es un tornillo sinfín con filos de corte” [2].

## 5.2 GEOMETRÍA.

La fresa madre es simplemente un sinfín con filos de corte, por tal motivo la geometría del sinfín es la misma que la geometría de la fresa madre. En la tabla 17 se indica la geometría de la Fresa madre. Ver cálculos detallados en Anexo B.2.



**Figura 53.** Geometría Fresa madre.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	RESULTADOS
Paso axial	px	6.283 mm
Módulo	M	2 mm
Diámetro exterior	De	37 mm
Diámetro primitivo	Dp	33 mm
Altura del diente	h	4.4 mm
Espesor del filete	e	3.1 mm
Ancho en el fondo del filete	t	1,45 mm
Ángulo de presión normal	$\phi_n$	20°
Ángulo de inclinación de la hélice	$\alpha$	64°
Ángulo de inclinación de la ranura	$\lambda$	26°
Diámetro del vástago	Dv	20 mm
Longitud del vástago	Lv	70 mm
Longitud de fresa madre	Ld	60 mm
Ángulo de la cara de ataque	$\theta$	84°
Ángulo de la cara libre de filo	$\Phi$	6°
Desplazamiento del sinfín	L	50.624 mm
Paso de la espiral de corte	SP	210 mm
Número de entradas de corte	ND	8
Número de filetes o entradas	n	8

**Tabla 17.** Geometría de la Fresa madre.

### 5.2.2 MATERIAL.

Teniendo en cuenta la disponibilidad del material y aprovechando su amplio espectro de propiedades útiles en piezas que se someten a gran esfuerzo, se ha escogido el acero de herramientas DF 2 (Anexo A.12). Acero DF2 es un acero al manganeso-cromo-tungsteno templable en aceite y muy versátil, para uso general.

Es apto para una gran variedad de aplicaciones de trabajo en frío. Entre sus principales características se cuentan:

- Buena maquinabilidad y buena estabilidad dimensional en el temple.
- Una buena combinación de gran dureza superficial y tenacidad tras el temple y revenido.

ANÁLISIS	C	Mn	Cr	W	V
TÍPICO%	0,95	1,1	0,6	0,6	0,1
Normas Equivalentes	UNE F-5220, W-Nr1 2510, AISI 01 (SS2140)				
Estado de Suministro	Aprox. 190 HB				

**Tabla 18.** Análisis típico del acero DF2.

TEMPERATURA	20°C	200°C	400°C
Densidad Kg/m <sup>3</sup>	7800	7750	7700
Módulo de Elasticidad MPa	190000	185000	170000
Conductibilidad Térmica W/m°C	32	33	34

**Tabla 19.** Características físicas del acero DF2.

### 5.3 CONSTRUCCIÓN DE LA FRESA MADRE.

El mecanizado de la fresa madre es igual al mecanizado del tornillo sinfín con la adición del mecanizado de ranuras perpendiculares al ángulo de hélice del sinfín y maquinado de filos de corte necesarios para el corte de los dientes de la rueda.

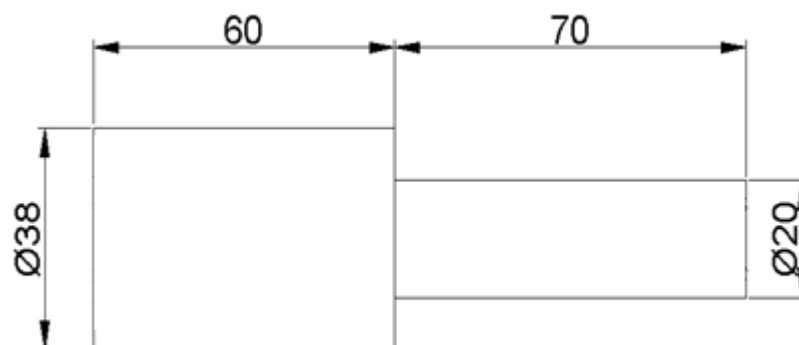
#### 5.3.1 OPERACIONES DE MECANIZADO.

La construcción de la Fresa Madre está dividida en 2 operaciones de maquinado, primero se realiza el maquinado del cuerpo de la fresa (torno), y se concluye con el maquinado de los filos de corte (fresadora), tal como se describe a continuación.

##### 5.3.1.1 MECANIZADO DEL CUERPO DE LA FRESA MADRE. (TORNO)

###### Paso 1.

Se refrenta las caras, luego se hacen los agujeros de centros, y por último se cilindra el eje a las siguientes medidas (mm):

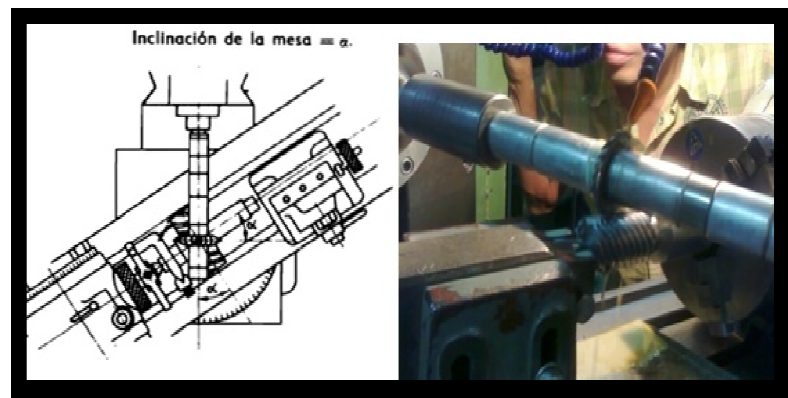


**Figura 54.** Acero DF2.

### 5.3.1.2 MAQUINADO DE FILOS DE CORTE. (FRESADORA UNIVERSAL)

#### Paso 2.

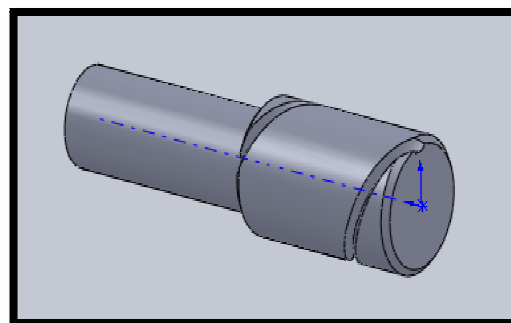
Como ya se conoce, la fresa madre es un tornillo de 8 entradas igual que el sinfín, cada entrada tiene un paso de 50 mm, entonces se coloca en la lira las ruedas calculadas, luego se monta el eje entre el contrapunto y el plato divisor, y se inclina la mesa  $26^\circ$  ya que el ángulo de hélice es de  $26^\circ$ ,



**Figura 55.** Inclinación de la mesa.

#### Paso 3.

Una vez montada la fresa de módulo 2mm, se efectúa el primer diente con la penetración adecuada.



**Figura 56.** Primer entrada en la fresa madre.



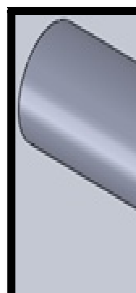
**Paso 4.**

Para realizar la s  
mecanizado de la seg  
quedando la fresa ma



**Paso 5.**

Se monta la fresa  
paso de la espiral de  
las ya calculadas con  
de corte.



**Fig**

ERROR: ioerror  
OFFENDING COMMAND: image

STACK: