

## **Tesis Doctoral**

# **UN MÉTODO DE FABRICACIÓN DE ENGRANAJES “ONE-OF-A-KIND” EN FRESADORAS MULTIEJE**

Presentada por  
**D. Álvaro Álvarez Arregui**

en el  
**Departamento de Ingeniería Mecánica**

perteneciente a la  
**Universidad del País Vasco  
Euskal Herriko Unibertsitatea**

Para la obtención del título de  
**Doctor Ingeniero Industrial**

Dirigida por  
**Dr. D. Luis Norberto López de Lacalle**

**Junio de 2017**



## Resumen

Este trabajo, financiado por el Gobierno Vasco mediante el **programa ZabaldUz**, nace con el compromiso de dar solución a una problemática real de una empresa del entorno social y productivo, como es **Ibarmia S.L.U.**, mediante una estrecha colaboración con fuentes de conocimiento continuo como son la **Universidad del País Vasco (UPV/EHU)** y el centro tecnológico **Tecnalia**.

La empresa Ibarmia S.L.U., fabricante de máquina-herramienta, frente a su incapacidad de dar una solución óptima a sus clientes/futuros clientes para el mecanizado de engranajes en máquinas de propósito general, plantea la realización de esta tesis de carácter industrial.

El objetivo de este trabajo de investigación se centra en el desarrollo de una metodología para el proceso de mecanizado de engranajes “one-of-a-kind” en máquinas multieje de propósito general, una vez ha sido estudiada y evaluada la problemática que presentan las tecnologías específicas de tallado. La metodología presentada a lo largo del todo el estudio permite tener un control sobre todo el proceso, desde la etapa de diseño a la de medición, una vez este ha sido mecanizado.

La etapa de diseño se centra en el desarrollo de software que permiten la obtención de dos tipologías diferentes de engranajes a partir de los parámetros de diseño introducidos por el usuario.

El primero de ellos permite obtener el diseño 3D de engranajes cilíndricos, tanto rectos como helicoidales. Ha sido desarrollada una API dentro del entorno CAD/CAM, para el caso particular del Siemens NX, lo que ha permitido unificar diseño y programación de estrategias. Para la obtención de una tipología de engranaje cónica, ha sido implementado un software ya existente que permite obtener el sólido 3D a partir de los parámetros de diseño introducidos en una hoja de cálculo Excel. Dentro de los engranajes cónicos, el trabajo se ha centrado en los espirocónicos debido a su complejidad. Para esta tipología, el software permite escoger entre los dos procedimientos más comunes, el método Gleason y el método Klingelnberg.

Una vez el engranaje ha sido diseñado, sobre el mismo han sido evaluadas diferentes estrategias de mecanizado, patrones de corte, desgastes de herramienta y tiempos de mecanizado con la finalidad última de optimizar el proceso. Además, en la operación de acabado han sido evaluados diferentes niveles de calidad, llegando a ser evaluada una nueva tecnología de acabado como es la turbina de aire, que permite una fácil programación e instalación en máquina.

Han sido mecanizadas diferentes tipologías de engranajes utilizándose máquinas de propósito general multieje dotadas de distintas cinemáticas. Previamente, con la finalidad de evaluar el correcto comportamiento del proceso de mecanizado, este será simulado en un entorno virtual.

Finalmente, la metodología se completa con un proceso de verificación dimensional y de la rugosidad superficial para cada uno de los diferentes flancos que forman los engranajes. La medición dimensional ha sido realizada mediante un escáner óptico 3D, el cual permite generar una comparativa entre el sólido mecanizado con el CAD de partida. En cambio, la medición de la rugosidad superficial ha sido realizada de manera individualizada, gracias a la combinación tanto de sistemas ópticos como por contacto, para cada uno de los diferentes flancos. Además, se ha desarrollado un modelo que permite estimar y predecir la topografía superficial que va a ser generada para cada uno de los diferentes flancos en función de parámetros tales como la inclinación y la orientación de la fresa, los parámetros geométricos de corte y las velocidades de avance y de giro de la herramienta.

En resumen, el trabajo presenta un método fiable y robusto para la fabricación de engranajes en máquinas de propósito general multieje.

## Índice General

### Capítulo I. Introducción y contexto .....3

I.1. Introducción .....	3
I.2. Contexto .....	5
I.2.1 Contexto histórico .....	5
I.2.2 Contexto actual .....	16
I.3. Objetivos .....	29
I.4. Organización de la memoria .....	30

### Capítulo II. Estado del arte .....35

II.1. Procedimientos para la fabricación de engranajes .....	35
II.1.1 Fabricación de engranajes sin arranque de viruta .....	36
II.1.2 Fabricación de engranajes con arranque de viruta .....	44
II.2. Procedimientos para la fabricación de engranajes cónicos .....	67
II.3. Fabricación de engranajes a punta de cuchilla. Cinemáticas de máquina y generación del contexto propicio para el mecanizado en máquina multieje .....	80
II.4. Procedimientos de diseño y generación de engranajes .....	95
II.4.1 Software de diseño + software CAM .....	96
II.4.2 Software CAD con módulo de diseño de engranajes + software CAM .....	97
II.4.3 Software CAD/CAM específico para engranajes .....	98
II.4.4 Software de diseño y programación CAM creado por fabricantes de máquina-herramienta .....	99
II.4.5 Software de diseño y programación CAM creado por fabricantes de herramienta ..	99
II.5. Métodos de estimación y predicción de la topografía superficial para fresado 5 ejes .	104

### Capítulo III. Métodos de fabricación de engranajes únicos en fresadoras 5 ejes ..... 111

III.1. Generación de la geometría de los engranajes .....	111
---	-----

III.1.1 Generación de la geometría de los engranajes cilíndricos.....	112
III.1.2 Generación de la geometría de los engranajes cónicos.....	118
III.2. Programación de las trayectorias.....	127
III.2.1 Trayectorias de desbaste .....	127
III.2.2 Trayectorias de acabado .....	129
III.3. Fresado de las diferentes tipologías.....	130
III.3.1 Engranaje cilíndrico helicoidal.....	131
III.3.2 Engranaje espirocónico .....	132
III.4. Control de la calidad de los diferentes engranajes mecanizados .....	133

## **Capítulo IV. Casos de estudio ..... 141**

IV.1. Evaluación comparativa de la fabricación de engranajes aeronáuticos de alta responsabilidad mediante tallado por generación o mecanizado a punta de cuchilla .....	141
IV.1.1 Caso de estudio.....	142
IV.1.2 Fabricación en máquina específica de engranajes .....	143
IV.1.3 Fabricación a punta de cuchilla en máquina de propósito general .....	144
IV.1.4 Control dimensional y rugosidad superficial.....	145
IV.1.5 Resultados.....	146
IV.1.6 Comparativa de costes.....	151
IV.1.7 Conclusiones .....	152
IV.2. Mecanizado de engranajes únicos en fresadoras multieje.....	153
IV.2.1 Caso de estudio.....	154
IV.2.2 Metodología.....	156
IV.2.3 Resultados.....	160
IV.2.4 Conclusiones .....	168
IV.3. Mecanizado de engranaje en 5 ejes continuos y en 3+2 ejes en máquina de propósito general. Estimación y predicción de la topografía superficial sobre flanco de engranaje ...	172
IV.3.1 Caso de estudio.....	173

IV.3.2 Estimación y predicción de la topografía superficial sobre flanco de engranaje ...	176
IV.3.3 Resultados.....	189
IV.3.4 Conclusiones .....	196

**Capítulo V. Aportaciones y líneas futuras ..... 201**

V.1. Aportaciones.....	201
V.2. Líneas futuras.....	204

**BIBLIOGRAFÍA ..... 207**



## Índice de Figuras

<b>Figura I.1</b> Ejemplo logotipos Escuelas de Ingeniería .....	3
<b>Figura I.2</b> Diseño de engrane corona y sinfín atribuido a Arquímedes (aprox. 250 a.C.) .....	6
<b>Figura I.3</b> Mecanismo de Anticitera (aprox. 100-150 a.C.) .....	6
<b>Figura I.4</b> Carro que apunta hacia el sur (150-250 d.C.) y el realizado en la UPV en 2016 .....	7
<b>Figura I.5</b> Reloj de la catedral de Wells (1392) y de la catedral de Salisbury (1396).....	7
<b>Figura I.6</b> Engranaje sinfín-corona de Leonardo da Vinci.....	8
<b>Figura I.7</b> Generación del perfil cicloide .....	8
<b>Figura I.8</b> La epicloide es la curva que describe un punto "P" .....	9
<b>Figura I.9</b> a) Generación del perfil evolvente; b) Línea de engrane generada por el perfil evolvente..	9
<b>Figura I.10</b> Máquina talladora de engranes desarrollada por Richard Roberts (1821).....	10
<b>Figura I.11</b> a) Engranaje helicoidal; b) Dibujos originales patente engranes helicoidales de a J. Woolams (1820) .....	10
<b>Figura I.12</b> a) Máq. para cortar engranes desarrollada por J. Saxton; b) Porción de dos ruedas con dientes cicloidales.....	10
<b>Figura I.13</b> Máq. desarrollada por J. Whitworth con una fresa de forma para diente de evolvente (1844-1851) .....	11
<b>Figura I.14</b> Fresadora de engranes desarrollada por William Gleason (1874).....	11
<b>Figura I.15</b> Máq. desarrollada por H. Pfauter para la fabricación de engranes mediante fresa madre (1897) .....	12
<b>Figura I.16</b> Primer modelo de producción de la generadora de engranes Fellows (aprox. 1900).....	12
<b>Figura I.17</b> Mecanismo piñón-corona con engranes chevron o helicoidales dobles .....	13
<b>Figura I.18</b> Sistema Digiton. Colocación de la cinta en la unidad lectora de la máquina- herramienta.....	14
<b>Figura I.19</b> Fresadora Cincinnati Hydro-Tel (1952).....	14
<b>Figura I.20</b> Fresadora Milwaukee-Matic-II.....	15
<b>Figura I.21</b> Primera fresadora CNC utilizando para su control una computadora HP-2100 (McMaster Uni, 1973) .....	15
<b>Figura I.22</b> Fresadora CNC para la fabricación de engranes con fresa madre .....	16
<b>Figura I.23</b> El mercado y las necesidades de la sociedad son la guía hacia nuevos paradigmas .....	17
<b>Figura I.24</b> Inserción del "blank" en máquinas específicas de tallado .....	18
<b>Figura I.25</b> Templado de dientes de engrane [ASM, 1991] .....	18
<b>Figura I.26</b> Datos de entrada de un software CAM.....	21
<b>Figura I.27</b> Simulación mecanizado engranaje en entorno Siemens NX .....	22
<b>Figura I.28</b> Cinemáticas serie Z y serie T de Ibarria S.L.U .....	24
<b>Figura I.29</b> Entradas de las que precisa un postprocesador.....	25
<b>Figura I.30</b> Sistema de punto cero MNG de WNT [WNT, 2016] .....	27

<b>Figura I.31</b> Sujeción de pieza con mordisco previo [LANG TECH., 2015] .....	28
<b>Figura I.32</b> Sujeción de pieza en utillaje magnético .....	28
<b>Figura I.33</b> Presencia de engranajes espirocónicos en las diferentes ferias del sector .....	29
<b>Figura II.1</b> Clasificación de los procedimientos para fabricar engranajes.....	35
<b>Figura II.2</b> Clasificación y ventajas de los procedimientos de conformado por fundición.....	36
<b>Figura II.3</b> Engranaje obtenido mediante fundición.....	37
<b>Figura II.4</b> Conjunto de engranajes obtenidos mediante sinterizado.....	38
<b>Figura II.5</b> Conjunto de engranajes obtenidos por inyección .....	39
<b>Figura II.6</b> Proceso y ejes nervados obtenidos mediante extrusión.....	39
<b>Figura II.7</b> Mecanismo mediante engranes conformados mediante estampación.....	40
<b>Figura II.8</b> Engranes conformados mediante forjado.....	41
<b>Figura II.9</b> Esquema simplificado proceso SLM [IK4_LORTEK, 2013] .....	42
<b>Figura II.10</b> Engranaje granallado.....	43
<b>Figura II.11</b> Posibles configuraciones de las boquillas de láser cladding1 .....	44
<b>Figura II.12</b> Tallado de un engranaje interior por cepillado .....	45
<b>Figura II.13</b> Ejemplos de tallado con fresa de módulo .....	46
<b>Figura II.14</b> Sistema Pfauter o Rhenania .....	47
<b>Figura II.15</b> Tipos de fresa madre: a) cilíndrica; b) Tronco cónica.....	47
<b>Figura II.16</b> Hobbing en máquina Ibarria en instalaciones de Azkoitia en 2017 .....	49
<b>Figura II.17</b> Proceso de brochado interior y exterior.....	49
<b>Figura II.18</b> Brocha típica para engrane interno .....	50
<b>Figura II.19</b> Operaciones de fresado rotativo [Bagwell, 2015].....	53
<b>Figura II.20</b> Talladores típicos para engranes rectos y helicoidales .....	53
<b>Figura II.21</b> Proceso de tallado y mecanizado en máquina.....	54
<b>Figura II.22</b> Tallado en “tándem”.....	55
<b>Figura II.23</b> Engrane con “hombro” o interferencia .....	55
<b>Figura II.24</b> Generación con cremallera mortajadora .....	56
<b>Figura II.25</b> Generación de engranajes mediante cremallera .....	57
<b>Figura II.26</b> Sistema Maag .....	58
<b>Figura II.27</b> Sistema Sunderland.....	58
<b>Figura II.28</b> Proceso electroerosión por hilo.....	59
<b>Figura II.29</b> Generación engranaje mediante electroerosión [Ellis, 2014] .....	60
<b>Figura II.30</b> Proceso de la fabricación de engranajes [Karpuschewski, 2008].....	60
<b>Figura II.31</b> Objetivos principales del acabado de los engranajes [Karpuschewski, 2008] .....	62
<b>Figura II.32</b> Proceso de “afeitado” de engranajes.....	63
<b>Figura II.33</b> Máquinas de rectificado de engranajes.....	64
<b>Figura II.34</b> Rectificado por generación o por perfiles .....	64
<b>Figura II.35</b> Lapeado de engranajes espirocónicos. Gleason Phoenix – Turbo Lapper 600HTL.....	65

<b>Figura II.36</b> Herramienta de bruñido [Karpuschewski, 2008].....	66
<b>Figura II.37</b> Topografía superficial de un engranaje bruñido [Karpuschewski, 2008].....	66
<b>Figura II.38</b> Cinemática del proceso de bruñido [Karpuschewski, 2008].....	67
<b>Figura II.39</b> Tipos de engranajes cónicos [Maitra, 1994] .....	68
<b>Figura II.40</b> Tipos de engranajes cónicos [Maitra, 1994] .....	69
<b>Figura II.41</b> Tipos de engranajes cónicos .....	69
<b>Figura II.42</b> Sistema de cuchillas dobles o Coniflex .....	70
<b>Figura II.43</b> Sistema Coniflex con fresas en forma de disco .....	71
<b>Figura II.44</b> Esquema sistema Gleason con dentado de altura variable .....	72
<b>Figura II.45</b> Disposición del tambor, la fresa de plato y la rueda a tallar en el sistema de.....	73
<b>Figura II.46</b> a) Dentado de altura variable; b) Dentado de altura constante.....	73
<b>Figura II.47</b> Dentado Gleason de altura variable .....	74
<b>Figura II.48</b> Procedimiento Spiromatic-Oerlikon .....	75
<b>Figura II.49</b> Movimiento relativo de epicicloide extendida .....	75
<b>Figura II.50</b> Esquema sistema Oerlikon con dentado de altura constante.....	76
<b>Figura II.51</b> Fabricación de engranajes mediante el sistema Oerlikon.....	76
<b>Figura II.52</b> Procedimiento Klingelnberg con fresa-madre cónica.....	77
<b>Figura II.53</b> Hiperboloides con generatriz en común para cada instante.....	78
<b>Figura II.54</b> Fabricación de engranajes mediante el sistema Klingelnberg [KLINGELNBERG, 2014] ..	78
<b>Figura II.55</b> Rectificado de engranaje espirocónico con muela de corindón .....	79
<b>Figura II.56</b> Point milling vs. flank milling .....	81
<b>Figura II.57</b> a) Superficie reglada álabeadada; b) superficie reglada desarrollable [Harik, 2013].....	82
<b>Figura II.58</b> Mecanizado con herramienta de disco con extremo cóncavo .....	83
<b>Figura II.59</b> Parámetros de mecanizado estudiados [Klocke, 2014] .....	83
<b>Figura II.60</b> Relación entre parámetros de mecanizado y calidad superficial [Chaphalkar, 2013] ...	84
<b>Figura II.61</b> Diferentes estructuras de máquina-herramienta multieje.....	86
<b>Figura II.62</b> Tipología de engranaje vs. procedimiento de fabricación .....	87
<b>Figura II.63</b> Comparación de los diferentes métodos de generación [InvoMilling, 2012].....	88
<b>Figura II.64</b> Modelos máquina en función de la tipología y dimensiones del engrane a fabricar.....	89
<b>Figura II.65</b> Modificaciones de flanco típicas .....	90
<b>Figura II.66</b> Razones para la modificación de los engranajes [Türich, 2010] .....	90
<b>Figura II.67</b> Par de engranajes de geometría compleja .....	91
<b>Figura II.68</b> Medición en la propia máquina de mecanizado .....	94
<b>Figura II.69</b> Ejemplo de aplicación KISSsoft®.....	96
<b>Figura II.70</b> Ejemplo de aplicación GearTrax™ .....	97
<b>Figura II.71</b> Ejemplo de aplicación EUKLID GearCAM® .....	98
<b>Figura II.72</b> Aplicación de correcciones de flanco en software EUKLID GearCAM® .....	98
<b>Figura II.73</b> Ejemplo de aplicación gearMILL® de DMG-MORI .....	99

<b>Figura II.74</b> Proceso InvoMilling™ .....	100
<b>Figura II.75</b> InvoMilling Software™ .....	101
<b>Figura II.76</b> Desbaste y acabado realizado mediante uP-Gear Technology .....	102
<b>Figura II.77</b> Comparación fresado convencional vs. uP-Gear Technology .....	103
<b>Figura II.78</b> Cresta generada por el path-interval y el feed-interval con hta. de punta esférica.....	105
<b>Figura II.79</b> Desalineación de la herramienta respecto al cono (runout).....	106
<b>Figura II.80</b> Imposición del eje de la hta. mediante un vector normal a la superficie del mismo.....	108
<b>Figura II.81</b> Esquema de un proceso de fresado en 5 ejes [Arizmendi, 2016] .....	108
<b>Figura III.1</b> Acceso a API desde software Siemens NX.....	112
<b>Figura III.2</b> Ventana de la API de engranajes desarrollada para Siemens NX.....	112
<b>Figura III.3</b> Elementos de un engranaje .....	113
<b>Figura III.4</b> Programación de diferentes módulos .....	113
<b>Figura III.5</b> Programación de diferente nº de dientes .....	114
<b>Figura III.6</b> Ángulo de presión .....	114
<b>Figura III.7</b> Programación de diferentes ángulos de presión.....	114
<b>Figura III.8</b> Programación de diferentes anchuras .....	114
<b>Figura III.9</b> Programación de diferentes radios en la base del diente.....	114
<b>Figura III.10</b> Diferentes diámetros del taladro .....	115
<b>Figura III.11</b> Diferentes tipologías de dientes.....	115
<b>Figura III.12</b> Diferentes diámetros del taladro .....	115
<b>Figura III.13</b> Dentado helicoidal .....	116
<b>Figura III.14</b> Ángulo de hélice de un engranaje helicoidal.....	116
<b>Figura III.15</b> Métodos Gleason y Klingelnberg .....	118
<b>Figura III.16</b> Hoja Excel para generación del dentado Gleason.....	119
<b>Figura III.17</b> Definición del ángulo de espiral en engranaje espirocónico.....	120
<b>Figura III.18</b> Diferentes diseños de engranaje espirocónico.....	120
<b>Figura III.19</b> a) Profile Crowning; b) Lead Crowning.....	121
<b>Figura III.20</b> Proceso de generación de la superficie de un dentado espirocónico.....	121
<b>Figura III.21</b> Cuerpos del par de engrane .....	122
<b>Figura III.22</b> Importación de la superficie (.igs).....	122
<b>Figura III.23</b> Generación del par de engranajes a partir de la superficie importada .....	123
<b>Figura III.24</b> Sección de una rueda cónica en el plano que pasa por su eje de giro .....	124
<b>Figura III.25</b> Validación esquema Barásov sobre engranaje espirocónico diseñado.....	125
<b>Figura III.26</b> Geometría de las fresas utilizada para el desbaste .....	128
<b>Figura III.27</b> Estrategias programadas para el desbaste .....	128
<b>Figura III.28</b> Geometría de las fresas utilizadas para el acabado .....	129
<b>Figura III.29</b> Parámetro stepover y diferentes valores del mismo sobre flanco de engranaje .....	130
<b>Figura III.30</b> Características del engranaje cilíndrico helicoidal .....	131

<b>Figura III.31</b> Ibarmia ZV25/U600 situada en el taller de ingeniería mecánica de la ETSI de Bilbao.	131
<b>Figura III.32</b> Características de la corona mecanizada.....	132
<b>Figura III.33</b> Cinemática de la Ibarmia ZVH38/L1600 Multiprocess y de la Ibarmia ZVH45/L1600 ADD+PROCESS .....	132
<b>Figura III.34</b> a) Leica DCM 3D; b) Taylor Hobson FORM TALYSURF SERIES 2 .....	133
<b>Figura III.35</b> Moldes de corona espirocónica.....	134
<b>Figura III.36</b> Medición rugosidad por sistemas ópticos y por contacto.....	134
<b>Figura III.37</b> Cálculo de la rugosidad teórica en mecanizado con fresa esférica .....	136
<b>Figura III.38</b> a) Análisis mediante macroscopio Leica Z6 APO; b) Análisis mediante ATOS GOM ....	137
<b>Figura III.39</b> Análisis dimensional mediante sistema óptico ATOS GOM .....	137
<b>Figura IV.1</b> a) Gleason GP300 ES; b) Cinemática máquina.....	143
<b>Figura IV.2</b> a) Gleason P400G; b) Cinemática máquina .....	144
<b>Figura IV.3</b> a) Cinemática máquina; b) Mordaza autocentrante Arnold SC125; c) Htas. utilizadas	145
<b>Figura IV.4</b> Perfiles de ciertos dientes obtenidos tras el proceso de rectificado .....	147
<b>Figura IV.5</b> a) Mecanizado en desbaste; b) Mecanizado en acabado; c) Estrategias programadas	148
<b>Figura IV.6</b> Ampliación (x32) de la superficie final de la estrategia 1 .....	150
<b>Figura IV.7</b> Evolución coste fabricación engranajes para diferentes módulos.....	151
<b>Figura IV.8</b> Comparación coste fabricación engranajes.....	152
<b>Figura IV.9</b> a) Procedimiento Gleason; b) Procedimiento Spiromatic-Oerlikon; c) Sistema Palloid de KlingelInberg.....	154
<b>Figura IV.10</b> a) Ibarmia ZV25/U600; b) Ibarmia ZVH38/L1600 Multiprocess .....	155
<b>Figura IV.11</b> a) Método Gleason; b) Método KlingelInberg .....	156
<b>Figura IV.12</b> a) Diferentes estrategias de desbaste evaluadas; b) Ejemplo de estrategias de desbaste aplicadas.....	158
<b>Figura IV.13</b> a) Diferentes “maximum scallop heights” evaluados; b) Diferentes patrones de corte evaluados.....	159
<b>Figura IV.14</b> Mecanizado con la turbina de aire .....	159
<b>Figura IV.15</b> Estrategia de desbaste D-1 .....	161
<b>Figura IV.16</b> Estrategia de desbaste D-2 .....	161
<b>Figura IV.17</b> Estrategia de desbaste D-3 .....	162
<b>Figura IV.18</b> Estrategia semiacabado realizada tras estrategia D-3.....	162
<b>Figura IV.19</b> Estrategia de desbaste D-4 .....	162
<b>Figura IV.20</b> Estrategia de desbaste D-5 .....	163
<b>Figura IV.21</b> a) Leica DCM 3D; b) Taylor Hobson Form; c) Rugosidad y topografía 2D/3D.....	163
<b>Figura IV.22</b> Desbaste y acabado de engranaje espirocónico mecanizado en Ibarmia ZVH38/L1600 Multiprocess .....	167
<b>Figura IV.23</b> Medición de las desviaciones en la forma y en el ángulo de los distintos flancos .....	167
<b>Figura IV.24</b> Análisis dimensional mediante escáner óptico 3D Atos Gom del segundo engranaje	168

<b>Figura IV.25</b> a) Sist. amarre Ibarria ZV25/U600; b) Sist. amarre Ibarria ZVH38/L1600 Multiprocess .....	169
<b>Figura IV.26</b> Máquinas virtuales utilizadas .....	169
<b>Figura IV.27</b> Fresa cónica $\varnothing 3\text{mm}$ vs. fresa cónica $\varnothing 2\text{mm}$ .....	170
<b>Figura IV.28</b> Patrón de corte Zig vs. Zig-Zag .....	171
<b>Figura IV.29</b> Calidad herramientas y voladizo herramienta.....	171
<b>Figura IV.30</b> Ibarria ZVH45/L1600 ADD+PROCESS con su respectiva cinemática .....	174
<b>Figura IV.31</b> Estrategia de desbaste aplicada .....	175
<b>Figura IV.32</b> Mecanizado en 3+2 ejes .....	175
<b>Figura IV.33</b> Extractos programa APT para mecanizado 5 ejes continuos y en 3+2 ejes .....	177
<b>Figura IV.34</b> Obtención de cada uno de los puntos de interpolación del hueco interdental.....	177
<b>Figura IV.35</b> Obtención de las trayectorias tanto del hueco interdental como de uno de los flancos .....	177
<b>Figura IV.36</b> Cálculo de la separación entre puntos que componen una pasada (trayectoria) .....	178
<b>Figura IV.37</b> Vista 3D y en planta de las trayectorias de corte para el fresado de superficie convexa.....	178
<b>Figura IV.38</b> a) Eliminación trayectorias pie del flanco; b) Definición de las zonas de simulación de superficie convexa .....	179
<b>Figura IV.39</b> Posiciones del extremo de la fresa correspondientes a trayectorias empleadas para la simulación de la topografía en una zona de la superficie.....	179
<b>Figura IV.40</b> Cálculo de la posición del centro de la fresa a partir de las posiciones del extremo y de la orientación del eje de la fresa.....	180
<b>Figura IV.41</b> a) Dirección normal a la superficie definida por las posiciones del centro de la fresa en el punto medio M de la zona de simulación; b) Definición del sistema de referencia $X_wY_wZ_w$ asociado a la pieza .....	182
<b>Figura IV.42</b> Vista 3D del sistema de referencia $X_wY_wZ_w$ asociado a la pieza.....	183
<b>Figura IV.43</b> Definición de la geometría de una fresa de punta esférica y de un filo de corte k: .....	184
<b>Figura IV.44</b> Esquema de un proceso de fresado en 5 ejes con ángulo de inclinación $\beta$ de la fresa y de orientación $\gamma$ .....	186
<b>Figura IV.45</b> Definición de los sistemas de referencia auxiliares $O_1X_1Y_1Z_1$ , $O_2X_2Y_2Z_2$ y $O_3X_3Y_3Z_3$ . .....	188
<b>Figura IV.46</b> Topografía simulada en 3D.....	189
<b>Figura IV.47</b> Configuraciones de las diferentes estrategias de desbaste .....	190
<b>Figura IV.48</b> Operación de desbaste con fresa cónica $\varnothing 3\text{mm}$ .....	190
<b>Figura IV.49</b> Comparativa rugosidad obtenida por el modelo vs. valor real de rugosidad medido. .....	193
<b>Figura IV.50</b> Perfiles generados para diferentes avances de una misma fresa.....	194
<b>Figura IV.51</b> Perfiles generados para fresas con diferente número de filos y que trabajan a diferentes avances.....	195
<b>Figura IV.52</b> Máquina virtual ZVH45/L1600 ADD+PROCESS .....	196

## Índice de Tablas

<b>Tabla I.1</b> Importancia de la industria del engranaje [Beulker, 1998] [Beulker, 2001].....	4
<b>Tabla II.1</b> Impacto medioambiental derivado de la producción de diferentes fluidos de corte [Pereira, 2016].....	93
<b>Tabla III.1</b> Tabla ISO 4288 [Leica Microsystems].....	135
<b>Tabla IV.1</b> Características de los engranajes.....	142
<b>Tabla IV.2</b> Condiciones de tallado en desbaste.....	146
<b>Tabla IV.3</b> Condiciones de rectificación en desbaste.....	147
<b>Tabla IV.4</b> Tiempos totales y análisis topográfico de las estrategias evaluadas.....	149
<b>Tabla IV.5</b> Tiempo y rugosidad para estrategia óptima.....	150
<b>Tabla IV.6</b> Parámetros de diseño del engranaje espirocónico programado.....	157
<b>Tabla IV.7</b> Diferentes operaciones de mecanizado por grupo de dientes.....	158
<b>Tabla IV.8</b> Evaluación de las 5 estrategias de desbaste aplicadas.....	161
<b>Tabla IV.9</b> Evaluación estrategias de acabado de engranaje espirocónico realizado en la Ibarria ZV25/U600.....	165
<b>Tabla IV.10</b> Evaluación estrategias de acabado de engranaje espirocónico realizado en la Ibarria ZVH38/L1600.....	166
<b>Tabla IV.11</b> Parámetros de diseño engranaje espirocónico programado.....	174
<b>Tabla IV.12</b> Características de las estrategias de acabado programadas.....	176
<b>Tabla IV.13</b> Coeficientes de la ecuación.....	181
<b>Tabla IV.14</b> Bondad del ajuste obtenido.....	181
<b>Tabla IV.15</b> Parámetros de rugosidad obtenidos para cada uno de los dientes tras el acabado.....	191
<b>Tabla IV.16</b> Parámetros de rugosidad generados por el modelo de rugosidad desarrollado.....	192



## Nomenclatura

<b>2D</b>	Dos dimensiones
<b>3D</b>	Tres dimensiones
<b><math>a_p</math></b>	Profundidad de pasada axial
<b><math>a_e</math></b>	Profundidad de pasada radial
<b><i>adjrsquare</i></b>	Degree-of-freedom adjusted coefficient of determination
<b>AGMA</b>	American Gear Manufacturers Association
<b>API</b>	Application Program Interface
<b>CAD</b>	Computer Aided Design
<b>CAM</b>	Computer Aided Manufacturing
<b>CBN</b>	Nitruro de Boro Cúbico Policristalino
<b>CNC/CN</b>	Control Numérico Computarizado $\approx$ Control Numérico
<b>CND</b>	Control Numérico Directo
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Carbono
<b>Db</b>	Diámetro circunferencia base
<b>df<sub>e</sub></b>	Degrees of freedom in the error
<b>Dp</b>	Diámetro primitivo
<b>ETSI</b>	Escuela Técnica Superior de Ingeniería
<b>EUA</b>	Estados Unidos de América
<b>F<sub>z</sub></b>	Avance por diente (mm)
<b>HAZ</b>	Heat Affect Zone
<b>hp</b>	Horsepower
<b>I+D</b>	Investigación y Desarrollo
<b>IMH</b>	Instituto de Máquina Herramienta
<b>k</b>	Número de filos
<b>Kg CO<sub>2</sub>-eq</b>	Kilogramos de dióxido de carbono equivalente
<b>LMD</b>	Laser Metal Deposition = Laser cladding
<b>m</b>	Módulo del engranaje
<b>MIT</b>	Massachusetts Institute of Technology
<b>MQL</b>	Mínima cantidad de lubricación
<b>N</b>	Nitrógeno
<b>N</b>	Velocidad de giro del husillo (rpm)
<b>N<sub>t</sub></b>	Número de filos de la herramienta
<b><math>n(n_x, n_y, n_z)</math></b>	Vector normal
<b>NNP</b>	Near Net Shape

$O_1X_1Y_1Z_1$	Sistema de referencia auxiliar 1
$O_2X_2Y_2Z_2$	Sistema de referencia auxiliar 2
$O_3X_3Y_3Z_3$	Sistema de referencia auxiliar 3
$O_kX_kY_kZ_k$	Sistema de referencia local asociado al filo k
<b>PIB</b>	Producto Interior Bruto
<b>Q</b>	Caudal de viruta mecanizado [ $\text{cm}^3/\text{min}$ ]
<b>R</b>	Radio de la fresa [mm]
<b>Ra</b>	Rugosidad media aritmética [ $\mu\text{m}$ ]
<b>rmse</b>	Error cuadrático medio ( <i>Root mean squared error (standard error)</i> )
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto
<b>rsquare</b>	Coefficiente de determinación ( <i>coefficient of determination</i> )
<b>RSm</b>	Parámetro de espaciado en estructuras periódicas [mm]
<b>Rt</b>	Altura total del perfil de rugosidad [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Rz</b>	Altura media de la rugosidad [ $\mu\text{m}$ ]
<b>SiC</b>	Carburo de Silicio
<b>SLM</b>	Selective Laser Melting
<b>sse</b>	Suma de los cuadrados de los residuales ( <i>Sum of squares due to error</i> )
<b>LSM</b>	Laser Metal Deposition
<b>T</b>	Matriz de transformación
${}^wT_1$	Matriz que transforma las coordenadas de un punto expresadas en el sistema $X_1Y_1Z_1$ a sus coordenadas en el sistema $X_wY_wZ_w$
${}^1T_2$	Matriz que transforma las coordenadas de un punto expresadas en el sistema $X_2Y_2Z_2$ a sus coordenadas en el sistema $X_1Y_1Z_1$
${}^2T_3$	Matriz que transforma las coordenadas de un punto expresadas en el sistema $X_3Y_3Z_3$ a sus coordenadas en el sistema $X_2Y_2Z_2$
${}^3T_T$	Matriz que transforma las coordenadas de un punto expresadas en el sistema $X_TY_TZ_T$ a sus coordenadas en el sistema $X_3Y_3Z_3$
<b>U.S.</b>	United States
<b>V<sub>c</sub></b>	Velocidad de corte [m/min]
<b>V<sub>f</sub></b>	Velocidad de avance de la fresa [mm/min]
<b>V<sub>fx</sub>, V<sub>fy</sub>, V<sub>fz</sub></b>	Velocidad de avance de los ejes lineales X, Y, y Z
<b>WDM</b>	Wire Discharge Machine
<b>w(w<sub>x</sub>,w<sub>y</sub>,w<sub>z</sub>)</b>	Vector unitario
<b>(X<sub>A</sub>,Y<sub>A</sub>,Z<sub>A</sub>)</b>	Coordenadas cartesianas del punto A
<b>(X<sub>B</sub>,Y<sub>B</sub>,Z<sub>B</sub>)</b>	Coordenadas cartesianas del punto B
<b>(X<sub>M</sub>,Y<sub>M</sub>,Z<sub>M</sub>)</b>	Coordenadas cartesianas del punto M

$X_k Y_k Z_k$	Sistema de referencia asociado al filo $k$
$X_T Y_T Z_T$	Sistema de referencia asociado a la herramienta
$X_w Y_w Z_w$	Sistema de referencia asociado a la pieza
$Z$	Número de dientes
$\emptyset$	Diámetro [mm]
$\alpha$	Ángulo de presión [°]
$\alpha_{hx}$	Ángulo hélice filo herramienta [°]
$\beta$	Ángulo de inclinación de la herramienta [°]
$\gamma$	Ángulo de orientación de la herramienta [°]
$\theta$	Ángulo [°] (en las ecuaciones paramétricas que definen el perfil de evolvente)
$\lambda_c$	Módulo de medición o <i>cut-off</i>
$\phi_k$	Separación angular entre el filo $k$ y el filo 1 [°]



---

## **Capítulo I. Introducción y contexto**

---



## Capítulo I. Introducción y contexto

### I.1. Introducción

El engranaje es, hoy en día, el artefacto ingenieril por excelencia. Tanto es así, que su perfil está presente en muchos de los logotipos de las distintas escuelas de ingeniería presentes alrededor del planeta. Algunos de estos logotipos se detallan en la siguiente figura, Figura I.1.



Figura I.1 Ejemplo logotipos Escuelas de Ingeniería

Este sistema posee grandes ventajas con respecto a las correas y poleas: reducción del espacio ocupado, relación de transmisión más estable (no existe posibilidad de deslizamiento), posibilidad de cambios de velocidad automáticos y, sobre todo, una mayor capacidad de transmisión de potencia, con rendimientos cercanos al 99%. Además, se trata de un sistema reversible, capaz de transmitir potencia en ambos sentidos, en el que no son necesarios elementos intermedios tales como correas o cadenas para transmitir el movimiento de un eje a otro.

Se estima que el volumen total de mercado de estos componentes es de varios miles de millones de euros por año (Tabla I.1), y la fabricación de los mismos ha sido designada como tecnología estratégica en países tales como Alemania y Estados Unidos, países que destacan por ser de los que más presupuesto invierten en I+D respecto a su PIB.

 World market (estimated)	 turnover	 Germany
80 ... 150 Billion €		8 ... 12 Billion €
gear production [pieces]		
2000 ... 2500 Mil.		200 ... 250 Mil.
vehicles production [pieces]		
60 Mil.		5 ... 6 Mil.
gears of high quality (better IT 5) [pieces]		
1000 ... 1400 Mil.		120 ... 140 Mil.

**Tabla I.1** Importancia de la industria del engranaje [Beulker, 1998] [Beulker, 2001]

Sus vastas aplicaciones en casi todos los dispositivos mecánicos han hecho de este componente un elemento imprescindible sin el cual tecnologías más avanzadas no podrían haber sido implementadas.

La fabricación de ruedas dentadas tiene lugar, en la gran mayoría de los casos, en máquinas específicas de tallado que acarrear un elevado coste de adquisición, dificultado así la amortización de las mismas. Una de las razones, posiblemente la más destacada del elevado coste de estas tecnologías, es el oligopolio en donde las pocas empresas existentes compiten. Se puede afirmar con rotundidad que son solo dos los grandes fabricantes mundiales, como son la americana Gleason y la alemana Klingelnberg. Estas empresas han dominado el mercado desde un inicio.

Estas máquinas limitan la fabricación en función del tipo de engranaje a fabricar, el método de tallado utilizado y el tamaño del mismo. Son máquinas utilizadas para la fabricación de grandes lotes, por lo que suelen ir dirigidas a sectores como el automovilístico.

El problema se presenta cuándo se quiere mecanizar engranajes únicos, ya sea por tamaño o geometría, o simplemente se quiere reparar uno ya existente. Es aquí cuando las máquinas de fabricación estándar no tienen sentido y hay que pensar en otros procedimientos de fabricación.

Gracias al programa ZabaldUz, programa financiado por el Gobierno Vasco, a una empresa como Ibarria S.L.U, en colaboración con la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) y Tecnalia, se le permitió plantear una problemática existente con el fin de dar solución a la misma, y es aquí donde nace el propósito final de este trabajo que aquí se presenta.

La problemática que se le presenta a Ibarria, empresa dedicada a la fabricación de máquina-herramienta, es dar una solución técnica óptima a la demanda de muchos clientes (o futuros clientes) para la fabricación de engranajes “one-of-a-kind” en máquinas de mecanizado de

propósito general, máquinas que ya los propios clientes utilizan para la fabricación de una infinidad de piezas, muchas de las cuales presentan una gran variabilidad en cuanto al material, tamaño, geometría,...etc.

## **I.2. Contexto**

Uno de los problemas principales de la Ingeniería Mecánica es la transmisión de movimiento. Desde épocas muy remotas se han utilizado cuerdas y elementos fabricados de madera para solucionar los problemas de transporte, impulsión, elevación y movimiento.

Desde su invención, hasta el día de hoy, los engranajes se presentan como el componente ideal para la transmisión de potencia. Tanto es así que, tras siglos de convivencia con este maravilloso componente, su uso sigue siendo imprescindible en numerosos sectores de la sociedad en la que vivimos, además de en nuestra vida cotidiana.

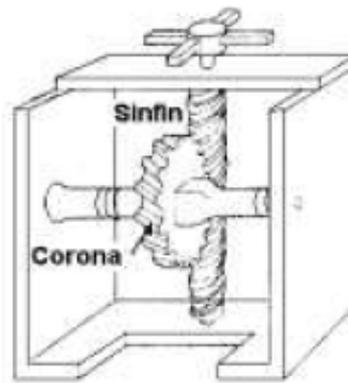
El engranaje ha sido y sigue siendo un elemento fundamental en la evolución de nuestra sociedad desde hace miles de años. Sus vastas aplicaciones en casi todos los dispositivos mecánicos han hecho de él un elemento imprescindible sin el cual tecnologías más avanzadas no podrían haber sido implementadas.

La razón principal por la que se puede afirmar que los engranajes son un producto inmejorable es que en los últimos 300 años su diseño ha permanecido casi inalterable.

### ***1.2.1 Contexto histórico***

Las ruedas dentadas han convivido con la especie humana durante muchos siglos, sin embargo resulta complicado datar con exactitud su invención. Aunque la literatura de la antigua China, Grecia, Turquía y Damasco mencionan engranajes, sin aportar muchos detalles, no es sencillo hallar su lugar de origen.

El primer tratado sobre engranajes se le atribuye a Aristóteles en el siglo IV a.C., bajo el nombre de "Problemas de la Mecánica", donde se plasmaban muchas aplicaciones donde eran usadas ruedas dentadas. Algunos años más tarde, alrededor de 250 a.C., Arquímedes diseñaría y construiría el mecanismo de tornillo sinfín (Figura 1.2), considerado el primer paso hacia la construcción de mecanismos más complejos. Es por esta razón que a Arquímedes se le suele considerar uno de los inventores de los engranajes.



**Figura I.2** Diseño de engrane corona y sinfín atribuido a Arquímedes (aprox. 250 a.C.)

Vitrivius, un ingeniero militar, describe en sus escritos que datan del año 28 a.C. un sinnúmero de aplicaciones de los engranes, de las que cabe destacar su molino de grano.

El mecanismo de engranajes más antiguo de cuyos restos se disponen es el mecanismo de Anticitera, Figura I.3. Este mecanismo es una calculadora astronómica datada entre el 100 y el 150 a.C., y compuesta por al menos 30 engranajes de bronce con dientes triangulares, capaz de calcular y reproducir con exactitud los movimientos de la Tierra y de la Luna alrededor del Sol. Este mecanismo presenta características tecnológicas avanzadas como por ejemplo trenes de engranajes epicicloidales que, hasta el descubrimiento de este mecanismo, se creían inventados en el siglo XIX. Por citas de Ciceron, se sabe que el de Anticitera no fue un ejemplo aislado, sino que existieron al menos otros dos mecanismos similares en esa época, construidos por Arquímedes y por Posidonio.



**Figura I.3** Mecanismo de Anticitera (aprox. 100-150 a.C.)

En China también se han conservado ejemplos muy antiguos de máquinas con engranajes. Un ejemplo es el llamado "carro que apunta hacia el sur" (120-250 d.C.), Figura I.4, inventado por el ingeniero mecánico chino Ma Jun (200-265 d.C.). Este aparato consistía en un vehículo con ruedas que hacía uso de un complejo sistema de engranajes diferenciales, utilizados en los automóviles actuales para aplicar cantidades iguales de torsión a las ruedas mientras estas giran a velocidades distintas cuando el vehículo gira. Los engranajes diferenciales se incorporaron con el fin de mantener una figura de accionamiento mecánico apuntando hacia una posición fija en

el sur. Así, el dispositivo utilizaba mecánica avanzada en lugar del magnetismo de una brújula, con vistas a navegar y orientarse. Algo anterior, de en torno a 50 d. C., son los engranajes helicoidales tallados en madera y hallados en una tumba real en la ciudad china de Shensi.



Figura I.4 Carro que apunta hacia el sur (150-250 d.C.) y el realizado en la UPV en 2016

No está claro cómo se transmitió la tecnología de los engranajes en los siglos siguientes. Es posible que el conocimiento de la época del mecanismo de Anticitera sobreviviese y contribuyese al florecimiento de la ciencia y la tecnología en el mundo islámico de los siglos IX al XIII. Por ejemplo, un manuscrito andalusí del siglo XI menciona el uso de engranajes epicíclicos y segmentados en la construcción de relojes mecánicos. Los trabajos islámicos sobre astronomía y mecánica pueden haber sido la base que permitió que volvieran a fabricarse calculadoras astronómicas en la Edad Moderna. En los inicios del Renacimiento esta tecnología se utilizó en Europa para el desarrollo de sofisticados relojes, en la mayoría de los casos destinados a edificios públicos como catedrales, como los mostrados en la Figura I.5,

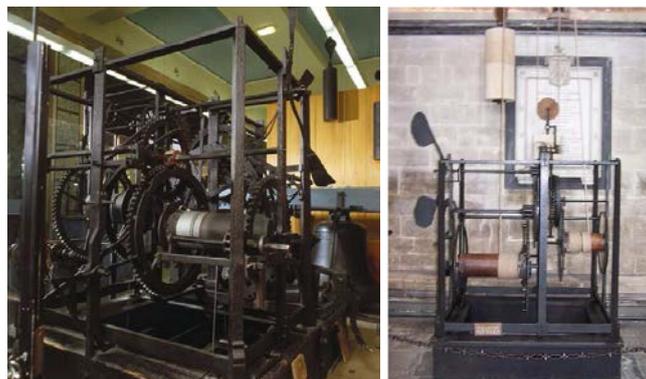


Figura I.5 Reloj de la catedral de Wells (1392) y de la catedral de Salisbury (1396)

Leonardo da Vinci, quien muere en Francia en 1519, dejó numerosos dibujos y esquemas de algunos de los mecanismos aún utilizados hoy en día, Figura I.6, incluidos varios tipos de engranajes de tipo sinfín-corona.

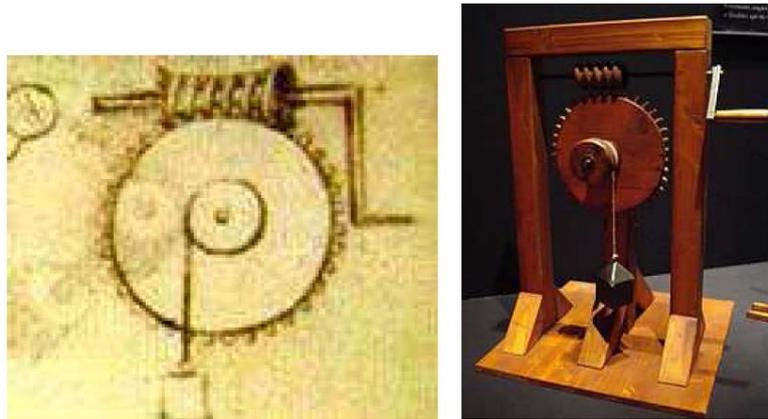


Figura I.6 Engranaje sinfín-corona de Leonardo da Vinci

Más de medio siglo después, en 1630, Gérard Desargues propone el diseño de los dientes de los engranajes a partir de un perfil cicloidal. La cicloide se define como el lugar geométrico de las distintas posiciones de un punto de una circunferencia que rueda sin resbalar sobre una recta fija, como se muestra en la Figura I.7.

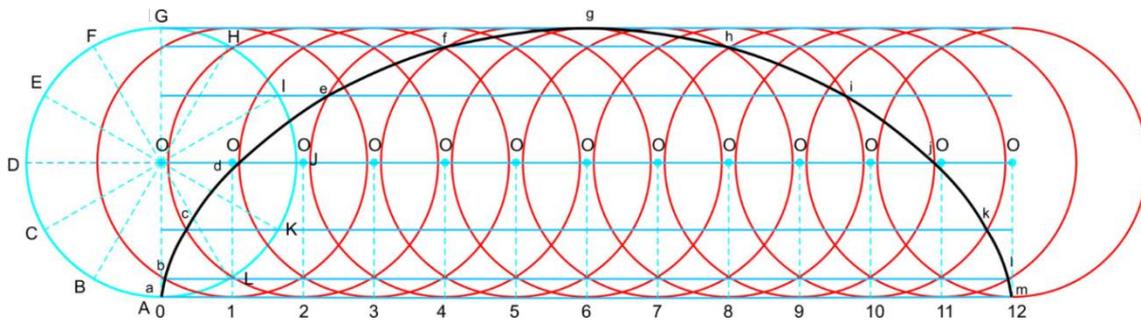


Figura I.7 Generación del perfil cicloide

El dentado con perfil cicloidal está compuesto por dos curvas, epicicloide en la parte superior del diente (cabeza) e hipocicloide en la parte inferior (pie). Este dentado tiene la ventaja de una perfecta correspondencia en la forma de los dientes, donde el perfil convexo contacta con el cóncavo, lo que hace que la presión específica en este tipo de contacto sea menor que cuando están en contacto dos perfiles convexos, minimizándose así el desgaste del dentado. Una limitación significativa de los perfiles cicloidales reside en que la línea de engrane no resulta ser una línea recta, por lo que el ángulo de presión no es constante.

En 1674, el danés Olaf Roemer (1644-1710) describe la forma o perfil del diente en epicicloide, Figura I.8, que anteriormente había sido descubierta por Alberto Durero. La epicicloide es la curva generada por la trayectoria de un punto de una circunferencia que rueda, sin deslizamiento, por el exterior de otra circunferencia directriz. Esta innovación permitió construir los primeros engranajes con velocidad angular constante. Este perfil es muy usado en los dientes de los mecanismos de relojería.

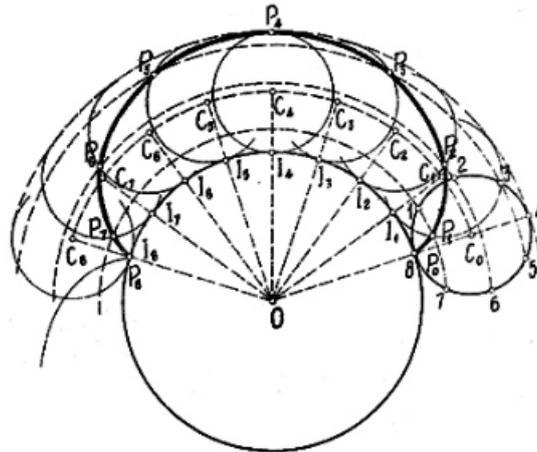


Figura I.8 La epícloide es la curva que describe un punto "P"

Se asocia y atribuye al francés Phillipe de La Hire como el primero en concebir el diente de perfil en evolvente en 1695, Figura I.9, muy poco tiempo después de que Roemer concibiera el epícloidal. La evolvente de una circunferencia está definida por un punto de una recta que rueda sobre la circunferencia, perfil que también satisface el requisito de transmisión de movimiento uniforme y una transmisión de energía óptima entre los engranajes, ya que en el punto de contacto entre dos dientes la tangente al perfil es común a ambos dientes.

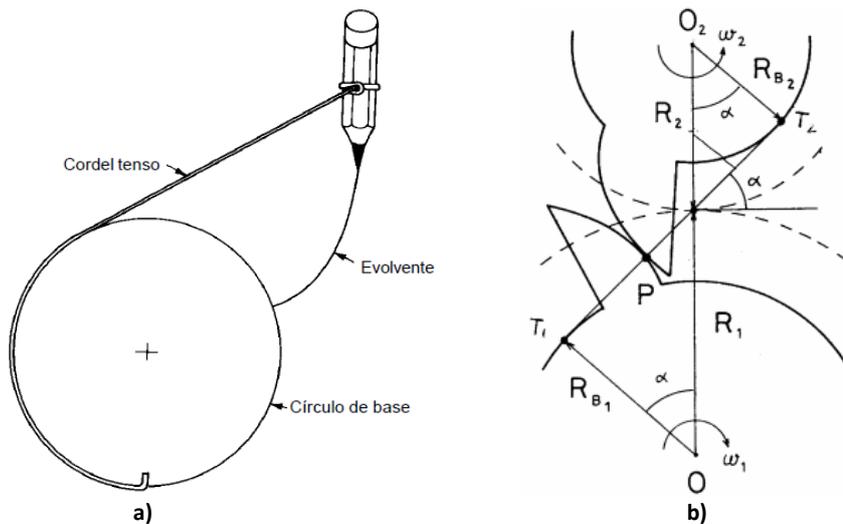
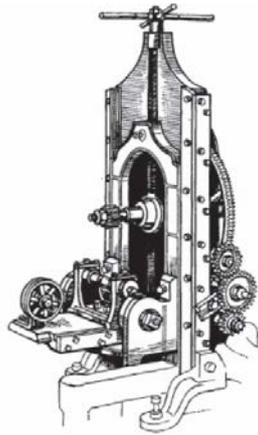


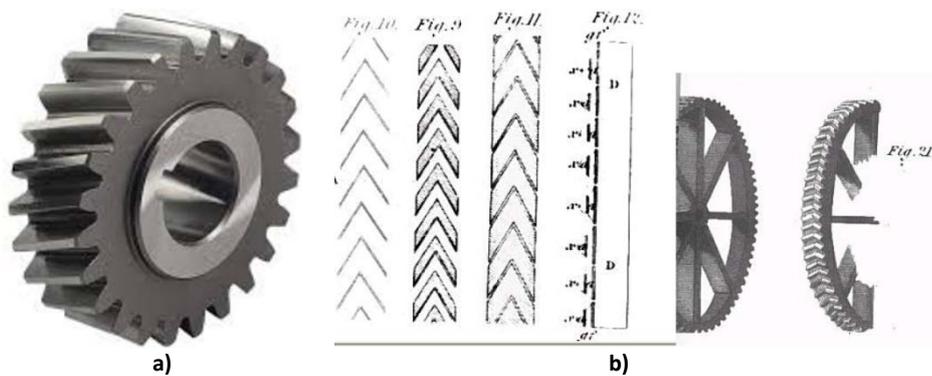
Figura I.9 a) Generación del perfil evolvente; b) Línea de engrane generada por el perfil evolvente

La primera aplicación práctica del diente en evolvente fue debida al suizo Leonhard Euler (1707). Richard Roberts construyó una amplia gama de máquinas-herramienta, algunas de diseño propio, siendo el primero en fabricar una máquina talladora de engranajes, Figura I.10. Para fabricar la máquina con la exactitud necesaria, Roberts comprobaba la dimensión de los engranajes con un sector, instrumento que perfeccionó para su venta a otros ingenieros. Roberts adoptó cortadores giratorios, que había visto usar a Maudslay (inventor del torno). Este es uno de los primeros registros de una fresa utilizada en ingeniería.



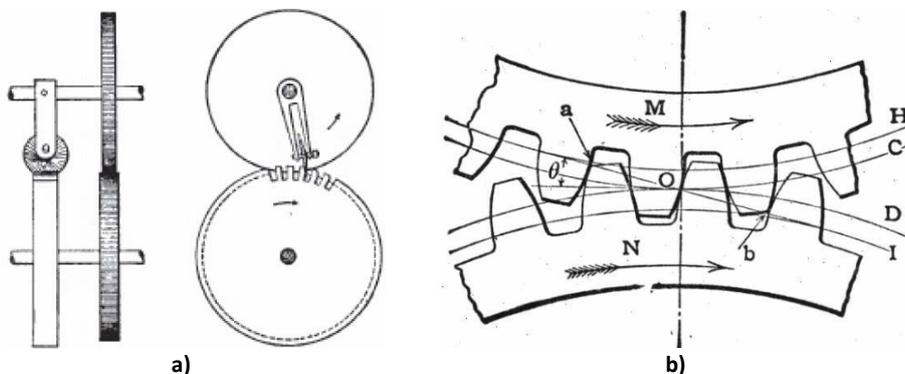
**Figura I.10** Máquina talladora de engranes desarrollada por Richard Roberts (1821)

En 1820, Joseph Woolams inventó los engranes helicoidales, así como los engranes herringbone (helicoidales dobles), Figura I.11, concediéndole la patente inglesa No. 4477 (20 de Junio de 1820). La forma en “v” de estos engranajes hace que las fuerzas en dirección axial sean contrarrestadas, eliminándose así esta componente.



**Figura I.11** a) Engranaje helicoidal; b) Dibujos originales patente engranes helicoidales de a J. Woolams (1820)

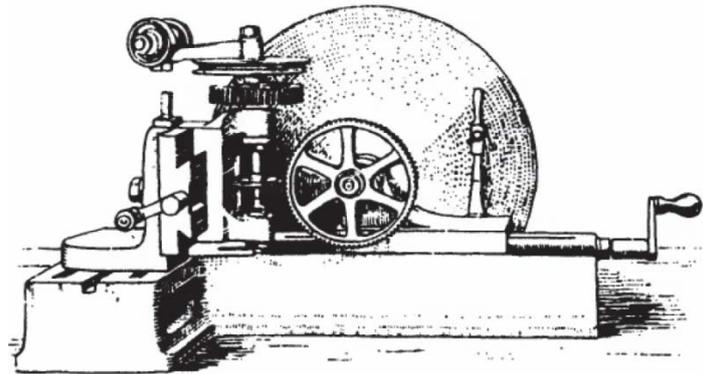
En 1842, Joseph Saxton desarrolló la primera máquina generadora de engranes para el mecanizado de dientes cicloidales, Figura I.12. Para la transmisión de una relación constante de velocidades con engranajes cicloidales, los círculos primitivos tienen que permanecer tangentes. Destacar que el diente con perfil evolvente, a igualdad de paso, es más sólido que el cicloidal.



**Figura I.12** a) Máq. para cortar engranes desarrollada por J. Saxton; b) Porción de dos ruedas con dientes cicloidales

Robert Willis (1800-1875), considerado uno de los primeros ingenieros mecánicos, fue el que obtuvo la primera aplicación práctica de la epicloide al emplearla en la construcción de una serie de engranajes intercambiables. De la misma manera, fue de los primeros matemáticos que implementó la idea del empleo de la evolvente de círculo en el perfil del diente. También se debe a Willis la creación del odontógrafo, aparato que sirve para el trazado simplificado del perfil del diente de evolvente.

En 1844, Joseph Whitworth perfeccionó una máquina muy grande para el mecanizado de engranes de envolvente mediante una fresa de forma, Figura I.13.



**Figura I.13** Máq. desarrollada por J. Whitworth con una fresa de forma para diente de evolvente (1844-1851)

Sobre la generación y fabricación de engranajes, que es lo que a este texto concierne, hay que trasladarse a mediados del siglo XIX.

En 1856 Christian Schiele descubrió el sistema de fresado de engranajes rectos por medio de fresa madre, pero el procedimiento no se llevaría a la práctica hasta 1887.

En 1874, el norteamericano William Gleason inventa la primera fresadora de engranajes cónicos, Figura I.14, y gracias al apoyo de sus hijos, especialmente a su hija Kate Gleason (1865-1933), convirtió a su empresa Gleason Works, radicada en Rochester (Nueva York, EUA), en una de los fabricantes de máquina-herramienta más importantes del mundo.



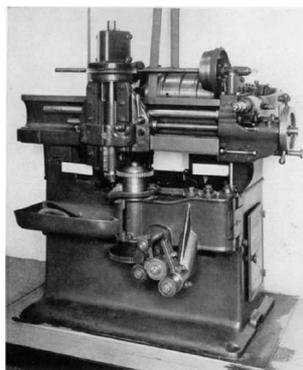
**Figura I.14** Fresadora de engranes desarrollada por William Gleason (1874)

En 1897, el inventor alemán Robert Hermann Pfauter (1885-1914), inventa y patenta una máquina universal para fabricar tanto engranes rectos como helicoidales mediante fresa madre. En 1897, H. Pfauter fabricó la primera máquina universal, Figura I.15, la cual se utilizaba para el mecanizado de engranes de dientes rectos y sinfín con diversas formas. A raíz de este invento y otros muchos inventos y aplicaciones que realizó sobre el mecanizado de engranajes, fundó la empresa Pfauter Company que, con el paso del tiempo, se ha convertido en una multinacional proveedora de todo tipo de máquina-herramienta.



**Figura I.15** Máq. desarrollada por H. Pfauter para la fabricación de engranes mediante fresa madre (1897)

A finales del siglo XIX, coincidiendo con la época dorada del desarrollo de los engranajes, el inventor y fundador de la empresa Fellows Gear Shaper Company, Edwin R. Fellows (1846-1945), inventa un método que resultaría ser una auténtica revolución (Figura I.16) para el mecanizado de tornillos sinfín glóbicos, tales como los que se montaban en las cajas de dirección de los vehículos antes de que estas fueran hidráulicas. Mediante esta técnica, el mecanizado de engranajes se podía hacer de una forma precisa y relativamente barata. Esta razón es por la cual la “Fellow Gear Shaper Company” tuvo una cierta relevancia durante gran parte del siglo XX, alcanzando un pico de trabajo de 3300 trabajadores durante los años en los que transcurrió la Segunda Guerra Mundial.



**Figura I.16** Primer modelo de producción de la generadora de engranes Fellows (aprox. 1900)

En 1905, M. Chambon fue el creador de una máquina para el tallado de engranajes cónicos por el procedimiento de fresa madre. Por esas fechas aproximadamente, André Citroën descubre el

procedimiento de tallado de los engranajes en forma *chevron* (en francés, esqueleto de pescado), percatándose inmediatamente de las enormes posibilidades de rentabilidad del mismo, por lo que decide comprar la licencia del proceso de fabricación y crea la empresa Sociedad de Engranajes Citroën.

Dichos engranajes se convierten en la fuente de inspiración del doble *chevron* que la compañía adopta como logotipo cuando crea la fábrica de automóviles Citroën en 1919, siendo el primer automóvil producido el Tipo A con 10 hp. Dicho automóvil utilizaba un diferencial con engranes *chevron*, Figura I.17. Tan importante fueron los engranes para Citroën que el emblema de la marca es representado con dos *chevrone*s dentro de una elipse horizontal de color azul y amarillo.



Figura I.17 Mecanismo piñón-corona con engranes *chevron* o helicoidales dobles

En 1906 el ingeniero y empresario alemán Friedrich Wilhelm Lorenz (1842-1924), especialista en la fabricación de maquinaria y equipos de mecanizado de engranajes, fabrica una talladora de engranajes capaz de mecanizar los dientes de una rueda de 6 m de diámetro, módulo 100 y una longitud del dentado de 1.5 m.

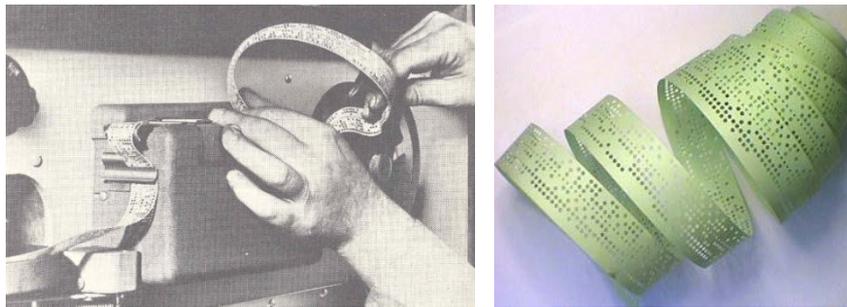
El final de la Primera Guerra Mundial es donde se asientan las bases de la tecnología CNC para el control de las máquinas-herramienta.

En principio, contrariamente a lo que se pudiera pensar, el control numérico de las máquinas-herramienta no fue concebido para mejorar los procesos de fabricación, sino para dar solución a problemas técnicos surgidos a consecuencia del diseño de piezas cada vez de una mayor complejidad, y por consiguiente, una mayor dificultad de mecanizado.

En 1942, la "Bendix Corporation" tuvo problemas con la fabricación de una leva tridimensional para el regulador de una bomba de inyección para motores de avión, el perfil de la cual era tan especial que era prácticamente imposible de realizar con máquinas controladas manualmente. La dificultad de la obtención de dicho perfil provenía de la necesidad de combinar los movimientos de la herramienta simultáneamente según varios ejes de coordenadas. Se acordó entonces confiar los cálculos a una máquina que de forma automatizada definiera un gran

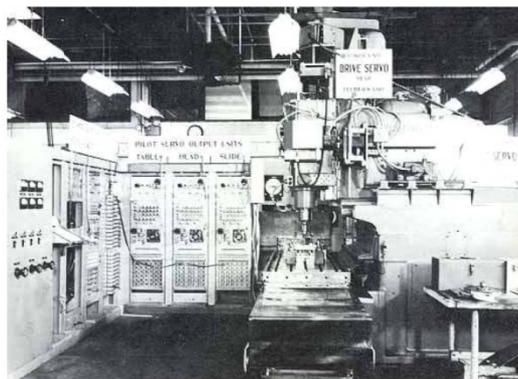
número de puntos de la trayectoria. Estos puntos son los que guiarían posteriormente a la herramienta.

En 1947, la idea de utilizar cintas perforadas como método de almacenamiento de datos mediante la realización de agujeros, permite a John Parsons desarrollar su sistema Digiton (Figura I.18). Las instrucciones a los dos ejes eran impuestas por la disposición de estos agujeros perforados.



**Figura I.18** Sistema Digiton. Colocación de la cinta en la unidad lectora de la máquina-herramienta

En esta época, bajo un contrato con la U.S. Air Force, Parsons Corporation se hace cargo del desarrollo de un sistema de fabricación flexible diseñado con la finalidad de maximizar la productividad y de alcanzar las exactitudes deseadas para pequeñas y medianas producciones. La Parsons Corporation a su vez subcontrata el desarrollo del sistema de control al Laboratorio de Servomecanismos del Massachusetts Institute of Technology (MIT). En 1952, gracias al apoyo del gobierno norteamericano, se desarrolla la máquina Cincinnati Hydro-Tel, Figura I.19, fresadora de 3 ejes controlada con tecnología digital, y capaz de mecanizar una superficie con la forma deseada.



**Figura I.19** Fresadora Cincinnati Hydro-Tel (1952)

En 1953, después de cinco años de la puesta a punto de esta tecnología digital, el MIT utiliza por primera vez el término "Numerical Control".

En 1959 se introdujo en el mercado la fresadora Milwaukee-Matic-II, primera máquina con un intercambiador de herramientas, Figura I.20.

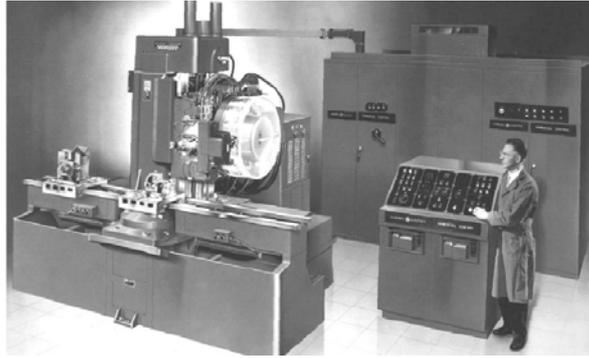


Figura I.20 Fresadora Milwaukee-Matic-II

En 1964, ya eran más de 35.000 máquinas de CN las que estaban en uso en todo Estados Unidos.

A inicios de los años 70 se comenzaron a usar computadoras en vez de las unidades controladoras en los sistemas de CN. Esto produjo la aparición del Control Numérico Computarizado (CNC) y del Control numérico Directo (CND). El CNC es un medio contenedor del sistema de CN para una máquina-herramienta simple al que se le integra una computadora, controlada por instrucciones almacenadas, con la finalidad de mejorar algunas o todas las funciones básicas del CN. El CND, en cambio, está directamente controlado por una computadora central.

Entre ambos sistemas, el CNC se convirtió en el más usado en los sistemas de fabricación, principalmente por su flexibilidad y por el bajo requerimiento de inversión. La preferencia al CNC en vez del CND se constató como resultado de la disponibilidad y reducción de los costos de los minicomputadores y microcomputadores.

Con el desarrollo de la microelectrónica, en 1973 Yoram Koren desarrolla a nivel mundial el primer controlador adaptativo computarizado en tiempo real para una fresadora, Figura I.21.



Figura I.21 Primera fresadora CNC utilizando para su control una computadora HP-2100 (McMaster Uni, 1973)

Sin embargo, fue durante los años 80 cuando se generaliza la aplicación de CNC debido al desarrollo de la electrónica y la informática, provocando una revolución en la cual, a día de hoy, aún estamos inmersos.

El siguiente gran avance se dio en 1975, cuando la empresa Pfauter (Alemania) introdujo la primera máquina CN para el tallado de engranes con fresa madre, Pfauter PE150, Figura I.22. En 1982 se lanzó al mercado una máquina de 6 ejes totales.



Figura I.22 Fresadora CNC para la fabricación de engranes con fresa madre

Los sistemas CNC también han sido la base para procesos posteriores, como el diseño asistido por ordenador (CAD) y la fabricación asistida por ordenador (CAM). Aunque conceptualmente son similares al sistema de tarjetas perforadas utilizadas en el mecanizado desde 1952, los sistemas CAD/CAM ofrecen a los fabricantes de hoy en día una flexibilidad casi absoluta tanto en el tema de diseño como en el de la fabricación, permitiendo el mecanizado de toda tipología de pieza, independientemente de su geometría.

### ***1.2.2 Contexto actual***

En los últimos años se ha consolidado un contexto propicio que ha permitido que la fabricación de estos componentes en máquinas de propósito general se plantee como un proceso totalmente factible. A continuación se exponen algunos de los factores que han posibilitado esta nueva situación,

- **Evolución de la máquina-herramienta: Cinemática, CNC y accionamientos**

Dentro de este punto cabe destacar la evolución de la máquina-herramienta, tanto desde el punto de vista de la cinemática como del control numérico (CNC) y de los accionamientos de la misma.

La cinemática de la máquina-herramienta es uno de los aspectos que recurre en una mejora continua. Las nuevas máquinas presentan cinemáticas que permiten el mecanizado continuo mediante la interpolación de cada vez un mayor número de ejes, permitiéndose así el mecanizado de piezas de una mayor complejidad.

También hay que destacar el nacimiento del concepto multitarea o *multitasking*, que se caracteriza por el hecho de que la máquina-herramienta deja de ser el factor limitante de la geometría a ser mecanizada.

El *multitasking* se podría resumir como “La combinación de operaciones/funciones/tareas de diferentes tecnologías en una máquina especialmente diseñada para ello”.

La implantación de este concepto en las máquinas-herramienta se empezó a llevar a cabo en la década de los 80, momento en el cual los sistemas productivos empezaron a focalizarse en la personalización de productos, llegándose con el cambio de siglo a la globalización y a la producción personalizada, como se representa en el gráfico de la Figura I.23. Esta nueva situación trajo como consecuencia la reducción del tamaño de los lotes a mecanizar y a flexibilización de los medios productivos.

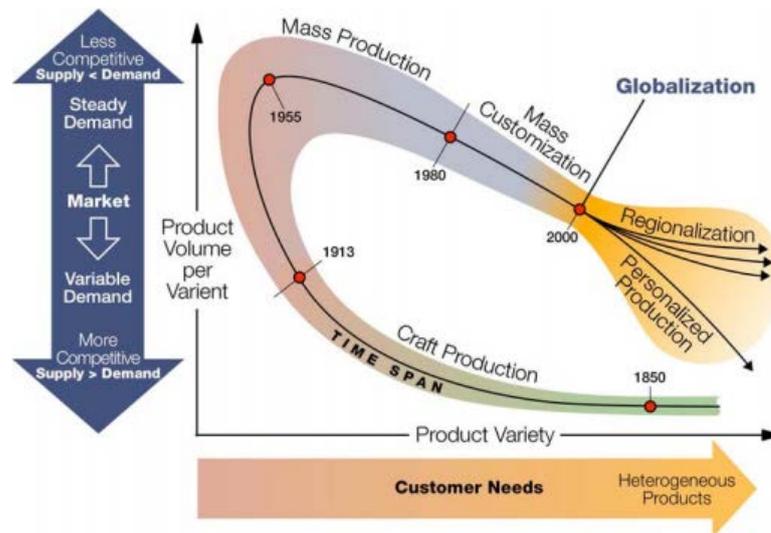


Figura I.23 El mercado y las necesidades de la sociedad son la guía hacia nuevos paradigmas [Yoram Koren, 2010]

Para dar respuesta a este cambio del paradigma productivo, los fabricantes de los medios productivos, entre los que se encuentran los fabricantes de máquina-herramienta, han tenido que evolucionar.

Esta evolución se centra, en el caso particular de los fabricantes de máquina-herramienta, en poner a disposición de los clientes todos aquellos medios que posibiliten la optimización del proceso de mecanizado, aportándose así una mayor flexibilidad y competitividad al mismo. Un claro ejemplo es el análisis de la viabilidad, en términos de fabricación, de una pieza que lleve operaciones de torneado y fresado en dos máquinas diferentes o en una sola máquina combinando ambas operaciones desde una óptica *multitasking*.

En el caso particular que atañe al propósito de este trabajo, que es el mecanizado de engranajes en máquinas de propósito general, el concepto *multitasking* aporta una ventaja tecnológica, ya que permite tornear y fresar la pieza en bruto en una misma máquina y tomando solo una única referencia en máquina.

Las máquinas específicas de tallado precisan de un “blank” previo al tallado de la geometría (Figura I.24), y este pre-mecanizado debe ser realizado en otra máquina. Por lo tanto, son necesarias al menos dos máquinas diferentes, y cada una de ellas con su respectivo sistema de referencia.



Figura I.24 Inserción del “blank” en máquinas específicas de tallado

La realización de toda la pieza en una misma máquina y bajo un mismo sistema de referencia tiene relación directa con una mejora de la precisión, al ser eliminado el cambio de referencias que se produce con cada cambio de máquina. Además, esto conlleva otra serie de ventajas a ser consideradas, como la eliminación de la transferencia de piezas entre máquinas, menores tiempos de ejecución por pieza, y por lo tanto un mayor rendimiento de los sistemas productivos.

En los últimos años están apareciendo máquinas *multitasking* que combinan las operaciones por arranque de viruta comunes (fresado y torneado) con otros procesos de mecanizado no tan convencionales, como pueden ser el láser y el rectificado.

Por ejemplo, la energía de un haz láser puede ser utilizada para producir un calentamiento rápido y focalizado en una determinada zona por indicaciones técnicas, mejorándose así las propiedades mecánicas superficiales de la misma. En la Figura I.25 puede observarse una aplicación de templado de dientes de un engrane.

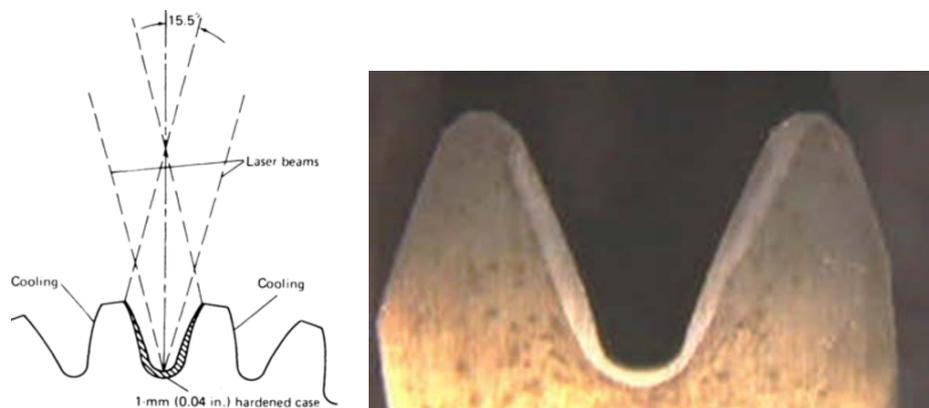


Figura I.25 Templado de dientes de engrane [ASM, 1991]

Por otro lado, el rectificado es un proceso de mecanizado que suele emplazarse tras el tratamiento térmico. Mediante este proceso lo que se pretende es eliminar las distorsiones producidas en el tratamiento térmico, obteniéndose así un producto con forma y dimensiones exactas, con calidades superficiales no alcanzables mediante fresado.

La irrupción de los motores de par o torque en 2003 ha facilitado la resolución cinemática y de transformación de las máquinas *multitasking*.

Este tipo de motores transmiten la potencia de forma directa a los elementos de máquina. Acoplar directamente la carga al rotor elimina la necesidad de elementos de transmisión tales como cajas de engranajes, correas de transmisión, reductores y accionamientos sinfín-corona, eliminándose así las posibles derivas, elasticidades y holguras. Además, al contrario que lo que ocurre en los motores con escobillas, no hay contacto entre rotor y estator, por lo que no se produce ningún desgaste mecánico.

La eliminación de todas estas problemáticas del sistema mejora el comportamiento del mismo, dotándole de una excelente fiabilidad y de un alargamiento de la vida útil.

En la actualidad, estos motores son los que se encuentra en la mayoría de los ejes rotativos de las diferentes máquinas, independientemente de la cinemática.

El desarrollo del CNC y accionamientos cada vez más potentes también es una parte esencial de esta ecuación. Esto además se ve fuertemente favorecido por la evolución que están teniendo también los sistemas de medida electrónicos presentes en máquina, como encoders y reglas ópticas, cada vez de una mayor precisión.

La función principal del CNC sigue siendo la regulación de la posición de cada uno de los ejes de la máquina, mediante el control de los accionamientos, para así obtener altas prestaciones de precisión y velocidad con una mayor capacidad de carga. Esta función no ha cambiado desde el nacimiento de los mismos, pero en la actualidad estos CNC presentan una amplia gama de funciones que podría definirse como innovadoras, tales como:

- Interface hombre-máquina cada vez más sencilla que aporta documentación continua y exhaustiva del proceso de mecanizado.

La evolución de estos interfaces de usuario contribuye en una programación más rápida y una operación más eficiente

- Posibilidad de poder trabajar con diferentes canales de comunicación con los accionamientos de las máquinas, lo que permite tener un mayor número de ejes controlados y funcionando en paralelo con programas diferentes
- Funciones mejoradas para 5 ejes, *multitasking*, diagnóstico remoto, etc.
- Incorporación de ciclos tecnológicos específicos dentro del mimo control, que permiten desde trabajar con diferentes tecnologías a la obtención de una mayor calidad superficial de la geometría programada
- Posibilidad de integrar sistemas de control de colisiones con objeto de controlar posibles programaciones deficientes de las máquinas

En el mecanizado, más importante que el concepto de precisión es el de la repetibilidad. La precisión de la máquina-herramienta se caracteriza por la capacidad de la máquina de producir piezas de la forma y dimensiones requeridas, esto es conseguir las tolerancias requeridas y la calidad superficial deseadas. Por lo tanto, las exigencias de precisión de las máquinas-herramienta son resultado de la precisión requerida de los componentes fabricados sobre la misma [Marañón, 2013]. En cambio, la repetibilidad de la máquina-herramienta es el error entre un número de tentativas de mover la máquina a una determinada posición para unas determinadas condiciones a lo largo de periodos dilatados en el tiempo. La repetibilidad, de manera general, se suele considerar como el parámetro más importante de una máquina CNC. A menudo, lo que se hace es trazar un mapa de los errores y luego compensarlos.

La evolución de los sistemas de medida incorporados en máquina, con precisiones y resoluciones cada vez más estrechas, contribuyen de manera directa en una mejora de la repetibilidad de la misma, debido a que estos sistemas son los encargados de dar la posición y velocidad real de los ejes de la máquina. Aunque existen diferentes sistemas de medida (ópticos, magnéticos,...) en la actualidad los más utilizados son las reglas ópticas para las medidas lineales y los encoders para las medidas angulares y velocidades. En procesos en los que se precisa de una mayor control de la cadena cinemática pueden ser utilizados sistemas de medida redundantes (regla óptica + encoder).

Otras acciones que pueden ser implementadas para mejorar el parámetro de repetibilidad es reducir la fricción estática y variantes termales.

○ Desarrollo y evolución de los programas informáticos para programación y simulación de trayectorias de mecanizado

La evolución de los software CAD/CAM en los últimos años ha sido considerable.

La fabricación asistida por ordenador (CAM) comúnmente se refiere al uso del control numérico, que son las aplicaciones de software para crear instrucciones detalladas (código G) que lleven a las herramientas de unidad de control numérico a la fabricación de piezas.

Estos sistemas permiten la planificación, gestión y control de las operaciones de una planta de fabricación mediante una interfaz directa o indirecta entre el sistema informático y los recursos de producción. En la Figura I.26, se muestra qué tipo de información es necesaria introducir en un software de CAM para realizar la correcta programación de las diferentes trayectorias de mecanizado.

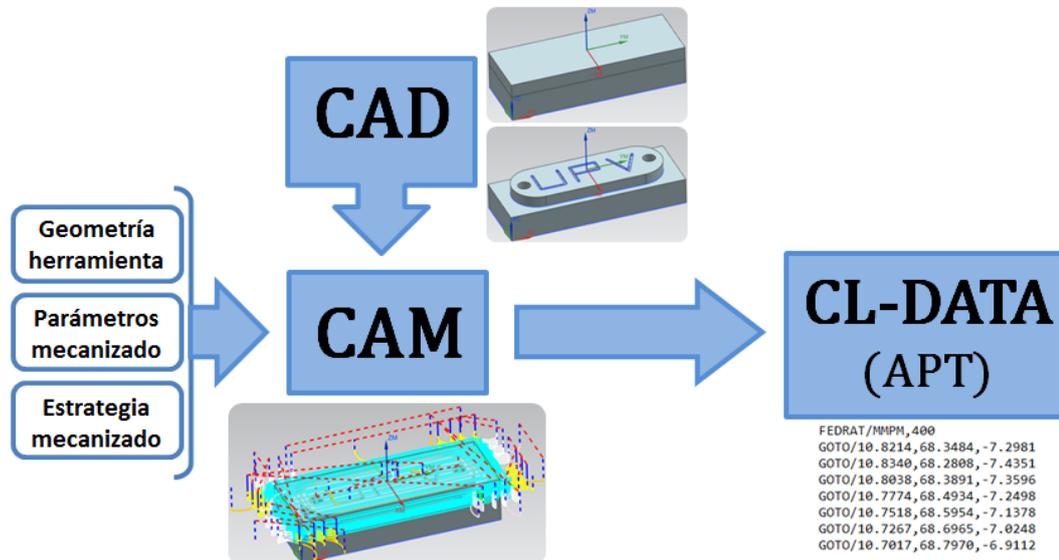


Figura I.26 Datos de entrada de un software CAM

Es por esta razón que estos sistemas tienen cada vez una mayor presencia en entornos productivos, vinculando de una manera directa la producción de piezas de una alta calidad a las capacidades de los mismos.

En un lenguaje más amigable, el software CAM lo que permite es la obtención y optimización de estrategias de mecanizado sobre cualquier geometría que se tenga previamente en CAD, y dando al usuario del mismo la posibilidad de trastear con cada uno de los parámetros que intervienen en el mecanizado. El usuario del mismo tiene el control absoluto del proceso de mecanizado.

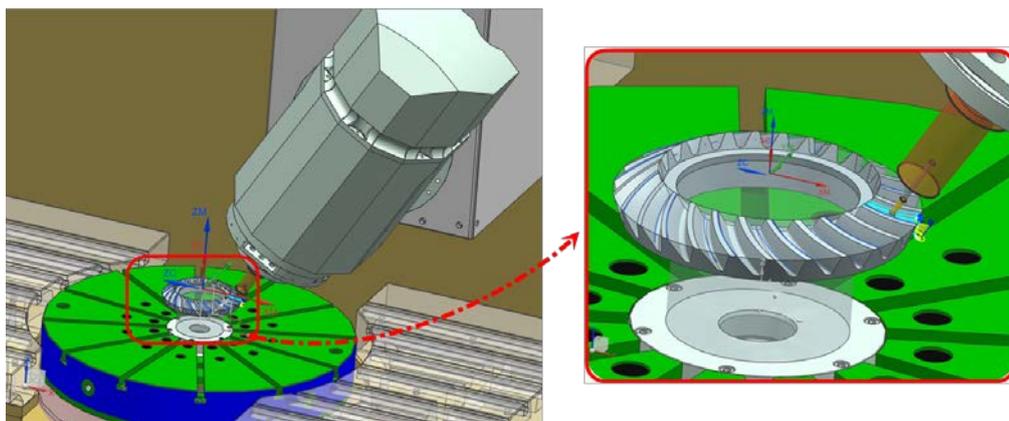
Los software CAM actuales incorporan, además de lo recientemente comentado, la verificación de los programas generados, detentándose así posibles colisiones.

Los programas CNC generados mediante CAM suelen ser largos y complejos para asegurar una correcta ejecución en máquina. Además, lo más común cuando se generan trayectorias de mecanizado es no tener en cuenta los amarres (utillajes) u otros dispositivos que están presentes durante el mecanizado.

El no tener en cuenta la presencia de estos componentes en la generación de trayectorias de mecanizado puede tener consecuencias catastróficas, y más teniendo en cuenta que en la mayoría de los centros de mecanizado el accionamiento principal es un electrohusillo, componente de elevada sensibilidad a colisiones debido a la incorporación de rodamientos de bolas cerámicas.

La utilización de sistemas de verificación virtual de trayectorias se utiliza cada vez más porque reducen el tiempo de validación y no requieren del empleo de la máquina real. El resultado de su aplicación depende de la calidad del “entorno simulado” construido. Aunque existen software dedicados en exclusividad a la simulación y verificación de las estrategias de mecanizado, detectándose así posibles colisiones, como es el caso particular de Vericut®, los nuevos software CAD/CAM ya incorporan esta verificación.

La integración de esta función de verificación dentro del mismo software CAM en el que han sido programadas y optimizadas las diferentes estrategias de mecanizado tiene ciertas ventajas, como la simplicidad de manejo, ya que solo es necesario conocer el funcionamiento de un solo software, y el ahorro económico que conlleva, al ser necesaria una única licencia de software. En la Figura I.27 se puede observar una simulación del mecanizado de un engranaje dentro del entorno CAM del software Siemens NX.



**Figura I.27** Simulación mecanizado engranaje en entorno Siemens NX

Es importante destacar que el software de verificación de programas, que muchos software CAM ya incorporan como módulo dentro del mismo software, solo sirve para la verificación geométrica de las trayectorias, es decir:

- Detectan colisiones de herramienta-pieza, herramienta-utillaje y herramienta-máquina. También son detectadas zonas no correctamente mecanizadas, trayectorias de mecanizado incorrectas, etc.
- No detectan desgastes de herramienta, roturas de las mismas, o problemas originados por una mala elección de las condiciones de corte

La simulación representa un proceso idílico, donde las condiciones de corte ( $V_c$ ,  $V_f$ ,  $a_p$ ,  $a_e$ ,...) pueden ser cualesquiera y la herramienta ni se desgasta ni rompe.

Destacar que, aunque en la simulación estos parámetros no son detectados, los controles numéricos de las máquinas, de manera directa o indirecta, sí que pueden ser capaces de detectarlos gracias a un control exhaustivo de la potencia a lo largo del proceso de mecanizado. Una variación progresiva en el consumo de una herramienta significaría el desgaste de la misma, y una rotura sería fácilmente detectable al hacerse el consumo de potencia 0.

Por ejemplo, el equipo de monitorización de potencia Marposs permite una supervisión continuada de todas las variaciones en las condiciones de corte y arranque de material. Además, produce muchos beneficios, como la identificación del desgaste de la herramienta, rotura o avería, y la detección de una dimensión excesiva de la pieza. Este equipo es fácilmente integrable en máquina.

Una vez realizado el programa de mecanizado con un determinado software CAM, y verificado su correcto funcionamiento gracias a la simulación de cada una de las estrategias, se necesita pasar el programa generado de manera genérica a una máquina específica.

Aunque esto en un principio parece un hecho banal, es una de cosas de mayor relevancia por ser el paso previo al mecanizado en máquina. Para convertir la información generada a partir de las estrategias de mecanizado en un programa CNC para una máquina específica, es necesario el postprocesado de este archivo mediante la utilización de un postprocesador.

En el caso particular de las máquinas CNC en el campo de la producción, un postprocesador sirve para convertir un programa independiente de la máquina, que describe los pasos de fabricación de una pieza, en un formato dependiente de la máquina. En otras palabras, el postprocesador es el programa encargado de transformar los resultados generados en el software CAM en un nuevo formato capaz de ser leído por la máquina. Es una especie de “traductor” entre el software CAM y el lenguaje máquina.

El postprocesador es un módulo más dentro de los sistemas CAM, pero es el único que debe estar personalizado para cada máquina. Se puede afirmar que cada máquina precisa de un postprocesador especial, adaptado a la misma.

Para la programación de un postprocesador, es necesario conocer e introducir:

- la cinemática de la máquina

Cada máquina tiene una determinada configuración.

Anteriormente, las máquinas podían ser divididas en cuatro categorías: horizontales o verticales, y tornos o fresadoras, pero en la actualidad las máquinas son desarrolladas en todas las direcciones. Con el nacimiento del concepto *multitasking*, los centros de torneado tienen hoy capacidad de fresado y los centros de mecanizado son capaces de tornerar.

El desarrollo de los sistemas CAM ha generalizado el uso de las máquinas 5 ejes, pero los ejes de una máquina no tienen por qué corresponder con los de otra.

Un mismo mecanizado puede ser realizado en dos máquinas diferentes, pero en cada una de ellas mediante la interpolación de ejes diferentes. Un claro ejemplo se muestra en la Figura I.28, donde se observan las distintas cinemáticas presentes en los dos modelos más usuales de la empresa Ibarmia. La serie Z corresponde a centros de mecanizado de mesa fija y columna móvil, y la serie T corresponde a centros de mecanizado con mesa y columna móvil.



Figura I.28 Cinemáticas serie Z y serie T de Ibarmia S.L.U

Una cinemática de máquina diferente se traduce directamente en un código máquina diferente. Esto significa que el mecanizado de una misma pieza en dos máquinas con distintas cinemáticas se realizaría con códigos máquina diferentes.

He ahí la misión del postprocesador, ya que aunque las operaciones de mecanizado son las mismas, el programa generado tras el postprocesado para cada una de ellas sería diferente.

▪ Tipo de control CNC

Es frecuente encontrar en un mismo taller máquinas equipadas con diferentes controles numéricos, que aunque compartan un mismo principio de operación difieren de manera notable en la interface hombre-máquina.

Los diferentes controles numéricos existentes en el mercado (Heidenhain, Siemens, Fanuc, Fagor,...) comparten cierta nomenclatura en la programación, ya que todos ellos se basan en el código ISO (CÓDIGO G), pero difieren en un gran porcentaje de la misma. Esta disparidad en la programación se debe a que, en un principio, solo el 20% del código utilizado por cada uno de los diferentes proveedores debe ser código ISO.

También suele haber una cierta uniformidad en la programación de algunas de las funciones auxiliares (funciones M), funciones que dependen, en un principio, del fabricante de la máquina.

Estas funciones M producen distintas acciones en la máquina, por ejemplo, arrancar/detener el husillo o arrancar/detener el suministro de refrigerante.

Además, los diferentes controles presentan cierta variabilidad en la introducción de los diferentes bloques, ya que en algunos de ellos es obligatoria la numeración de los mismos. Otro campo en donde suele haber cierta variabilidad es en la llamada a la herramienta, ya que cada fabricante presenta una programación diferente.

En la Figura I.29, se esquematiza de la manera más concisa posible, las diferentes entradas que se precisan para una correcta programación de un postprocesador.

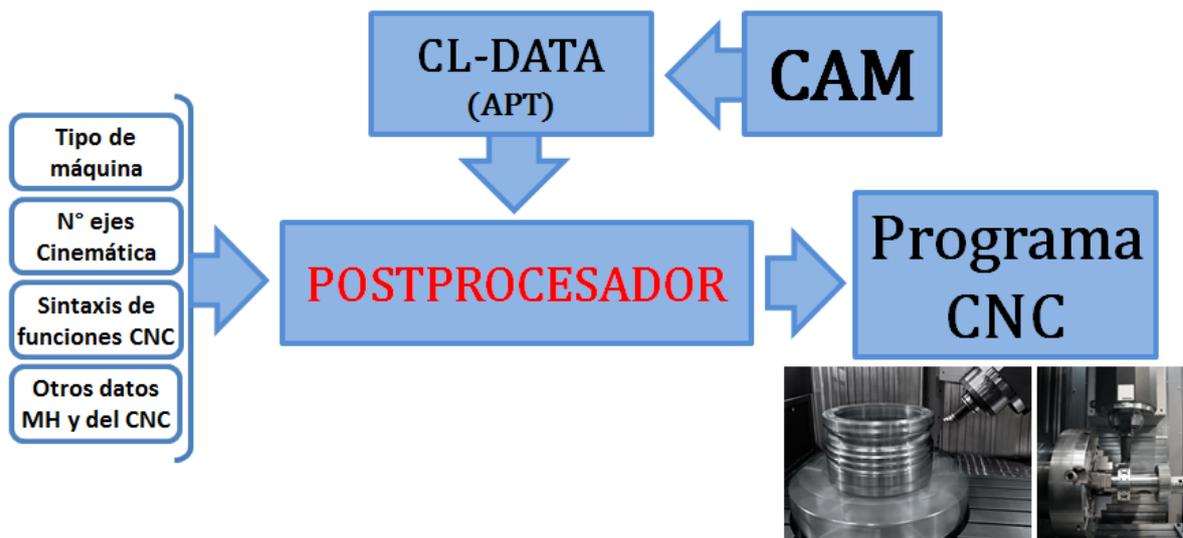


Figura I.29 Entradas de las que precisa un postprocesador

Tener un postprocesador depurado asegura una simulación REAL del mecanizado en el entorno CAM, y por lo tanto asegura un mecanizado limpio, sin colisiones.

Es necesario considerar que una colisión, además de los daños materiales que puede ocasionar, tanto en pieza como en la propia máquina, conlleva tener la máquina en estado no productivo hasta que esta es reparada, con los costes adicionales que esto acarrea.

○ **Uso de herramienta de corte estándar**

En líneas generales, se puede afirmar que una fresa de hoy en día mecaniza con una tasa de arranque superior a 10 veces a la de una de hace 20 años. Esto se debe a que las herramientas de corte estándar presentan un desarrollo continuo, atendiendo a su material base, geometría y recubrimiento.

En lo que respecta al mecanizado de engranajes, la principal ventaja derivada de la utilización de herramientas estándar es la versatilidad, tanto en tamaño como en forma, de la geometría a ser mecanizada. Además, su uso también permite llevar a cabo modificaciones arbitrarias en el dentado (*tip relief, root relief, angular profile variance,...*), con la única finalidad de mejorar el contacto entre las superficies en contacto.

El uso de herramientas estándar también constituye una ventaja a tener en cuenta, como es la reducción tanto en coste como en los tiempos de entrega, parámetros que son de vital importancia en producción.

La reducción de los costes de adquisición de estas herramientas se debe principalmente al uso del término “estándar”, ya que son herramientas que podemos encontrar en cualquiera de los catálogos de los diferentes fabricantes de herramientas. La elevada existencia en el mercado de posibles proveedores de las mismas eleva la oferta, y esto conlleva a una moderación en el coste de adquisición de las mismas.

Cualquiera de los fabricantes de herramienta estándar se compromete a que su producto sea recepcionado en un plazo de 24-48 horas como máximo, lo que asegura un suministro flexible, rápido y fiable.

En el caso particular de las herramientas utilizadas en las máquinas especiales (fresas madre, talladores, plato de cuchillas, etc.) las herramientas a utilizar las suele suministrar el mismo proveedor de la máquina-herramienta. Aunque existen otros fabricantes en el mercado, la oferta es muy inferior a la encontrada para un producto estándar, lo que repercute directamente en el coste de adquisición.

En relación a los tiempos de entrega, los plazos para las herramientas utilizadas en las máquinas específicas son mucho más elevados, lo que obliga a tener una rigurosa planificación.

Como dato a ser considerado, un fabricante de herramientas, como es el caso particular de Sandvik, estima el plazo de entrega de una fresa madre (*hob*) en 8-12 semanas.

o **Nuevos sistemas de amarre/utillaje**

En la actualidad existe una gran oferta en sistemas de amarre/utillaje.

Característica común de los diferentes sistemas presentes en el mercado, es la de ofrecer un aumento de la producción a la par que se consigue un producto de elevada calidad. Algunos de estos nuevos sistemas son presentados a continuación:

**Sistemas de “punto cero”** (Figura I.30)

Principales beneficios:

- Reducción drástica de los tiempos de preparación y de tiempos improductivos en máquina

También se ven reducidos los tiempos de cambio de pieza, principalmente porque pueden ser preparadas las piezas a mecanizar mientras la máquina se encuentra trabajando

- Posicionamiento y sujeción de las piezas en un simple paso. Esto conlleva asociado un aumento de la precisión
- Versatilidad. Cambio de mordazas o elementos de fijación de unas máquinas a otras, o dentro de una misma máquina, de forma fácil y rápida



**Figura I.30** Sistema de punto cero MNG de WNT [WNT, 2016]

**Sistemas Lang** – Sujeción de pieza con mordisco previo (Makro-Grip®) (Figura I.31)

Principales beneficios:

- Acceso ideal para piezas que requieran de un mecanizado por 5 caras

El amarre solo precisa de un sobre material de 3mm, por lo que los esfuerzos generados serán pequeños, evitándose así la aparición de deformaciones

- Excelente capacidad de sujeción, lo que conlleva a una reducción de las vibraciones. La reducción de las vibraciones produce un mejor acabado y un aumento de la vida útil de las herramientas
- La forma particular de los dientes de retención permite repetibilidades de  $\sim 0.01\text{mm}$ . La pieza se puede quitar y poner repitiendo la posición

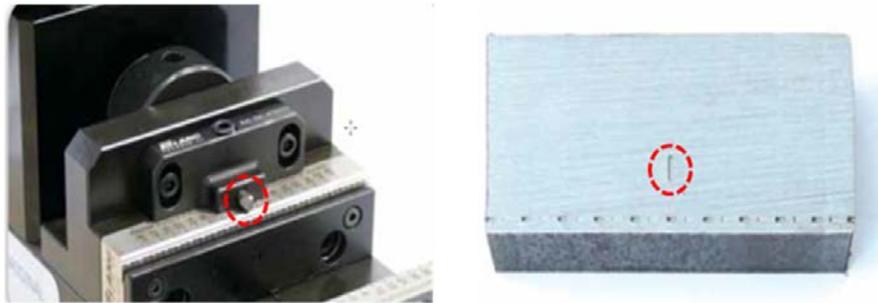


Figura I.31 Sujeción de pieza con mordisco previo [LANG TECH., 2015]

#### Sistemas magnéticos (Figura I.32)

Principales beneficios:

- Acceso ideal para piezas que requieran de un mecanizado por 5 caras. Además no es preciso dejar un sobre material, por lo que se ahorra en material  
La capacidad de la máquina se ve aumentada en más de un 20%, y se reduce el número de atadas
- Es un sistema fácilmente ajustable para piezas largas e irregulares
- La uniformidad en las fuerzas generadas sobre la pieza evita la aparición de posibles deformaciones



Figura I.32 Sujeción de pieza en utillaje magnético

Tal es la factibilidad e interés de la fabricación de estos componentes en máquinas de propósito general que en las últimas ferias del sector su presencia ha sido cuantiosa, como se representa en la Figura I.33, superando en número a la de otros componentes de mayor complejidad y de elevado valor añadido, como son los *impellers*.



Figura I.33 Presencia de engranajes espirocónicos en las diferentes ferias del sector

### I.3. Objetivos

El trabajo presentado plantea el desarrollo de una metodología fiable y robusta para la realización de engranajes en máquinas multiteje de propósito general. De esta forma se pretende ampliar el conocimiento de este proceso de fabricación mediante la experimentación y modelización del mismo. El estudio desarrollado pretende mejorar el proceso de mecanizado de estos componentes mediante la optimización en la programación de cada una de las operaciones de mecanizado, y mediante la aplicación de un modelo que permite predecir la topografía superficial que va a ser generada para cada uno de los diferentes flancos en función de los parámetros de mecanizado utilizados. De forma resumida, los objetivos planteados se pueden especificar en los siguientes puntos:

- Desarrollo de una metodología fiable e integral para el mecanizado de engranajes en máquinas de propósito general multiteje
- Desarrollo de diferentes software de diseño de engranajes en función de la tipología del mismo. Integración de los software como API dentro del entorno CAD/CAM. Esto conlleva una mayor simplicidad de uso y un ahorro en los costes, al ser precisa una única licencia

- Optimización de las estrategias de mecanizado, tanto para la operación de desbaste como de acabado. Para la operación de desbaste serán evaluados parámetros tales como el desgaste de la herramienta y el tiempo de mecanizado. En la operación de acabado, en cambio, serán evaluados parámetros tales como la calidad superficial obtenida, la repetibilidad del proceso en máquina, y el tiempo de mecanizado de cada una de las estrategias
- Validación de la turbina de aire como tecnología de mecanizado, principalmente para la operación de acabado. Alto par y velocidad bajo carga variable. Fácil programación y adaptable a cualquier tipología de máquina
- Obtención de parámetros y estrategias de mecanizado capaces de optimizar el mecanizado de engranajes en máquinas de propósito general multieje. Evaluación de mecanizados en 5 ejes continuos y en 3+2 ejes (diferente comportamiento de los ejes rotativos). Evaluación de la tecnología *multitasking*
- Desarrollo y validación de un modelo que permita estimar la topografía superficial que va a ser obtenida tras el proceso de mecanizado en 5 ejes del engranaje, en función de parámetros tales como la inclinación y la orientación de la fresa, los parámetros geométricos de corte, y las velocidades de avance y giro de la herramienta. La tipología de herramienta es una fresa de punta esférica

Con esta memoria de tesis doctoral se espera aportar una visión global del mecanizado de engranajes en máquinas de propósito general multieje, gracias al desarrollo de una metodología que hace de la fabricación de estos componentes un proceso totalmente factible.

## I.4. Organización de la memoria

El trabajo presentado ha sido organizado en una serie de capítulos que se describen a continuación.

En el **Capítulo I**, tras una breve introducción al tema destacando la importancia de estos componentes y sus vastas aplicaciones, se realiza una descripción tanto del contexto histórico como del actual, el cual ha propiciado la fabricación de estos componentes en máquinas de propósito general multieje. En este capítulo se encuadra el proceso dentro el sector industrial actual y se detallan también los objetivos del presente trabajo y la estructura del documento.

Por su parte, en el **Capítulo II** se realiza un estudio del estado del arte actual.

En primer lugar, son presentados los diferentes procedimientos de fabricación de engranajes existentes, tanto para las tipologías cilíndricas como cónicas. Se presta una mayor atención a los procedimientos utilizados para el tallado de los engranajes espirocónicos. En segundo lugar, gracias a la lectura de numerosa bibliografía, se presenta un resumen de la evolución del mecanizado de estos componentes en máquinas de propósito general multieje. A su vez, son presentadas las diferentes tipologías de máquina presentes en el mercado, con sus respectivas cinemáticas, y el por qué del contexto propicio para la fabricación de los engranajes en estas máquinas. También se lleva a cabo un estudio de los distintos procedimientos actuales de diseño y generación de los engranajes para esta tipología de máquina. Por último, en este capítulo se presenta la evolución de los métodos de estimación y predicción de la topografía superficial para fresado en 5 ejes con fresa de punta esférica.

En el **Capítulo III** se presenta la metodología desarrollada para cada uno de los diferentes casos de estudio realizados a lo largo del trabajo. En primer lugar, son presentados los software desarrollados para la generación del sólido 3D del engranaje, dependiendo de la tipología de este, y después son presentadas las peculiaridades de las distintas estrategias de mecanizado programadas sobre este sólido 3D, tanto para desbaste como para acabado. También son expuestas las diferentes tipologías de engranajes realizados, y las diferentes cinemáticas de máquina en donde estos han sido mecanizados. Para finalizar este capítulo, son descritos los diferentes equipos con los que ha sido realizado el control de la calidad sobre la pieza acabada, y los parámetros escogidos para cada una de las mediciones. Se realiza un control dimensional y superficial.

El **Capítulo IV** está destinado a la exposición de cada uno de los diferentes casos de estudio realizados y evaluados a lo largo de este trabajo.

En el primero de los casos, se presenta una evaluación de la factibilidad del mecanizado de un engranaje cilíndrico-helicoidal de pequeño módulo en una máquina de propósito general multieje, siendo las tecnologías clásicas las más idóneas para el mecanizado de este tipo de tipología cuando los módulos son tan reducidos.

El segundo de los casos, permite evaluar y optimizar el mecanizado de un engranaje espirocónico de elevado módulo, mediante la evaluación de diferentes estrategias y parámetros de corte. También son verificadas las ventajas de la tecnología *multitasking*. Además, en este estudio se ha testeado una nueva tecnología de acabado de los dientes, como es una turbina de aire, gracias a la incorporación de herramientas multi-diente y de rectificado.

En el último de los casos evaluados, la fabricación de un nuevo engranaje espirocónico permite la validación de un modelo predictivo para la obtención de la topografía superficial generada tras un mecanizado en 5 ejes.

En último lugar, en el **Capítulo V** se presentan las principales aportaciones derivadas del trabajo realizado, así como las posibles líneas futuras que han surgido de este trabajo que permitirán profundizar aún más en el conocimiento de este proceso.



---

## **Capítulo II. Estado del arte**

---





## Capítulo II. Estado del arte

En este capítulo se realiza un resumen del estado del arte actual tanto de los procedimientos para la fabricación de engranajes cilíndricos como para la de los cónicos, dentro de los cuáles la atención ha recaído en los espirocónicos. Por otro lado, se presenta un resumen de la evolución del mecanizado de esta clase de componentes en máquinas de propósito general multieje, en el que son presentadas las diferentes tipologías de máquina existentes, y el por qué del contexto propicio en el que nos encontramos. También se lleva a cabo un estudio de los procedimientos actuales de diseño y generación de los engranajes en esta tipología de máquina. Por último, se presenta la evolución de los métodos de estimación y predicción de la topografía superficial para fresado 5 ejes.

### II.1. Procedimientos para la fabricación de engranajes

La fabricación de engranajes se puede dividir en dos grandes categorías, como son la fabricación sin arranque de viruta y la fabricación mediante arranque de viruta, como se detalla en la Figura II.1,

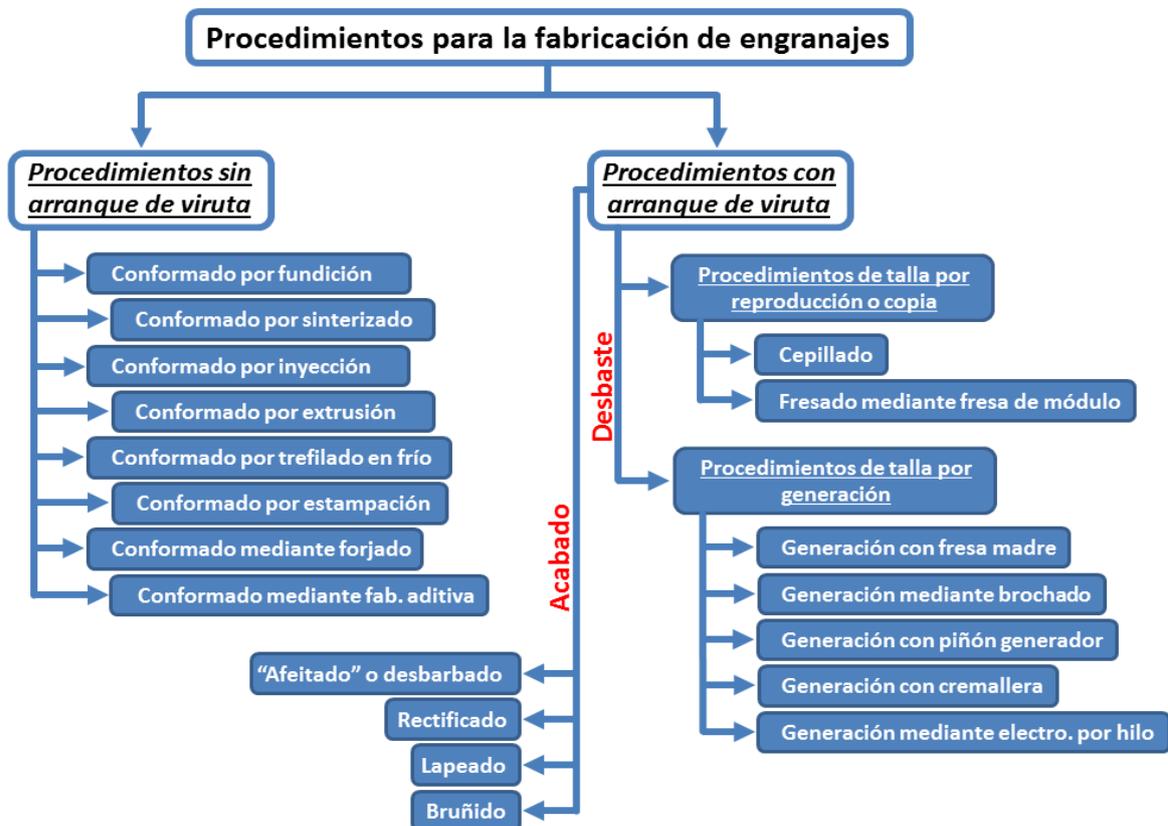


Figura II.1 Clasificación de los procedimientos para fabricar engranajes

### II.1.1 Fabricación de engranajes sin arranque de viruta

Dentro de esta categoría cabe destacar que los dientes del engranaje son conformados todos al mismo tiempo a partir de un molde o matriz en el que previamente ha sido mecanizada la forma exacta de los dientes a producir.

La precisión de los dientes depende enteramente de la calidad del molde o matriz en la cual han sido conformados, y por lo general esta es menor a la alcanzable mediante los procesos vinculados a la otra categoría de fabricación, como es por arranque de viruta.

La mayoría de estos métodos conlleva un alto coste en herramientas, por lo que su uso va vinculado a la fabricación de lotes de tamaño elevado.

Las diversas técnicas que podemos englobar dentro de esta categoría se detallan a continuación:

- **Conformado por fundición**

El moldeo en arena, el moldeo por compresión y el moldeo a la cera perdida son los procesos de colada más propicios para la obtención de engranajes. Sus principales ventajas se exponen en la Figura II.2,



Figura II.2 Clasificación y ventajas de los procedimientos de conformado por fundición

- **Moldeo en arena**

Estos engranajes se caracterizan principalmente por su mal acabado superficial y una mala precisión dimensional, lo que hace que sean ruidosos y adecuados solo para aplicaciones no críticas. El coste de herramientas es razonable.

Los engranajes conformados en arena se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, como juguetes, pequeños aparatos, en la caja de cambio de montacargas, etc.

Los materiales que pueden ser colados en un molde de arena son principalmente el acero, el bronce, el latón y los materiales cerámicos.

- Moldeo por compresión

Estos engranajes se caracterizan principalmente por un mejor acabado superficial y una buena precisión dimensional, además de por no ser apropiados para trabajar a elevadas velocidades o elevadas cargas.

Este proceso es adecuado para producciones a gran escala, debido a que el coste de herramientas es elevado.

Los engranajes conformados en un molde por compresión se utilizan en instrumentos, cámaras, lavadoras, bombas de engranajes, en pequeños reductores de velocidad, etc.

Los materiales utilizados para fabricar estos engranajes son el zinc, el aluminio y el latón.

- Moldeo a la cera perdida

Estos engranajes se caracterizan principalmente por ser razonablemente precisos, dependiendo esta del patrón original utilizado.

El material del molde es refractario, lo que permite elevadas temperaturas de fusión de los materiales. Este proceso es aplicable a una amplia gama de materiales.

Los materiales utilizados para fabricar estos engranajes son el acero para herramientas, aceros para nitruración, monel y aleaciones de cobre de berilio. Este proceso se utiliza solo si ninguno de los procesos anteriores es adecuado, ya que el coste de producción es elevado.

En la Figura II.3 se plasma un engranaje obtenido mediante fundición.



Figura II.3 Engranaje obtenido mediante fundición

- Conformado por sinterizado o pulvimetalurgia

El sinterizado es el tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico o cerámico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, lo que hace incrementar la fuerza y la resistencia de la pieza debido a la creación de enlaces fuertes entre las diferentes partículas.

Este proceso de conformado permite seleccionar a medida las propiedades del material dependiendo del uso futuro que se le vaya a dar a este. La utilización del material es superior al 95%.

La precisión obtenida es similar a la obtenida mediante el moldeo por compresión, y no precisa de un mecanizado posterior.

Aunque permite el conformado de engranajes de una amplia gama de tipologías, es especialmente adecuado para engranajes de pequeño tamaño. Es un proceso económico para lotes de gran tamaño.

En la Figura II.4 se plasma un conjunto de engranajes obtenidos mediante sinterizado.



Figura II.4 Conjunto de engranajes obtenidos mediante sinterizado

○ **Conformado por inyección**

El moldeo por inyección se utiliza para hacer engranajes no metálicos en varios termoplásticos tales como nylon y poliacetal. Estos engranajes presentan una baja precisión en tamaños pequeños, pero a su vez presentan ciertas ventajas, como un bajo costo y la posibilidad de trabajar sin lubricación para bajas cargas.

Los engranajes conformados mediante moldeo por inyección se utilizan en cámaras, proyectores, limpiaparabrisas, velocímetros, lavadoras, etc.

Los materiales utilizados para fabricar estos engranajes son el nylon, el acetato de celulosa, poliestireno, poliamidas y fenólicos.

En la Figura II.5 se plasma unos engranajes obtenidos por inyección.



Figura II.5 Conjunto de engranajes obtenidos por inyección

○ **Conformado por extrusión**

El conformado por extrusión consiste en hacer pasar el material a través de varias matrices en donde la última de estas tiene la forma exacta del acabado final del engrane a fabricar. Como el material es desplazado por presión, la superficie del engranaje conformado es dura y tersa.

Los materiales que son comunmente extruidos son los metales no ferrosos tales como el aluminio y las aleaciones de cobre, bronce y latón.

El resultado obtenido mediante el conformado por extrusión, debido a que el material es desplazado por presión, es un producto de buen acabado superficial, libre de poros y con una elevada resistencia.

Las aplicaciones más comunes para esta tecnología de conformado son la obtención de ejes nervados huecos y estriados.

En la Figura II.6 se plasma el proceso y unos ejes nervados obtenidos por extrusión.

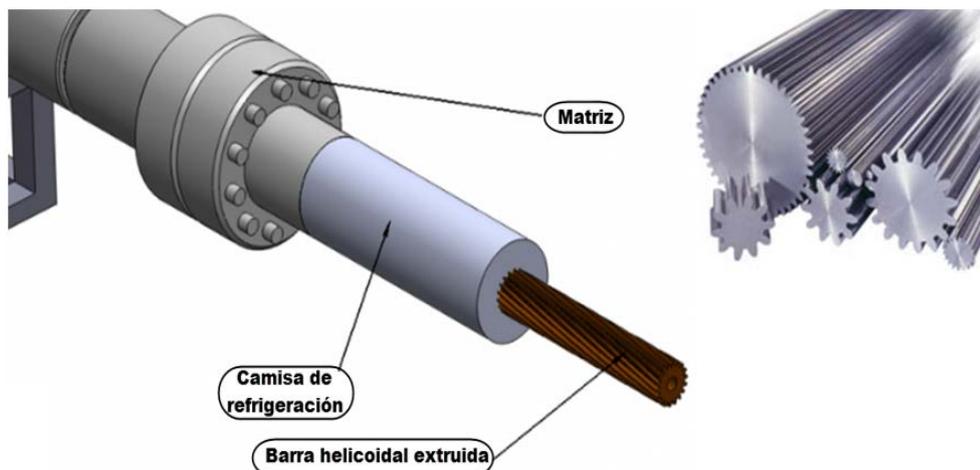


Figura II.6 Proceso y ejes nervados obtenidos mediante extrusión

○ **Conformado por trefilado en frío**

El conformado mediante trefilado en frío se basa en formar dientes en barras de acero estirándolas a través de matrices endurecidas. El trabajo en frío aumenta la resistencia y reduce la ductilidad. Las barras después son cortadas a las longitudes deseadas.

○ **Conformado por estampación**

La chapa puede ser estampada con formas de dientes , dando lugar así a engranajes de baja precisión, a bajo coste y en elevadas cantidades. El acabado superficial y la precisión de los mismos son pobres.

Los engranajes conformados mediante estampación son utilizados en juguetes y en mecanismos donde la velocidad requerida para los mismos sea baja.

Dentro de esta tecnología también se encuentra la **estampación de alta precisión**, que gracias a la utilización de matrices mecanizadas con tolerancias estrechas, permite la obtención de engranajes de elevada precisión y sin la existencia de rebabas.

Los engranajes conformados mediante esta tecnología son los utilizados mayoritariamente en la mecánica de los relojes, como se observa en la Figura II.7.



Figura II.7 Mecanismo mediante engranes conformados mediante estampación

○ **Conformado mediante forjado**

El conformado mediante forjado ha sido utilizado durante mucho tiempo en la fabricación de engranajes. Esto es particularmente cierto para la producción de los “blank” que serán posteriormente utilizados para el mecanizado de la forma final deseada.

Las piezas obtenidas mediante forja tienen las siguientes ventajas:

- Mejores propiedades mecánicas respecto a otros procesos

- Eliminación de defectos internos, por lo que el material se homogeneiza
- Reducción del tamaño del grano, debido a la temperatura de trabajo y la velocidad de deformación

Esta técnica también presenta ciertas desventajas, como:

- El producto obtenido no presenta una gran precisión ( $\pm 1$  mm). Por tanto luego precisará de operaciones de acabado
- Necesidad de series largas

Durante los últimos 35 años se han realizado considerables investigaciones y desarrollos dirigidos a producir engranajes *Near Net Shape* (NNS) mediante forjado de precisión. Hoy en día, mediante el uso de esta tecnología, es posible la obtención de engranajes ya terminados, exentos de procesos posteriores de acabado.

Los engranajes conformados mediante esta tecnología son comúnmente utilizados en automoción, en la industria aeroespacial, ferrocarril, sector energético y minero, etc.

En la Figura II.8 se plasma varios ejemplos de engranajes forjados.



Figura II.8 Engranajes conformados mediante forjado

#### ○ **Conformado mediante fabricación aditiva**

La fabricación aditiva es un proceso que consiste en unir materiales, normalmente capa a capa, para crear objetos a partir de datos 3D de un modelo, de forma opuesta a las metodologías de fabricación sustractiva.

- Selective Laser Melting (SLM)

SLM es un tecnología de fabricación aditiva que puede imprimir piezas metálicas en 3D. Un láser es el encargado de fundir el material en polvo metálico en los lugares específicos.

El proceso consiste en la fusión de capas sucesivas de polvo metálico. Un láser es el encargado de calentar las partículas de material en lugares específicos, obtenidos de un archivo CAD 3D, sobre un lecho de polvo metálico hasta que este es fundido completamente. A continuación, la máquina añadirá sucesivamente otro lecho de polvo por encima de la capa ya fundida, y así hasta terminar la pieza por completo. El proceso se esquematiza en la Figura II.9.

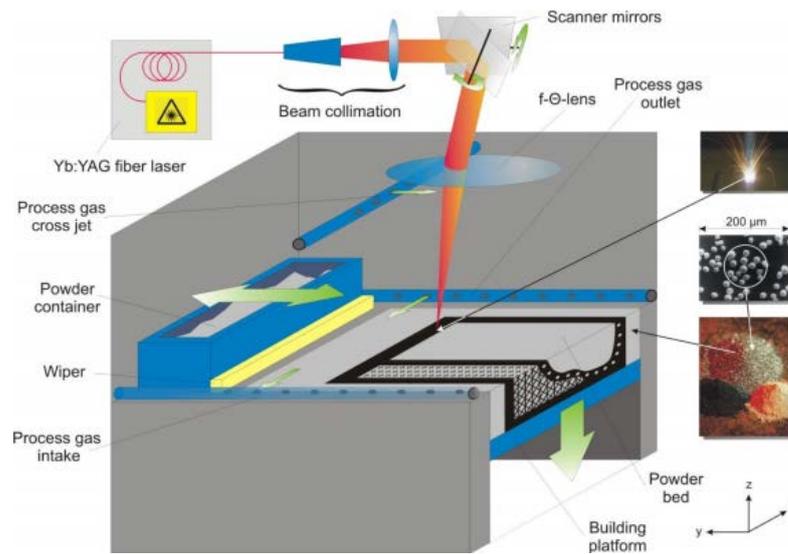
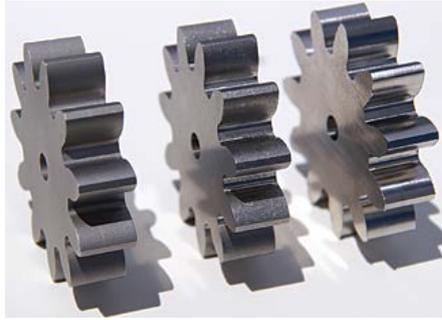


Figura II.9 Esquema simplificado proceso SLM [IK4\_LORTEK, 2013]

Las piezas obtenidas pueden poseer casi cualquier geometría y presentan excelentes propiedades.

La problemática que presenta esta tecnología es la obtención tanto de una elevada rugosidad superficial como de unas elevadas tensiones residuales. Es por esta razón que esta tecnología puede ser utilizada como una técnica NNP, y usar otra de las tecnologías de mecanizado, que serán vistas a continuación, para dotar al mismo de las especificaciones requeridas. El sobrematerial programado debería ser de unas 200µm, aunque este valor depende de la exactitud del proceso [Bouquet, 2014].

Toda tensión superficial debe eliminarse o, mejor aún, convertirse en una tensión de compresión. Ciertas técnicas, como el granallado (Figura II.10), pueden ser utilizadas para crear tensiones superficiales de compresión sobre la superficie.



**Figura II.10** Engranaje granallado

La tecnología SLM permite ahorrarse la etapa de desbaste, pero de momento es una tecnología cara debido principalmente al coste que conlleva la adquisición de la maquinaria.

Los materiales que pueden utilizarse en este proceso son principalmente las aleaciones cuproferrosas, aceros de herramienta, aceros inoxidable, aleaciones de titanio, aleaciones base níquel, aleaciones base cobalto y aluminio. SLM con 16MnCr5 y con otros aceros ricos en carbono es posible [Kempen, 2011] [Kempen, 2012], pero con aceros con altos contenidos en carbono hay que prestar una atención especial para evitar la aparición de grietas.

Una de las aplicaciones de esta tecnología es la producción de prototipos, y a partir del funcionamiento de los mismos pueden revisarse los modelos CAD, permitiendo introducir posibles mejoras.

- Laser Metal Deposition (LMD=LASER CLADDING)

El aporte de material mediante láser o láser cladding, es un proceso que utiliza la energía procedente de un haz láser para generar un baño fundido muy localizado en un material base o substrato. En este baño fundido se inyecta un material de aporte que puede encontrarse en forma de hilo o de polvo, generándose una capa de material que puede tener un espesor de entre 0.05mm y 2mm, y anchuras de hasta 5mm [Fallah, 2011]. Estas capas pueden superponerse unas con otras para generar todo tipo de geometrías, desde recubrimientos para protección de piezas críticas o incluso reparar zonas dañadas de elementos de alto valor. Por otro lado, es posible, mediante una estrategia y trayectorias premeditadas la sucesión de estas superposiciones de capas, para así fabricar piezas procedentes de un diseño CAD. Existen diferentes configuraciones de boquillas de aporte (Figura II.11),

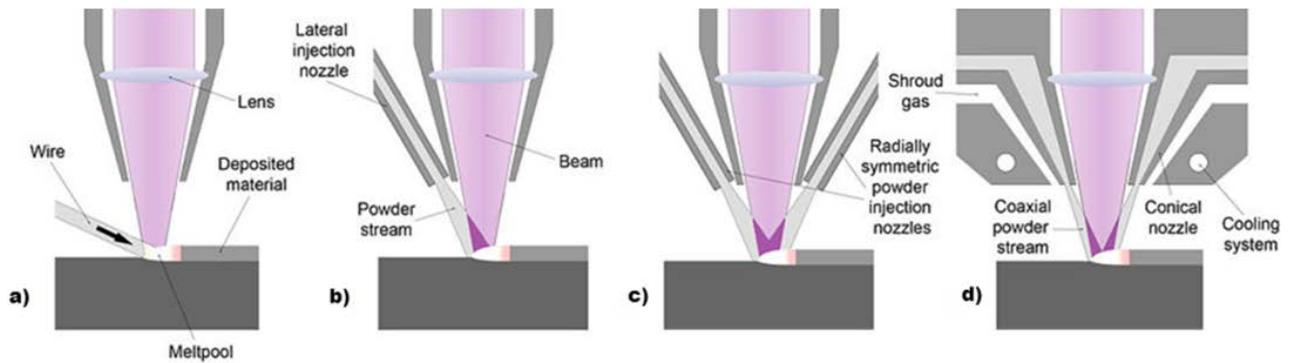


Figura II.11 Posibles configuraciones de las boquillas de láser cladding

Al igual que la tecnología de SLM, las piezas fabricadas mediante esta tecnología disponen de una alta rugosidad superficial, por lo que también puede ser utilizada como una técnica NNP, siendo necesaria alguna operación posterior de acabado con el fin de obtener así las especificaciones requeridas.

Además de la calidad del aporte, la baja dilución, la mínima distorsión térmica y la gran calidad superficial, es importante destacar que el uso de la tecnología láser permite un alto grado de automatización y facilita la integración del proceso en máquinas convencionales sin altos costes [Tabertero, 2013]. Todo esto hace que el aporte de material mediante láser sea un proceso versátil que ha sufrido desarrollos importantes desde su primera aplicación.

### II.1.2 Fabricación de engranajes con arranque de viruta

Los procedimientos de tallado de ruedas dentadas consisten en la utilización de una herramienta de corte para efectuar el tallado de los dientes de los engranajes a partir de un cilindro base.

Los procedimientos de producción de engranajes por talla se dividen, a su vez, en dos grandes grupos:

- Procedimientos de talla por reproducción o copia.
- Procedimientos de talla por generación.

#### **Procedimientos de talla por reproducción o copia**

En los procedimientos de tallado de ruedas dentadas por reproducción, el borde cortante de la herramienta es una copia exacta de cierta parte de ella (por ejemplo, del hueco entre dientes contiguos). Como consecuencia de ello, los métodos de talla por reproducción precisan de un número elevado de herramientas ya que, incluso para fabricar ruedas dentadas con el mismo

módulo, hace falta una herramienta para cada número de dientes, puesto que el hueco interdental varía.

A estas herramientas de corte se les denomina “cortadores conformadores” y, generalmente, el cortador tiene la forma exacta del hueco interdental. Cabe distinguir dos procedimientos, según la maquina herramienta utilizada:

- **Cepillado**

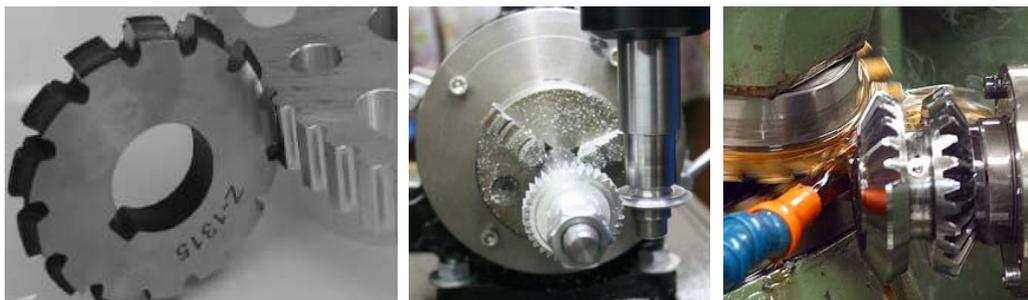
La herramienta, en la sección perpendicular a la dirección de su movimiento, tiene perfiles cortantes que se corresponden perfectamente con el contorno del hueco interdental del engranaje a tallar, Figura II.12. Aunque cada vez está más en desuso, actualmente se suele emplear para la realización de dientes no normalizados



Figura II.12 Tallado de un engranaje interior por cepillado

- **Fresado mediante fresa de módulo**

Es un método de gran difusión, similar a la talla por cepillado, pero aquí en vez de una cuchilla con forma determinada se utiliza como herramienta una fresa especial estandarizada (fresa de módulo), cuyos dientes tienen perfiles idénticos a la forma del hueco interdental que se persigue, Figura II.13. Al final de la operación de fresado de un diente, la fresa vuelve a su posición de partida y la pieza bruta gira un ángulo igual a  $1/2$  de vuelta para poder fresar el siguiente hueco.



**Figura II.13** Ejemplos de tallado con fresa de módulo

El elevado precio de una fresa de módulo, y la rapidez con la que se desgastan, obliga a recurrir a una cierta inexactitud en el tallado al emplear la misma fresa para ruedas con un  $n^\circ$  de dientes cercano a aquél para el que está diseñada la fresa.

Lo habitual es utilizar juegos de 8 fresas para cada módulo (en ocasiones también 15 ó 26 para una mayor exactitud), cada una de las cuales abarca cierto número de dientes, de forma que cada fresa se corresponde con el número menor de dientes de su serie, ya que al aumentar  $Z$  disminuye el hueco interdental, evitando de esta manera el peligro de “acuñamiento”.

Este método produce un tallado imperfecto del diente, que requiere ser corregido, y el cuál es aconsejable solo en producciones pequeñas.

### **Procedimientos de talla por generación**

En el caso de los procedimientos de ruedas dentadas por generación, la idea es que la herramienta de corte genere precisamente el perfil conjugado de sus dientes, de la misma forma que existiría un contacto entre perfiles si la rueda fabricada engranase con ella. El “punto de contacto” sería en el tallado el “punto de perfil generado”.

La cinemática del proceso la impone la máquina de tallado, equivalente al que sería el contacto entre perfiles.

Para los diferentes tipos de dentados a obtener, es necesario establecer movimientos relativos combinados entre pieza y herramienta.

La talla puede realizarse con una precisión elevadísima, indistintamente del número de dientes del engranaje, asegurándose así un funcionamiento perfecto y silencioso, aún a grandes velocidades.

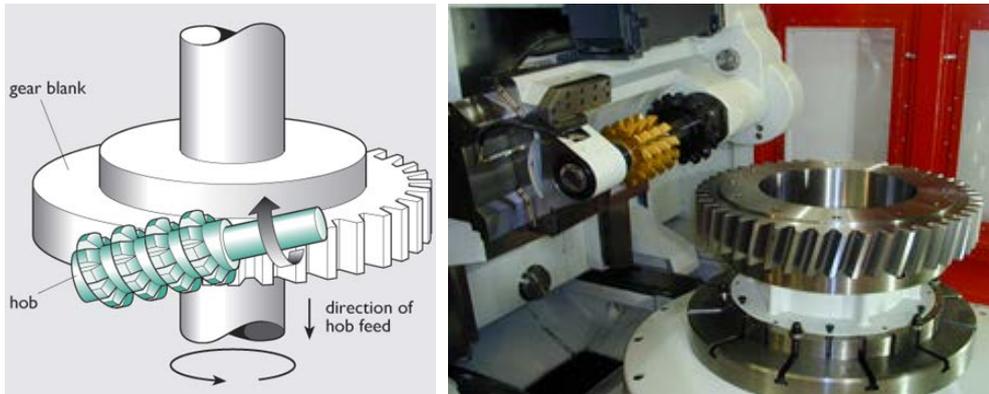
Existen diversas formas de lograr el perfil del diente: con un piñón generador, mediante tallado con fresa madre, por tallado con cremallera, etc. A continuación son expuestos cada uno de estos procedimientos,

- **Generación con fresa madre o hobbing**

- **Sistema Pfauter ó Rhenania**

- Según la descripción de Joseph Whitworth en su patente de 1835, la generación del dentado por fresado continuo se realiza mediante el empleo de una herramienta

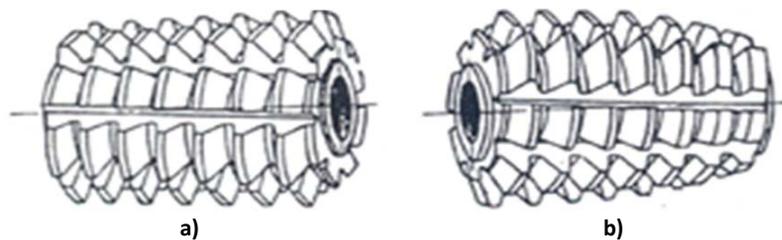
especial en forma de tornillo sinfín (fresa madre o *hob*), cuya sección longitudinal normal a la dirección de las espiras, tiene la forma aproximada de una cremallera capaz de engranar con todas las ruedas del mismo módulo aunque posean diferentes número de dientes. El *hob* y la pieza de trabajo giran en sincronía uno con el otro mientras la herramienta se mueve a lo largo de la pieza de trabajo, como se observa en la Figura II.14.



**Figura II.14** Sistema Pfauter o Rhenania

En el *hob* varias ranuras se disponen normales a la hélice, interrumpiendo la continuidad del filete, para que pueda cortar y expulsar al mismo tiempo las virutas. El dorso de los dientes que quedan así formados tienen los flancos destalonados, así como la punta (ángulo de inclinación).

Son utilizados dos tipos de fresas creadoras para el tallado: una de ellas es cilíndrica en toda su longitud (Figura II.15 a)), lo cual permite obtener el tallado del dentado en una sola pasada, y se usa para módulos pequeños. La otra es levemente tronco cónica (Figura II.15 b)), la cual permite un desbaste inicial que se va profundizando paulativamente, y por ello es utilizada para módulos y pasos más grandes.



**Figura II.15** Tipos de fresa madre: a) cilíndrica; b) Tronco cónica

El generado es el proceso más comúnmente utilizado en la industria para la fabricación de engranes rectos y helicoidales externos. Actualmente es el proceso más utilizado debido a que provee de una alta producción a una bajo coste, y a la introducción de continuas modificaciones en herramientas y maquinaria que

permiten incrementar tanto la velocidad de operación como la calidad de los engranes.

Entre las mejoras que se han ido incorporando a este proceso cabe destacar: el desarrollo y uso de aceros para herramienta más resistentes al desgaste y temperatura, el desarrollo de recubrimientos superficiales que incrementan la resistencia al desgaste y temperatura, y el desarrollo de materiales que permiten ser utilizados sin refrigerante. Normalmente para aplicaciones generales se utilizan fresas madre fabricadas en acero rápido (M2 o M35), para operaciones en seco o para alto desempeño se utilizan fresas madre en aceros fundidos especiales (FM34D), aceros sinterizados (FAX38, FAX55) o en carburo de tungsteno. En conjunto con el material base (acero o carburo), se puede recubrir la fresa madre para obtener mejores desempeños, ya que permiten trabajar a velocidades y avances mayores reduciendo el desgaste de la herramienta.

Aun así, debido a la geometría compleja de la herramienta, las fresa-madre (*hobs*) tienen un coste demasiado elevado. Es por esta razón que el tiempo de uso efectivo de estas herramientas, teniendo en cuenta procesos de reacondicionamiento, es un parámetro esencial del proceso [Bouzakis, 2008].

Los avances en esta clase de herramientas son continuos, y cada vez se obtienen aleaciones y recubrimientos más resistentes, lo que mantiene a este proceso como el más utilizado para la fabricación en masa de engranes.

La capacidad de la máquina Rhenania admiten tallado desde ruedas de 80mm hasta 3000mm de diámetro, y desde 65mm a 1000mm de altura de la rueda a tallar. Este método se utiliza solo para desbastes, o para ruedas dentadas que no exijan una precisión extrema.

Se puede afirmar que la gran mayoría de los engranajes pre-mecanizados son generados mediante este sistema, y esto se debe a la eficiencia de este proceso para generar engranajes cilíndricos de elevada calidad [Bouzakis, 2008].

Por otro lado, destacar que el *hob* puede también ser incorporado al husillo principal de una máquina de propósito general, como puede observarse en la Figura II.16, donde con una misma herramienta se generan diferentes engranajes: recto, helicoidal con hélice a derechas y helicoidal con hélice a izquierdas.

El problema es que al estar la herramienta solo amarrada por uno de sus extremos, la rigidez del mecanizado es menor debido a la flexión de la misma. Es por esta razón que se limita el mecanizado para un módulo máximo de 6. Más de 6 las cargas son muy elevadas. Calidad asegurada DIN 6.



Figura II.16 Hobbing en máquina Ibarria en instalaciones de Azkoitia en 2017

○ **Generación mediante brochado**

La brocha es una herramienta de corte y se caracteriza por tener dientes con filos cortantes, los cuales van incrementando su altura en forma consecutiva hasta alcanzar la forma o profundidad requerida, como se muestra en la Figura II.17. El brochado es una operación en la cual la brocha es forzada a pasar por el interior o exterior de la pieza de trabajo para obtener una forma específica.

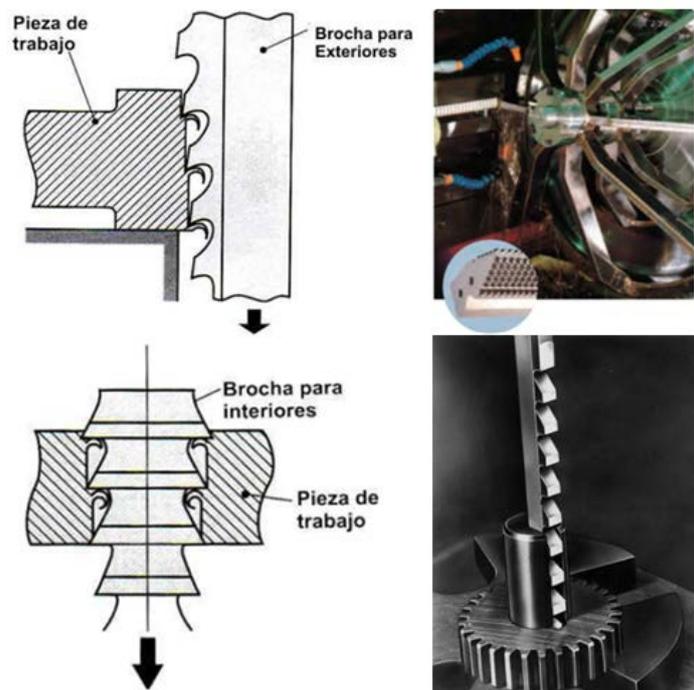


Figura II.17 Proceso de brochado interior y exterior

Dentro de las ventajas que este procedimiento proporciona se pueden destacar:

- Existen brochas tanto para interiores como para exteriores
- Es un proceso muy rápido
- Son herramientas de forma, lo cual significa que la geometría que tiene la herramienta será transmitida a la pieza
- Son herramientas que se pueden reafilarse. Dependiendo del tipo de herramienta y proceso hasta 15 veces

En la Figura II.18 se muestra una brocha típica para un engrane interno. Los extremos se denominan zancos, y van utilizados a la máquina brochadora. El zanco frontal es enganchado a un cabezal el cual jala la brocha a través de la pieza. En algunas máquinas, el proceso es empujando la herramienta en lugar de jalar. En otro diseño de máquina, la brocha permanece fija y lo que se desplaza a lo largo de su longitud es la pieza de trabajo.

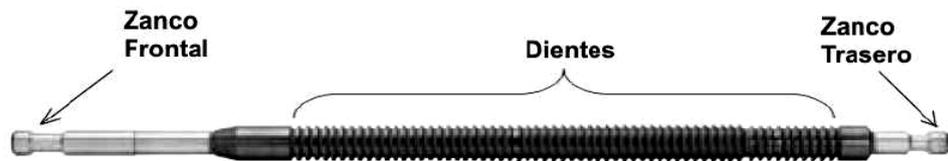


Figura II.18 Brocha típica para engrane interno

Un tipo de brocha muy utilizado es la que tiene dientes combinados alternados, esto es, un diente corta el diámetro menor y el siguiente el diámetro mayor y así sucesivamente. Este diseño permite obtener piezas con menos variantes en concentricidad entre ambos diámetros.

El brochado es uno de los procesos de mecanizado más rápidos, precisos y fiables conocidos por la humanidad. La principal ventaja del proceso de brochado radica en la capacidad de realizar el desbaste, semiacabado y acabado en una sola pasada de la brocha [DMG-MORI, 2015].

Este proceso es el que proporciona el costo-beneficio más bajo cuando es utilizado para producción a gran escala, debido a que las máquinas son relativamente baratas, con mantenimientos simples y presentan bajos costes productivos. Normalmente se utiliza para la producción de piezas metálicas, pero también es utilizado en plástico y materiales no metálicos. Las brochas hoy en día son utilizadas en formas muy complejas para la fabricación de engranes internos y externos, tanto rectos como helicoidales.

Hasta este momento, no se ha podido desarrollar un proceso que mejore en productividad y costo al brochado. Al igual que las fresas madre, se hacen desarrollos

continuos permitiendo la utilización de aceros más resistentes así como tratamientos superficiales y/o recubrimientos para incrementar la productividad.

Existen dos limitaciones principales que presenta este proceso:

- Cuánto mayor es el material que se requiere cortar, la longitud de la brocha debe ser mayor. Esto hace que en ocasiones no sea posible el uso de una brocha por no contar la máquina con recorrido suficiente
- La cantidad de material a cortar implica un esfuerzo de corte, el cual está directamente relacionado con la potencia de la máquina: A mayor material a cortar, mayor potencia de máquina y mayor rigidez de la misma

La brocha solo es capaz de cortar ciertas “formas”, no es flexible.

Se fabrican las brochas principalmente en aceros rápidos o al cobalto (M2, M4, M35) pero dependiendo del proceso y exigencias de producción, también se fabrican en aceros sinterizados (T15, PMM4) o de carburo de tungsteno sólido. En conjunto, las brochas pueden ser sometidas a un tratamiento químico de nitrurado para que la superficie exterior obtenga mayor dureza y se tenga una mejor lubricación. Dependiendo de la aplicación, también se pueden recubrir con TiN que prolonga aún más la vida de la herramienta.

- Brochado rotativo

En la actualidad, debido a la innovación en las brochas rotativas, el brochado rotativo es una tecnología que debe ser considerada para la obtención de ciertas formas, como pequeñas *splines* con perfil evolvente, geometrías poligonales (cuadrados, hexágonos,...) y bordes dentados.

Las herramientas de brochado rotativo fueron patentadas por primera vez hace más de 100 años por H. E. Warren. El concepto implica el uso de una máquina que “tambalea” una herramienta de corte de un lado a otro, a un avance lento, en un agujero piloto. Cuando la brocha alcanza el fondo del agujero, la forma completa ha sido mecanizada en un tiempo de ciclo rápido, y sin ser necesaria una operación posterior de acabado.

En la década de los 50, los portaherramientas comerciales de brochas rotativas fueron adaptados a tornos y a maquinaria para tornillería. Estas herramientas eran

adecuadas para la obtención de pequeños hexágonos, cuadrados y formas poligonales. Sin embargo, el interés fue creciendo para la obtención de otras formas, como bordes dentados y *splines*.

Este proceso puede ser adaptado a tornos, fresadoras y centros de mecanizado CNC. En la actualidad, las herramientas rotativas para máquinas CNC presentan avances interesantes, como rodamientos sellados, orificios de alivio de presión y mejoras en el acero de las herramientas de corte. En la mayoría de los casos, el brochado rotativo puede realizarse al mismo tiempo que se realizan otras operaciones, aumentándose así la eficiencia y la rentabilidad del proceso, sin sacrificar por ello la precisión.

A diferencia con el brochado convencional, en el cuál unas formas poligonales son “empujadas” a través de un agujero previo hasta lograrse el tamaño y forma deseados, la brocha rotativa corta la forma completa en un paso.

Además, el brochado rotativo permite el mecanizado de engranajes en agujeros ciegos gracias al uso de portaherramientas con un grado de libertad adicional (relativo a la línea central de la pieza de trabajo), generándose así una oscilación controlada que permite que la brocha rotativa vaya cortando secuencialmente diente a diente [Tryles, 2014]. Esto hace que no sean necesarias operaciones previas.

La facilidad de uso de esta tipología de herramienta en máquina ha hecho que muchos operarios hayan tomado conciencia de su uso, lo que ha hecho que hoy en día esta tecnología sea utilizada para la obtención de formas hexalobulares y evolventes en productos mecanizados con precisión en tornos y fresadoras de propósito general [Bagwell, 2015].

El campo en el que es óptimo la utilización de este proceso es en la obtención de geometrías de pequeño tamaño (de 0.028” a 2” en diámetro) y que requieran poca profundidad de mecanizado. Una regla que se suele tomar como referencia, es que la profundidad recomendada no debe exceder de 1.5 veces el valor del diámetro.

En la Figura II.19 se representa alguna operación en la que se ha aplicado el brochado rotativo.

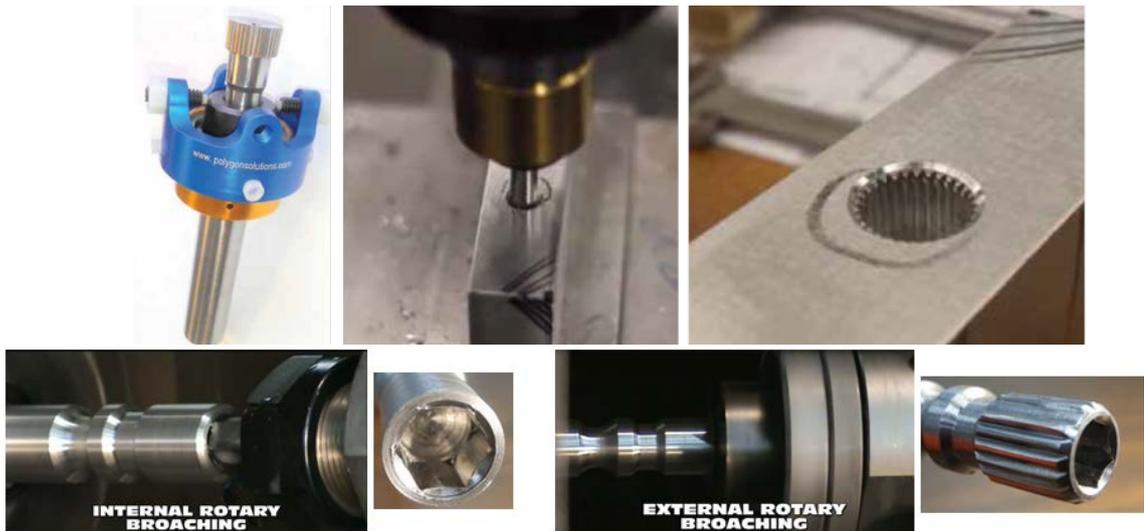


Figura II.19 Operaciones de fresado rotativo [Bagwell, 2015]

Para operaciones interiores, la pieza debe ser previamente perforada y achaflanada antes del brochado. Es recomendable abrir el pre-taladrado algo más que el diámetro menor de la forma a generar, facilitándose así el corte de la herramienta y viéndose aumentada la vida útil de la misma.

Las formas generadas mediante brocas rotativas presentan tolerancias cercanas a 0.0005".

Materiales como plásticos, aluminio, latón, aleaciones y aceros inoxidable son ideales para el brochado rotativo. Materiales complicados, como el titanio, pueden ser mecanizados de manera satisfactoria gracias al uso de recubrimientos (TIN, TICN y TIALN) y materiales de sustrato tales como (M-2 HSS, PM-4 y T15).

○ **Generación con piñón generador o gear shaping**

▪ **Sistema Fellows**

El tallador (Figura II.20) es una herramienta de acero templado con forma de engrane (piñón), y es en la parte inferior del mismo donde se encuentra el filo para el corte.



Figura II.20 Talladores típicos para engranes rectos y helicoidales

Los dientes son tallados por el movimiento rectilíneo alternativo del piñón cortate, trabajando como un útil de mortajar, y girando alrededor de su eje al mismo tiempo que la pieza a tallar, Figura II.21. Es necesario que estos movimientos de giro se encuentren sincronizados “como si engranaran”, y de forma que esté conjugado con el movimiento rectilíneo de vaivén, para que la rueda generadora del tallado efectúe su trabajo como una mortajadora. Esta operación podría no realizarse en una sola vuelta ya que dependiendo de la profundidad total de trabajo, en ocasiones son necesarias 2 ó 3 pasadas.

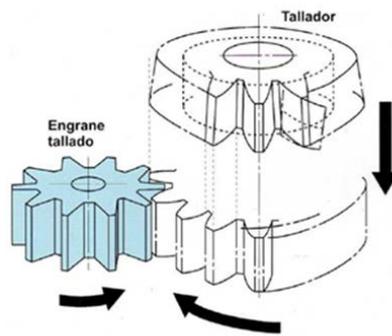


Figura II.21 Proceso de tallado y mecanizado en máquina

En los dentados interiores, el útil de corte y la pieza han de girar en el mismo sentido, empleando un piñón mortajador con ángulos de corte especiales, contando con 18 o más dientes cortantes y tallados en perfil constante.

En este tipo de procedimiento de talla, todos los engranajes obtenidos con el mismo módulo y ángulo de presión resultan intercambiables, sea cual fuere su número de dientes ( $Z$ ). Por lo tanto, bastará con una sola herramienta de cada módulo para tallar todas las ruedas, sea cual fuere el número de dientes, incluso las cremalleras. El piñón mortajador tiene la ventaja de que todos los dientes trabajan por igual, puesto que entran en acción de forma correlativa.

Con este método es posible fabricar engranes rectos y helicoidales, tanto externos como internos, así como cremalleras. La única geometría que no es posible generar mediante este proceso es la sinfín.

Para el tallado de dentados helicoidales, se requiere de una guía especialmente diseñada, cuyas características son las de transformar el movimiento rectilíneo alternativo en un movimiento helicoidal, para que acompañe la dirección de la hélice del piñón mortajador, que forzosamente debe tener sus dientes en forma helicoidal. La guía a diseñar debe contener una hélice y un ángulo de hélice particulares, que corresponden, para cada uno de los casos, a la de los dientes a ser generados.

Para el tallado de cremalleras, tanto a dientes rectos como helicoidales, es necesario también un dispositivo que se monta sobre la mesa de la máquina para que transforme su movimiento, que normalmente es de rotación, en uno rectilíneo y continuo.

En estas máquinas pueden tallarse de manera simultánea dos o más ruedas iguales. Este procedimiento de tallado en “tandem” (Figura II.22) permite reducir los tiempos de mecanizado, gracias al trabajo simultáneo de dos piñones mortajadores de igual dentado, montados sobre un mismo eje.



Figura II.22 Tallado en “tándem”

Dentro de los procesos de fabricación de engranes, el de tallado se encuentra dentro de los más lentos. Esto se debe principalmente a que una vez realizado el corte, el tallador necesita realizar un movimiento de retorno a su posición inicial, el cual no conlleva ningún mecanizado, antes de realizar el siguiente corte. Este movimiento de retorno siempre es de mayor velocidad que el correspondiente al corte.

Este proceso únicamente se utiliza cuando restricciones en la geometría de la pieza de trabajo impiden el uso de otro tipo de herramientas, como puede ser en piezas que presentan “hombros” muy cercanos al engrane, como se muestra en la Figura II.23. En estos casos no sería posible utilizar un generador o brochado.

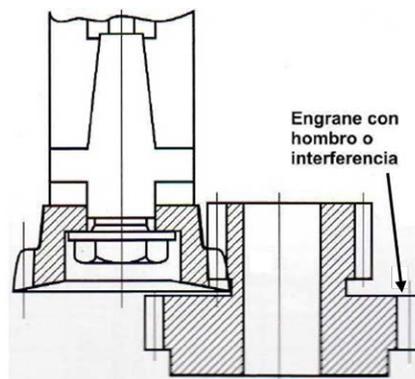


Figura II.23 Engrane con “hombro” o interferencia

Mediante este proceso pueden ser generados engranajes con tolerancias estrechas, y tanto la precisión como la repetibilidad del perfil del diente del engranaje generado es fácilmente mantenido a lo largo del proceso.

Los talladores son fabricados en aceros rápidos (M2, M35), y si se pretende obtener un mejor rendimiento, se utiliza acero sinterizado (FAX31) en combinación con un recubrimiento de TiN.

○ **Generación con cremallera o rack shaped cutter**

▪ Sistema Maaq y Sunderland

Este método se basa en un principio análogo al Fellows, pero en este caso, en vez de un piñón generador o una rueda madre, se utiliza una herramienta cortante en forma de dientes de cremallera, llamada peine creador o cremallera mortajadora (Figura II.24). Esta herramienta se mueve alternativamente en la dirección vertical, cepillando por mortajado los dientes de la rueda a tallar, y moviéndose rueda y herramienta como si engranaran en una misma dirección.

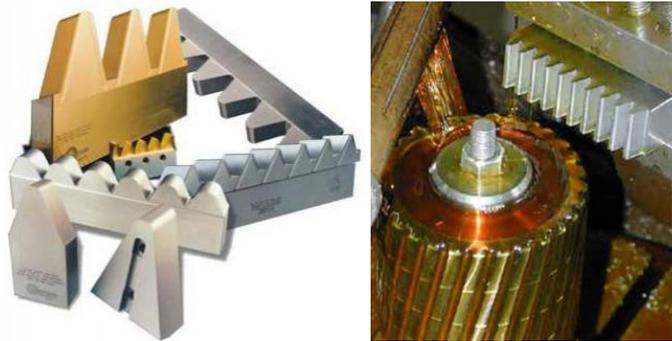
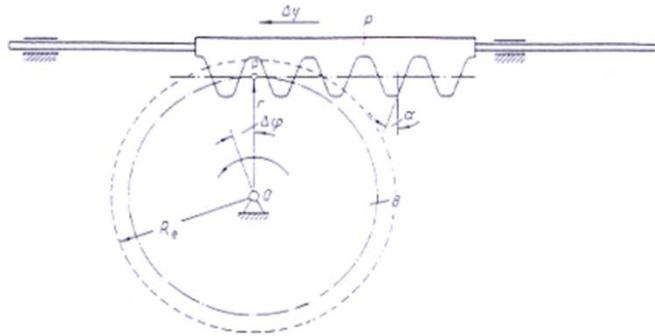


Figura II.24 Generación con cremallera mortajadora

La cremallera consiste en varios planos rectos unidos rígidamente, de modo que pueden generarse simultáneamente las dos caras del diente. Partiendo de un cilindro de acero, la cremallera se emplea como herramienta de corte en el sentido perpendicular al plano del dibujo (Figura II.25). Una vez efectuado el corte, se levanta la cremallera, se gira el engrane que se está tallando un ángulo  $\Delta\phi$ , se avanza la cremallera  $R \cdot \Delta\phi$ , y se vuelve a proceder a un nuevo corte. Repitiendo esta operación sucesivas veces obtenemos el engrane. El número de repeticiones está en relación directa al número de dientes a tallar.



**Figura II.25** Generación de engranajes mediante cremallera

El movimiento de retroceso de la mesa porta pieza es indispensable, porque el peine es de una longitud limitada, y comprende un número de dientes que puede variar en relación al módulo de 4 a 12. Podrán realizarse así, dentados exteriores en ruedas cilíndricas, tanto de dientes rectos como de dientes inclinados o helicoidales.

Para la generación de engranajes helicoidales, es necesario dotar de cierta inclinación al cabezal portaherramientas. Esta inclinación, producida a partir de la combinación de movimientos de rotación entre pieza y herramienta, es la que determina la hélice a generar.

Por la manera de trabajar, en este sistema se pueden establecer 2 grupos:

#### Sistema Maag (Figura II.26)

La herramienta de corte trabaja animada de un movimiento alternativo de ascenso y descenso vertical.

El diámetro primitivo de la rueda a tallar rueda sobre la línea primitiva de la cremallera mortajadora, desplazándose la mesa con el movimiento de avance, y produciéndose así la generación del dentado, habiendo entrado la herramienta por uno de los lados.

Cuando la herramienta ha salido de la pieza a tallar por el lado contrario, la máquina se para de manera automática, quedando así la herramienta en el punto muerto superior, la mesa junto con la pieza a tallar retrocede hasta el punto inicial, y vuelve a comenzar un nuevo ciclo de generación.

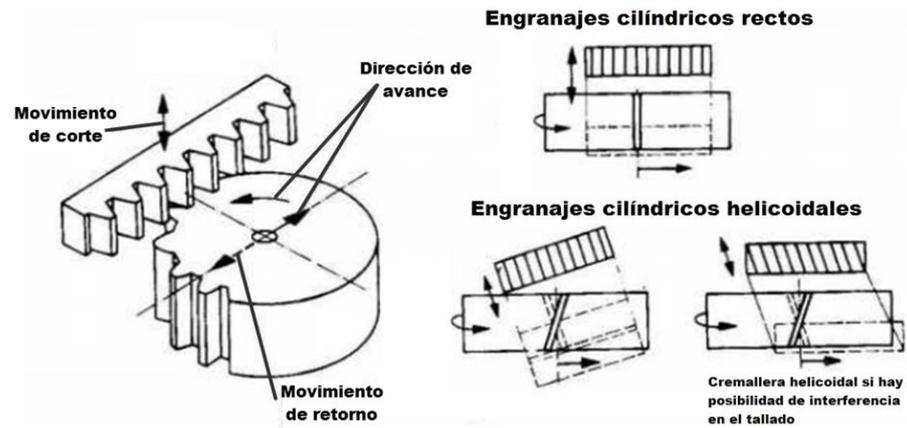


Figura II.26 Sistema Maag

La máquina Maag es más productiva que la Fellows, dada la mayor facilidad de reafilado de la herramienta, puesto que su perfil es rectilíneo, y es el que corresponde al tipo de perfiles de evolvente de círculo adoptado universalmente en las máquinas talladoras de engranajes.

Con este tipo de máquinas pueden realizarse dentados sobre ruedas de hasta un diámetro máximo de 5 metros.

Sistema Sunderland (Figura II.27)

La herramienta empieza la penetración tangencialmente a la rueda a tallar, y al llegar a la profundidad programada, automáticamente se para, se retira la herramienta, y la pieza a tallar gira el valor correspondiente al paso (un diente). Hecho el cambio de posición, también de manera automática, el útil de corte empieza de nuevo a mecanizar, y así hasta terminar el tallado por generación con este principio.

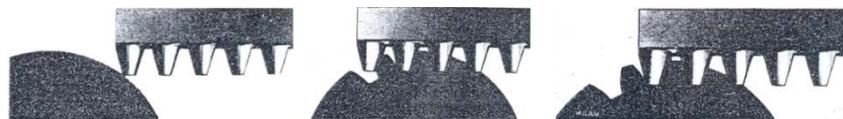


Figura II.27 Sistema Sunderland

○ Generación mediante electroerosión por hilo (WEDM)

El mecanizado por electroerosión se realiza en un medio dieléctrico mediante el salto de descargas eléctricas entre el electrodo y la pieza a mecanizar. El proceso es básicamente un proceso termoeléctrico en el que las chispas representan una fuente térmica puntual. Esta fuente térmica funde el material de la pieza produciéndose de esta forma la erosión. En la Figura II.28 se esquematiza el proceso.

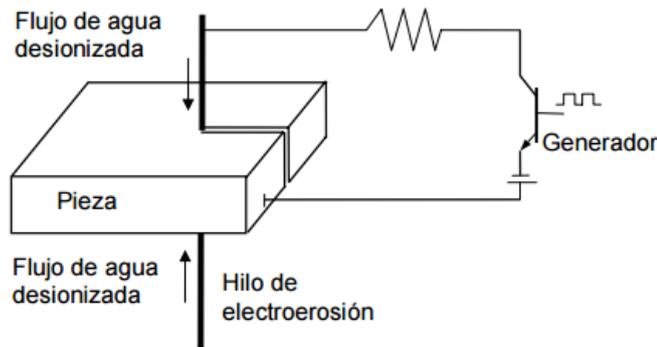


Figura II.28 Proceso electroerosión por hilo

En la electroerosión por hilo, WEDM, un hilo conductor, normalmente de latón, se utiliza como electrodo. El hilo pasa por unas guías imponiéndole la dirección que debe seguir. Las descargas se producen por la diferencia de potencial existente entre el hilo y la pieza, que obviamente debe ser de un material conductor de la electricidad. El hilo circula continuamente, y entre el hilo y la pieza existe un canal, llamado de descarga, bañado por un fluido dieléctrico, que generalmente es agua.

El dieléctrico (agua) es introducido entre el hilo y la pieza con el objetivo de ayudar al salto y calidad de las chispas, refrigerar el “gap” y eliminar el material arrancado después de las descargas eléctricas. El mantener una distancia correcta entre hilo y pieza es el punto más importante para tener un correcto mecanizado y conseguir precisión.

Mediante esta tecnología pueden ser generadas ruedas dentadas de elevada precisión y con un buen acabado superficial.

La zona afectada térmicamente (HAZ - *Heat Affect Zone*) introducida por este proceso termoeléctrico, causa cierta preocupación en relación a la integridad superficial. La HAZ, incluida la capa blanca, está asociada a la aparición de elevadas tensiones residuales, microgrietas, porosidad, crecimiento del grano y a la generación de aleaciones con el electrodo o el fluido dieléctrico [Klink, 2011].

Estos efectos pueden ser minimizados en gran medida mediante la aplicación de una estrategia de corte optimizada, tanto en desbaste como en acabado. Si el material es cortado utilizando un solo corte (corte de desbaste: elevada energía que conlleva una elevada tasa de eliminación de material), seguido por cortes de repaso para la obtención de un acabado de elevada calidad, los efectos anteriormente comentados son minimizados, e incluso pueden llegar a ser eliminados en su totalidad. Con los repasos lo que se consigue es la reducción del espesor de la HAZ.

El tipo de dieléctrico utilizado en el proceso también tiene influencia en el acabado superficial y la integridad de la propia pieza. Utilizar como dieléctrico un fluido base aceite permite la obtención de una mayor calidad superficial, pero el proceso de

mecanizado es más lento que cuando es utilizada el agua como fluido dieléctrico [Klink, 2011].

El uso de esta tecnología se presenta como una opción a tener en cuenta en el mecanizado de engranajes (Figura II.29), especialmente para prototipado, pero también presenta ciertas limitaciones.



Figura II.29 Generación engranaje mediante electroerosión [Ellis, 2014]

La WEDM permite mecanizar modificaciones micro-geométricas que sean ortogonales a la dirección del hilo, tales como el *tip relief*, el *root relief*, el *angular profile variance* y el *profile crowning*. Sin embargo, las modificaciones geométricas que difieran de las superficies regladas no son mecanizables mediante WEDM, como el *lead crowning*. Las modificaciones *angular lead variance* y el *end relief* podrían llegar a ser obtenidas, pero se necesita una mayor investigación para poder confirmarlo. Además, el mecanizado de engranajes helicoidales es imposible mediante WEDM [Bouquet, 2014].

Tras la obtención del engranaje, indistintamente de si ha sido mediante arranque o no de viruta, a la gran mayoría de los engranajes se les suele aplicar un tratamiento térmico, como se detalla en la siguiente Figura II.30.

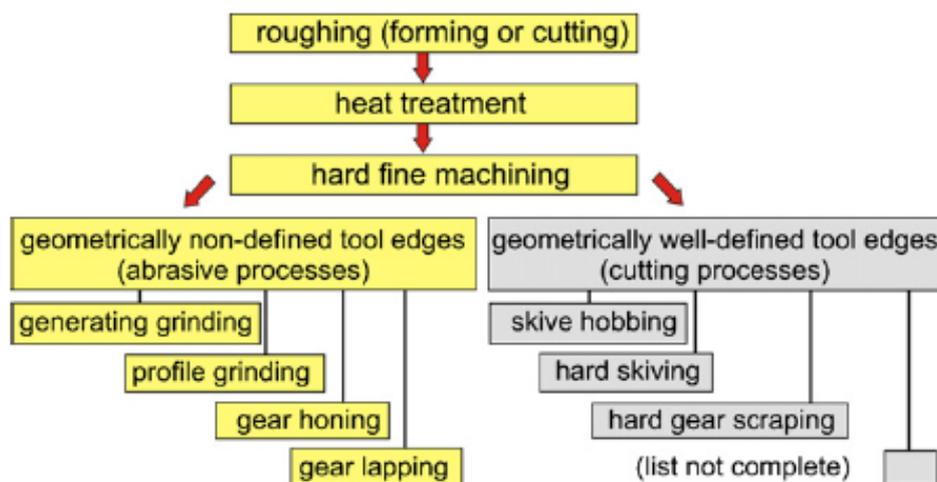


Figura II.30 Proceso de la fabricación de engranajes [Karpuschewski, 2008]

Los tratamientos que se les practican a los engranajes se dan principalmente a los dientes. Sin entrar en mucho detalle, los tratamientos más comunes son:

- **Carburizado:** Es uno de los métodos más ampliamente usados para el endurecimiento superficial de los dientes. El engrane se coloca en un medio carburizante y se calienta, la capa superficial de los dientes del engranaje absorbe el carbono (difusión) y después de una o mas horas de mantenerlo a temperatura elevada, el carbono ha penetrado para dar la profundidad de endurecido requerida.
- **Nitrurado:** Es un procedimiento de endurecimiento superficial que se aplica a los engranajes de acero aleado. El engranaje a nitrurar recibe un tratamiento de bonificado para darle un endurecimiento promedio. Las zona que no van a ser nitruradas deben ser cubiertas con placas de cobre u otro material adecuado, después se coloca en el horno de nitruración calentándolo a 1000°F (538°C). El nitrurado se efectúa mediante gas de amoniaco que se descompone en nitrógeno atómico e hidrógeno sobre la superficie del acero.  
El nitrógeno atómico penetra lentamente en la superficie y se combina con otros elementos, formando así nitruros de extraordinaria dureza. Un acero con aleación de exclusiva de carbono no puede ser nitrurado con éxito.
- **Endurecimiento por inducción:** El engrane es endurecido superficialmente por medio de corrientes alternas de alta frecuencia. El proceso consiste en enrollar una bobina de inducción alrededor de la pieza, generalmente la pieza es girada dentro de la bobina, y en pocos segundos los dientes son llevados por encima de la temperatura crítica (de un color rojo intenso). Después de este proceso el engranaje es retirado de la bobina y se le da un temple controlado por medio de un baño de rocío aplicado por un rociador o se le sumerge en un baño agitado. Antes del endurecimiento por inducción, al disco del engranaje se trata térmicamente.
- **Endurecido con flama:** Proporciona un endurecimiento poco profundo. El endurecimiento se produce por medio de una flama oxiacetilénica empleando quemadores especiales. Para obtener un calentamiento uniforme, generalmente se hace girar el engranaje en la flama. Básicamente es el método por el cual se hace un endurecimiento de la superficie al calentar el metal con una llama de alta temperatura seguida por un proceso de templado [Rojas, 2011].

Los engranajes, tal como salen de los procesos anteriormente descritos, pueden no tener el acabado superficial y la precisión dimensional requerida para ciertas aplicaciones. Además,

estos pueden ser ruidosos y sus propiedades mecánicas, como la vida a fatiga, pueden ser deficientes.

Los objetivos principales del acabado de los engranajes son detallados en la Figura II.31.

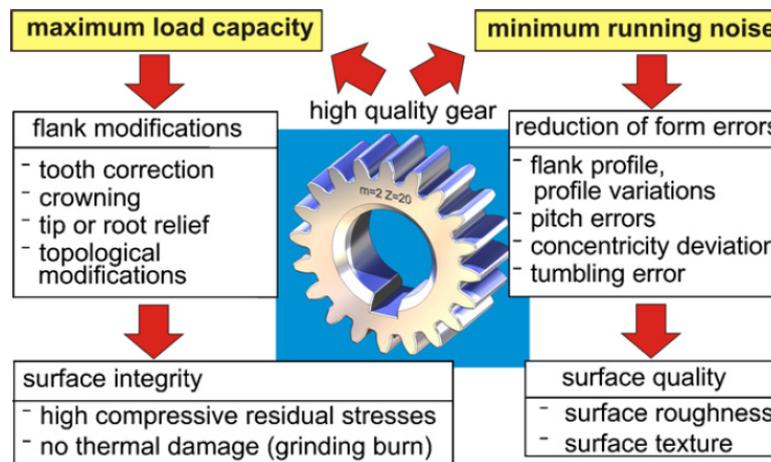


Figura II.31 Objetivos principales del acabado de los engranajes [Karpuschewski, 2008]

Es por esta razón que se disponen de varios procesos de acabado para mejorar la calidad superficial de los mismos. La elección del proceso está determinada por el método de fabricación empleado, y de si los engranes han sido endurecidos mediante un tratamiento térmico, ya que estos pueden causar distorsiones en las partes, las cuales son inadmisibles desde el punto de vista de operación. En consecuencia, para lograr que los dientes tengan perfiles precisos, los engranajes tratados térmicamente se deben someter a operaciones de acabado adecuadas.

A continuación se detallan las diferentes opciones de las que se dispone,

○ **“Efeitado” o desbarbado (GEAR SHAVING)**

El “afeitado” de engranajes es una operación de acabado que elimina pequeñas cantidades de metal de los flancos de los dientes del engrane.

Es utilizada una herramienta de corte que se caracteriza por su forma, un engranaje con dientes rectificadas. Esta herramienta engrana a la perfección con en el engranaje a ser mecanizado (Figura II.32). Los dientes de la herramienta (desbarbador) tienen serraciones de forma rectangular a lo largo de todo el perfil, los cuales, al entrar en contacto con el engrane, cortan pequeñas cantidades de material en forma de hilos delgados.

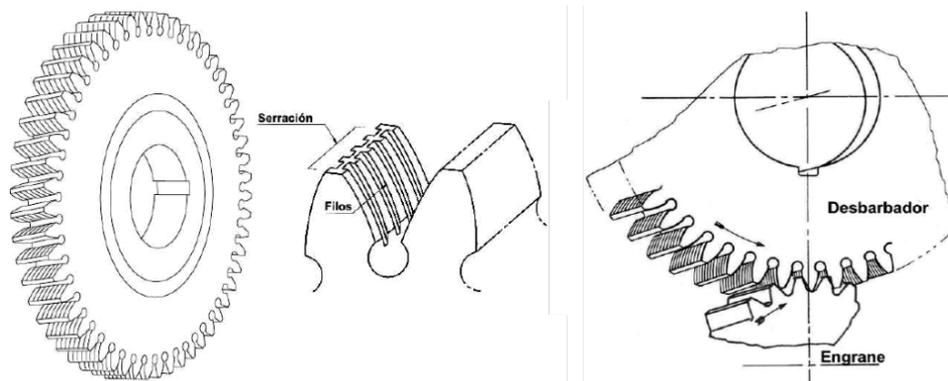


Figura II.32 Proceso de “afeitado” de engranajes

Principalmente, el desbarbador se utiliza para obtener un mejor acabado superficial en los dientes de los engranes, a la vez que se consigue dejar al engranaje en las tolerancias y dimensiones requeridas. Esta herramienta se utiliza posteriormente a los procesos de generado o tallado, donde las superficies de los dientes son obtenidas con un acabado burdo y en consecuencia, las tolerancias no están bien logradas.

El proceso consiste en engranar ambas partes, el engrane y la herramienta. El desbarbador está acoplado a la transmisión de la máquina, y al girar transmite movimiento al engrane. La herramienta se hace girar en un sentido mientras se desplaza a lo largo del flanco del engranaje, y una vez se llega al final del recorrido, el giro se invierte regresando al punto de origen. Este proceso se suele repetir 4-5 veces, dependiendo de la cantidad de material a eliminar, las capacidades de la máquina, y el acabado superficial que se quiere alcanzar.

Este proceso podría entenderse como una transmisión simple entre engranes, sin embargo, la diferencia radica en que mientras en una transmisión de engranes hay un claro “backlash”, en el desbarbado no existe este espacio, y la herramienta y el engrane están en contacto total. En cada uno de los recorridos de la herramienta este contacto se ve incrementado, dependiendo de la cantidad a material a eliminar, definido por los aspectos mencionados en el párrafo anterior.

Aunque el proceso de rectificado provee de mejores acabados superficiales, tolerancias más ajustadas y de una mejor repetitividad; el desbarbado es más económico y la herramienta puede ser modificada en geometría para procesos en el que los engranes presenten variantes en los ángulos de presión, lo que hace a la herramienta más versátil que una rueda de rectificado.

Los desbarbadores suelen ser fabricados en aceros rápidos (M2, M4) pero también pueden ser de acero sinterizado (PMM4) para obtener un mejor comportamiento. Entre

los desarrollos que se están llevando a cabo, cabe destacar el uso de aceros fundidos con una estructura más homogénea (FM23A), el cual permite obtener una mayor vida útil.

En este campo de aplicación no se ha demostrado que el uso de aceros sinterizados o con recubrimientos permitan una reducción en los costos de operación, por lo que se han seguido utilizando únicamente los materiales mencionados anteriormente.

o **Rectificado**

Después de haber sido la pieza endurecida mediante el tratamiento térmico correspondiente, lográndose una alta dureza para así resistir las cargas aplicadas durante los años de servicio, los engranajes sufren distorsiones que no pueden ser eliminadas con máquinas de tallado.

Dichas distorsiones se eliminan en máquinas especiales de rectificado de engranajes, como las que se muestran en la Figura II.33, que son máquinas muy específicas que acarrear elevados costes de adquisición.



Figura II.33 Máquinas de rectificado de engranajes

El rectificado puede ser por generación o por perfiles, como se representa en la Figura II.34.

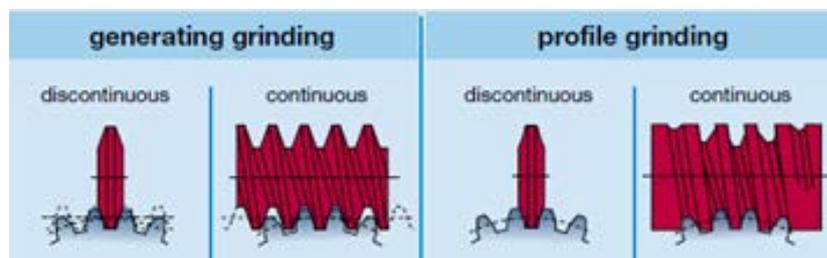


Figura II.34 Rectificado por generación o por perfiles

Mediante este procedimiento se consigue una precisión dimensional muy alta, del orden de  $5\mu\text{m}$ , y excelentes acabados superficiales, del orden de  $0.4\mu\text{m}$ .

o **Lapeado**

El lapeado es una operación de mecanizado en la que se frotan dos superficies con un abrasivo de grano muy fino entre ambas, mejorándose así el acabado y disminuyéndose la rugosidad superficial.

En el caso particular de los engranajes, se trata al engranaje con una herramienta para lapear en forma de engranaje, en un medio que tiene abrasivo (Figura II.35). Se precisa de un movimiento relativo adicional en la dirección del eje para los engranajes cilíndricos, tanto los de dientes rectos como los de dientes helicoidales. Un lapeado excesivo puede ser perjudicial para la forma de la involuta.



Figura II.35 Lapeado de engranajes espirocónicos. Gleason Phoenix – Turbo Lapper 600HTL

- **Pulido**

La operación de pulido se utiliza para dar la forma final a los dientes tras el tratamiento térmico correspondiente.

Gracias a esta operación los errores de distorsión debidos al templado pueden ser corregidos. Hay que ser conscientes que durante el tallado debe dejarse material suficiente sobre la superficie de los dientes.

El lapeado es una operación de mecanizado en la que se frotan dos superficies con un abrasivo de grano muy fino entre ambas, mejorándose así el acabado y disminuyéndose la rugosidad superficial.

- **Bruñido (GEAR HONING)**

El proceso de bruñido se empezó a utilizar por primera vez en la década de los 70 con el propósito de eliminar los daños producidos en los flancos de los engranajes endurecidos durante el transporte.

El bruñido es un proceso de moldeado plástico que resulta de la presión de rozamiento, la cual aplanar y extiende las pequeñas irregularidades superficiales.

El bruñido se distingue del rectificado en la cinemática y en la herramienta, la cual generalmente tiene forma de engranaje, Figura II.36. Esta herramienta bruñidora suele ser del mismo material que las muelas de rectificado.



Figura II.36 Herramienta de bruñido [Karpuschewski, 2008]

La mayor ventaja que este proceso presenta es la posibilidad de ajuste de la estructura superficial favorable, tanto en altura como anchura, en la dirección del flanco de los dientes, Figura II.37. La orientación mixta de las ranuras mecanizadas, que se aproximan asintóticamente al diámetro de paso, se traduce en un nivel de ruido muy aceptable cuando los engranajes están trabajando, debido principalmente a las características estocásticas de su estructura y a la ausencia de estructuras de excitación paralelas. Por esta razón, el bruñido es empleado cada vez más como una operación de post-procesado tras el rectificado de los flancos de los dientes [Karpuschewski, 2008].

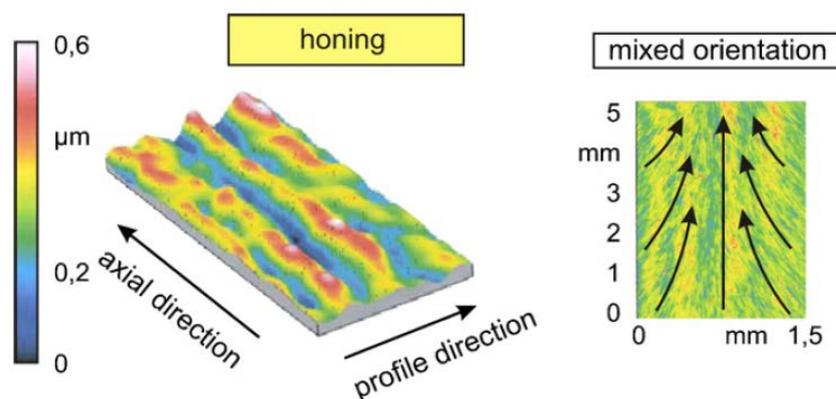


Figura II.37 Topografía superficial de un engranaje bruñido [Karpuschewski, 2008]

En el proceso de bruñido, proceso plasmado en la Figura II.38, la velocidad de corte es considerablemente inferior que en los procesos de rectificado, con rangos de velocidad entre 1-10m/s, dependiendo del caso concreto de aplicación. Estas bajas velocidades hace que se produzcan temperaturas menores en la zona de contacto, por lo que no se produce daño térmico alguno a lo largo del proceso de bruñido.

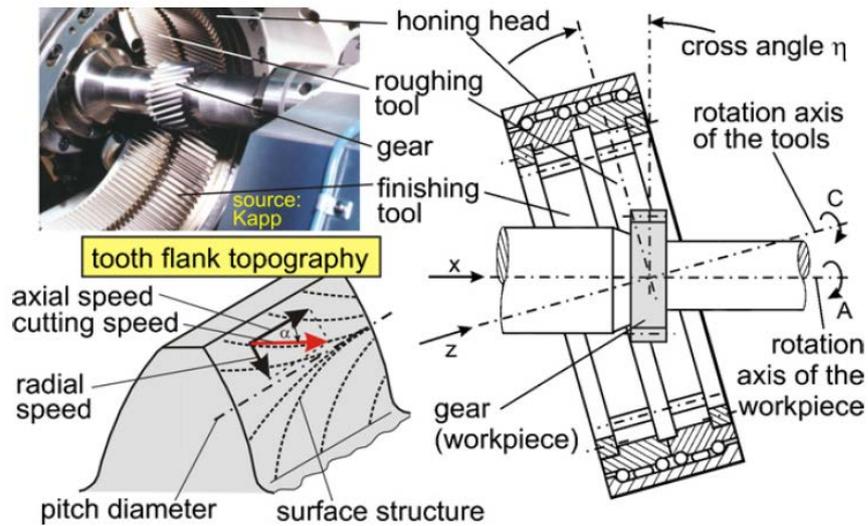


Figura II.38 Cinemática del proceso de bruñido [Karpuschewski, 2008]

Este proceso no corrige los errores derivados de un tamaño erróneo, pero puede utilizarse como proceso complementario tras el proceso de rectificado para generar la topografía final, sustituyendo así a otros procesos de acabado en duro.

## II.2. Procedimientos para la fabricación de engranajes cónicos

Los engranajes cónicos se utilizan cuando se quiere transmitir movimiento entre ejes que se cortan.

Los métodos de obtención de dentados también se han extendido al tallado de ruedas cónicas, cuya ejecución es difícil, porque tanto el espesor del diente como la curvatura de sus flancos varían hacia el vértice del cono original de forma constante.

Los diferentes tipos de engranajes cónicos existentes se ilustran en la Figura II.39. Estos engranajes son representados en un plano, es decir, son la corona de los respectivos tipos de engranajes.

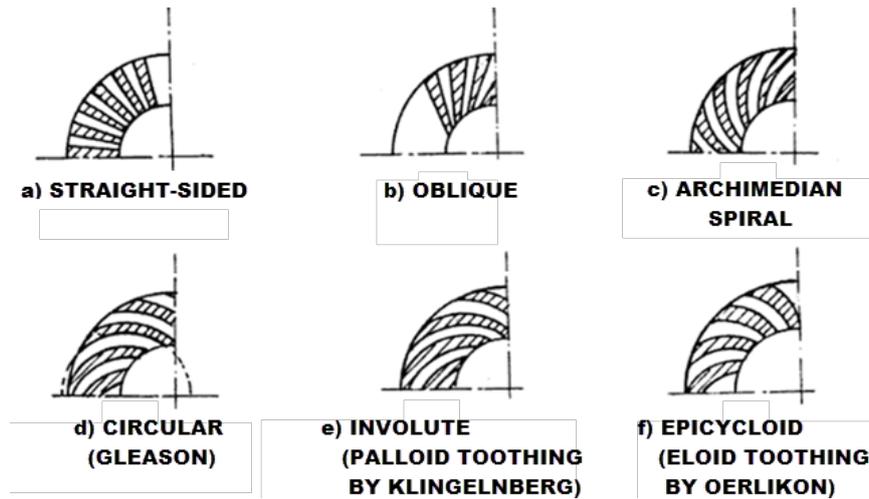


Figura II.39 Tipos de engranajes cónicos [Maitra, 1994]

Las ruedas dentadas cónicas pueden ser mecanizadas con exactitud por el procedimiento de rodamiento, pero también es necesario un subterfugio para resolver el problema del espesor variable y del terminado posterior de los flancos por separado (retoque).

Para ello, se han desarrollado máquinas especiales para tallado de dientes de ruedas cónicas por generación, las cuales están basadas en el principio de composición de los movimientos: de rotación sin rozamiento de una superficie cónica sobre un plano alrededor de un eje de rodadura, y de revolución alrededor de un punto.

Existen cuatro sistemas de generación para el tallado de ruedas cónicas por medio de máquinas especiales:

- o **Procedimiento BILGRAM**

El dentado por cepillado se consigue por la acción de una cuchilla de perfil trapezoidal (H), animada de un movimiento rectilíneo alternativo sincronizado con un movimiento de rotación planetario de la rueda a tallar, que se halla montada en un mandril oscilante (A). En la Figura II.40 se esquematiza este procedimiento.

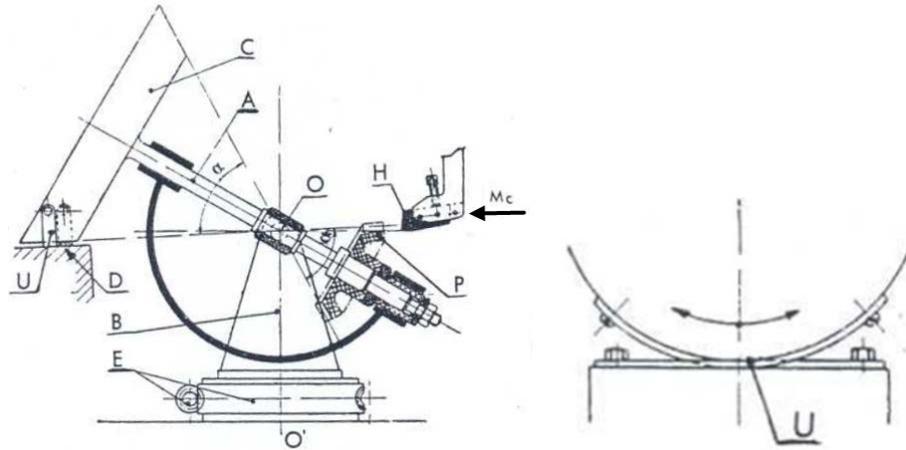


Figura II.40 Tipos de engranajes cónicos [Maitra, 1994]

La herramienta tiene solo un movimiento de vaivén en una sola línea, como en las máquinas limadoras, y la rueda a tallar solo realiza un movimiento oscilante de giro sobre su eje hasta un determinado ángulo, Figura II.41.



Figura II.41 Tipos de engranajes cónicos

El mandril porta pieza (A) está sostenido sobre una base soporte (B), a su vez giratoria alrededor de un eje ( $O - O'$ ), por acción del mecanismo de tornillo sinfín y rueda helicoidal (E). El centro (O) coincide con el vértice del cono primitivo de la rueda (P) a tallar. En el extremo del mandril se dispone una rueda cónica (C), con igual conicidad que el cono primitivo de la rueda a cortar, apoyándose sobre una plantilla (U). Cuando se le imprime una rotación al mecanismo de tornillo sinfín (E), la rueda tronco cónica (C) es obligada a rodar sobre la plantilla (U), y transmite por lo tanto su movimiento a la pieza a tallar (P).

Para que este movimiento resulte preciso, se ha dispuesto sobre el plano de apoyo y el cono de rodamiento dos delgadas láminas de acero que constituyen la plantilla. Cada una de ellas tiene un extremo apoyado sobre el plano (D), y el otro acompañando al cono de rodamiento. Merced al movimiento oscilatorio del mandril (A) y la rotación del cono (C) combinados, va presentando la herramienta (H), en el momento en que no tiene contacto con la pieza, trayectorias direccionales que convergen todas en (O). Al mismo tiempo, el divisor continuo que lleva la máquina, permite hacer que gire la rueda a tallar un paso por cada carrera activa de la herramienta, determinando el perfil del diente.

Con este principio, la cuchilla corta los flancos de los dientes durante una rotación planetaria de la amplitud permitida por la plantilla. Terminada esta operación, el cono (C) vuelve a su posición inicial, y dispositivos automáticos de mando, incluido el divisor, provocan la rotación angular correspondiente a un nuevo paso.

Este mecanismo tiene la ventaja de repartir las inexactitudes que puedan presentarse debido al desgaste de las cuchillas. La generación del perfil del diente se produce de forma progresiva en tres tiempos.

El mayor inconveniente que presenta este procedimiento está en que son necesarias tantas plantillas como ángulos diferentes tengan las ruedas a tallar.

○ **Procedimiento GLEASON**

▪ Sistema de cuchillas dobles o Coniflex

Son utilizadas dos herramientas que se mueven alternativamente actuando cada una en la carrera de retroceso de la otra, teniendo la rueda a tallar un movimiento de rotación periódica o de avance angular (Figura II.42). Cuando un diente queda acabado, la rueda gira una magnitud correspondiente al paso, y se vuelve a repetir el mismo proceso. Mediante este sistema son generados engranajes cónicos rectos.

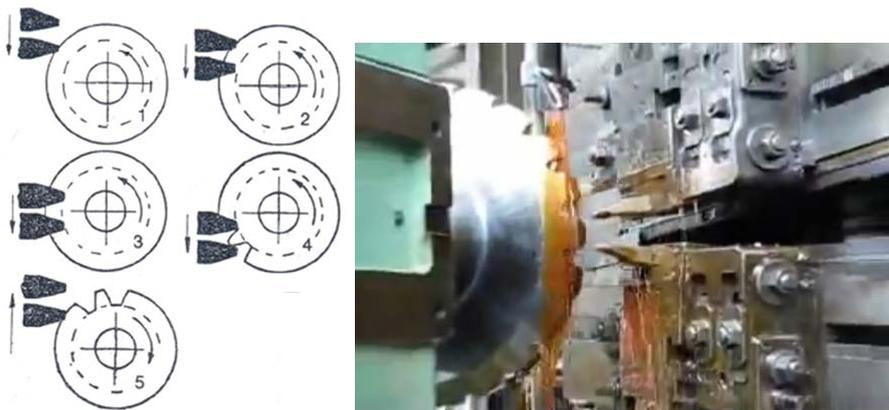


Figura II.42 Sistema de cuchillas dobles o Coniflex

Este sistema, patentado por Gleason, permite realizar el “abombado” de los flancos de los dientes. Los dientes abombados ofrecen la ventaja de reducir las superficies de contacto durante el engrane, garantizando así una transmisión regular, y dotando al engranaje de una mayor resistencia de la que presenta el diente recto.

Una de las evoluciones de la máquina Gleason fue la de introducir dos fresas en forma de disco en sustitución de las dos cuchillas (Figura II.43), las cuales poseen

ejes regulables e incorporan herramientas de corte que pueden ser fácilmente sustituidas.

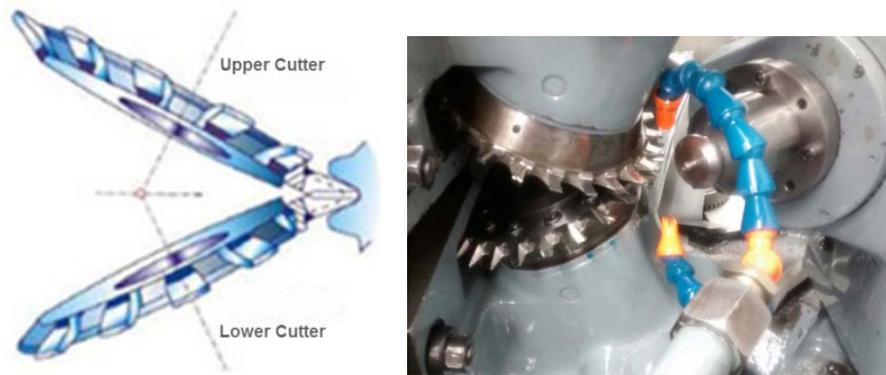


Figura II.43 Sistema Coniflex con fresas en forma de disco

▪ Método Gleason – Espiral oblicua – Face Milling (single indexing)

La casa Gleason de USA, dedicada a la fabricación de engranajes y máquinas para construir engranajes, tiene su propio tipo de diente normalizado, habiendo sido la primera en construir talladoras de engranajes cónicos en espiral. Posteriormente aparecieron otros constructores, como Klingelnberg, Oerlikon, Boettcher y Mammano.

Este método resuelve el problema del tallado en curva con perfil individual a evolvente de círculo, pero con generatrices que se acercan a la forma de un arco de círculo de centro excéntrico respecto al eje de la rueda plana.

La fabricación se basa en fresas de plato con dientes de corte perimetral que, o bien generan alternativamente los flancos cóncavos y convexos, o bien generan solo los flancos cóncavos o los flancos convexos. Las cuchillas dispuestas en el cortador realizan un movimiento circular mientras el engranaje se mantiene fijo en una determinada posición, generándose así uno de los dientes. Este proceso se repetirá tantas veces como dientes tenga el engranaje a fabricar.

La herramienta que utiliza está formada por un disco que girando recorre una trayectoria circular. Para ello, se dispone un cierto número de cuchillas de sección triangular con vértice a  $29^\circ$ , uno cortando a la izquierda y otro a la derecha, haciéndolo en conjunto como los dientes de una fresa de cuchillas múltiples.

Sobre el disco pueden montarse cuchillas para desbaste y acabado de los flancos de los diferentes dientes.

El sistema Gleason permite el tallado de dientes con diferentes inclinaciones (incluso con ángulo cero en el punto medio del diente) y aproximaciones a la espiral de diferentes radios.

El dentado Gleason suele ser de altura variable, por lo que requiere que la fresa penetre más profundamente en la zona exterior del diente generado (generatriz  $Re$ ) que en la zona interior (generatriz  $Ri$ ), como se muestra en la Figura II.44.

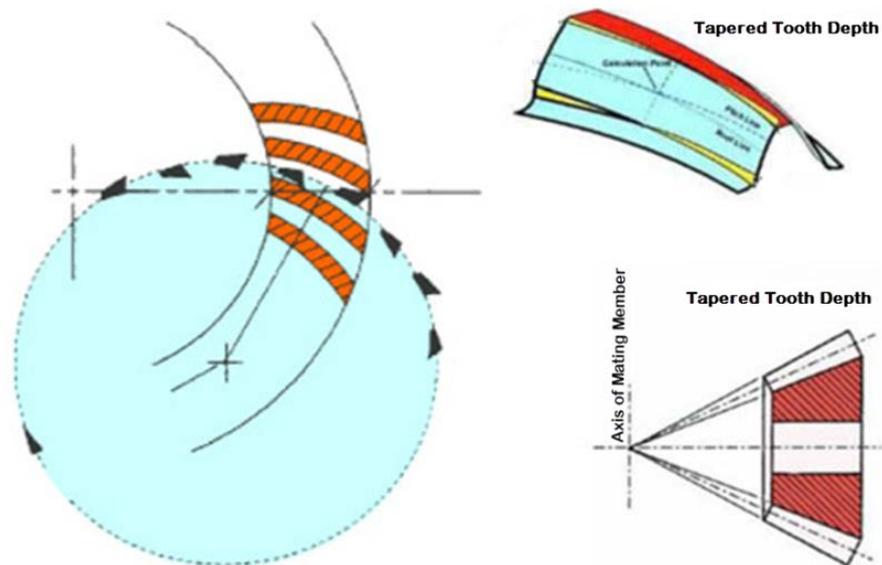
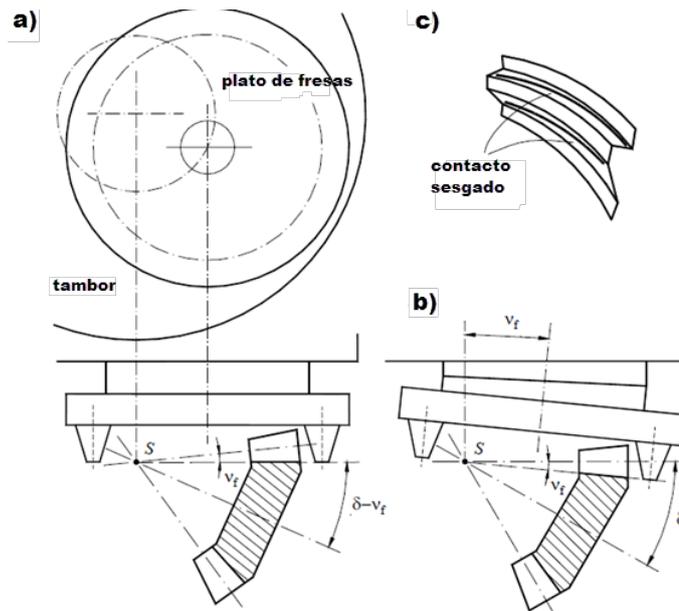


Figura II.44 Esquema sistema Gleason con dentado de altura variable

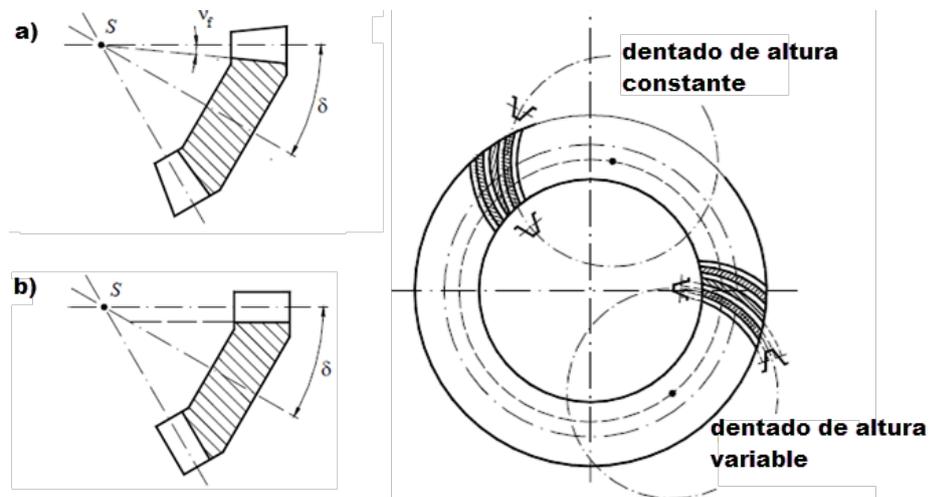
Para obtener este efecto, es necesario que la fresa y la rueda adopten una de las siguientes disposiciones: a) Fresa de plato tangente al cono de pie de la rueda a tallar (la más habitual, Figura II.45 a)). Los dientes de corte se mueven en un plano paralelo a la rueda plana materializada por el tambor, pero la rueda no es tangente al axoide de la rueda generada, sino a su cono de pie; b) Fresa de plato inclinada (Figura II.45 b)). El axoide de la rueda plana y de la rueda generada son tangentes, pero los dientes de corte se mueven en un plano ligeramente inclinado respecto a la rueda plana (ángulo  $V_f$ ).



**Figura II.45** Disposición del tambor, la fresa de plato y la rueda a tallar en el sistema de Gleason con dentado de altura variable

Tanto una disposición como la otra generan ruedas dentadas que no son rigurosamente conjugadas entre sí, hecho que tiene como consecuencia que el contacto entre los dientes entre si presenta un sesgo (Figura II.36 c)). Para compensar este defecto, la casa Gleason indica diversos métodos de corrección que, si bien son efectivos, no dejan de ser molestos y sujetos a posibles errores.

Con dentados de altura constante (la generatriz del pie es paralela al axoide, Figura II.37 b)), se consigue al mismo tiempo que los axoides de la rueda plana y de la rueda generada sean tangentes y que los dientes de corte se muevan en un plano paralelo a la rueda plana, procedimiento que permite tallar ruedas conjugadas entre sí con contacto sin sesgo.



**Figura II.46** a) Dentado de altura variable; b) Dentado de altura constante

Aun así, destacar que el sistema Gleason adopta habitualmente el dentado de altura variable (Figura II.46 a)) por razones de fabricación [Riba, 1999], como se puede observar en la Figura II.47.



Figura II.47 Dentado Gleason de altura variable

En efecto, si la corona se talla con una fresa de plato única para ambos flancos (procedimiento más económico, ya que tiene un número de dientes superior) y la altura y la anchura de los dientes son constantes, el adelgazamiento del diente en la zona interior se acumula en la cabeza de la corona; por tanto el entre diente del piñón (tallado con dos fresas diferentes) resulta muy estrecho en la cara interior (generatriz  $R_i$ ) y las herramientas se presentan excesivamente débiles. Gleason ha presentado un dentado de altura constante (sistema Equidep) con herramientas independientes para los flancos cóncavos y convexos, haciendo una división de  $\frac{1}{2}$  paso entre el corte de unos y otros flancos, a fin de equilibrar anchura y entre dientes (este procedimiento se aproxima al sistema Oerlikon).

○ **Procedimiento SPIROMATIC–OERLIKON**

▪ *Sistema epicicloide – Face Hobbing (continuous indexing) con plato de fresas*

Basados en el mismo principio del método Gleason, se han ideado varios métodos similares con varios grupos de dos herramientas montadas sobre el mismo disco, cada una de ellas siguiendo una trayectoria individual, efectuándose el tallado sobre varios dientes simultáneamente.

Encima de la rueda plana de referencia, los dientes siguen generatrices de epicicloide extendida (punto exterior al círculo que genera una cicloide rodante sobre el círculo de base). Este sistema no requiere de un dispositivo divisor ya que todos los dientes se van generando simultáneamente.

La talladora Spiromatic–Oerlikon permite realizar este procedimiento de trabajo.

El plato de fresas contiene diversos conjuntos de dientes ( $Z_0=5$ , en la Figura II.48) formados por una herramienta de desbaste seguida de dos más que acaban los

flancos cóncavo y convexo, dispuestas de forma ligeramente espiral sobre el plato. El número de conjuntos de dientes y el número de pasos entre ambas ramas de la epicicloide extendida tienen que corresponderse.

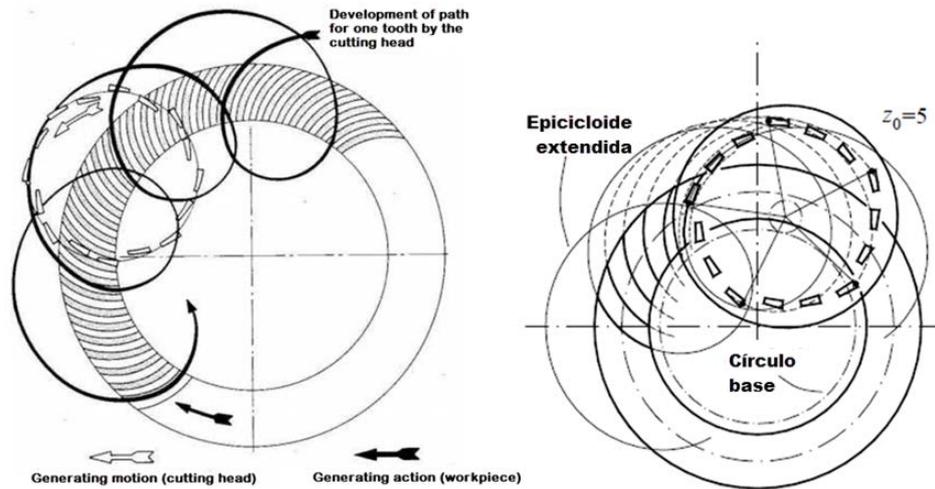


Figura II.48 Procedimiento Spiromatic-Oerlikon

A diferencia del sistema Gleason, en donde la rueda generada se encuentra parada durante el desbaste, en el sistema Oerlikon la rueda generada gira lentamente en sentido contrario a la fresa de plato de forma sincronizada con el fin de crear un movimiento relativo de epicicloide extendida, Figura II.49. Por lo tanto, es un sistema continuo que fabrica todos los dientes simultáneamente.



Figura II.49 Movimiento relativo de epicicloide extendida

Simultáneamente al movimiento anterior, es necesario un pequeño movimiento de generación, como si engranasen la rueda plana (materializada por el tambor) y la rueda generada, el cual se puede realizar de dos formas: a) Con el plato de fresas a la profundidad total y con un giro del tambor elevado, desde el momento en que entra en contacto la fresa de plato y la rueda generada hasta que se pierde este contacto (procedimiento más lento); b) Iniciando una penetración frontal del plato de fresas hasta la altura correspondiente, y haciendo después un pequeño giro del

tambor y la rueda generada (procedimiento mucho más eficaz, y el más usado habitualmente).

El sistema Oerlikon, al avanzar cada nuevo corte respecto al anterior y repartir anchuras y entre dientes, admite un dentado de altura constante (Figura II.50) que genera ruedas correctamente conjugadas.

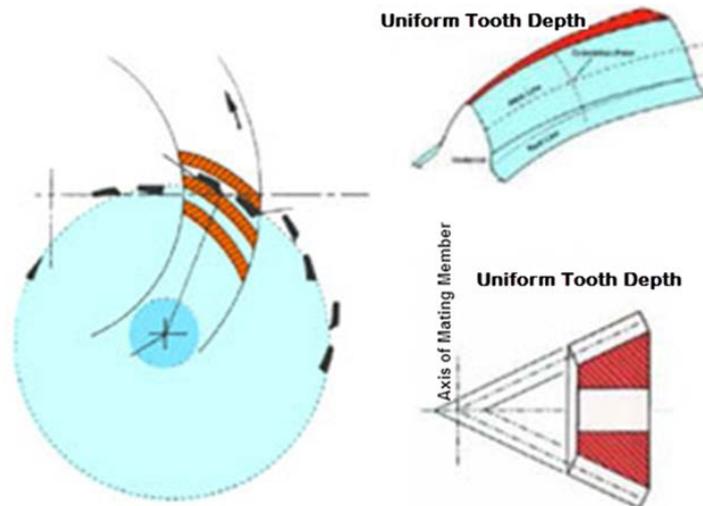


Figura II.50 Esquema sistema Oerlikon con dentado de altura constante

Es un procedimiento muy flexible que permite asegurar un contacto centrado de los flancos de los dientes por medio del ligero aumento de la curvatura del flanco cóncavo y disminuir ligeramente la del flanco convexo.

En la Figura II.51 se puede observar la fabricación de engranajes con dentado de altura constante mediante el sistema Oerlikon.



Figura II.51 Fabricación de engranajes mediante el sistema Oerlikon

○ **Procedimiento KLINGELNBERG**

- *Sistema Palloid – Face Hobbing (continuous indexing) con fresa madre cónica*

El sistema KlingelInberg está basado en el principio de talla de las coronas cónicas, empleándose una fresa-madre de forma troncocónica para la obtención de los

dientes en espiral. La generatriz de los dientes siguen evolventes de círculo, como se puede observar en la Figura II.52. Es por este motivo que la fresa tiene forma troncocónica.

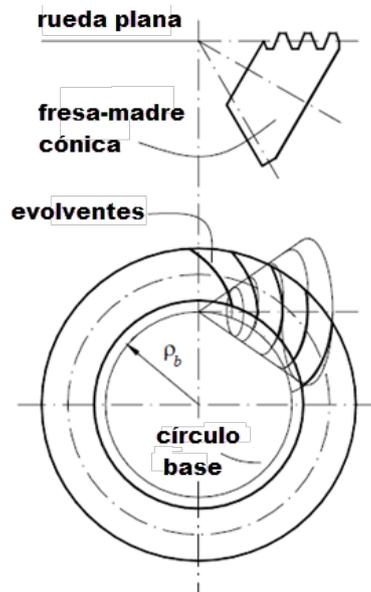


Figura II.52 Procedimiento Klingenberg con fresa-madre cónica

Los dientes están dispuestos según una espiral de paso constante, trabajando fresa-madre y rueda a tallar como si engranarían, igual que lo hicieran una vez tallados ambos engranajes. La sección normal del dentado Klingenberg (distancia entre dos evolventes del mismo círculo de base) es siempre constante, debido a que el aumento de la generatriz se compensa con el aumento del ángulo.

Este sistema permite el dentado de altura constante (ruedas correctamente conjugadas) y la fabricación por fresa-madre es de una elevada eficiencia. Sin embargo, requiere de fresas especiales de coste muy elevado, fabricadas en forma exclusiva por la misma casa que construye la máquina. Es por esta razón que el uso de estas solo se justifica en la fabricación de series muy elevadas.

El procedimiento Klingenberg se utiliza para el tallado de engranajes hipoidales (hiperboloides). Los engranajes hipoidales, cuyo aspecto general es el de los engranajes cónicos, se emplean para la transmisión del movimiento entre ejes alabeados, en los cuales no coinciden los vértices de los conos primitivos originales.

Las superficies primitivas del movimiento entre ejes alabeados se reducen a dos hiperboloides, que tienen en cada instante una generatriz común.

El movimiento relativo puede obtenerse por el rodamiento de un hiperboloide sobre el otro, pero acompañado de un deslizamiento en la dirección de la generatriz de contacto.

Para que dos hiperboloides de revolución puedan considerarse superficies primitivas que se acuerden o se correspondan, se debe cumplir que:

$$R1.ctg\alpha1 = R2.ctg\alpha2$$

siendo R el radio de la circunferencia de la garganta del hiperboloide, y  $\alpha$  el ángulo que forman las generatrices del hiperboloide con el eje de rotación (Figura II.53).

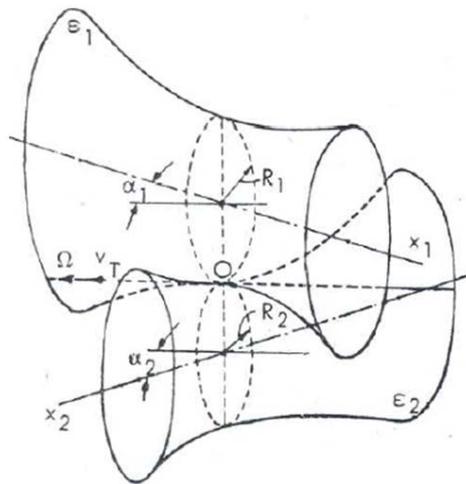


Figura II.53 Hiperboloides con generatriz en común para cada instante

Mediante este procedimiento pueden ser talladas ruedas cónicas de hasta un diámetro máximo de 840mm y un módulo máximo de 15.

En la Figura II.54 se puede observar la fabricación de engranajes con dentado de altura constante mediante el sistema Klingelnberg.



Figura II.54 Fabricación de engranajes mediante el sistema Klingelnberg [KLINGELNBERG, 2014]

Los engranajes espirocónicos son comúnmente fabricados mediante el uso de procesos discontinuos. Si la línea transversal del diente tiene forma de evolvente o de epicicloide extendida, la producción puede llevarse a cabo mediante procesos continuos.

En lo que respecta a los procesos de acabado de esta tipología de engranajes, los engranajes espirocónicos, son tradicionalmente acabados utilizando el proceso de lapeado. El lapeado es el proceso más antiguo pero también el más usado para el suavizado de la superficie de los flancos de los dientes reduciéndose así el ruido de funcionamiento. La corona y el piñón son fijados en una máquina especial de lapeado engranando entre sí. Aceite mezclado con partículas finas abrasivas (normalmente SiC) es pulverizado en la zona de contacto generándose así la eliminación de material [Stadfeld, 2001]. El proceso se mantiene hasta ser alcanzado el contacto deseado, el cual se visualiza cuando cada uno de los diferentes flancos que componen el engrane aparecen coloreados. Este proceso es bastante lento, durando al menos unos 10 minutos por par. Este par formado por corona-piñón engranará a lo largo de toda su vida útil.

En la actualidad, cada vez un mayor número de fabricantes prefiere aplicar procesos de rectificado para los pares de engranajes cónicos, en vez de aplicar un proceso de lapeado, Figura II.55.

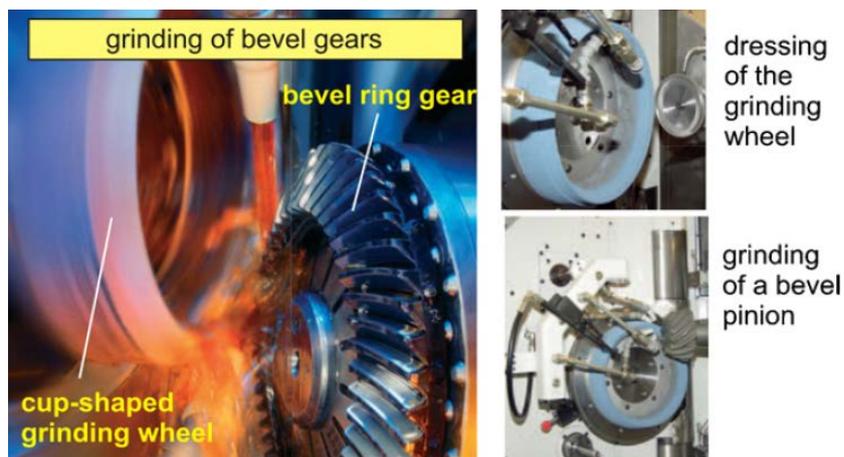


Figura II.55 Rectificado de engranaje espirocónico con muela de corindón

Las máquinas modernas para el rectificado de engranajes cónicos hipoides utilizan muelas de vaso con una forma especial de cono, utilizando toda una gama de materiales abrasivos, desde CBN a alúmina, en configuraciones que permiten el diamantado de la muela [Haupt, 1997].

Las máquinas rectificadoras controladas por CNC ofrecen una precisión y calidad más estables, una anchura de diente homogénea, una alta repetibilidad, y una mayor intercambiabilidad al evitarse el emparejamiento a lo largo de la vida útil de la misma. También se alcanza un mayor rendimiento al reducirse ligeramente los tiempos de fabricación y de puesta [PHOENIX, 2008].

### II.3. Fabricación de engranajes a punta de cuchilla. Cinemáticas de máquina y generación del contexto propicio para el mecanizado en máquina multieje

Los engranajes espirocónicos llevan fabricándose más de 50 años. Aunque han ido surgiendo nuevas mejoras de los métodos iniciales, los principios fundamentales del mecanizado de esta tipología de engranajes siguen siendo los mismos.

En los últimos años, debido a sus buenas características de engrane, los engranajes espirocónicos son cada vez más utilizados, principalmente en las nuevas transmisiones mecánicas.

Históricamente, son dos las vías fundamentales para la fabricación de un engranaje espirocónico. El primer método es mediante la utilización de las tecnologías tradicionales, como ya se ha expuesto en el apartado anterior. El segundo de estos métodos es el basado en un modelo sólido de la geometría. Los sólidos obtenidos nunca han llegado a ser suficientemente buenos para la obtención de superficies de calidad, además de presentar una productividad menor.

Además, ambos métodos requieren de diferentes máquinas, habilidades de los operarios y software de programación.

En los últimos años la cosa ha cambiado significativamente. El desarrollo del concepto *multitasking*, junto al desarrollo de nuevos software de programación que se combinan con nuevos procesos de mecanizado, han generado el contexto propicio para la reinención en la fabricación de engranajes mediante el uso de máquinas de propósito general.

Las máquinas *multitasking* pueden ser englobadas principalmente en dos grandes categorías, las máquinas torno-fresadoras (*turn-mill*) y las fresadoras con función de torno (*mill-turn*). Las primeras de estas tipologías son adecuadas para el mecanizado de piezas de mayor longitud, por ejemplo piñones, mientras que las fresadoras con función de torno son adecuadas para piezas de mayores diámetros, como son las coronas [Chaphalkar, 2013].

Con el desarrollo de las tecnologías multieje para el mecanizado de superficies complejas a principios de los años 2000, empiezan a ser publicadas investigaciones en las cuales se muestra la factibilidad del mecanizado de los engranajes espirocónicos en máquinas de propósito general mediante el uso de herramienta esférica estándar, como se presenta en los trabajos de Suh [Suh, 1998][Suh, 2001].

K. Kawasaki, con el apoyo del Ministerio de Economía de Japón, presenta en su trabajo una comparación del mecanizado en un centro vertical de 3 ejes y en uno 5 ejes con tecnología *multitasking*.

Mientras que en el centro vertical de 3 ejes el mecanizado se realizó de manera ineficiente, al no poder ser controlada de una manera óptima la posición de la herramienta respecto a la superficie, con el centro de mecanizado de 5 ejes *multitasking* esta problemática no se dio. Gracias al acceso a los 5 ejes de máquina, a la herramienta se la pudo dotar de la posición óptima para cada uno de los puntos que definen la superficie a mecanizar.

Una optimización y control de la posición de la herramienta a lo largo de todo el proceso de mecanizado permite el uso de herramientas de un mayor diámetro [Kawasaki, 2011]. Mayores diámetros dotan a la herramienta de una mayor robustez y mayores velocidades de avance, por lo que los tiempos de mecanizados se verán reducidos.

Kawasaki plantea el mecanizado de acabado de los dientes mediante una estrategia de corte que permite mecanizar utilizando el lateral de la herramienta de corte (*swarf cutting* o *flank milling*). En la Figura II.56 se plasma de manera gráfica la diferencia existente, en cuanto al área de contacto entre herramienta y pieza a mecanizar, entre utilizar una estrategia de mecanizado que permita mecanizar con todo el flanco de la herramienta (en color azul) u otra que solo permita mecanizar utilizando un único punto de la herramienta (*point milling*) (en color rojo).

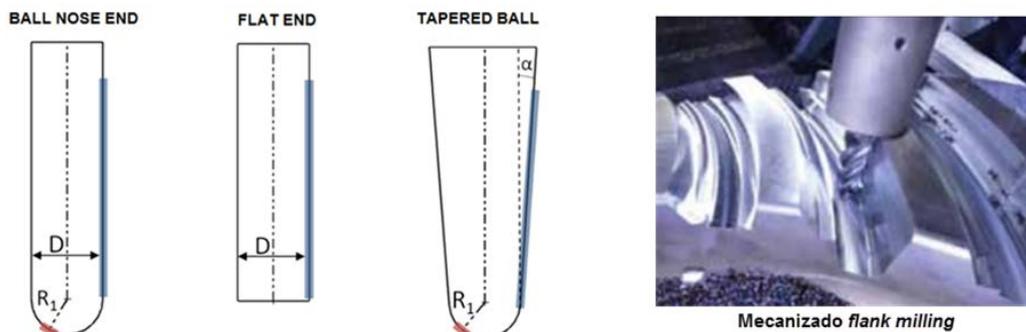


Figura II.56 Point milling vs. flank milling

La ventaja fundamental de esta técnica es que se ven reducidos los tiempos de mecanizado al aumentar el caudal de viruta arrancado ( $Q$ ) por la herramienta. Esta técnica de mecanizado solo puede ser aplicada a superficies regladas. Una superficie es reglada si por cada punto de la misma, existe una línea recta contenida en la superficie. Una superficie reglada puede ser siempre descrita (al menos localmente) por una ecuación paramétrica. Las superficies regladas pueden dividirse a su vez en dos tipos: alabeadas (Figura II.57 a)) y desarrollables (Figura II.57 b)).

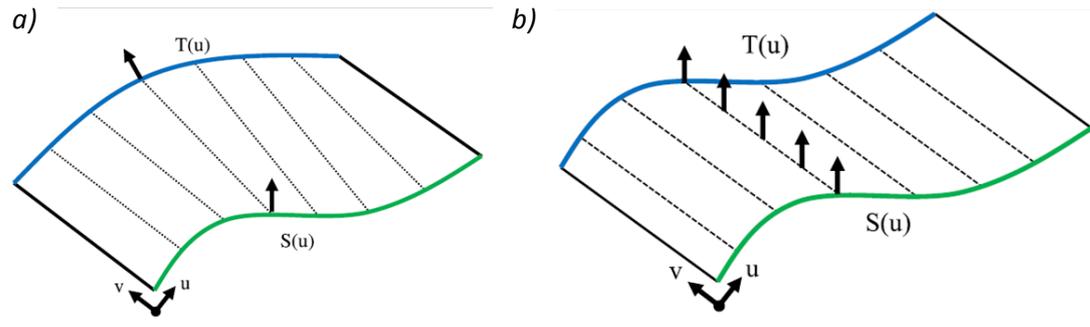


Figura II.57 a) Superficie reglada álabeadada; b) superficie reglada desarrollable [Harik, 2013]

Tras analizar el patrón de contacto del diente durante el engrane, se observó que este se encontraba situado en el centro de la superficie del diente, y que su longitud era aproximadamente del 50% de la longitud del diente. Tras estos resultados se validó el uso de la tecnología multieje como método para la realización de engranajes espirocónicos.

Debido a la problemática que se desprende del uso de fresas esféricas, principalmente resumida en una pobre eficiencia debida a una reducida área de contacto de la herramienta, en los últimos años han sido presentadas algunas publicaciones en las que el esculpido de la superficie de los dientes se realiza mediante el uso de herramientas frontales estándares, cuyo uso permite un área de contacto mayor, y por lo tanto una mayor eficiencia del mecanizado [Vichers, 1989][Fan WG, 2010].

En las conclusiones de estos artículos los autores dejan constancia de que el uso de esta tipología de herramienta solo es factible cuando las superficies tengan perfiles relativamente suaves y abiertos. Las superficies de los dientes de los engranajes espirocónicos presentan ciertas restricciones que hay que tener en cuenta. Estos presentan una compleja estructura topológica superficial, además de un espacio estrecho entre diente y diente. Además, en este hueco interdental coinciden dos flancos de dientes diferentes, uno cóncavo y otro convexo.

Con el fin de encontrar nuevas alternativas a las herramientas estándares ya expuestas, en la bibliografía se pueden encontrar a autores que plantean otra tipología de herramienta, como pueden ser herramientas de disco con el extremo cóncavo (Figura II.58). En este caso es invertida la secuencia de los ángulos *lead angle* y *tilt angle*, que son los que definen la orientación de la herramienta, y se separa las funciones de ambos ángulos. El *lead angle* será determinado de acuerdo a la posición del punto de contacto del corte en la superficie del diente correspondiente, con el fin de evitarse así posibles interferencias. En cambio, el *tilt angle* será determinado a partir de lo expuesto en la teoría de fresado para herramienta frontal, con el único objetivo de conseguir una mayor anchura en el corte.



Figura II.58 Mecanizado con herramienta de disco con extremo cóncavo

El método de fresado planteado presenta ciertas ventajas, como un aumento de la vida útil de la herramienta y una mayor eficiencia, al verse aumentada la anchura de la banda del mecanizado [Xiao, 2014].

También han sido estudiados, aunque no para el caso particular del mecanizado de los engranajes espirocónicos, como afectan la variación de ciertos parámetros del proceso de corte con herramienta estándar en la calidad del engranaje obtenido.

Parámetros como la dirección de la trayectoria, el número de pasadas y su disposición sobre el flanco de los dientes, y el orden del mecanizado de los diferentes dientes son parámetros que han sido estudiados, Figura II.59.

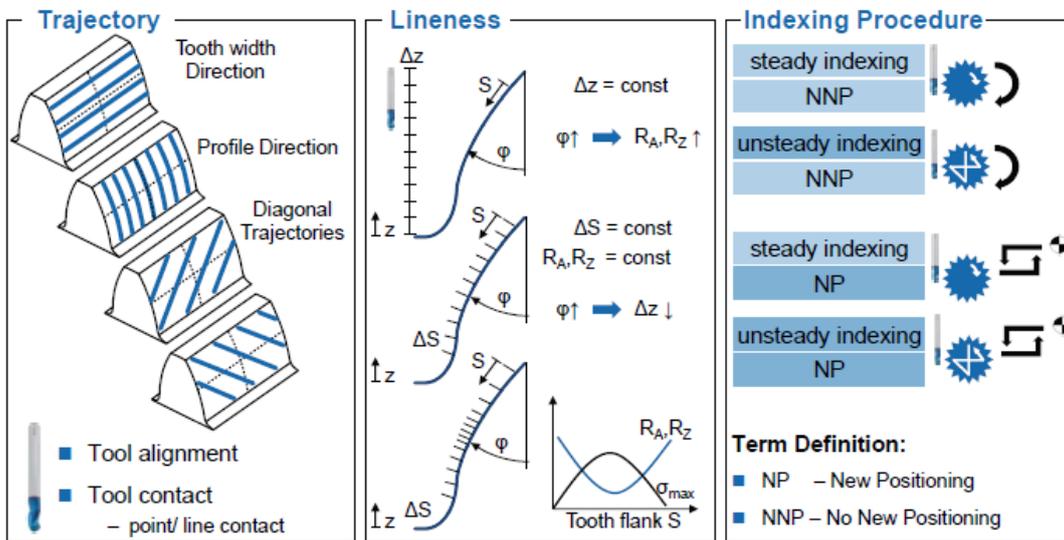


Figura II.59 Parámetros de mecanizado estudiados [Klocke, 2014]

La complejidad de la trayectoria, aunque desde el punto de vista de la fabricación no hay restricciones tecnológicas, hay que tenerla en cuenta, ya que cuanto más compleja sea esta mayor será el número de ejes y de movimientos adicionales de la herramienta. Se consigue una estrategia más eficiente si la herramienta se posiciona tangencialmente al flanco de la herramienta.

El espacio existente entre pasada y pasada de la herramienta define la rugosidad superficial [Pfeiter, 2006]. Además, la desviación del perfil aumenta exponencialmente a medida que decrece el número de pasadas de la herramienta. Este parámetro también tiene una influencia significativa en la desviación de la evolvente (*profile form deviation*) [Klocke, 2014].

Con la variación en el orden de mecanizado de los dientes puede llegar a minimizarse el error de paso (*pitch deviation*) de los engranajes [Klocke, 2014].

A grandes rasgos, se puede afirmar que la calidad de los engranajes generados con herramienta estándar en máquinas de propósito general es muy buena. Esta calidad es proporcional al tiempo de ciclo del mecanizado, con mayores tiempos de ciclo mayor calidad. Como en todo proceso de mecanizado, la calidad de la superficie obtenida depende del avance ( $V_f$ ) y del *stepover* programado (distancia entre pasada y pasada, en sentido perpendicular al avance  $\approx a_e$ ).

El valor programado de *stepover* afecta directamente al error de evolvente (*profile error*) mientras que el avance afecta al error de avance (*lead error*) [Chaphalkar, 2013]. En la Figura II.60 queda representada la relación entre los parámetros de mecanizado recientemente comentados y la calidad final de la superficie.

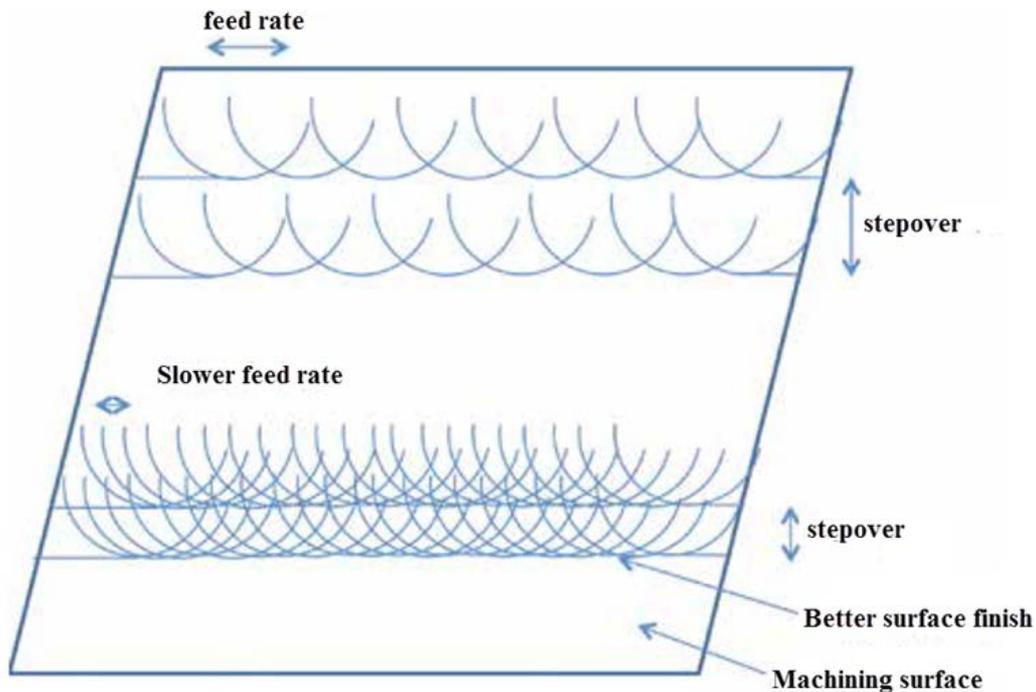


Figura II.60 Relación entre parámetros de mecanizado y calidad superficial [Chaphalkar, 2013]

Como ya ha sido comentado anteriormente, es en los últimos años cuando se ha generado el contexto propicio para plantear el mecanizado de engranajes, indistintamente de su geometría o tamaño, en máquinas de propósito general como un proceso totalmente factible, y asegurando unos estándares de calidad muy aceptables.

A continuación son expuestos algunos de los factores de mayor relevancia que han posibilitado esta nueva situación,

- **Evolución de la máquina-herramienta: Cinemática, CNC y accionamientos**

La evolución de la máquina-herramienta en los últimos años asegura una alta repetibilidad del proceso de mecanizado, parámetro de vital importancia para el caso particular de los engranajes, que no dejan de ser una sucesión de “huecos”, tantos como dientes tiene el engrane, en el cual se conserva constante el ángulo existente entre cada uno de ellos.

- **Desarrollo y evolución de los software CAD/CAM**

En la actualidad, los software CAD/CAM son tan potentes que permiten la simulación exacta del proceso de mecanizado, verificándose así posibles interferencias dentro de máquina con la finalidad de evitarlas.

El trinomio formado por el control de la máquina, la cinemática de la misma y el software CAM en el cuál han sido programadas las diferentes estrategias de mecanizado, aseguran una interpelación precisa entre los diferentes ejes que entran en juego en el mecanizado.

- **Postprocesador**

Para una correcta simulación en el entorno CAM es preciso un postprocesador adecuado y depurado. Una correcta programación del postprocesador asegura una simulación real del proceso y por lo tanto un mecanizado sin sustos.

El postprocesador depende principalmente de la cinemática de la máquina y del tipo de control.

- **Herramientas estándar**

El uso de herramienta estándar se traduce de manera directa en menores precios de adquisición y en menores plazos de entrega.

- **Nuevos sistemas de amarre/utillaje**

Sistemas de “punto cero” y sistemas que permiten una elevada accesibilidad a la pieza (5 caras), reduciéndose así interferencias máquina-utillaje y reduciendo sobremateriales (demasías).

Las estructuras más utilizadas en el mercado de las máquinas multieje se plasman en la Figura II.61, extraídas del libro *Machine Tools for High Performance Machining* (Lopez de Lacalle & Lamikiz, Springer, 2009).

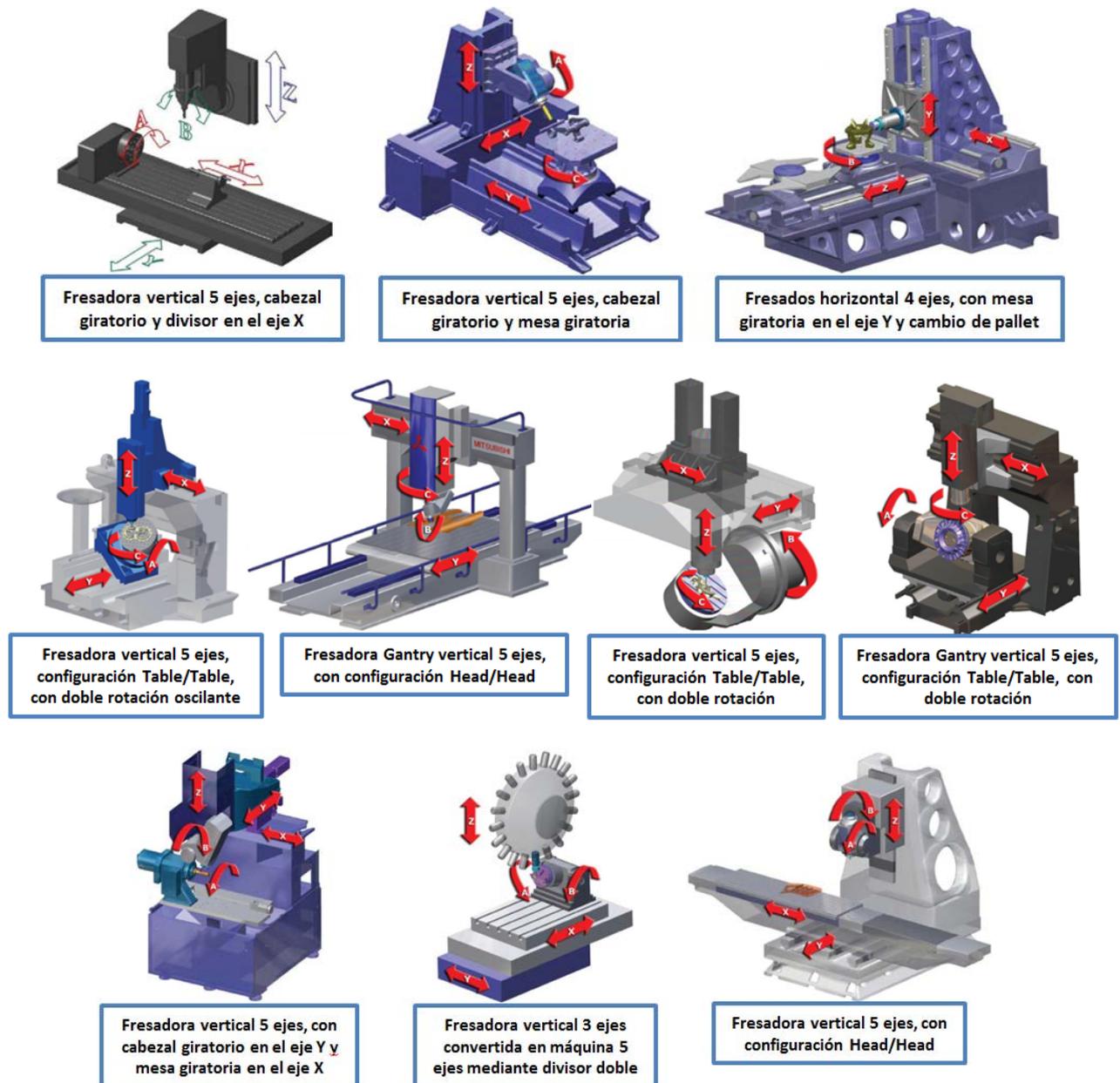


Figura II.61 Diferentes estructuras de máquina-herramienta multieje

Antes de utilizar una máquina multieje es imprescindible conocer bien la estructura cinemática de la misma, por un lado para realizar una correcta programación y, por el otro, para prever los movimientos de la máquina durante el mecanizado. Además, si las trayectorias son programadas mediante un software CAD/CAM, es recomendable tener bien configurada la máquina virtual para asegurar así una simulación real, evitando posibles colisiones y previendo el resultado final del mecanizado.

El primer paso será conocer cómo está estructurada la cinemática de la máquina.

Una vez conocida la cinemática de la máquina, la programación CAM se hará respecto a la misma. Para una correcta y veraz simulación, la máquina virtual y el postprocesador también serán configurados en función de esta cinemática.

El mecanizado en máquinas de propósito general con herramienta estándar, máquinas multieje que permiten un mecanizado 5 ejes, presenta como su mayor aliciente la flexibilidad en el mecanizado. Estas máquinas permiten el mecanizado de cualquier tipología de engranaje (cilíndricos rectos, helicoidales, cónicos, espirocónicos, herringbone,...), siendo la única tecnología que es capaz de hacerlo, como se muestra en la Figura II.62.

Tipos de máquina	Planing	Milling	Hobbing	Shaping	Form Grinding	Generating Grind
Spur gears	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Helical gears	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Herringbone	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Internal gears	Si	Si	No	No	Si	Si
Racks	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Straight bevel gears	Si	Si	No	No	Si	Si
Spiral bevel gears	Si	Si	No	No	Si	Si
Hypoid gears	Si	Si	No	No	Si	Si
Worms	No	Si	No	No	Si	No
Worm gears	No	Si	Si	No	Si	Si



Figura II.62 Tipología de engranaje vs. procedimiento de fabricación

Las principales ventajas que aporta el uso de una máquina de propósito general 5 ejes para el mecanizado de este producto son:

- Obtención de un producto de calidad elevada (DIN 3 (AGMA 14\*\*)). (*Calidad obtenida en el mecanizado de un engranaje espirocónico de  $\varnothing 1.320\text{mm}$  y con  $m=25$* )

Engranaje cónico recto DIN $\leq 5$

Engranaje cilíndrico recto DIN $\leq 6$

En esta tipología de máquina estándar, la calidad final obtenida es directamente proporcional al número de pasadas programadas. Un mayor número de pasadas también conlleva un mayor tiempo de mecanizado.

Por comparar con otras de las tecnologías, la calidad alcanzable mediante fresa-madre (*hobbing*) es de DIN 7-8 (AGMA 9-10\*\*).

\*\*according to AGMA A2000-A88 standards  
[DMG-MORI, 2015]

- Especialmente indicado para el mecanizado de engranajes grandes complejos, y para tiradas de número reducido. Engranajes “únicos”  
Cuanto mayor es el tamaño del engranaje a mecanizar mayor puede ser la calidad alcanzable.
- Utilización de herramienta estándar  
Un mayor número de proveedores se traduce directamente en un menor coste de adquisición, y al ser herramienta estándar, los plazos de entrega se reducen considerablemente. Los plazos de entrega suelen rondar las 24-48 horas.  
Esto último repercute directamente en los plazos de entrega de pieza terminada al cliente, haciendo así más atractiva la oferta.  
Por comparar con otras de las tecnologías estudiadas, los plazos de entrega de una fresa-madre, debido a su compleja geometría, es de 8-12 semanas.
- Enorme flexibilidad tanto en geometría como en tamaño, Figura II.63  
Esta enorme flexibilidad se debe al uso de máquinas con cinemáticas tales que permitan el mecanizado en 5 ejes continuos, implementados con utillajes que faciliten la accesibilidad a la pieza a mecanizar por 5 de las caras.

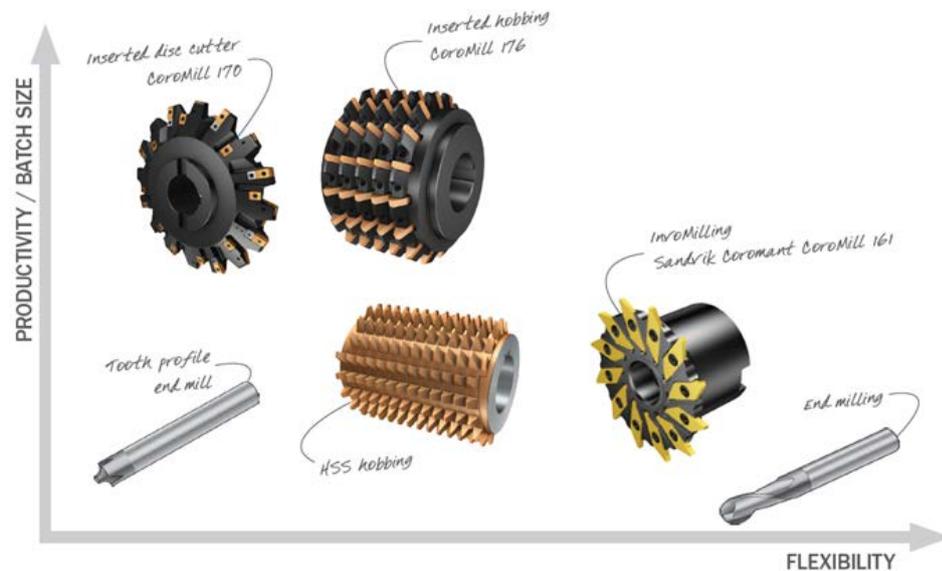


Figura II.63 Comparación de los diferentes métodos de generación [InvoMilling, 2012]

En las máquinas específicas, los engranajes son generados en su mayoría mediante procesos de corte continuos, clasificados en función del método de fabricación utilizado. Dependiendo del tipo de máquina utilizada, serán generados una u otra tipología de engranaje, como ya ha sido comentado anteriormente.

Además, las máquinas también limitan la fabricación en función del tamaño de los mismos, como queda patente en la página web del fabricante número uno a nivel mundial, como es Gleason. En la Figura II.64, se plasman los diferentes modelos de máquina existentes tanto para la tipología cilíndrica como para la espirocónica. Se puede comprobar que dependiendo del tamaño del engranaje a mecanizar será seleccionado uno u otro modelo.

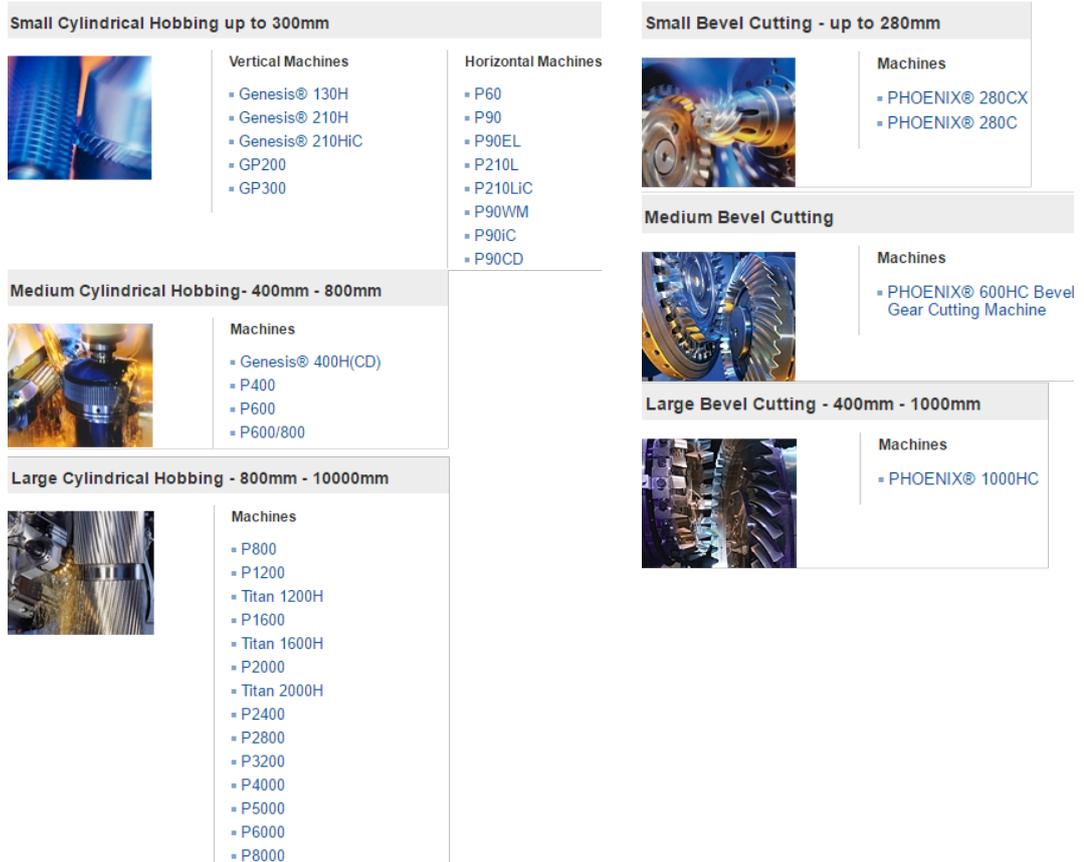


Figura II.64 Modelos máquina en función de la tipología y dimensiones del engrane a fabricar

[GLEASON, 2017]

Además, todas estas máquinas específicas de tallado trabajan sobre una pieza pre-mecanizada, también conocida como “blank”. Por lo tanto, para la realización de este mecanizado previo, es necesario disponer al menos de otra máquina, con todo lo que ello conlleva.

Otro campo en el que queda patente la flexibilidad del mecanizado en máquina de propósito general es en la de posibilitar la inclusión de micro correcciones de flanco, como son el *tip relief*, *root relief*, *angular profile variance*, *profile crowning*, *angular lead variance*, *end relief* y *lead crowning* (Figura II.65).

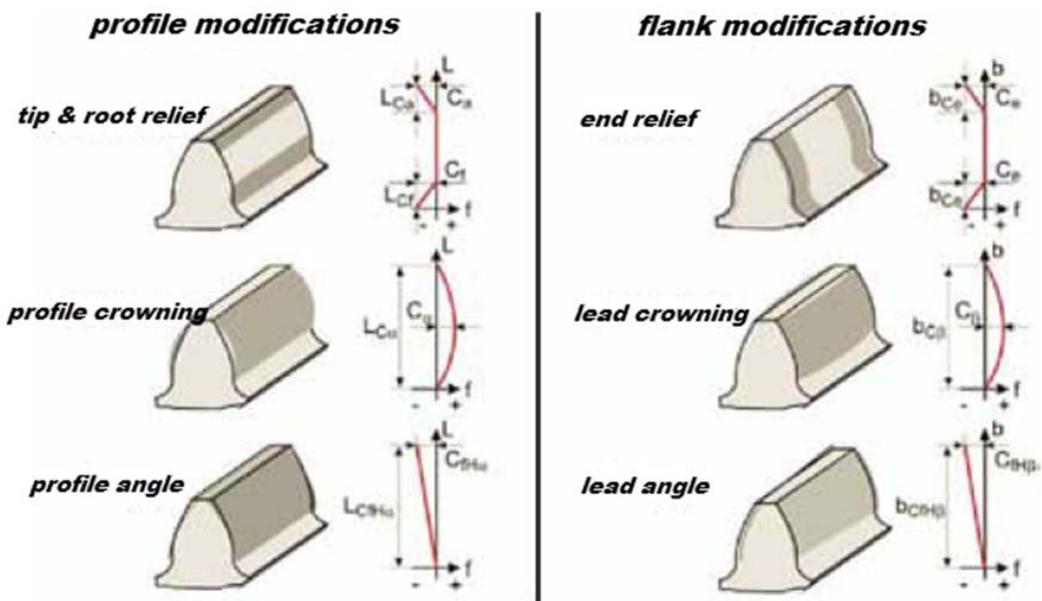


Figura II.65 Modificaciones de flanco típicas

Las principales razones para la modificación de los flancos de los engranajes son las de compensar la deformación de los dientes debida a la carga sobre los mismos, y la de asegurar un engrane perfecto, alcanzándose así un patrón de contacto optimizado entre los dientes (Figura II.66).

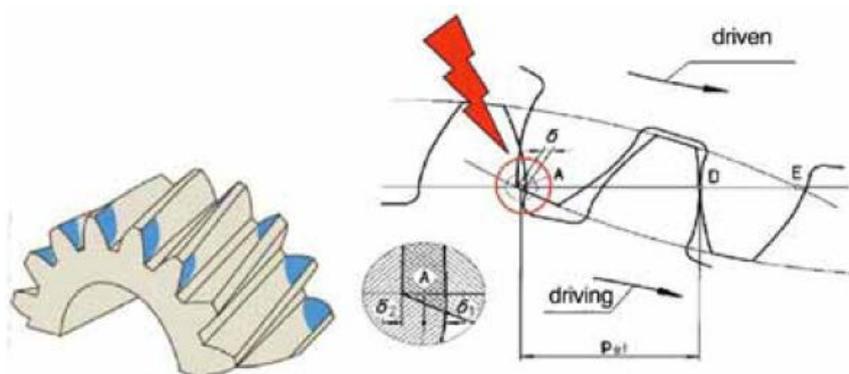


Figura II.66 Razones para la modificación de los engranajes [Türich, 2010]

Las correcciones de perfil también son comúnmente usadas para reducir el error de transmisión y el riesgo de escoriado, además de para suavizar el contacto entre el par de engranajes en el proceso de engrane. Es un hecho constatado que el tipo de corrección del perfil utilizado tiene una fuerte influencia en el error de transmisión resultante. El grado de esta influencia puede ser determinado calculando la carga del diente durante el engrane [Kissling, 2010].

Las modificaciones más comunes – *profile and lead crowning* – se utilizan con el fin de alcanzar un buen patrón de contacto, evitándose así el contacto en ambos extremos del flanco en el área de la cabeza (*tip*) y del pie (*root*) del diente. Las modificaciones *profile*

o *lead angle* son utilizadas para compensar la deformación de los propios dientes, pero también para compensar la deformación de los ejes dentro de las cajas de cambios, lo que produciría ejes no paralelos y por lo tanto el mal funcionamiento de las mismas. Todas estas modificaciones pueden combinarse, dando lugar a complejas modificaciones de los flancos [Mauer, 1990][Ling, 2008].

La modificación *tip relief* se realiza principalmente por dos razones: minimizar el contacto de la cara del diente (interferencia del diente) y reducir las perturbaciones dinámicas (error de transmisión).

En la literatura pocas o ninguna conclusión pueden ser extraídas sobre el efecto de las diferentes modificaciones sobre el flanco de los dientes [Kissling, 2010].

Cualquiera de estas modificaciones del flanco pueden ser realizadas en máquinas de propósito general, siempre que estas modificaciones sean introducidas en el modelo CAD sobre el cual serán programadas las diferentes estrategias de mecanizado.

El software CAM permite que el usuario programe el mecanizado de cualquier superficie indistintamente de la geometría de la misma (Figura II.67). Por lo tanto, la superficie resultante tras las diversas modificaciones del flanco será tratada como una superficie nueva sobre la cual serán aplicadas nuevas estrategias de mecanizado, las cuales diferirán muy poco de las programadas previamente a la introducción de las modificaciones.



Figura II.67 Par de engranajes de geometría compleja

Si a esta flexibilidad aportada por las máquinas de propósito general se le añade el concepto *multitasking*, ya comentado anteriormente, se desprenden una serie de ventajas adicionales, como son [Marañón, 2012]:

- Solo es necesaria una máquina

El concepto *multitasking* permite combinar diferentes operaciones en una misma máquina. Al concentrar los trabajos en una sola máquina se consigue una reducción

del número de atadas, que trae como consecuencia una mejora de la precisión al no eliminar el cambio de referencias que se produce en cada cambio de atada.

Esto garantiza un tiempo mínimo entre el pedido y la entrega al cliente, garantizándose así un plazo mínimo, lo que repercute de forma directa en un incremento de pedidos

También conlleva un ahorro en costes asociados a las máquinas, como mantenimientos, reparaciones, energía, etc.

- Concentricidad asegurada

La concentricidad entre el diámetro primitivo y el diámetro interior/exterior del engranaje se ve intrínsecamente asegurada, por lo que se verá mejorada la calidad del ruido producido [Chaphalkar, 2013].

- Reducción o eliminación de transferencia de piezas entre máquinas

Esta reducción/eliminación de las transferencias de piezas se debe a condensar las operaciones de varias máquinas en una.

- Se presta a tener corte desatendido

Al ser incluidas un mayor número de operaciones, se consiguen mayores tiempos de operación sin necesidad de la intervención de las personas.

- Reducción de la puesta a punto

Únicamente hay que realizar la puesta a punto de una máquina, y esta nos servirá para diferentes tecnologías/funciones/tareas.

- Simplificación de utillajes

La mayoría de las máquinas multitasking permiten la sujeción de la pieza de trabajo sin más que ajustar las garras del plato, mientras que un centro de mecanizado 5 ejes típico suele precisar de sistemas de amarre externos, lo que conlleva mayores tiempos de mecanizado y un incremento de los costes.

- Reducción de stock

Se reduce el stock, los plazos se mejoran y, al ser un stock estándar, no hay riesgo de obsolescencia.

- En resumen, lo que se tiene es un mayor rendimiento de los sistemas productivos.

Las máquinas 5 ejes/*multitasking* proporcionan tal flexibilidad que permiten aplicar la mejor metodología con el fin de ver satisfechas las necesidades del cliente. Además,

permite obtener engranajes de una mayor calidad que la obtenida mediante las tecnologías tradicionales en aquellas operaciones previas al tratamiento térmico de la pieza [Hyatt, 2014] .

- Ecológico

Las tecnologías tradicionales de fabricación de engranajes necesitan la asistencia de fluidos de corte de origen mineral para no afectar la integridad superficial de la pieza a la vez que se protege el filo de la herramienta de corte. Convencionalmente, estos aceites de corte son inyectados en la intercara herramienta/pieza.

Sin embargo, con el uso de herramientas estándar cabe la posibilidad de utilizar emulsiones de aceite de corte, coloquialmente conocidas como taladrina, lo que supone una reducción neta de uso de aceites de corte de origen mineral que puede alcanzar hasta el 95%. Además, dependiendo del tipo de material del sustrato de la herramienta y del recubrimiento de la misma, y del tipo de operación, se puede llegar a mecanizar en seco. De este modo se evita el choque térmico provocado por los fluidos de corte que en ciertas condiciones se pueden llegar a dar, lo que se traduce en una reducción de la vida útil de la herramienta y puede llegar a producir una invalidación de la pieza.

Como se muestra en la Tabla II.1, la producción de 1 kg de aceite mineral implica un vertido de 3.56 kg de dióxido de carbono equivalente (kg-CO<sub>2</sub>-eq) además de otros impactos inherentes a su uso y posterior tratamiento. Por lo tanto, el utilizar taladrina como fluido de corte reduce la huella ambiental de forma considerable.

Impact Category	Impact units	1kg of canola oil	1 kg of mineral oil	1 kg of LN <sub>2</sub>	1kg of CO <sub>2</sub>
Global Warming	kg CO <sub>2</sub> -eq	-0.36	3.56	0.431	0.816
Acidification	H+ moles-eq	2.7	0.46	0.101	0.106
Carcinogenics	kg benzene-eq	0.006	0.003	2.26·10 <sup>-4</sup>	2.21·10 <sup>-4</sup>
Non carcinogenics	kg toluene-eq	33.4	14.3	4.86	6.07
Respiratory effects	kg PM 2.5eq	0.005	0.002	6.23·10 <sup>-4</sup>	6.53·10 <sup>-4</sup>
Eutrophication	kg N eq	0.076	0.002	7.15·10 <sup>-5</sup>	2.7·10 <sup>-4</sup>
Ozone depletion	kg CFC-11-eq	2.8·10 <sup>-7</sup>	6.5·10 <sup>-7</sup>	2.13·10 <sup>-8</sup>	5.45·10 <sup>-8</sup>
Ecotoxicity	kg 2,4-Diclorobenzen eq	1.78	1.22	1.01	0.828
Smog	kg NOx eq	0.023	0.003	7.25·10 <sup>-4</sup>	8.5·10 <sup>-4</sup>

Tabla II.1 Impacto medioambiental derivado de la producción de diferentes fluidos de corte [Pereira, 2016]

Sin embargo, hay que tener en cuenta que el aumento de la consciencia medioambiental unido a la alta competitividad y legislaciones cada vez más restrictivas entorno al cuidado del medioambiente implica que la taladrina también deba ser sustituida a corto plazo por

otras técnicas de refrigeración/lubricación que satisfagan esta terna. En este contexto, el uso de alternativas como la lubricación MQL (mínima cantidad de lubricación) consistente en la pulverización de aceite biodegradable sobre la zona de corte y la refrigeración criogénica, en la que son utilizados gases licuados como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), suponen una reducción del impacto ambiental a la vez que se ve aumentada la salubridad e higiene de los puestos de trabajo. También se elimina el coste del mantenimiento y posterior tratamiento de la taladrina una vez terminada su vida útil. Como ventaja, actualmente estas tecnologías se presentan en formato “Plug & Play”, es decir, se pueden acoplar a las máquinas-herramienta actuales sin la necesidad de grandes modificaciones estructurales o tecnológicas.

- El pre-tratamiento y el post-tratamiento de la pieza se pueden realizar en la misma máquina.

Las operaciones pre-tratamiento engloban a aquellas realizadas para dotar a la pieza de aquella geometría previa al mecanizado de los diferentes dientes. Como norma general, estas operaciones suelen ser operaciones de torneado.

En cambio, las operaciones post-tratamiento engloban a aquellas realizadas una vez el componente ya ha sido mecanizado y tratado.

Además, también pueden ser implementados procedimientos de medición y control a lo largo de todo el proceso de mecanizado (Figura II.68), permitiéndose así la detección y por lo tanto la corrección de posibles incongruencias en pieza desde fases previas. Hay que ser conscientes de que en un proceso de mecanizado intervienen muchos parámetros que pueden afectar a la calidad de la pieza induciendo errores.



Figura II.68 Medición en la propia máquina de mecanizado

Muy contrario de lo que se suele pensar, la utilización de sondas no aumenta el tiempo de los ciclos productivos, sino todo lo contrario. La utilización de sondas acorta los tiempos al verse reducidos los tiempos muertos, ya que las sondas permiten automatizar el ajuste de pieza y herramienta, y los tiempos de certificación, ya que esta se realiza en la propia máquina.

El número de piezas rechazadas se ve minimizado debido a que los pasos de centrado e inspección de pieza con retroalimentación de la información pueden eliminar posibles errores de operario y compensar el tiempo utilizado en el proceso.

## **II.4. Procedimientos de diseño y generación de engranajes**

Para el mecanizado de engranajes en máquinas de propósito general es imprescindible tener un modelo CAD 3D del mismo. La calidad de este sólido es un parámetro de elevada importancia.

Hay que ser conscientes de que para la programación de las estrategias de mecanizado se trabaja siempre con las superficies del sólido CAD 3D, por lo tanto la calidad final obtenida será directamente proporcional a la calidad del mismo. Además, la disposición de superficies de una mayor calidad simplifica considerablemente la programación.

En aquellos tipos de engranajes donde la superficie de los dientes está dotada de una mayor complejidad geométrica cinemática, como es el caso de los engranajes espirocónicos, la calidad del archivo CAD de partida todavía tiene una mayor relevancia. Además, para esta tipología de engranajes, como ya ha sido expuesto anteriormente, dependiendo de los métodos de corte existentes (Gleason, Klingelnberg, Oerlikon) la geometría de las superficies obtenidas diferirán.

Para la obtención de este modelo CAD 3D existen diferentes metodologías con las que el usuario estándar puede trabajar. Una vez se disponga de la geometría 3D deseada, sobre la misma serán programadas las diferentes estrategias de mecanizado necesarias para lograr el engranaje final a partir del “*blank*” de partida. Una mayor calidad del sólido de partida conlleva una mejor definición de las distintas superficies que lo forman.

Las diferentes metodologías existentes en el mercado pueden ser resumidas en los siguientes puntos:

### II.4.1 Software de diseño + software CAM

El diseño del engranaje, independientemente de su tipología, se realiza en un software de diseño específico. Una vez el modelo del sólido del engranaje esté generado, será importado en un software CAM, en el cual serán programadas cada una de las diferentes estrategias de mecanizado.

El software más conocido a nivel mundial para el cálculo y diseño de ruedas dentadas es KISSsoft® (Figura II.69). Este software cubre todos los tipos usuales (ruedas cilíndricas rectas, ruedas dentadas cónicas, ruedas helicoidales, ruedas de engranaje hiperbólico y ruedas hipoides).

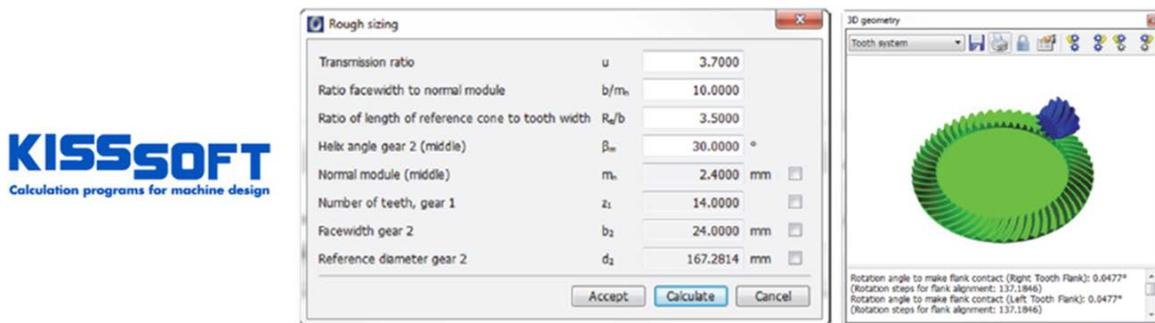


Figura II.69 Ejemplo de aplicación KISSsoft®

Una vez el sólido se ha generado, sería importado al software CAM, independientemente de cuál sea este.

#### Ventajas

- Software de cálculo

Dependiendo de la carga que debe ser transferida el engranaje calculado y generado sera uno u otro.

- Se cubre el diseño de toda tipología de engranajes
- Mayor número de los parámetros de entrada. Mejor definición del engranaje

#### Desventajas

- Software independiente al software CAM
- Coste

Las diferentes tipologías son tratadas en diferentes módulos. Cada módulo supone un incremento en el coste del software.

Como el sólido generado tiene que ser importado en un software CAM, se precisará de una interfaz CAD para poder exportar el 3D. Esto también conlleva costes adicionales.

### II.4.2 Software CAD con módulo de diseño de engranajes + software CAM

Para esta segunda casuística, la obtención del sólido 3D se genera directamente en el software CAD gracias a la posibilidad de adquirir un módulo específico de diseño de engranajes.

El módulo GearTrax™ (Figura II.70), que muchos software CAD (Solid Edge, SolidWorks e Inventor) permiten su incorporación en su entorno gráfico en forma de módulo, permite crear modelos sólidos de componentes de transmisión, como son los engranajes. Permite crear engranajes cilíndricos rectos, helicoidales, engranajes cónicos y sinfines.

El problema es que el módulo de GearTrax™ solo permite ser implementado en software CAD, no en software CAD/CAM.

#### Ventajas

- Menores costes

Al ser un módulo dentro de un software CAD, el coste de adquisición sería inferior al que supondría la adquisición de un software específico de diseño de engranajes, como el caso del software KISSsoft® comentado anteriormente.

#### Desventajas

- Se precisa al menos de dos software
- Los únicos software CAD que permiten una vinculación con GearTrax™ son el Solid Edge, SolidWorks e Inventor

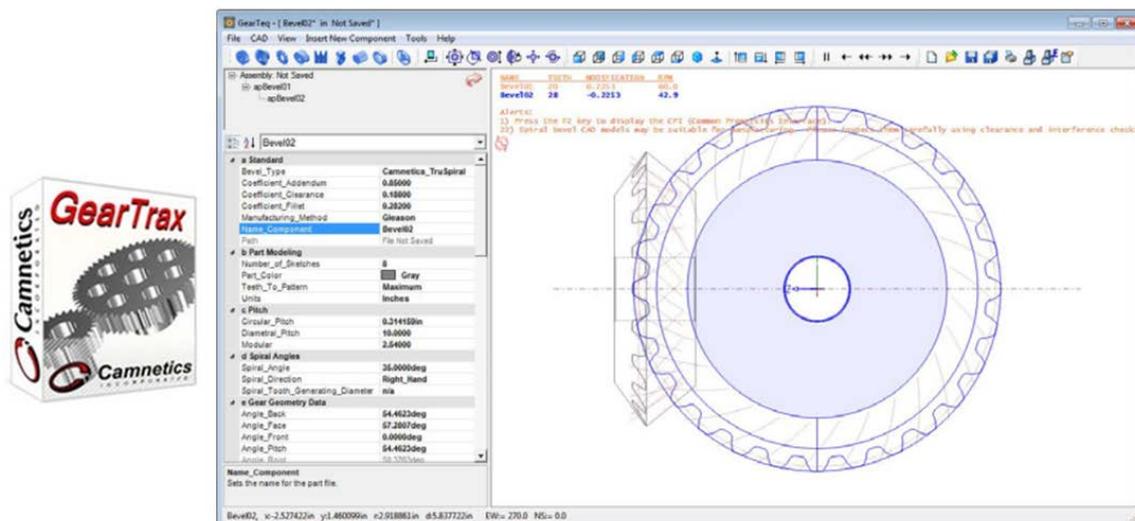


Figura II.70 Ejemplo de aplicación GearTrax™

### II.4.3 Software CAD/CAM específico para engranajes

En esta tercera alternativa, tanto el diseño del engranaje como la programación de las diferentes estrategias de mecanizado se realizan en un mismo software. El proceso se simplifica al ser solo necesario un software, aunque el coste del mismo suele ser superior a los comentados anteriormente.

#### Ventajas

- Solo un software. Simplicidad de uso
- Optimización de estrategias de mecanizado

#### Desventajas

- El software CAD es específico para engranajes, por lo que su uso queda muy restringido

EUKLID GearCAM® (Figura II.71) es un módulo de EUKLID para ruedas dentadas. Ofrece un módulo de fácil uso para la fabricación económica de ruedas dentadas en máquinas de propósito general.

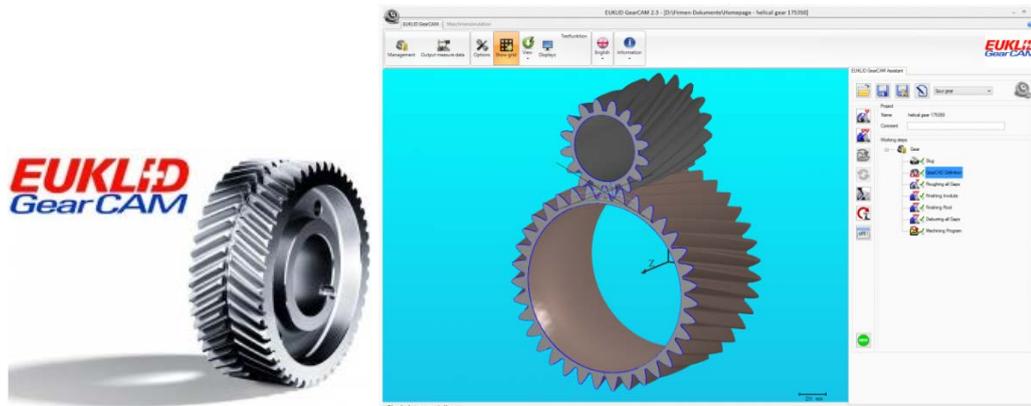


Figura II.71 Ejemplo de aplicación EUKLID GearCAM®

EUKLID GearCAM® permite introducir correcciones de flanco en el diseño del engranaje (Figura II.72). Además, el software permite optimizar las trayectorias de fresado respetando estrictamente las tolerancias indicadas.

Data input			
Reference profile - particular input		Without reference profile	
Gear data	Reference profile L	Calculated data	
Flank Corrections		Tolerances / Allowances / Measurement	
Type	Name	Left	Right
	Width crowning	✓	✓
	Height crowning	✓	✓
	Tip relief	✓	✓
	Foot relief	✓	✓

Figura II.72 Aplicación de correcciones de flanco en software EUKLID GearCAM®

#### ***II.4.4 Software de diseño y programación CAM creado por fabricantes de máquina-herramienta***

Grandes e importantes fabricantes de máquina herramienta han creado su propio software que permite el mecanizado de las diferentes tipologías de engranajes directamente desde máquina. Consiste en añadir un módulo al control numérico de la máquina, el cual permite, una vez se han introducido los diferentes parámetros de diseño del engranaje, optimizar tanto el diseño del mismo como la programación de las diferentes estrategias de mecanizado a llevar a cabo.

Como ejemplos se pueden destacar tanto el gearMILL® de DMG-MORI (Figura II.73) como el GearPro™ de MAG.

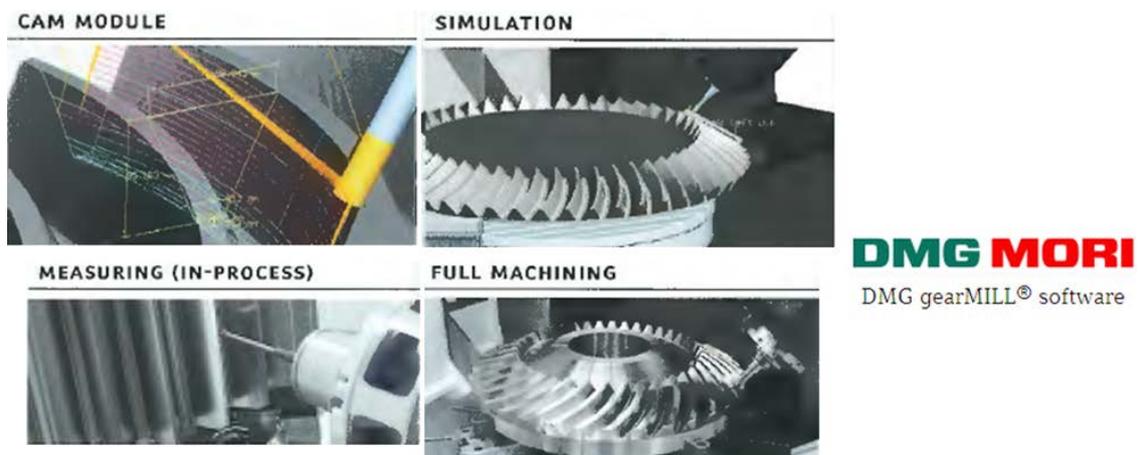


Figura II.73 Ejemplo de aplicación gearMILL® de DMG-MORI

##### Ventajas

- Software controlado directamente desde el control de la máquina
- Solo se precisa de un software

##### Desventajas

- Software vinculado a un determinado fabricante de máquina-herramienta
- Un único proveedor

#### ***II.4.5 Software de diseño y programación CAM creado por fabricantes de herramienta***

En los últimos años, en parte debido al volumen de mercado de estos componentes, que se estima en miles de millones por año, han surgido nuevas tecnologías en herramientas de fresado. Sandvik Coromant, empresa líder mundial en distribución de herramientas, ha

desarrollado herramientas especiales tanto para el fresado de engranajes cilíndricos, tanto rectos como helicoidales, como para engranajes cónicos. Estas herramientas están diseñadas para ser utilizadas en máquinas de propósito general 5 ejes, independientemente del fabricante de estas.

Para el caso particular de los engranajes cilíndricos, Sandvik Coromant con la colaboración del fabricante de máquina-herramienta DMG-MORI, ha presentado *InvoMilling™*. *InvoMill* utiliza herramienta frontal para interpolar la evolvente del diente del engranaje. El contacto entre el plano de la herramienta y la evolvente del diente es descrito por una línea. La trayectoria de la herramienta es radial, por lo general desde la cabeza a la raíz del diente. Por lo tanto, las principales variables del engranaje (módulo, ángulo de presión y ángulo de hélice) están determinadas por la trayectoria de la herramienta, no a la herramienta en sí, una característica generalmente asociada a herramientas de flanco o de bola, siendo diferente a lo que ocurre en los procesos de *hobbing*, *gashing* o *shaping*.

A diferencia del proceso de fresado convencional, donde la calidad superficial depende de los parámetros de  $a_p$  y  $a_e$ , es decir, que si se incrementan estos valores la rugosidad superficial tiende a empeorar, para el caso de *InvoMill* no existe tal correlación. Esta nueva tecnología permite diferentes profundidades axiales, gracias a la existencia de herramientas con anchuras que van de 5 a 15mm para la mayoría de los engranajes comunes que comprenden el rango de módulo 3-6, no viéndose así afectada la textura superficial debido a que el contacto entre el plano de la herramienta y la evolvente del diente es descrito por una línea, como ya se ha mencionado anteriormente.

En comparación con el fresado convencional, la limitación de los parámetros de mecanizado ( $a_p$  y  $a_e$ ) pasa de 0.1 a 0.3mm. Como resultado, la productividad de *InvoMill* puede ser de una magnitud de uno a dos órdenes mayor que con el fresado convencional [Richt, 2013]. En la Figura II.74 se muestra, de manera gráfica y en 4 simples pasos, el proceso *InvoMilling™*.

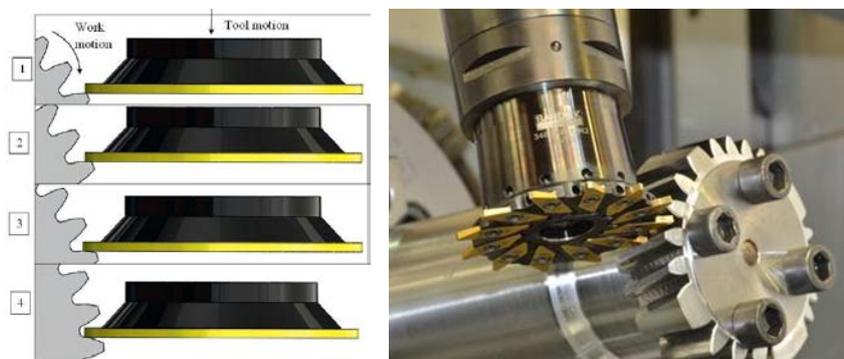


Figura II.74 Proceso *InvoMilling™*

El proceso de *InvoMill* y el proceso de *hobbing* son procesos comparables porque ambos se utilizan principalmente para el mecanizado de engranajes cilíndricos. Se ha demostrado, utilizándose condiciones conservadoras en el mecanizado de engranajes del rango de módulo 3-6 para cada uno de los dos procesos, que *InvoMill* se vuelve más productivo que el proceso “*double cut hobbing*” para engranajes de módulo 6. La misma tendencia se ha demostrado para módulos de tamaño superior a 6 y también para algunos módulos inferiores a 6.

Por otro lado, *InvoMill* comparte una restricción con el fresado convencional, que es la dificultad en la preparación de una trayectoria de la herramienta para el CNC. Las soluciones CAM tradicionales son inefectivas, igual que lo son los modelos sólidos de los perfiles de los engranajes existentes.

Este problema ha sido resuelto por el desarrollo de la superficie del engranaje basado en un modelo sólido generado por el software gearMILL® de DMG-MORI. Este software permite la programación de los engranajes que carecen de modelos y de aquellos que han sido modelados de manera imperfecta.

Hasta el año 2014, debido a la colaboración previa entre Sandvik y DMG-MORI en la obtención y continua mejora del producto *InvoMilling™*, solo las máquinas del fabricante DMG-MORI disponían de licencia de exclusividad de utilización de este producto. En la actualidad, esta tecnología ya no presenta tal exclusividad, pudiéndose utilizar en cualquier máquina, independientemente del fabricante. Es por esta razón que Sandvik ha desarrollado su propio software, *InvoMilling Software™* 1.0, el cual permite una programación CNC rápida y fácil del proceso *InvoMilling™* patentado. Así, combinando el software con sus herramientas precisas de corte CoroMill®161 y CoroMill®162, se consigue una fabricación de engranajes realmente flexible. En la Figura II.75 se muestra un ejemplo de aplicación del *InvoMilling Software™*.



Figura II.75 *InvoMilling Software™*

### Ventajas

- Elevada productividad y flexibilidad

Una misma herramienta puede ser usada para diferentes tamaños y perfiles de engranajes.

- Solo se precisa de un software

- Cargas que sufre la herramienta son muy pequeñas
- Adaptable a cualquier máquina 5 ejes
- Tecnología sostenible, al ser una operación en seco

#### Desventajas

- Permite realizar correcciones en el eje X, pero no otras correcciones como son el *crowning* o el *tip relief*
- Calidad obtenida asegurada DIN 6, inferior a la que puede ser alcanzada con herramienta estándar
- Un único proveedor
- Coste. El precio por licencia ronda los 45.000€

Para el caso del mecanizado de engranajes cónicos, Sandvik Coromant en colaboración con Gleason, líder mundial en ingeniería y tecnología del engranaje, y con el fabricante de máquina-herramienta Heller, ha desarrollado una herramienta especial, *uP-Gear Technology*. En la Figura II.76 se muestra un desbaste y un acabado realizado mediante esta tecnología.



**Figura II.76** Desbaste y acabado realizado mediante *uP-Gear Technology*

Una de las principales ventajas que presenta *uP-Gear Technology* es la reducción del tiempo de producción total. Al fabricar el componente en una misma máquina, se ahorra un tiempo considerable en comparación con el uso de una máquina de fabricación específica de engranajes cónicos, en la cual se precisa también de una operación de torneado previa, y por lo tanto, de otra máquina. En comparación con el fresado convencional, *uP-Gear Technology* permite generar la geometría del diente terminado en menos de un tercio del tiempo [uP-Gear, 2012]. En la Figura II.77 se representa una comparativa entre las herramientas utilizadas en el fresado convencional frente a las utilizadas mediante *uP-Gear Technology*.



Figura II.77 Comparación fresado convencional vs. *uP-Gear Technology*

El conjunto de herramientas de alta precisión requeridas para el proceso *uP-Gear Technology* son usadas para el fresado de la geometría del diente del engranaje. Todas las herramientas están diseñadas para altas velocidades de eliminación de material, lo cual conduce a tiempos de ciclo muy cortos.

En vez de herramientas dedicadas y específicas, a menudo usadas en máquinas de engranajes cónicos, la tecnología *uP-Gear* nos permite utilizar herramientas y plaquitas estándares de fresado, las cuales ayudan a reducir los costes de las herramientas hasta en un 50%. Además, también es posible utilizar el mismo conjunto de herramientas para una gama diferente de perfiles de dientes y de tamaños.

La gama de herramientas de Sandvik Coromant para *uP-Gear Technology* han sido diseñadas para tres operaciones principalmente: apertura de la ranura del diente, mecanizado de la protuberancia y el acabado de los flancos de los dientes. Las mismas herramientas de acabado son utilizadas tanto para el mecanizado de los flancos cóncavos como para los convexos.

Todas las herramientas se han optimizado para el mecanizado del engranaje antes y después del tratamiento térmico.

El tipo y el número de herramientas para el proceso de *uP-Gear Technology* depende tanto del módulo del engranaje como de la estrategia de mecanizado seleccionada.

#### Ventajas

- Elevada productividad y flexibilidad

Una misma herramienta puede ser usada para diferentes tamaños y perfiles de engranajes

- Solo se precisa de un software

- El coste de producción por engranaje cónico se ve reducido considerablemente
- Adaptable a cualquier máquina 5 ejes
- Tecnología sostenible, al ser una operación en seco

#### Desventajas

- Inexactitud de los perfiles

Dependiendo en el rango en el que se trabaje se necesita seleccionar un “set” de herramientas

- Un único proveedor
- Coste. Licencia de elevado coste

## **II.5. Métodos de estimación y predicción de la topografía superficial para fresado 5 ejes**

Cada día tiene una mayor relevancia la modelización de procesos de mecanizado por ser una herramienta imprescindible del mecanizado virtual. El mecanizado virtual es una herramienta que permite la simulación de un proceso de mecanizado con la intención de optimizar los parámetros de corte (avance, profundidad de pasada y velocidad de corte) que intervienen en este sin necesidad de recurrir al método de prueba y error debido al coste y al tiempo que este conlleva, no asumibles en las condiciones actuales de mercado.

En los últimos años han sido presentados numerosos trabajos centrados en el desarrollo de modelos capaces de predecir los valores de las fuerzas o la precisión de acabado superficial, siendo dos de los parámetros de mayor relevancia en la optimización de una operación de acabado.

En el caso particular de este estudio, se ha trabajado en un modelo que nos va a permitir predecir la rugosidad superficial tras el mecanizado con fresa de punta esférica.

Las fresas esféricas son una tecnología clave del mecanizado para la generación de superficies libres precisas. Esta tipología de herramienta suele ser la elegida para el acabado de matrices y moldes, debido a que estos productos requieren de especificaciones muy exigentes en lo que respecta a la calidad superficial.

Con el fin de lograrse superficies de elevada calidad, han sido muchos los estudios que se han realizado sobre fresas de acabado. Kline [Kline, 1982], en 1982, intentó predecir la precisión

superficial desde el punto de vista de las fuerzas de corte y la deflexión de la herramienta, y poco después Marciniak [Marciniak, 1991] analizó de manera precisa el comportamiento de la geometría compleja del filo de corte, pero ambos sin centrarse en las fresas de punta esférica. A principios de siglo, Zhu [Zhu, 2001] presentó un modelo mecánico de fresa esférica para la predicción de las fuerzas de corte y analizó el punto de corte de la geometría. Imani [Imani, 2001] aplicó un modelado sólido a la operación de fresado con fresa de punta esférica y Altintas [Altintas, 1998] analizó la geometría de corte de una manera más precisa.

Fue Mizugaki [Mizugaki, 1999] de los primeros que estimaron el perfil de la superficie mecanizada y la altura de cresta basándose en la geometría de corte de la fresa de punta esférica. Reveló el mecanismo de generación de las superficies mecanizadas desde el punto de vista del movimiento del filo de corte y de la orientación de la herramienta, limitada al fijar el *lead angle*. Poco después mejoró el modelo [Mizugaki, 2001], eliminando esta última restricción, y las ecuaciones fueron reformuladas de nuevo para cualquiera de las posibles orientaciones de la herramienta, incluyéndose así los efectos de la orientación de la herramienta en la textura superficial y altura de cresta obtenida.

Bouzakis [Bouzakis, 2003] desarrolló un algoritmo para la predicción de la rugosidad superficial con vistas a la selección de aquellas condiciones de corte y estrategias de mecanizado capaces de optimizar tanto la rugosidad superficial como el tiempo de mecanizado.

En el 2005, Jung [Jung, 2005] propone un nuevo enfoque para la predicción de la rugosidad con fresa de punta esférica, y Chen [Chen, 2005] desarrolla un modelo para predecir la cresta generada entre pasada y pasada de la herramienta (*path-interval/stepover*) y la generada en el avance de la propia herramienta (*feed-interval*) para el acabado con fresa de punta esférica en el mecanizado a alta velocidad, Figura II.78. Debido a los altos valores de avance utilizados, la cresta generada en el avance de la propia herramienta es de mayor altura que la generada entre pasada y pasada de la herramienta, justo el resultado opuesto encontrado a cuando la herramienta de punta esférica trabaja con condiciones de corte normales.

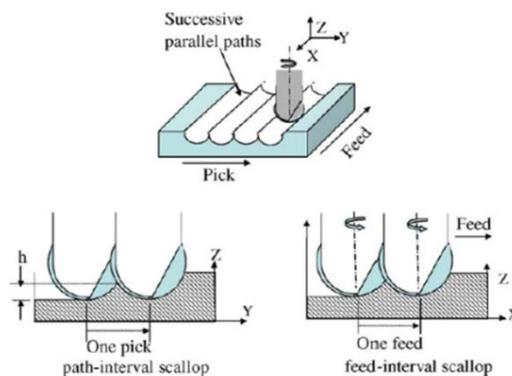


Figura II.78 Cresta generada por el path-interval y el feed-interval con  $h_{ta}$  de punta esférica

El ángulo inicial de entrada del filo de corte y los ángulos de inclinación del eje de la herramienta también fueron parámetros analizados. Quedó demostrado que el aumento del ángulo de inclinación del eje de la herramienta reducía la altura de cresta generada. Sin embargo, un ángulo de inclinación de hasta  $10^\circ$  es suficiente para la mayoría de los diámetros de herramienta desde el punto de vista de la rugosidad superficial.

También han sido desarrollados modelos dedicados a la predicción de la superficie generada por herramienta esférica en la cuál esta se ha visto afectada por otros parámetros inherentes al proceso de mecanizado, no considerados en la mayoría de los estudios previos.

El primero de estos parámetros es la desalineación de la herramienta respecto al cono (*runout*), Figura II.79. Dado que los valores típicos de *runout* en el fresado de alta velocidad con portaherramientas de pinzas se encuentran en el rango de  $10\text{-}30\mu\text{m}$  y representan la fuente principal del error superficial, este no debe ser ignorado. En el 2008 Arizmendi [Arizmendi, 2008] desarrolla un modelo para predecir la topografía superficial generada por fresas de punta esférica teniendo en cuenta este parámetro. Para la obtención de la topografía superficial fueron utilizados los desarrollos o aproximaciones de los polinomios de Chebyshev.

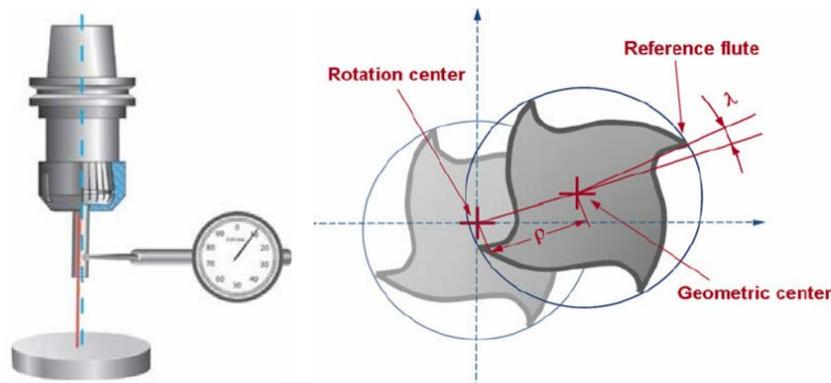


Figura II.79 Desalineación de la herramienta respecto al cono (*runout*)

En el 2013 Zhang [Zhang, 2013] presenta un modelo que permite predecir la topografía superficial considerando el desgaste de la herramienta producido durante el mecanizado. Establece la ecuación de la trayectoria del filo de corte, que puede ser transformada en ecuaciones polinomiales equivalentes y resuelta para posiciones discretas a lo largo de la dirección de avance, incluyéndose el efecto del desgaste de la herramienta.

Debido a que el mercado cada vez más precisa de piezas de una mayor complejidad, el uso de las estrategias multieje se está expandiendo. Además, en estos casos la estrategia de la herramienta suele ser generada a través del uso de un software CAM, el cual ofrece varias estrategias de mecanizado dependiendo de la geometría de la superficie a mecanizar. La calidad

de la superficie mecanizada resultará de la elección de la estrategia de mecanizado y de los parámetros de corte.

En cuanto a la calidad de la superficie, algunos trabajos han enfatizado la importancia de la topografía superficial 3D, en particular en aplicaciones de ingeniería [Dong, 1994]. La topografía superficial 3D tiene influencia en las propiedades mecánicas y físicas de las partes en contacto, y juega un papel importante en la integridad de la superficie, afectando así a la vida a fatiga de la pieza. La caracterización topográfica superficial permitirá evaluar las relaciones existentes entre la estrategia de mecanizado (condiciones de corte, dirección de mecanizado e inclinación de la herramienta) y la superficie topográfica obtenida.

Pocas obras tocan el caso del fresado en 5 ejes. Partiendo de la expresión de la ecuación de la trayectoria del filo de corte respecto a la pieza de trabajo y las trayectorias de la herramienta, Zhang [Zhang WH, 2006] [Zhang WH, 2008] desarrolló un método general e iterativo para la simulación de la rugosidad en una operación multieje con fresa de punta esférica. En particular, fueron estudiados el efecto de la inclinación de la herramienta y el modo de corte. Se constata también el hecho de que la rugosidad de la superficie permanece más o menos constante más allá de un ángulo de inclinación límite. La rugosidad solo será medida mediante el parámetro Rz.

La predicción de la topografía superficial 3D en función de las condiciones de mecanizado sigue siendo un tema de relevancia en el mecanizado 5 ejes. En el trabajo de Lavernhe [Lavernhe, 2010] se investiga la influencia de la estrategia de mecanizado en 5 ejes (parámetros de corte e inclinación de la herramienta) en la topografía superficial mediante un diseño experimental. La topografía superficial es simulada gracias a un modelo predictivo basado en la simulación de arranque de material.

Normalmente, la altura máxima de cresta (*maximum scallop height*) es uno de los parámetros más usado en el software CAM para definir la topografía superficial 3D. Los resultados ponen de manifiesto que el patrón resultante tras el mecanizado viene dado por la geometría e inclinación de la herramienta. En particular, se constata que el ángulo de orientación (*yaw angle*) de la herramienta es el principal factor que afecta a la topografía, aunque esta influencia se ve reducida más allá de los 2°. Por lo tanto, para controlar los parámetros de amplitud ( $S_a$ ,  $S_z$ ), es necesario ajustar primero el ángulo de inclinación, después la velocidad de avance, y por último la altura máxima de cresta.

En nuestro caso particular, el mecanizado de engranajes en máquina multieje, cada flanco de los diferentes dientes han sido acabados con una fresa cónica de punta esférica.

Las estrategias de mecanizado aplicadas han sido multieje (*VARIABLE\_CONTOUR*), lo que ha permitido trabajar con los 5 ejes de la máquina de manera continua, o por el contrario, imponiendo el eje de la herramienta mediante un vector (Figura II.80), trabajando así con una configuración 3+2, 3 ejes trabajando en continuo y 2 ejes de posicionado, siendo los encargados de dotar a la pieza de la disposición correcta en máquina.

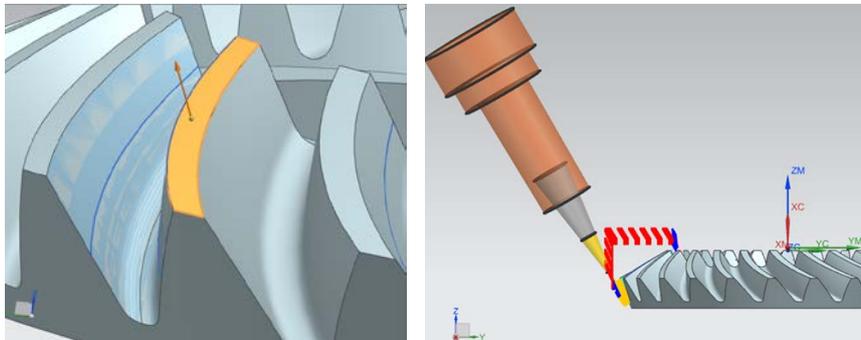


Figura II.80 Imposición del eje de la hta. mediante un vector normal a la superficie del mismo

Como se detalla en uno de los trabajos de Arizmendi [Arizmendi, 2016], la operación de fresado en 5 ejes se puede representar de manera esquemática tal como se muestra en la Figura II.81. Esta operación de fresado viene definida por parámetros tales como la inclinación y la orientación de la fresa, los parámetros geométricos de corte y las velocidades de avance y de giro de la fresa. Durante la operación de fresado, la fresa gira con una velocidad de giro  $N$  y se desplaza con una velocidad  $V_f$  en la dirección de avance, avanzando una distancia  $f$  por cada revolución de la fresa. La orientación de la fresa se define por medio de dos ángulos: el ángulo de inclinación  $\beta$  y el ángulo de orientación  $\gamma$ . La definición de un sistema de referencia asociado a la pieza ( $O_W X_W Y_W Z_W$ ) facilita la definición de estos ángulos gracias a la proyección del eje de la fresa sobre el plano  $X_W Y_W$ .

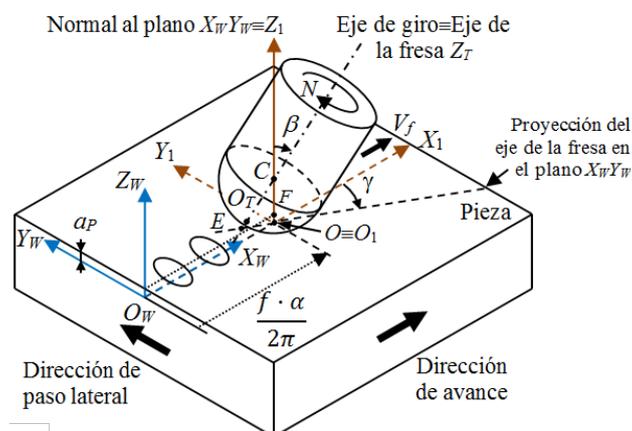


Figura II.81 Esquema de un proceso de fresado en 5 ejes [Arizmendi, 2016]

A partir del esquema del proceso de fresado en 5 ejes pueden ser desarrolladas las ecuaciones que describan la trayectoria de cualquier punto situado sobre los filos de la fresa.







---

## **Capítulo III. Métodos de fabricación de engranajes únicos en fresadoras 5 ejes**

---





## Capítulo III. Métodos de fabricación de engranajes únicos en fresadoras 5 ejes

*En este capítulo se detalla la metodología desarrollada para cada uno de los diferentes casos de estudio realizados. En primer lugar, son presentados los dos software desarrollados para la generación del sólido 3D del engranaje, dependiendo de la tipología de este, y después las peculiaridades de las distintas estrategias de mecanizado programadas sobre este sólido, tanto para desbaste como acabado. También son expuestas las diferentes tipologías de engranajes realizados y con qué cinemática de máquina han sido mecanizados. Por último, son presentados los diferentes equipos con los que ha sido realizado el control de calidad sobre la pieza acabada, y los parámetros escogidos para la misma.*

### III.1. Generación de la geometría de los engranajes

Para la realización de este trabajo, y una vez ya conocida la problemática que presenta cada una de las diferentes metodologías ya expuestas en el punto II.4 para el diseño y generación de los diferentes engranajes, en este trabajo se presenta una nueva metodología.

La metodología presentada en este punto se va a centrar en intentar unificar, de una manera lo más simple posible, el diseño y la programación de las trayectorias de mecanizado del engranaje en un mismo software. Este software integrador va a ser el Siemens NX.

El verdadero problema se presenta a la hora de obtener el diseño del engranaje, ya que el software Siemens NX, en su módulo de diseño, no dispone de ninguna opción para el diseño de los mismos. En lo referente a la programación de las estrategias de mecanizado, el módulo CAM del software permite aplicar diferentes estrategias de mecanizado dependiendo del número de ejes necesarios para la realización de cada una de las operaciones y de la cinemática de la máquina.

Para la resolución de la problemática de diseño de los engranajes, van a ser planteadas dos metodologías diferentes:

- La primera de estas metodologías se va a centrar en la obtención de la geometría de los engranajes cilíndricos, tanto rectos como helicoidales
- La segunda metodología permite obtener la geometría de los engranajes cónicos

y ambas metodologías en el marco de uso del software CAD/CAM Siemens NX.

### III.1.1 Generación de la geometría de los engranajes cilíndricos

Para la obtención del diseño 3D de los engranajes cilíndricos, tanto rectos como helicoidales, se ha desarrollado una API dentro del propio software CAD/CAM con el que trabajamos, Siemens NX. La ventaja principal que presenta esta metodología es la de unificar el diseño del engrane y la programación CAM del mismo en un único software.

El procedimiento para acceder a esta API desde el propio software CAD/CAM es muy simple (Figura III.1):

**File → Execute → Nx Open...**

y se abre el *.dll* que corresponde al programa generado, abriéndose una ventana (Figura III.2), donde serán introducidos los parámetros de entrada para generar el diseño del engranaje a fabricar.

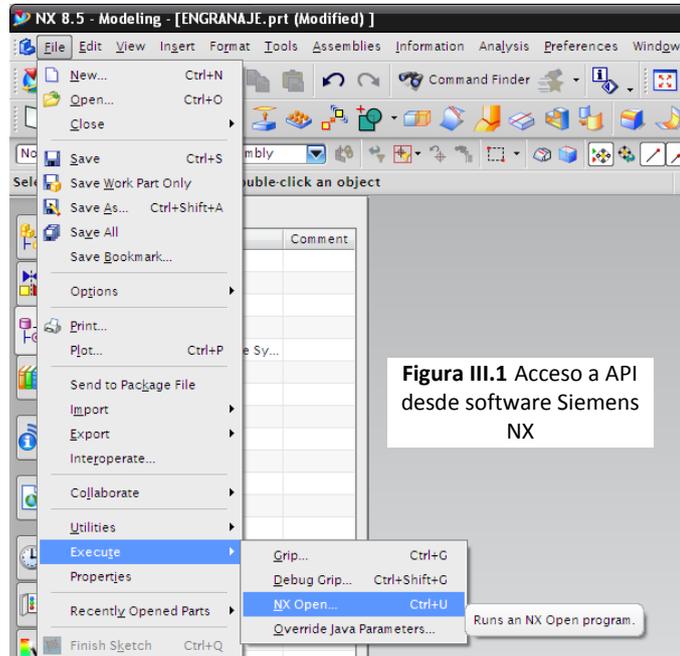


Figura III.1 Acceso a API desde software Siemens NX

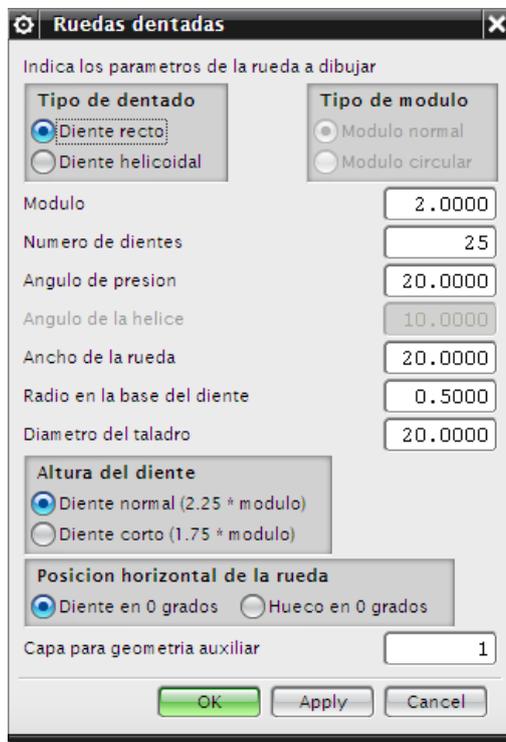


Figura III.2 Ventana de la API de engranajes desarrollada para Siemens NX

Las diferentes opciones que presenta el software van a ser expuestas y comentadas a continuación, en función de los elementos de un engranaje (Figura III.3) y diferenciándose entre

las dos opciones posibles, diente recto y diente helicoidal. Dependiendo la opción elegida, serán activados unos u otros campos en la ventana de la aplicación.

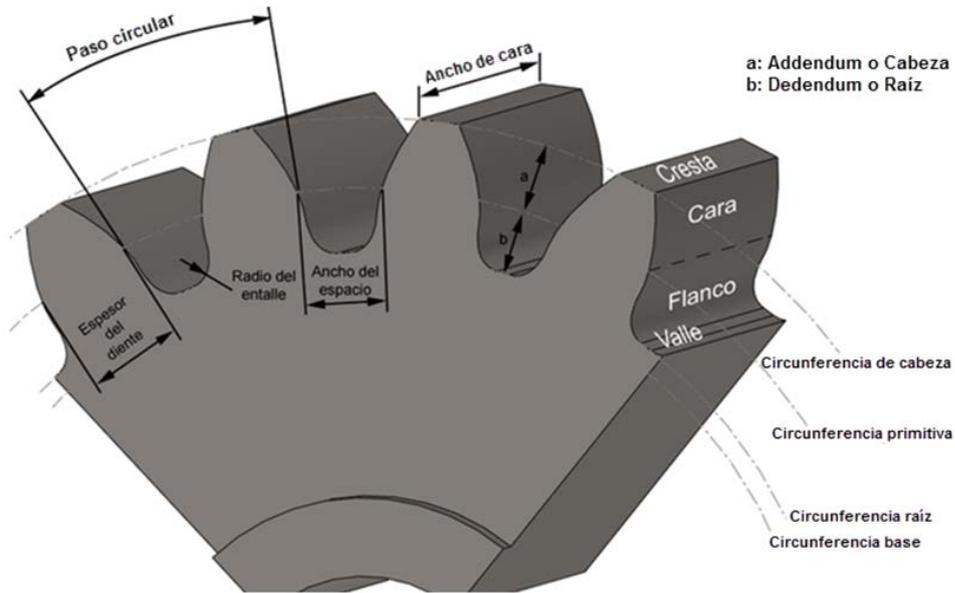


Figura III.3 Elementos de un engranaje

Independientemente del tipo de diente, en la definición del perfil de las ruedas dentadas se ha aplicado la evolvente de círculo (involuta), que es una curva plana de desarrollo cuyas normales son tangentes a la circunferencia. El perfil de evolvente satisface el requisito de transmisión de movimiento uniforme y una transmisión de energía óptima entre los engranajes.

Las ecuaciones paramétricas que definen el perfil de evolvente:

$$X(\theta) = \frac{Db}{2} \times \left( \cos\theta + \frac{\theta \times \pi}{180} \times \sin(\theta) \right)$$

$$Y(\theta) = \frac{Db}{2} \times \left( \sin\theta - \frac{\theta \times \pi}{180} \times \cos(\theta) \right)$$

siendo  $Db$  el diámetro de la circunferencia base, y  $\theta$  el ángulo en grados

o **Diente recto**

Para el caso de “diente recto”, los parámetros de entrada que pueden ser introducidos para diseñar el engranaje deseado por el usuario son:

- Módulo normal (m)

$$m = \frac{Dp}{Z}$$

$Dp$ = Diámetro primitivo  
 $Z$ = Nº de dientes

- número de dientes (Z)

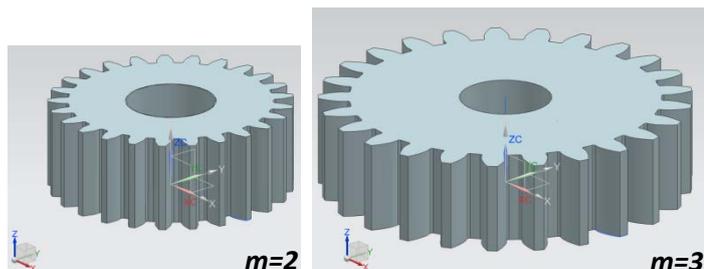


Figura III.4 Programación de diferentes módulos

**Z=25**

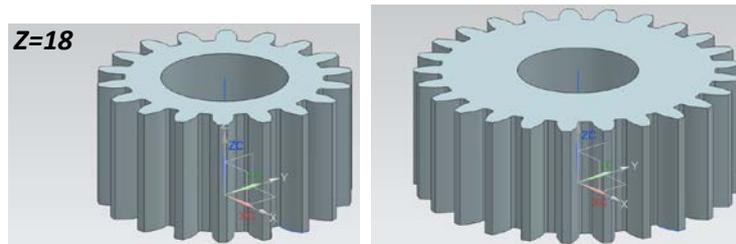


Figura III.5 Programación de diferente nº de dientes

- ángulo de presión ( $\alpha$ )

Ángulo que forman las líneas perpendiculares de la circunferencia primitiva de los dientes del engranaje (Figura III.6). Permanece constante durante el engrane y suele valer  $20^\circ$ .



Figura III.6 Ángulo de presión

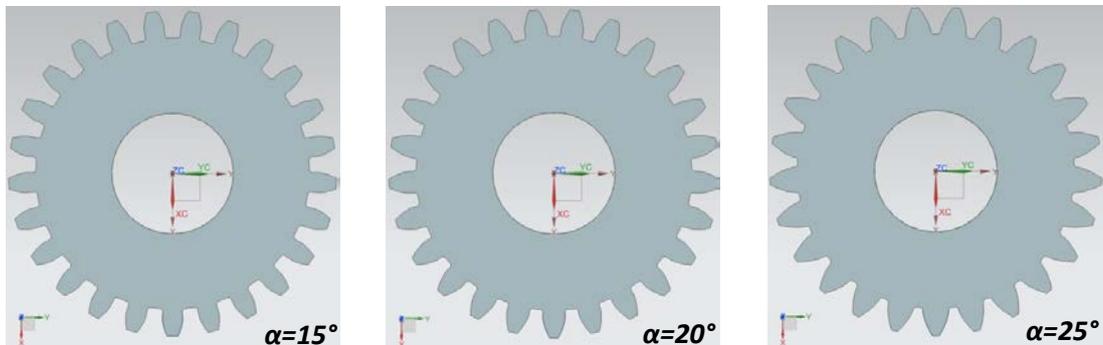


Figura III.7 Programación de diferentes ángulos de presión

- ancho de la rueda

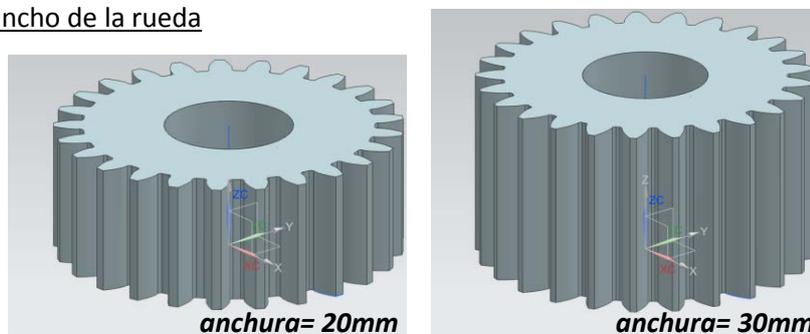


Figura III.8 Programación de diferentes anchuras

- radio en la base del diente



Figura III.9 Programación de diferentes radios en la base del diente

- diámetro del taladro

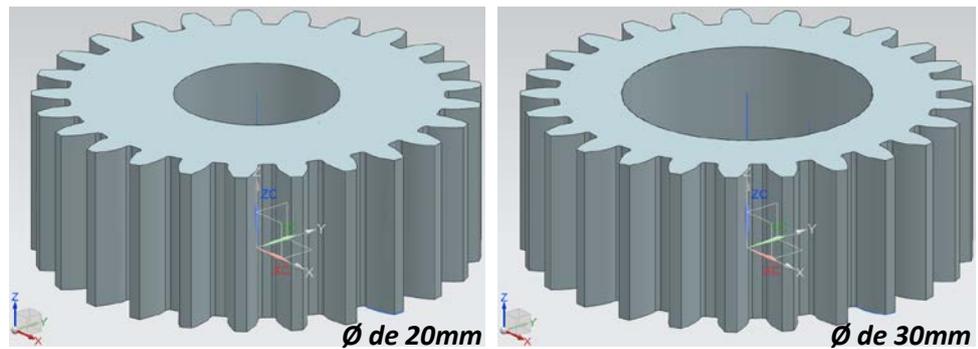


Figura III.10 Diferentes diámetros del taladro

- altura del diente

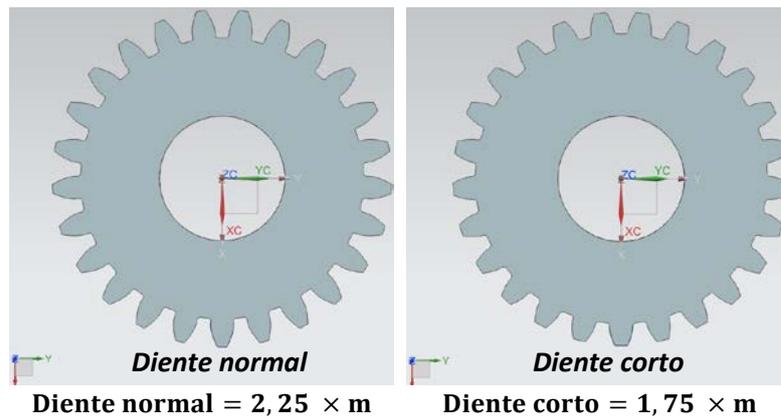


Figura III.11 Diferentes tipologías de dientes

- posición de la rueda

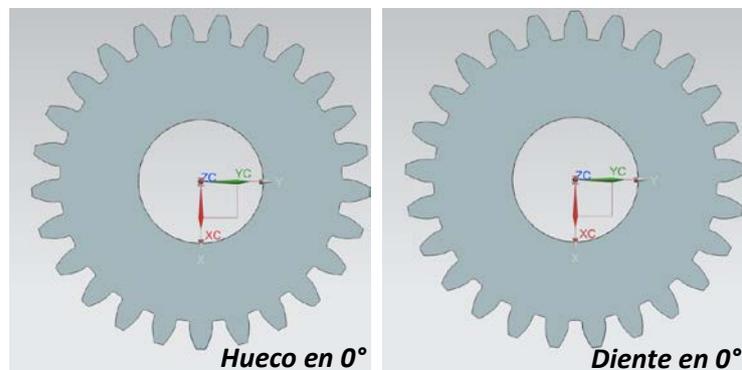


Figura III.12 Diferentes diámetros del taladro

- o **Diente helicoidal**

Para el caso de “diente helicoidal” (Figura III.13), además de los campos ya cumplimentados para el caso de diente recto, se añaden nuevos campos, los cuales son detallados a continuación:

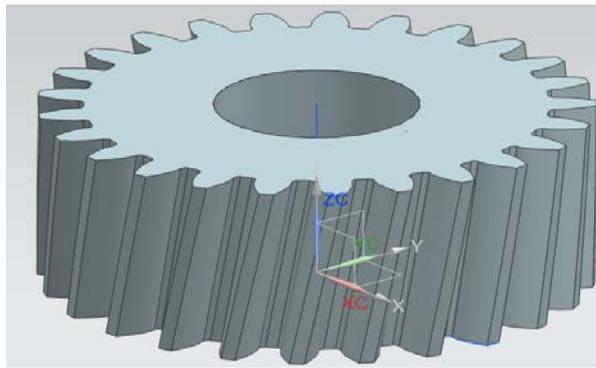


Figura III.13 Dentado helicoidal

- módulo circular (mc)

$$mc = \frac{m}{\cos\beta}$$

$\beta$ = ángulo de hélice

- ángulo de hélice ( $\beta$ ) (Figura III.14)

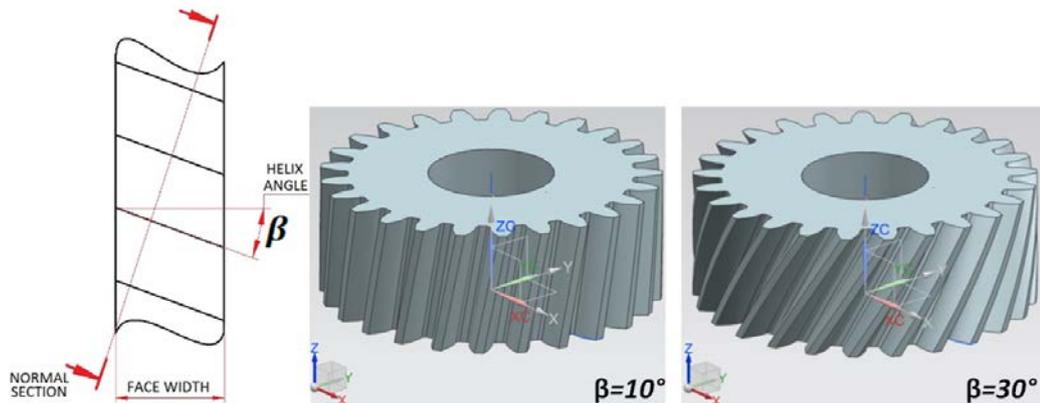


Figura III.14 Ángulo de hélice de un engranaje helicoidal

Cuando un engranaje helicoidal comienza a engranar, el contacto tiene lugar solamente en el punto del diente que más avanzado se encuentra, siguiendo la hélice, y extendiéndose gradualmente sobre una línea diagonal (no paralela al eje) que sigue el diente al girar el engrane.

El hecho de que el contacto y la aplicación de la carga se produzcan de forma gradual, reduce el ruido y las cargas dinámicas, así que los engranajes helicoidales pueden operar a mayores velocidades y transmitir más carga que los engranajes cilíndricos rectos de tamaño similar.

En pares de engranajes cuyos ejes sean paralelos, el ángulo de hélice ( $\beta$ ) deberá ser idéntico en las dos ruedas, pero en una de las rueda la hélice será a izquierdas y en la otra a derechas. En cambio, en pares de engranajes cuyos ejes se cruzan a  $90^\circ$ , el ángulo

de la hélice deberá ser idéntico y con el mismo sentido en las dos ruedas, y la suma de ambos será igual al ángulo entre los ejes.

#### Ventajas

- Diseño y programación CAM en un mismo software

De las metodologías ya expuestas, esta es la única que permite el diseño de engranajes cilíndricos dentro de un entorno CAD/CAM genérico, en el que puede ser diseñada cualquier geometría, no viéndose limitado al diseño de engranajes. El diseño en el mismo software CAD permite también combinar el engranaje con otros componentes de diseño, como pueden ser los ejes.

Además, señalar que el software Siemens NX es el software CAM con más perspectivas de crecimiento del mercado.

- Calidad de las superficies generadas

La calidad del sólido generado es muy importante debido a que sobre esta geometría van a ser programadas las diferentes estrategias de mecanizado.

Una mayor calidad del sólido conlleva directamente a una mejor programación CAM.

- Manejo sencillo

Como acaba de ser expuesto, el manejo de la API es sencillo. Desde una única ventana emergente se tiene acceso a cada una de las diferentes posibilidades de diseño que ofrece el software.

Dependiendo de los parámetros de diseño introducidos será generada una u otra geometría.

- Económico

No supone un coste adicional al coste del propio software CAD/CAM.

- Adaptable a cualquier máquina 5 ejes

#### Desventajas

- No permite correcciones de flanco

Por el momento, desde la ventana de la API no hay ningún campo que nos permita modificar el perfil del flanco con la finalidad de optimizar el funcionamiento del mismo.

- Limitación en tipología de engranajes

Solo permite el diseño de engranajes cilíndricos rectos y helicoidales.



STEP 1: INPUT PRELIMINARY DATA		
GEAR HEEL PITCH DIAMETER (MM):	200,000	
RATIO ([PINION RPM] / [GEAR RPM]):	2,00000	
HAND OF SPIRAL ON GEAR (LEFT OR RIGHT):	LEFT	

STEP 2: FINALIZE DATA. Run "Gear" "Pinion" macros		Suggestions:
SHAFT ANGLE	90	90
NUMBER OF TEETH ON GEAR:	25	34
NUMBER OF TEETH ON PINION:	17	17
GEAR FACE WIDTH (MM):	34	33,54101966
PRESSURE ANGLE (DEG):	20	20
SPIRAL ANGLE (DEG):	35	35
GEAR TRANSVERSAL TOOTH THICKNESS ON HEEL (MM):	12	12,56637061
ANGULAR BACKLASH ON GEAR (DEG):	0,15	0,16387095
GEAR COEFFICIENT OF ADDENDUM:	1	1
COEFFICIENT OF TOOTH HEIGHT:	2,25	2,25
FACE CUTTER GENERATING DIAMETER (MM):	140	140
PROFILE CROWNING (MM):	0,005	0,006708204
LEAD CROWNING (MM):	0,025	0,03354102
COEFFICIENT OF ROOT RADIAL CLEARANCE	0,25	0,25

GEAR FACE ANGLE (DEG):	59,47955524
PINION FACE ANGLE (DEG):	38,09087551
PINION OD (MM):	147,2189533
GEAR OD (MM):	207,5685908
PITCH APEX TO CROWN ON PINION (MM):	96,18555588
PITCH APEX TO CROWN ON GEAR (MM):	62,43485973
ROOT CLEARANCE (MM):	1,080214061
PINION HEEL PITCH DIAMETER (MM):	136
PINION TRANSVERSAL TOOTH THICKNESS ON HEEL (MM):	12,87094184
FACE CUTTER RADIAL DISTANCE (MM):	85,76572047

Figura III.16 Hoja Excel para generación del dentado Gleason

El propio software, al lado de la celda donde se introduce el valor para cada uno de los diferentes campos, va sugiriendo valores. Dependiendo de los parámetros que van siendo introducidos, estos valores sugeridos van siendo actualizados.

De los numerosos parámetros que el software permite ir introduciendo, los que tienen una mayor relevancia para el caso específico de los engranajes espirocónicos van a ser expuestos y comentados a continuación:

- *spiral angle* ( $\beta$ )

El ángulo de espiral es el ángulo de inclinación del diente curvado que es tangente al vector del radio desde el punto de intersección del piñón y del eje del engranaje, como se muestra en la Figura III.17. Debido a la curvatura existente a lo largo de la longitud del diente, existen diferentes puntos con diferentes ángulos de espiral a lo largo del perfil. Se tomará como valor nominal del ángulo espiral del engranaje espirocónico a aquel medido desde el centro del diente.

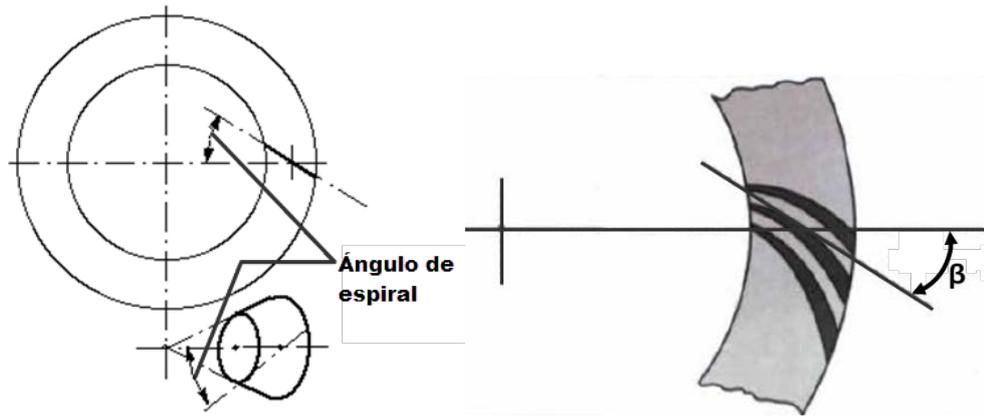


Figura III.17 Definición del ángulo de espiral en engranaje espirocónico

- gear transversal tooth thickness on heel

Mediante este parámetro se controla el espesor del dentado del engranaje.

En la Figura III.18 son representados dos engranajes en los que han sido programados diferentes parámetros de diseño. En el primero de ellos se ha programado un ángulo de espiral de  $35^\circ$  y un espesor de diente en la raíz de 40mm, Figura III.18 a). En el segundo, el ángulo de hélice programado ha sido de  $45^\circ$  y el espesor del diente en la raíz de 63mm, Figura III.18 b).

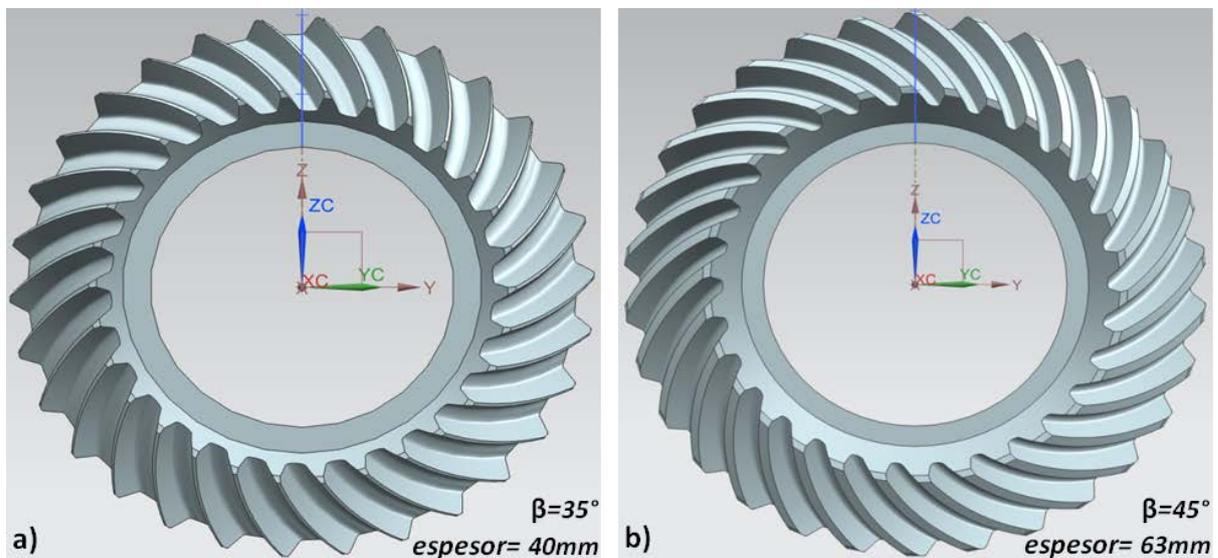


Figura III.18 Diferentes diseños de engranaje espirocónico

La hoja de cálculo también tiene unos campos que permiten introducir modificaciones de flanco. Estas modificaciones son el *profile* y *lead crowning* (Figura III.19), que son las modificaciones más comunes que suelen aplicarse al perfil del diente.

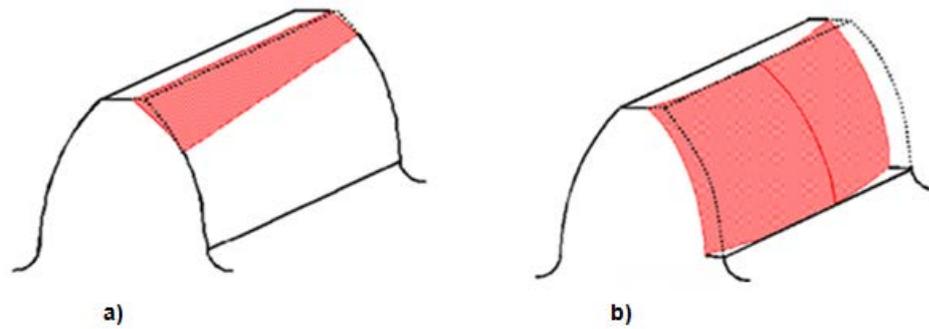


Figura III.19 a) Profile Crowning; b) Lead Crowning

Estas modificaciones se utilizan con el fin de alcanzar un buen patrón de contacto, evitándose así el contacto en ambos extremos del flanco en el área de la cabeza (*tip*) y del pie (*root*) del diente.

Una vez todos los parámetros de diseño han sido introducidos, se ejecuta la macro y directamente son generados dos archivos diferentes, uno correspondiente a la corona y el otro al piñón. Estos archivos tienen extensión *.igs* (formato de gráficos vectoriales 2D/3D), lo que permite que sean importados desde cualquier software CAD/CAM. En nuestro caso particular el software Siemens NX. La Figura III.20 esquematiza el proceso descrito.

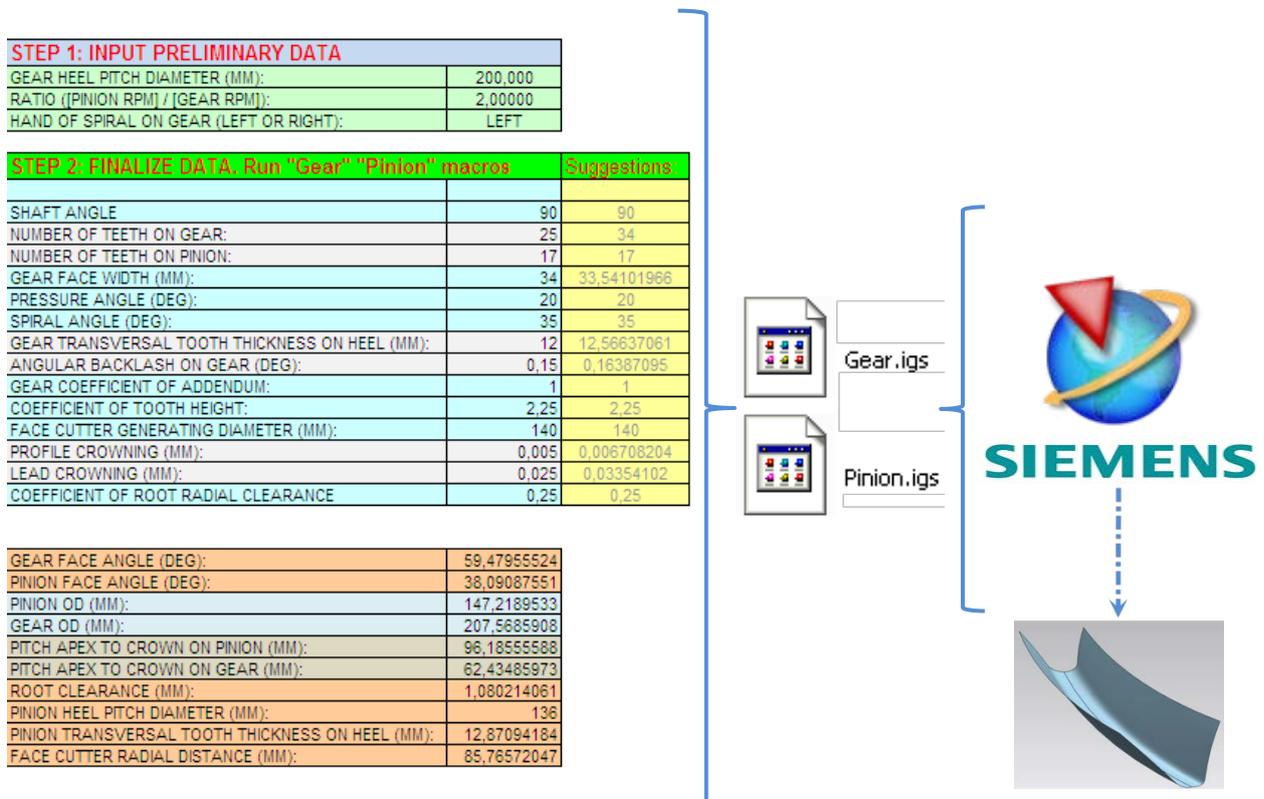


Figura III.20 Proceso de generación de la superficie de un dentado espirocónico

El tratamiento que se le da a la superficie generada por el software es lo que determina la correcta generación del sólido 3D con el que se va a trabajar.

Previamente a la importación del archivo *.igs* serán generados los diferentes cuerpos que forman el par de engrane (Figura III.21). La generación de estos sólidos se realiza en el propio software CAD/CAM a partir de los datos introducidos previamente en la hoja de cálculo. Hay que prestar atención al diseño del *sketch* a partir del cual se genera cada uno de los sólidos, debido a que de este depende la correcta generación del par de engranajes.

Para asegurar una correcta implementación del software de diseño dentro del entorno CAD/CAM con el que se ha trabajado, ha sido necesaria establecer una metodología. El desarrollo de esta metodología asegura el correcto diseño de los mismos.

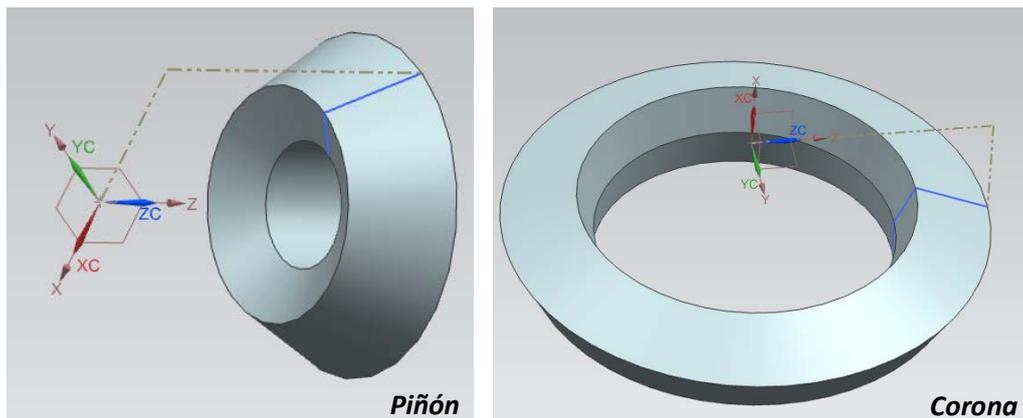


Figura III.21 Cuerpos del par de engrane

Una vez ya han sido generados los diferentes cuerpos del par de engrane es cuando es importado el archivo *.igs* desde el software CAD/CAM correspondiente,

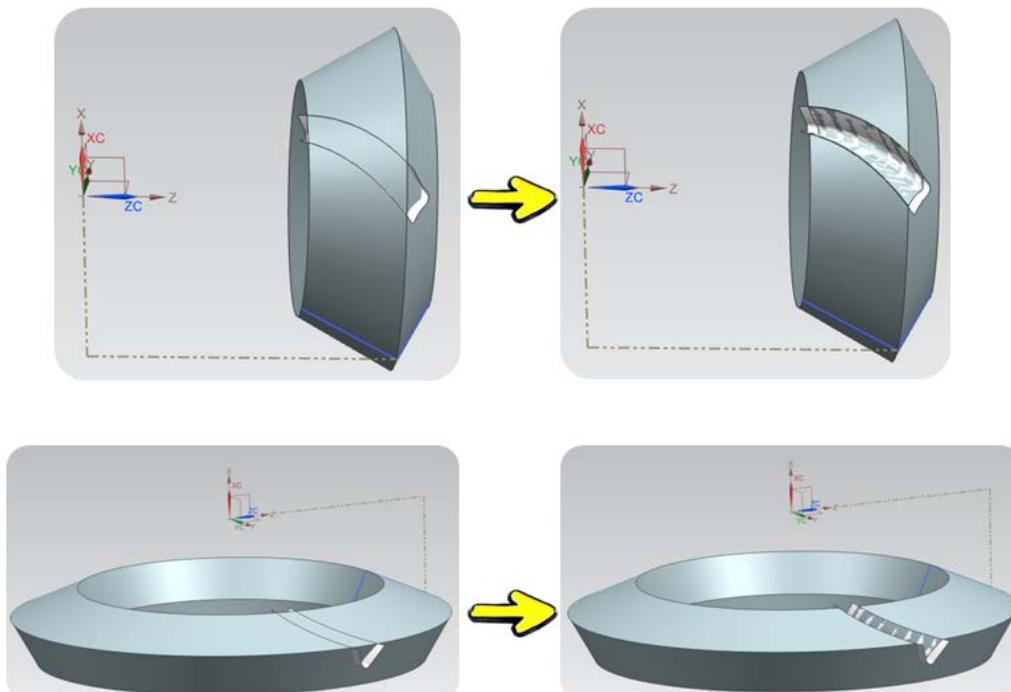


Figura III.22 Importación de la superficie (.igs)

Como se puede observar en la Figura III.22, al importar el archivo .igs lo que nos encontramos es con una sola superficie, tanto para el caso del piñón como de la corona, la cual ha sido generada a partir de los parámetros de diseño anteriormente introducidos.

Esta superficie corta cada uno de los cuerpos previamente generados, y si no es así, la superficie es extendida hasta conseguirlo. Mediante una operación relativamente sencilla es eliminado el material intersecado por la superficie diseñada, conformándose así el primero de los dientes para cada uno de los diferentes componentes.

El que solo sea generado un diente no conlleva ningún problema adicional, debido a que los engranajes, independientemente de la tipología del mismo, no dejan de ser una sucesión de “huecos”, tantos como dientes tiene el engrane, en el cual se conserva constante el ángulo existente entre cada uno de ellos. Por lo tanto, teniendo una de las superficies y aplicando un patrón circular en el software CAD/CAM, podemos obtener el resto de los dientes que forman el engranaje, Figura III.23.

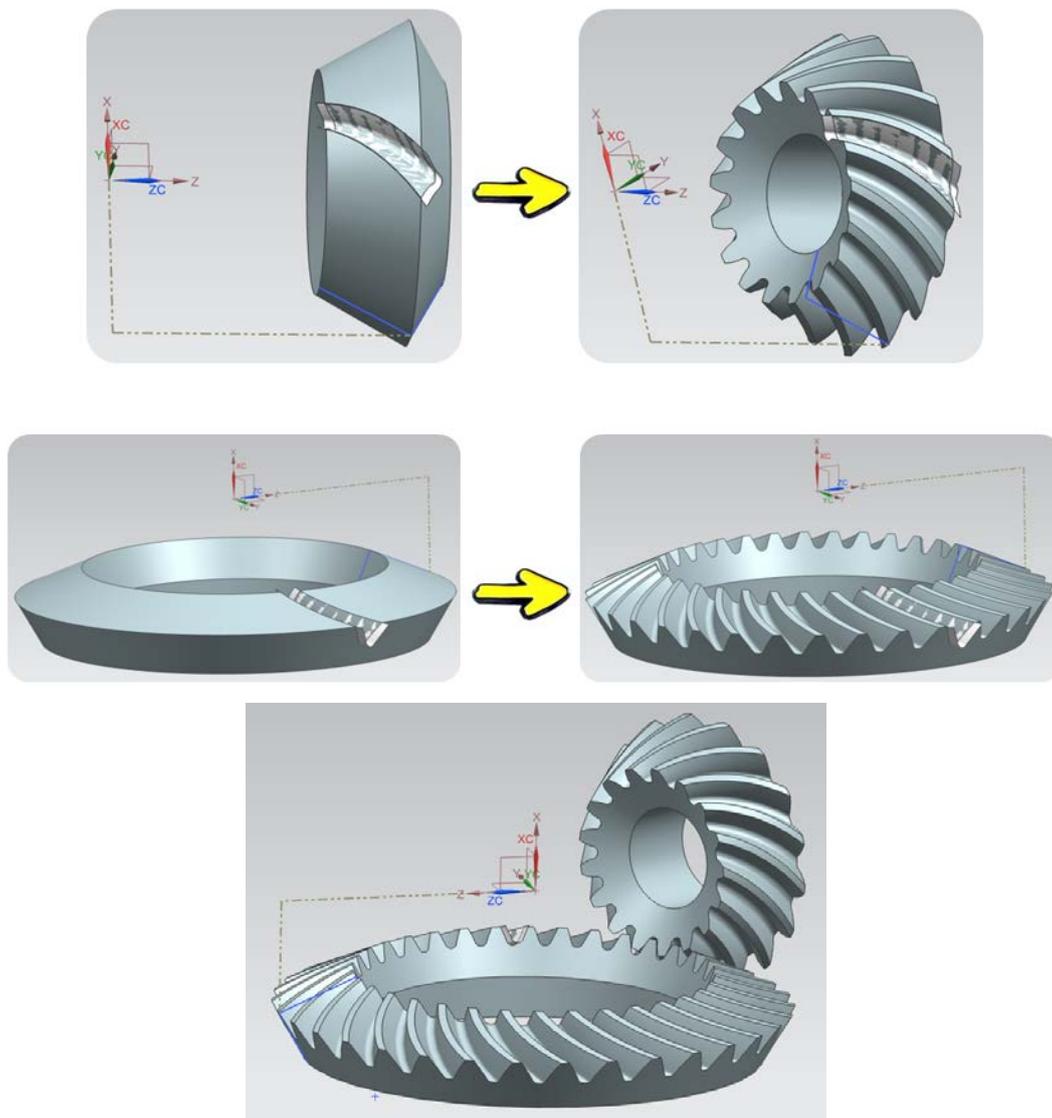


Figura III.23 Generación del par de engranajes a partir de la superficie importada

Una vez que se ha generado el par de engranajes, para confirmar que el engrane entre ambos componentes va a ser el idóneo, validándose así también el correcto funcionamiento del software de diseño, tiene que ser verificado lo expuesto por G.G. Baránov [Baránov, 1979].

Según Baránov, las superficies frontales de una rueda cónica se diseñan empleando conos, complementarios al cono primitivo. En la Figura III.24 se muestra un cono complementario de una superficie frontal externa. El vértice de este cono está situado en el punto  $O'$ .

La generatriz  $O'P$  del cono complementario es perpendicular a la generatriz  $OP$  del cono primitivo. Por eso, el ángulo del cono complementario es igual a  $(90^\circ - \phi)$ , donde  $\phi$  es el ángulo del cono primitivo. La altura del diente, así como el paso y el módulo del engranaje disminuyen al pasar de la superficie frontal externa a la interna. Se ha convenido en fijar todas las dimensiones principales de una rueda cónica en la superficie frontal externa. El cono complementario interseca al cono primitivo a lo largo de una circunferencia de radio  $r$ . Esta circunferencia se denomina circunferencia primitiva de una rueda cónica; sobre esta circunferencia el módulo del engranaje  $m$ , debe tener un valor estandarizado.

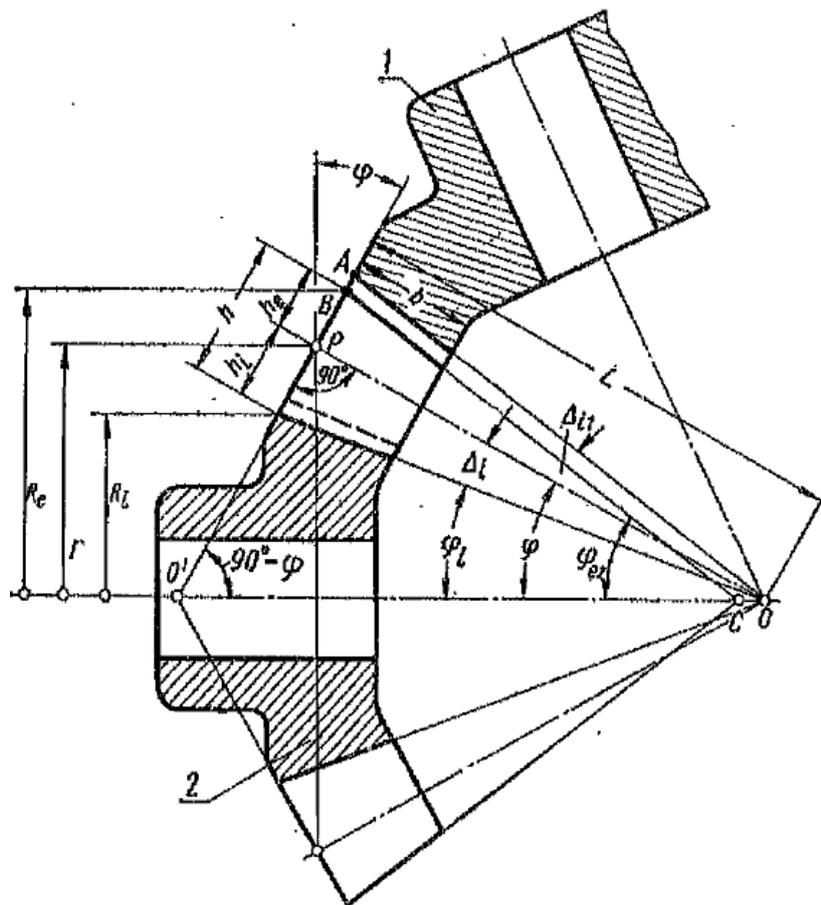


Figura III.24 Sección de una rueda cónica en el plano que pasa por su eje de giro

En las ruedas cónicas normales el paso de engrane, el espesor del diente, el hueco interdental, la altura de la cabeza del diente y el radio de la circunferencia primitiva están relacionados con el módulo del engranaje del mismo modo que las ruedas dentadas cilíndricas normales. Solo varía un poco la holgura radial, que en las ruedas cónicas se toma igual a  $0.2xm$  (en vez de  $0.25xm$ ).

Con el fin de garantizar una holgura radial constante entre los dientes, el cono de cabeza de los dientes en una de las ruedas se diseña de tal modo que su generatriz CB sea paralela a la generatriz OA del cono de fondo de la otra.

Ahora se va a reproducir el esquema de la Figura III.25 sobre el sólido generado previamente a partir de los parámetros de diseño introducidos por el usuario en la hoja de cálculo.

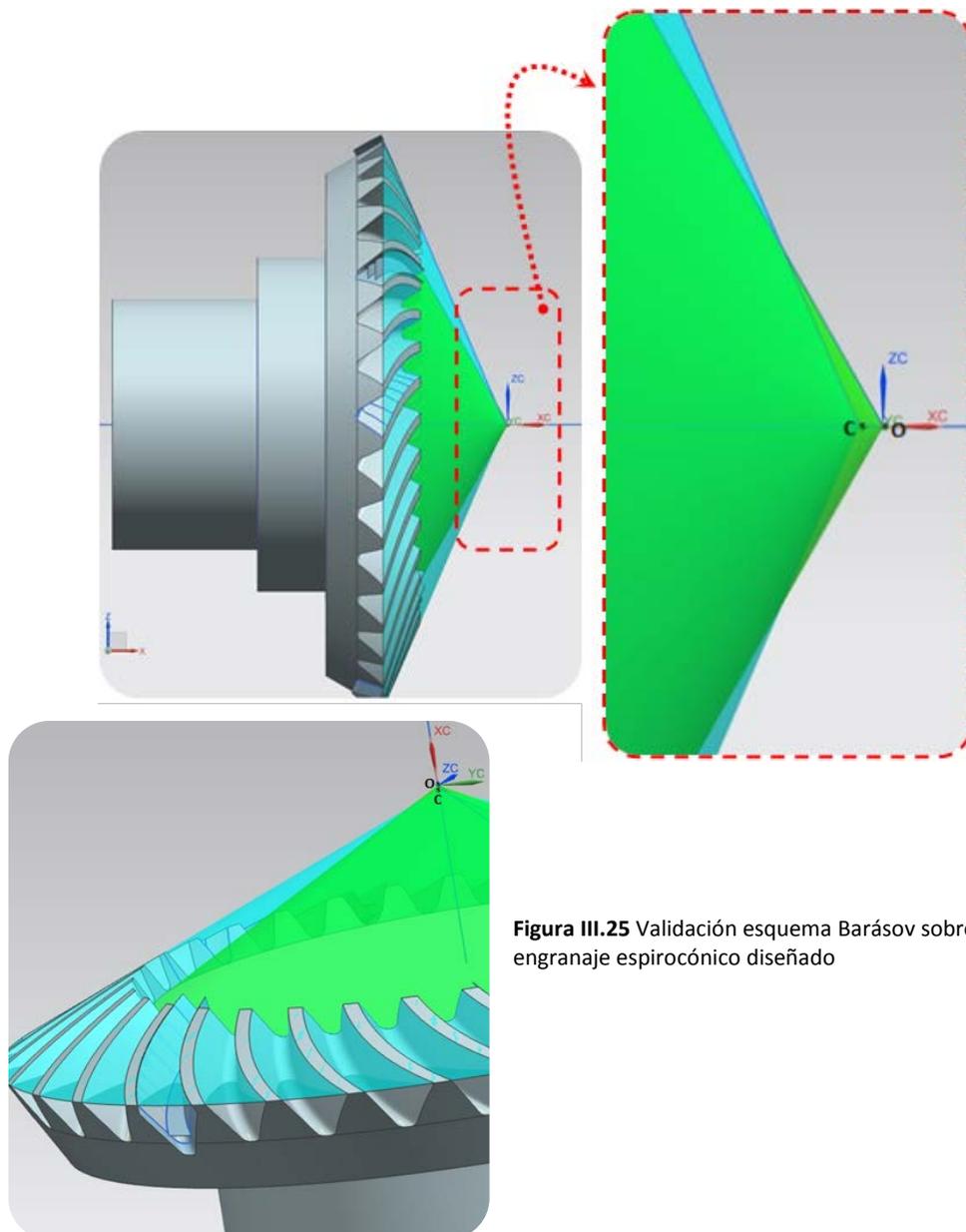


Figura III.25 Validación esquema Barásov sobre engranaje espirocónico diseñado

Como se puede observar en la Figura III.25, el esquema representado por Baránov para la sección de una rueda cónica en el plano que pasa por su eje de giro queda completamente retratado sobre el engranaje espirorocónico diseñado.

Con la realización de esta prueba se consigue validar el correcto funcionamiento del software de diseño, lo que también asegurará el idóneo contacto entre corona-piñón en el engrane entre ambos.

#### Ventajas

- Software genérico

Una vez introducidos los diferentes parámetros de diseño, se ejecuta la macro y se generan los archivos *.igs* correspondientes. El formato *.igs* es un archivo genérico que puede ser importado desde cualquier software CAD, CAM o CAD/CAM.

- Software de diseño permite una programación simple

El software de diseño es una hoja de cálculo Excel, lo que simplifica mucho la introducción de los parámetros de diseño. Desde una única tabla se tiene acceso a cada uno de estos parámetros.

Además, el propio software va sugiriendo valores para cada uno de los diferentes campos a lo largo del proceso de diseño, lo que conlleva una ayuda adicional.

- Introducción de modificaciones de flanco

La hoja de cálculo tiene unos campos que permiten introducir modificaciones de flanco.

Estas modificaciones son el *profile* y *lead crowning*, que son las modificaciones de flanco más usuales que pueden ser aplicadas al perfil del diente.

- Calidad del sólido generado

El software genera una superficie, a partir de los parámetros de diseño introducidos, que corresponde geoméricamente a la de uno de los dientes.

Una vez esta superficie es importada desde el propio software de diseño, las operaciones necesarias para obtener el engranaje completo ya son realizadas en este software. Esto permite que todas las geometrías obtenidas, y con las que posteriormente se va a trabajar, sean generadas en el mismo software en el que van a ser programadas las diferentes estrategias de mecanizado.

Esto reduce considerablemente las posibles incidencias que pueden presentarse en el proceso de programación, asegurándose así la optimización de las estrategias de mecanizado aplicadas, con el ahorro de tiempo y calidad que esto conlleva.

- Económico

La adquisición de este software no conlleva casi coste adicional

- Adaptable a cualquier máquina 5 ejes

#### Desventajas

- Software adicional

Los parámetros de diseño son introducidos en un software diferente al software CAM en el que serán programadas las diferentes estrategias de mecanizado, por lo que son necesarios al menos el uso de dos software.

- Limitación en tipología de engranajes

Solo permite el diseño de engranajes cónicos

## **III.2. Programación de las trayectorias**

A lo largo del proceso de estudio, se han llevado a cabo numerosos ensayos con la única finalidad de optimizar el mecanizado de engranajes en máquinas de propósito general.

Los engranajes que han sido diseñados a lo largo de los diferentes ensayos han sido dotados de un elevado número de dientes ( $Z$ ). Esto se debe a que cuanto mayor es este número, se dispondrá de un mayor número de elementos sobre los que evaluar las diferentes estrategias de mecanizado programadas.

Con la finalidad de optimizar el proceso, las diferentes estrategias de mecanizado (trayectorias) tanto para el desbaste como para el acabado van a ser evaluadas de manera independiente.

### ***III.2.1 Trayectorias de desbaste***

Para un mismo diámetro de engranaje, cuanto mayor es el número de dientes menor será el hueco interdental. Una reducción del hueco interdental conlleva la programación de herramientas de diámetros más ajustados.

Para el caso particular del desbaste, los diámetros de las fresas utilizadas son de 3 y 4mm. Debido a la esbeltez de estas herramientas, durante el mecanizado serán dotadas del menor voladizo posible para realizar la operación, aumentándose así la estabilidad y precisión de la operación y minimizándose las posibilidades de rotura de la misma. Para conocer con exactitud

el valor de este voladizo mínimo, solo hay que recurrir a la simulación CAM, donde este valor puede ser medido para la situación más desfavorable de la herramienta.

Además de dotar a la herramienta del menor voladizo posible, a la hora de seleccionarla también se ha intentado buscar características que le proporcionaran de una mayor robustez, como añadir un pequeño chaflán en la parte inferior del filo, Figura III.26.

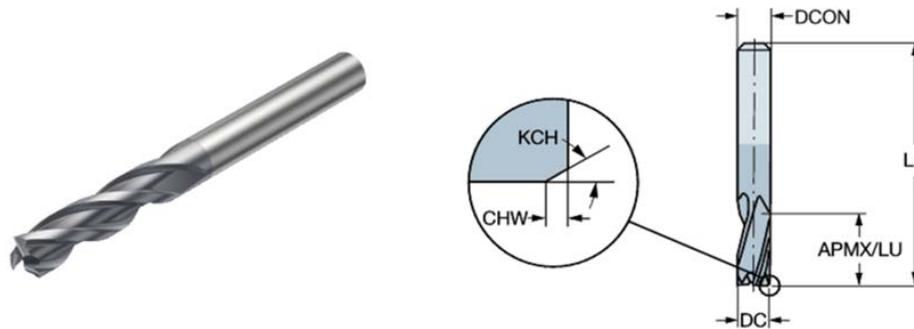


Figura III.26 Geometría de las fresas utilizada para el desbaste

Es una fresa diseñada para ranurar, que es la operación más exigente del mecanizado, al estar la fresa trabajando con todo su diámetro.

Aprovechando que todas las máquinas con las que se ha trabajado permiten la interpolación de hasta 5 ejes de manera continua, han sido programadas y evaluadas diferentes estrategias. Han sido programadas estrategias 3+1 ejes (3 ejes continuos y 1 posicional) como es el caso de la estrategia *CAVITY\_MILL* (dentro del entorno *mill\_contour*) y estrategias de 5 ejes continuos, como es el caso de *VARIABLE\_CONTOUR* (dentro del entorno *mill\_multi-axis*), Figura III.27.

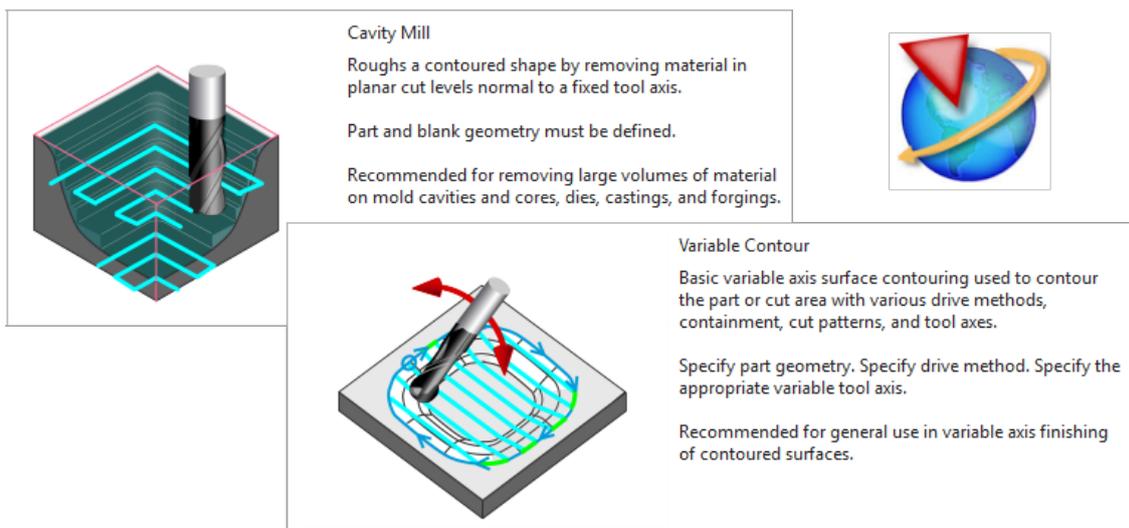


Figura III.27 Estrategias programadas para el desbaste

Además, dentro de estas estrategias de mecanizado, han sido evaluados diferentes patrones de corte (Zig, Zig-Zag, Follow Part, Follow Periphery) en combinación con diferentes parámetros de

corte ( $a_e$ ,  $a_p$ ). Pese a ser operaciones de desbaste, se ha constatado que el uso de taladrina en el proceso de mecanizado alarga la vida útil de la herramienta.

Destacar que cada una de las estrategias programadas no son aplicadas sobre un único hueco interdental. Estas son aplicadas a varios huecos interdentales consecutivos con la finalidad de verificar la repetibilidad del proceso.

Una vez ya han sido programadas, verificadas y mecanizadas cada una de las diferentes estrategias, en el estudio nos vamos a centrar en dos parámetros para encontrar aquella estrategia capaz de optimizar el proceso. Estos parámetros van a ser el tiempo de mecanizado y el desgaste de la herramienta.

### III.2.2 Trayectorias de acabado

Como es lógico, los diámetros de las herramientas de acabado programadas son de igual o menor diámetro que las utilizadas para el desbaste, principalmente porque tienen que alcanzar lugares que la herramienta de desbaste no ha llegado a mecanizar.

Las estrechas demasías existentes tras la operación previa de desbaste harán que las fuerzas de corte generadas en las operaciones de acabado no sean elevadas. Aun así, el voladizo programado también será el mínimo que permita el mecanizado completo de la geometría, debido a que al ser operaciones de acabado hay que asegurar la precisión y la estabilidad de la herramienta a lo largo de todo el proceso de mecanizado.

Las herramientas utilizadas para el acabado de las superficies de los flancos de los dientes son de geometría cónica y de diámetro 3mm, Figura III.28. En algunos de los ensayos también han sido utilizadas herramientas de la misma geometría pero de diámetro 2mm. La geometría cónica permite acceder a zonas de difícil acceso reduciendo el riesgo de interferencias con zonas de la pieza de trabajo que no precisan de mecanizado.



Figura III.28 Geometría de las fresas utilizadas para el acabado

A diferencia de las estrategias de mecanizado programadas para el desbaste, en las operaciones de acabado solo han sido programados estrategias de 5 ejes continuos. La estrategia *VARIABLE\_CONTOUR* permite programar estos 5 ejes de diferentes maneras:

- 5 ejes continuos

- 3+2 ejes, 3 continuos y 2 de posicionamiento. Esto se consigue imponiendo la dirección de la herramienta mediante la definición de un vector.

Dentro de esta operación *VARIABLE\_CONTOUR* han sido evaluados diferentes patrones de corte (*Zig* y *Zig-Zag*) y diferentes valores de *stepover*. En la Figura III.29 se representa este parámetro, el cual está ligado directamente a la calidad final de la superficie obtenida, aunque también puede llegar a conllevar incrementos de tiempos que deberán ser considerados.

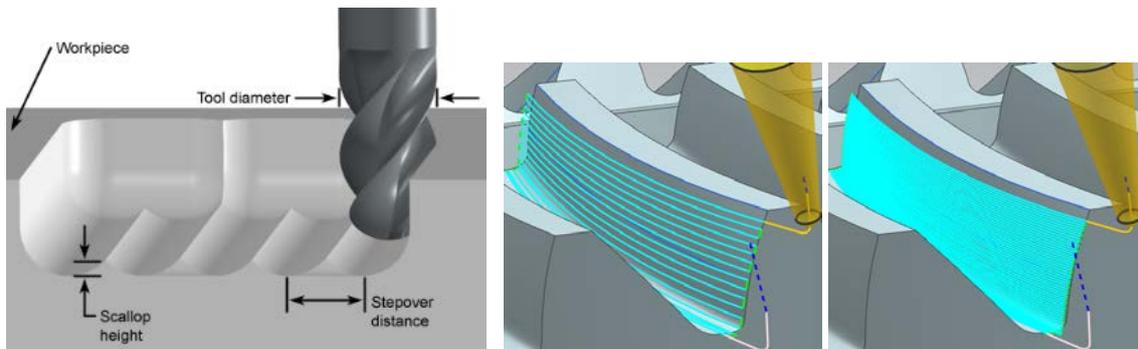


Figura III.29 Parámetro *stepover* y diferentes valores del mismo sobre flanco de engranaje

Igual que se hizo para la operación de desbaste, cada una de las estrategias programadas no serán aplicadas a un único hueco interdental, serán aplicadas a varios huecos consecutivos con la finalidad de verificar la repetibilidad de la operación evaluada.

Una vez ya han sido programadas, mecanizadas y verificadas cada una de las diferentes estrategias, para encontrar aquella estrategia capaz de optimizar el proceso de acabado nos vemos a centrar en el parámetro de la rugosidad superficial. El valor de esta rugosidad será obtenido tanto por sistemas de medición ópticos como por contacto, generándose topografías individualizadas para cada uno de los diferentes dientes estudiados.

### III.3. Fresado de las diferentes tipologías

A lo largo de los diferentes ensayos realizados, han sido mecanizados engranajes de diferentes tipologías, como son un engranaje cilíndrico helicoidal y varios engranajes espirocónicos (coronas).

Estos engranajes han sido mecanizados en máquinas Ibarria multieje pero de diferente cinemática y control. En términos generales, la programación CAM de las diferentes estrategias es la misma. Es el postprocesador desarrollado para cada una de las máquinas quien se encarga de traducir el programa generado a lenguaje máquina para cada una de las máquinas empleadas, y todo esto en función del control y la cinemática de cada una de estas.

### III.3.1 Engranaje cilíndrico helicoidal

El primero de los engranajes que ha sido mecanizado es un engranaje cilíndrico helicoidal de pequeño módulo.

Con el mecanizado de este engranaje, lo que quería ser verificado era la factibilidad de mecanizar engranajes tan pequeños en máquinas de propósito general. En la Figura III.30 se puede comprobar la dimensión real de este engranaje.

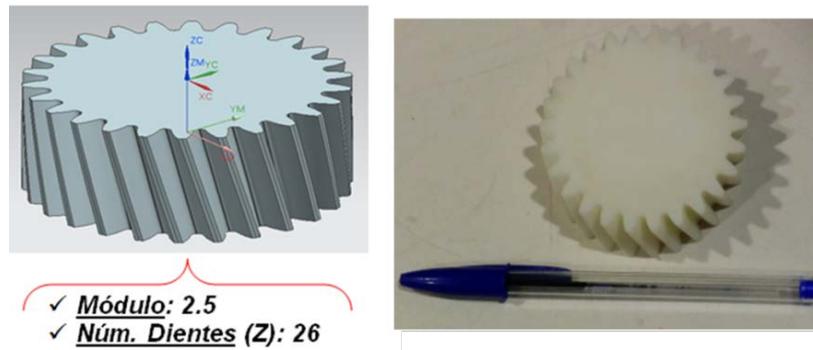


Figura III.30 Características del engranaje cilíndrico helicoidal

Estos engranajes de módulos tan pequeños ( $m=2.5$  en este caso) suelen ser mecanizados mediante el uso de los sistemas tradicionales, debido principalmente al hecho de que las herramientas estándar a utilizar para poder mecanizar los estrechos huecos interdentales son muy esbeltas. Esta esbeltez hace que las herramientas sean poco robustas, lo que complica el proceso de mecanizado.

La máquina utilizada para la realización de este engranaje fue la *Ibarmia ZV25/U600* del taller mecánico de la ETSI de Bilbao. La cinemática de esta máquina se muestra en la Figura III.31.



Figura III.31 *Ibarmia ZV25/U600* situada en el taller de ingeniería mecánica de la ETSI de Bilbao

### III.3.2 Engranaje espirocónico

Una vez mecanizado el engranaje cilíndrico, el resto de los engranajes mecanizados han sido de tipología espirocónica, engranajes que destacan por su complejidad geométrica.

El software utilizado permite generar ambos componentes del par de engrane simultáneamente. En todos los mecanizados realizados, de ambos componentes se ha decidido trabajar con la corona (Figura III.32), debido a que el número de dientes es mayor del que dispone el piñón, por lo que se dispondrá de un mayor número de elementos sobre los que poder evaluar las diferentes estrategias de mecanizado programadas.

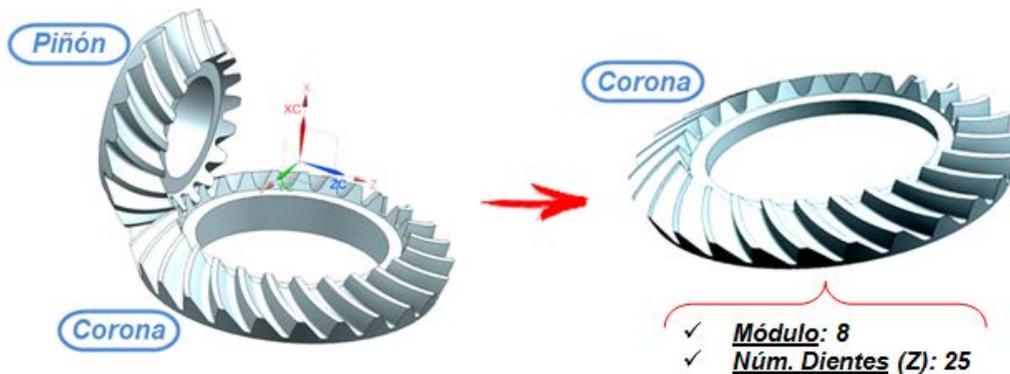


Figura III.32 Características de la corona mecanizada

Esta corona ha sido mecanizada en 3 máquinas diferentes. La primera de ellas se mecanizó en la *Ibarmia ZV25/U600* del taller mecánico de la ETSI de Bilbao, cuya cinemática se ha representado anteriormente. Después de este primer mecanizado, la misma corona ha sido mecanizada en una *Ibarmia ZVH38/L1600 Multiprocess*, perteneciente al Instituto de Máquina Herramienta (IMH) de Elgoibar, y en una *Ibarmia ZVH45/L1600 ADD+PROCESS*, situada en las instalaciones de Tecnalía en Donosti. Estas dos últimas máquinas comparten cinemática, Figura III.33.

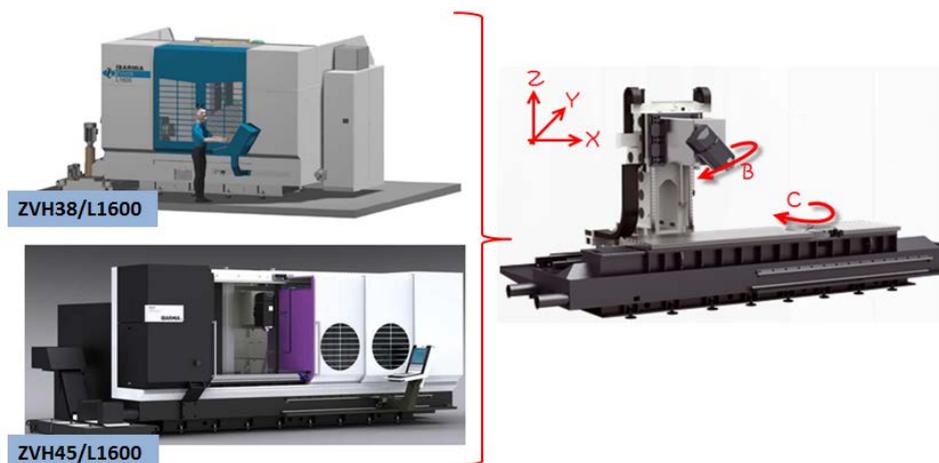


Figura III.33 Cinemática de la *Ibarmia ZVH38/L1600 Multiprocess* y de la *Ibarmia ZVH45/L1600 ADD+PROCESS*

## III.4. Control de la calidad de los diferentes engranajes mecanizados

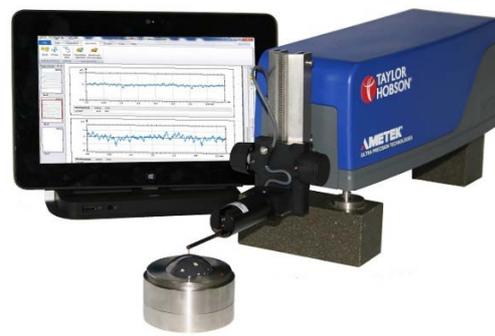
Tras las diferentes operaciones de acabado, como ya ha sido comentado anteriormente, se procederá a la medida de la rugosidad superficial de cada uno de los diferentes flancos.

Para la obtención de estas rugosidades superficiales han sido utilizados diferentes equipos. Por un lado tenemos un equipo que nos permite medir esta rugosidad de una manera óptica, como es el perfilómetro tridimensional *Leica DCM 3D*. Además, este mismo equipo permite obtener las topografías de cada una de las superficies analizadas. Figura III.34 a).

Por otro lado, se dispone de otro equipo que permite la obtención de esta rugosidad mediante un contacto explícito con la superficie de cada uno de los diferentes elementos, como es el perfilómetro *Taylor Hobson FORM TALYSURF SERIES 2*, Figura III.34 b). El contacto se realiza mediante una punta palpadora que se desplaza de manera perpendicular a la trayectoria realizada sobre la superficie a velocidad constante. Sobre el calibrador será aplicada una carga para asegurar que el contacto no se pierde a lo largo de toda la medición.



a)



b)

Figura III.34 a) *Leica DCM 3D*; b) *Taylor Hobson FORM TALYSURF SERIES 2*

Los engranajes mecanizados presentan ciertas dificultades para permitir el acceso a ciertas zonas mecanizadas con los equipos de medición anteriormente descritos. En el caso del perfilómetro óptico, el reducido espacio interdental evita que la luz penetre de manera eficiente en este, mientras que para el caso del perfilómetro por contacto, la medición se ve restringida al no haber el palpador en este hueco interdental. Estos problemas dificultan la obtención de los parámetros de rugosidad.

Ha esta problemática también habría que añadir lo que supone el manejo de una pieza de más de 10 kilos sobre estos equipos, como es el caso particular de la corona espirocónica. Además de la implícita incomodidad que presenta este hecho, su manejo conlleva una peligrosidad

adicional tanto para los propios equipos de medición, que son de elevada sensibilidad, como para la persona encargada de este manejo.

Es por esta razón que se recurre a la obtención de moldes de cada uno de los diferentes huecos interdentes para cada uno de los engranajes mecanizados en los diferentes ensayos. Para la obtención de estos moldes se ha recurrido a resinas especiales, con precisiones de impresión que rondan la micra y que permiten ser analizadas con dispositivos de medición de rugosidad ópticos. Dependiendo de la consistencia de mezcla que se requiera, el fabricante permite proporciones desde 1:1 a 3:1. En nuestro caso particular, tras varios ensayos, se determinó que la proporción idónea era 2:1, 2 porciones de polvo por cada 1 de disolvente. El proceso de obtención de los moldes se puede ver en la siguiente figura, Figura III.35, donde se obtiene un molde por cada hueco interdental del engranaje.

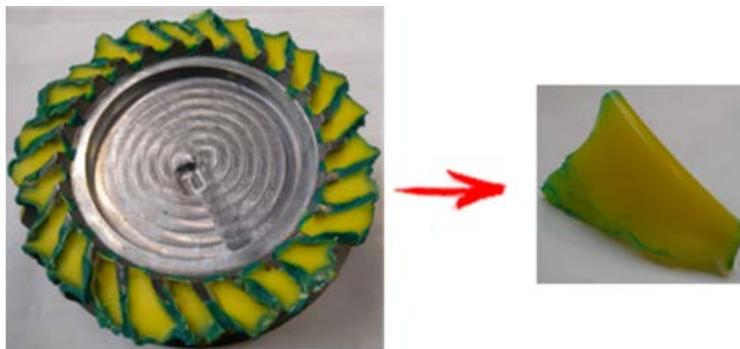


Figura III.35 Moldes de corona espirocónica

Una vez son extraídos cada uno de los moldes de los diferentes dientes, se procede a medir la rugosidad de cada uno de ellos. Como se ha comentado anteriormente, la medición de cada uno de los diferentes dientes se realizará mediante el uso tanto del perfilómetro óptico como del de contacto. En la Figura III.36 se detalla este proceso a partir de la obtención de cada uno de los diferentes moldes.

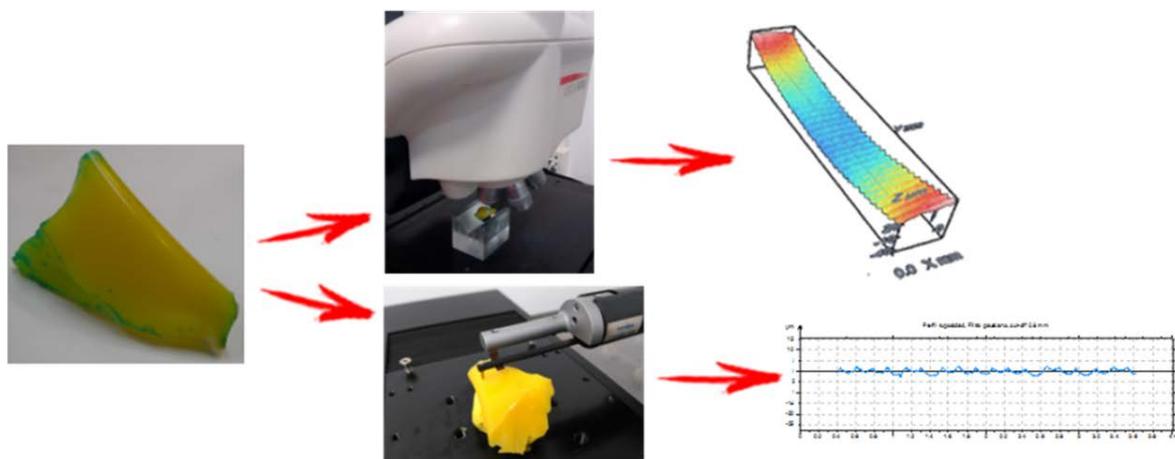


Figura III.36 Medición rugosidad por sistemas ópticos y por contacto

Antes de realizar la medición de la rugosidad debe ser determinado el valor del módulo de medición o *cut-off* ( $\lambda_c$ ). Este valor no debe de ser confundido con la longitud de medición. Su función es la de actuar como filtro de la ondulación, eliminándose así esta y solo quedándonos con el valor de la rugosidad. Normas internacionales establecen cinco veces el módulo como mínimo para realizar una evaluación de la rugosidad de una superficie.

El valor de  $\lambda_c$  se selecciona en función del valor esperado para el parámetro de espaciado RSm en estructuras periódicas, como es nuestro caso, al tratarse de una operación de fresado. En la Tabla III.1, correspondiente a la Tabla ISO 4288, se representa los valores de *cut-off* para cada uno de los diferentes rangos de RSm.

RSm (mm)		$\lambda_c = l_r$ (mm)	$l_n$ (mm)	$l_t$ (mm)	$r_{tip}$ ( $\mu m$ )	$\lambda_s$ ( $\mu m$ )
> 0.013	...0.04	0.08	0.4	0.48	2	2.5
> 0.04	...0.13	0.25	1.25	1.5	2	2.5
> 0.13	...0.4	0.8	4	4.8	2 or 5 *	2.5
> 0.4	...1.3	2.5	12.5	15	5	8
> 1.3	...4	8	40	48	10	25

Tabla III.1 Tabla ISO 4288 [Leica Microsystems]

Los parámetros de rugosidad que han sido tomados para cada una de las diferentes medidas han sido la rugosidad media aritmética ( $Ra$ ) y la altura media de la rugosidad ( $Rz$ ). En alguna de las mediciones también ha sido obtenido el parámetro de la altura total del perfil de rugosidad ( $Rt$ ).

- El  $Ra$  es el parámetro más extendido y utilizado en todo el mundo. Es utilizado cuando se necesita el control de la rugosidad de una forma continua debido a la facilidad de obtención del resultado. La desventaja que presenta la obtención de este parámetro es que un pico o un valle no típico altera el valor de la medida, no representando fielmente el valor medio de la rugosidad.
- El  $Rz$  (DIN 4768) es un parámetro que define muy bien la superficie en perfiles periódicos, tal como es nuestro caso. Surcos aislados serán considerados parcialmente de acuerdo a la cantidad de puntos aislados.

- El  $Rt$  (ISO 4287:1997) tiene las mismas características que  $Rmax$  pero con mayor rigidez, debido a que la longitud de medición es igual a la longitud de palpado del equipo.

Para el caso particular de las fresas esféricas, a partir del radio de la herramienta, del *stepover* programado y del ángulo de inclinación de la zona de trabajo, para cada una de las operaciones programadas puede ser obtenida de una manera teórica la altura de cresta sobre la superficie mediante la aplicación de una simple ecuación, como se muestra en la Figura III.37.

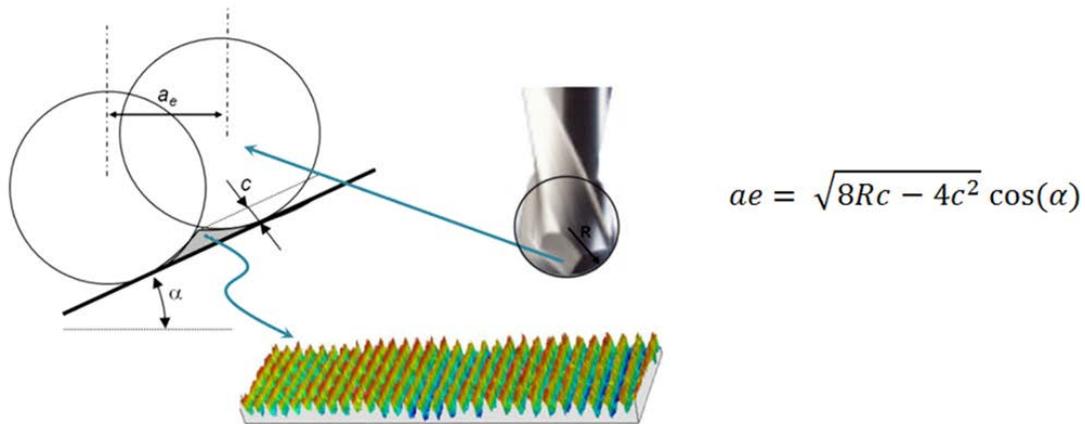


Figura III.37 Cálculo de la rugosidad teórica en mecanizado con fresa esférica

El uso de estos equipos se ha visto reforzado por el uso de otros equipamientos. El uso de un microscopio *Leica Z6 APO* (Figura III.38a)) nos ha permitido obtener imágenes amplificadas y con una buena nitidez tanto del flanco como de los diferentes filos de las herramientas utilizadas en la operación de desbaste. Gracias a esto, el desgaste ha podido ser analizado con un mayor detalle.

También ha sido utilizado un sistema de medición 3D óptico, como es el caso del *ATOS GOM* (Figura III.38 b)). Este instrumento permite obtener coordenadas 3D exactas y trazables de la superficie de un sólido mediante la proyección de patrones de luz. Tras cada medición, el sensor o la pieza se mueven para poder explorar áreas no capturadas en la exploración anterior. Todas las mediciones individuales se convierten automáticamente en un sistema de coordenadas común que da lugar a una completa nube de puntos 3D, la cual será comparada con el modelo CAD sobre el cual han sido programadas las diferentes estrategias de mecanizado.

Este procedimiento de medición permite una verificación de pieza rápido y veraz en relación a las dimensiones finales de la misma, pero no permite obtener el parámetro de rugosidad superficial.

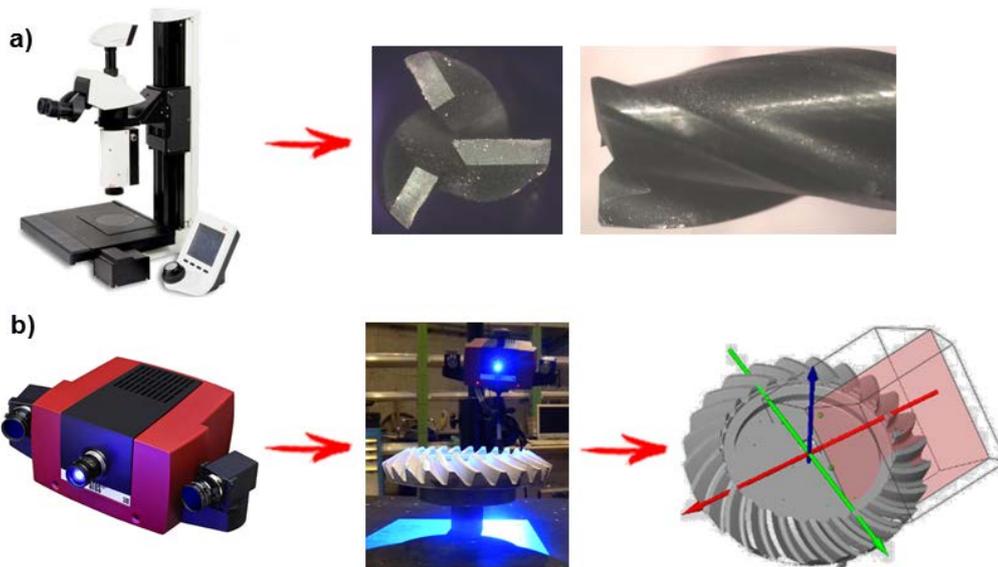


Figura III.38 a) Análisis mediante macroscopio *Leica Z6 APO*; b) Análisis mediante *ATOS GOM*

El escáner óptico *3D ATOS GOM*, como ya se ha comentado, permite generar una comparativa entre el sólido analizado y el modelo CAD sobre el cual han sido programadas las diferentes estrategias de mecanizado. Tras la medición, dependiendo de las tolerancias existentes sobre cada uno de los diferentes puntos analizados, el software genera una visualización policromática del sólido que será dependiente del valor de esta.

En la Figura III.39 se plasma una medición realizada sobre un engranaje espirocónico mecanizado en uno de los ensayos llevados a cabo.

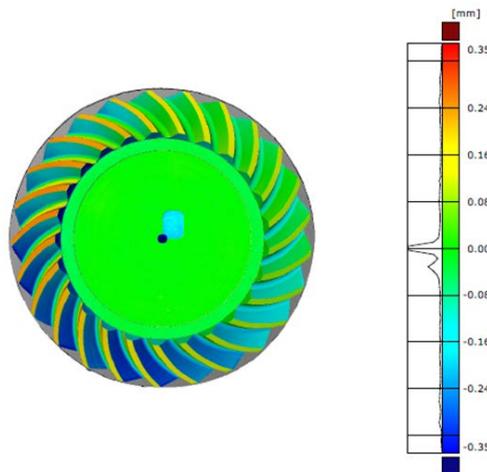


Figura III.39 Análisis dimensional mediante sistema óptico *ATOS GOM*

Como se puede observar, sobre la escala policromática se añade una representación gráfica de la distribución normal del grupo de datos analizados.

Mediante el uso de este sistema óptico puede ser determinado de manera relativamente sencilla el error de paso existente entre diente y diente, y el error acumulado del paso.







---

## BIBLIOGRAFÍA

- [Altintas, 1998] Altintas, Y., Lee P. (1998), *Mechanics and Dynamics of Ball End Milling*, Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering (1998), 120: 684-692.
- [Arizmendi, 2008] Arizmendi, M., Fernández (3), J., López de Lacalle, L. N., Lamikiz, A., Gil, A., Sánchez, J. A., Campa, F. J., Veiga, F., *Modal development for the prediction of surface topography generated by ball-end mills taking into account the tool parallel axis offset. Experimental validation*, CIRP Annals – Manufacturing Technology 57 (2008) 101-104.
- [Arizmendi, 2016] Arizmendi, M., Artano Aldalur, M., Jiménez Zabaleta, A., *Generación de texturas superficiales por fresado en cinco ejes*, XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica (CNIM), Noviembre 2016.
- [ASM, 1991] ASM Handbooks Online™ – Volume 4, Heat Treating – Laser Surface Hardening – Application – Laser Surface Hardening of a Large Gear.
- [Bae, 2014] Bae, I., Schirru V., *An approach to find optical topological modification to duplicate tooth flank form of the existing gear*, Gear Solutions Magazine, December 2014, pp. 34–43.
- [Bagwell, 2015] Peter Bagwell, *Machine involute splines and serrations with rotary broach tools*, [www.gearsolutions.com](http://www.gearsolutions.com), March 2015.
- [Baránov, 1979] G. G. Baránov, Guillermo Munizaga Rojas, *Curso de la teoría de mecanizamos y máquinas*; Mir, 1979; ISBN 5030011846, 9785030011844.
- [Beulker, 1998] Beulker K., Köllner T., Becker J. (1998), *Leistungssteigerung beim Verzahnungshonen Report (Forschungsvereinigung Antriebstechnik)* 547: 1–127.

- [Beulker, 2001] Beulker K., Wicke B. (2001), *Optimierte Bearbeitungsstrategien zur Zahnrad-Hart feinfbearbeitung*. MM—Maschinenmarkt. Das Industrie Magazin 107(41): 60–62. 65–67.
- [Bouquet, 2014] Bouquet J., Hensgen L., Klink A., Jacobs T., Klocke F., Bert Lauwers, *Fast production of gear prototypes – a comparison of technologies*, 6<sup>th</sup> CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2014. Procedia CIRP 14 (2014) 77-82.
- [Bouzakis, 2003] Bouzakis K.-D., Aichouch P., Efstathiou K. (2003), *Determination of the Chip Geometry, Cutting Force and Roughness in Free Form Surfaces Finishing Milling, with Ball-end Tools*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 43:499-514.
- [Bouzakis, 2008] Bouzakis K.-D., Lili E., Michailidis N., Friderikos O., *Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods*, CIRP Annals – Manufacturing Technology 57 (2008) 676-696.
- [Chen, 2005] Chen J-S, Huang Y-K, Chen M-S (2005) *A Study Of The Surface Scallop Generating Mechanism In The Ball-End Milling Process*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 45: 1077-1084.
- [Chaphalkar, 2013] Nitin Chaphalkar, *Economics of Machining Bevel Gears on Multi Tasking Machines*, [www.gearsolutions.com](http://www.gearsolutions.com), December 2013.
- [DMG-MORI, 2015] DMG-MORISEIKI, *A Portfolio of Solutions for Gear Production*, [www.dmgmorseikiusa.com](http://www.dmgmorseikiusa.com), 2015.
- [Dong, 1994] Dong WP, Sullivan PJ, Stout KJ (1994), *Comprehensive study of parameters for characterizing three dimensional surface topography IV: parameter for characterizing spatial and hybrid properties*. Wear 178:45-60.
- [DIN 3960, 1987-03] *Concepts and Parameters Associated with Cylindrical Gears and Cylindrical Gear Pairs with Involute*.
- [Egrin, 2014] Matt Egrin, *The dynamic art of gear broaching*, [www.gearsolutions.com](http://www.gearsolutions.com), March 2014.

- [Ellis, 2014] Glenn Ellis, *Why use a wire EDM worm wheel in a plastic injection molded application*, [www.gearsolutions.com](http://www.gearsolutions.com), December 2014.
- [Fallah, 2011] Fallah V., Alimardani M., Corbin S.F., Khajerpour A., *Temporal development of melt-pool morphology and clad geometry in laser powder deposition*, *Computational Materials Science* vol.50, pp. 2124-2134, 2011.
- [Fan WG, 2010] Fan WG, Wang XC, Jiang H, Cai YL, *Multi-point tool positioning strategy for five-axis machining of open sculptured concave surfaces*. *J Xi'an Jiaotong Univ* (2010) 44:69-73.
- [GLEASON, 2017] [www.gleason.com/products](http://www.gleason.com/products)
- [Harik, 2013] R. F. Harik, H. Gong, A. Bernard, *5-axis flank milling: A state-of-the-art review*, *Computer-Aided Design* vol.45 (3), pp. 796–808, 2013.
- [Haupt, 1997] Haupt F., Seidel T., Karpuschewski B., Brunner G. (1997) *Zahnflankenschleifen bogenverzahnter Kegelradsätze mit CBN-Schleifscheiben*, *VDI-Z* 139/9:62-65.
- [Hyatt, 2014] Gregory Hyatt, Markus Piber, Nitin Chaphalkar, Orrin Kleinhenz, Masahiko Mori, *A review of New Strategies for Gear Production*, 6<sup>th</sup> CIRP International Conference on High Performance Cutting, *Procedia CIRP* 14 (2014) 72-76.
- [IK4\_LORTEK, 2013] *Fabricación aditiva en metal: introducción, tipos de tecnologías AM en metal, SLM, aplicaciones, fases del proceso*. <http://www.lortek.es/files/fab-aditiva/ik4-lortek-jornada-dm.pdf>, 2013.
- [Imani, 2001] Imani B. M., Elbestawi M. A. (2001), *Geometric Simulation of Ball-End Milling Operations*, *Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 123: 177-184.
- [InvoMilling, 2012] SANDVIK COROMANT, *InvoMilling – Revolutionizing spur and helical gear manufacturing*, [www.sandvik.coromant.com](http://www.sandvik.coromant.com), C-1140:547 ENG/01, Enero 2012.

- [Jung, 2005] Jung T-S, Yang M-Y, Lee K-J, *A New Approach to Analysing Machined Surfaces By Ball-End Milling Part I: Formulation Of Characteristic Lines Of Cut Remainder*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2005) 25: 833-840.
- [Karpuschewski, 2008] B. Karpuschewski, H.-J. Knoche, M. Hipke, *Gear finishing by abrasive processes*. CIRP Annals – Manufacturing Technology 57 (2008) 621-640.
- [Kawasaki, 2011] Kawasaki K., Tsuji I., Abe Y., Gunbara H. (2011). *Manufacturing method of large-sized spiral bevel gears in cyclo-palloid system using multi-axis control and multi-tasking machine tool*. JSME Ser. C. 77B: 728-736.
- [Kempen, 2011] Kempen K., Yasa E., Thijs L., Kruth J.P., Van Humbeeck J., *A Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel*. Physics Procedia 12 (2011) 255-263 *preliminary investigation on selective laser melting of M2 high speed steel*, Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping, 2012.
- [Kempen, 2012] Kempen K., Thijs L., Yasa E., Van Humbeeck J., Kruth J.P., Liu Z.H., C.K. Chua, K.F. Leong, *A preliminary investigation on selective laser melting of M2 high speed steel*, Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping, 2012.
- [Kissling, 2010] Dr. -Eng. Ulrich Kissling, *Effects of Profile Corrections on Peak-to-Peak Transmission Error*, [www.geartechnology.com](http://www.geartechnology.com), July 2010.
- [KLINGELNBERG, 2014] [www.klingelberg.com/en/products/bevel-gear-technology.html](http://www.klingelberg.com/en/products/bevel-gear-technology.html)
- [Kline, 1982] Kline W. A., DeVor R. E., Shareef I. A. (1982), *The prediction of Surface Accuracy in End Milling*, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 104: 273-278.
- [Klink, 2011] Klink A., Guo Y.B., Klocke F., *Surface integrity evolution of powder metallurgical tool steel by main cut and finish trim cuts in wire-EDM*, 1<sup>st</sup> CIRP Conference on Surface Integrity (CSI), 2011.

- 
- [Klocke, 2014] Klocke F., Brumm M., Staudt J., *Quality and surface of gears manufactured by free form milling with standard tools*, International Gear Conference, August 2014, Lyon.
- [LANG TECH., 2015] [www.lang-technovation.com](http://www.lang-technovation.com)
- [Lavernhe, 2010] Sylvain Lavernhe, Yann Quinsat, Claire Lartigue, *Model for the prediction of 3D surface topography in 5-axis milling*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2010) 51:915–924.
- [Ling, 2008] Ling WF (2008), *The study of spiral bevel gears new machining method and crucial technology*. Dissertation, Beijing Jiaotong University.
- [Linke, 2000] Linke H. and F. Lierath, *Toleranzen und Messunsicherheiten bei der Beurteilung von Abweichungen an modifizierten Zahnflanken*, FVA Forschungsreport zum Vorhaben Nr. 376 I+II, FVA-Infotagung Würzburg, 14./15./11, 2000.
- [Maitra, 1994] Gigin M. Maitra, *Handbook of Gear Design*, Tata McGraw-Hill, ISBN-13: 978-0-07-460237-09, 1994.
- [Marañón, 2012] Jose Ángel Marañón, *Los claves del multitasking*, IMHE, Enero-Febrero 386 (2012), 16-22.
- [Marañón, 2013] Jose Ángel Marañón, *Los errores en el mecanizado*, Interempresas – Industria Metalmecánica, 235, Nº1.047, Diciembre 2013.
- [Marciniak, 1991] Marciniak, K., 1991, *Geometric Modeling for Numerically Controlled Machining*, Oxford University Press.
- [Mizugaki, 1999] Mizugaki, Y., Hao, M., Asao, T., Terai, H., 1999, *Machining Error Estimation Based on Ball-nosed End Milling Behavior*, Proc. 32<sup>nd</sup> CIRP Int'l Seminar on Manufacturing Systems, 283-288.
- [Mizugaki, 2001] Mizugaki, Y., Hao, M., Kikkawa, K., Nakagawa, T., 2001, *Geometric Generating Mechanism of Machined Surface by Ball-nosed End Milling*, Annals of CIRP, 50/1: 69-72.
-

- [Mauer, 1990] Mauer, G., Gezielte Verbesserung der Leistungsübertragung von Zahnradgetrieben durch Flankenkorrekturen, Dr.-Ing. Dissertation, RWTH Aachen, 1990.
- [Pereira, 2016] Pereira O., Rodríguez A., Fernández-Abia A.I., Barreiro J., López de Lacalle L.N., *Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304*, Journal of Cleaner Production 139 (2016) 440-449.
- [Pfeiter, 2006] Pfeiter, T. R. Schmitt, Autonome Produktionszellen. Komplexe Produktionprozesse Flexibel Automatisieren, Springer 2006.
- [PHOENIX, 2008] *PHOENIX®200G/450G–CNC-Hypoid-Schleifmaschinen*, Prospectus The Gleason Works, Rochester (USA).
- [Riba, 1999] Carles Riba Romeva, *Mecanismes i màquines II – Transmissions d’engranatges*, Edicions UPC S.L., ISBN: 84-8301-620-6, 1999.
- [Richt, 2013] Christer Richt, Aaron Habeck, *The best of both worlds in gear manufacturing: High flexibility with high productivity*, [www.gearsolutions.com](http://www.gearsolutions.com), April 2013.
- [Rojas, 2011] Rojas M. C., *Piñones. Diente por diente y vuelta por vuelta*. [www.metalactual.com/revista/9/pinones.pdf](http://www.metalactual.com/revista/9/pinones.pdf). p.44-50. Septiembre 2011.
- [Stadfeld, 2001] Stadfeld H.J. (2001), *Zukunftweisende Kegel-rad-Verzahntechnik*. The Gleason Works.
- [Suh, 1998] Suh S.H., Lee J. (1998), *Multi-axis machining with additional-axis NC system*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 14:865-875
- [Suh, 2001] Suh S.H., Jih W.S., Hong H.D., Chung D.H. (2001), *Sculptured surface machining of spiral bevel gears with CNC milling*. Int J Mach Tool Manuf 41:833-850

- 
- [Tabernero, 2013] Iván Tabernero Campos. *Optimización del proceso de aporte por láser mediante la predicción de la geometría generada*, tesis doctoral T.720, 535.374(043), 2013.
- [Tryles, 2014] Jeff Tryles, *The dynamic art of gear broaching*, [www.gearsolutions.com](http://www.gearsolutions.com), March 2014.
- [Türich, 2010] Dr. A. Türich, *Producing Profile and Lead Modifications in Threaded Wheel and Profile Grinding*, [www.geartechnology.com](http://www.geartechnology.com), January/February 2010.
- [uP-Gear, 2012] SANDVIK COROMANT, *uP-Gear Technology – The optimal solution for large bevel gear manufacturing*, [www.sandvik.coromant.com](http://www.sandvik.coromant.com), C-1140:545 ENG/01, Febrero 2012.
- [Vichers, 1989] Vichers G.W., Quan K.W., *Ball-mills versus end-mills for curved surface machining*. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* (1989) 111:22-26.
- [Wermeister, 2011] Guenter Wermeister, *Milling tools for bevel gears*, [www.gearsolutions.com](http://www.gearsolutions.com), April 2011.
- [Xiao, 2014] Xiao-zhong Deng, Geng-geng Li, Bing-yang Wei, Jing Deng, *Face-milling spiral bevel gear tooth surfaces by application of 5-axis CNC machine tool*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2014) 71:1049-1057.
- [Yoram Koren, 2010] Koren Y., *The Global Manufacturing Revolution, Product-Process, Business Integration and Reconfigurable Systems*, The University of Michigan, ISBN: 978-0-470-58377-7, 2010
- [WNT, 2016] [www.wnt.com](http://www.wnt.com)
- [Zhang WH, 2006] Gao T., Zhang WH, Qiu K., Wan M. (2006), *Numerical simulation of machined surface topography and roughness in milling process*, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 128:96-103.
- [Zhang WH, 2008] Zhang WH, Tan G., Wan M., Gao T., Bassir D. (2008), *A new algorithm for the numerical simulation of machined surface topography in*
-

*Multi-axis ball-end milling*, Journal of Manufacturing Science and Engineering 130:11003-1-11003-11.

[Zhang, 2013]

Chan Zhang, Song Guo, Haiyan Zhang, Laishui Zhou, *Modeling and predicting for surface topography considering tool wear in milling process*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2013) 68:2849-2860.

[Zhu, 2001]

Zhu, R., Kapoor, S. G., DeVor, R. E. (2001), *Mechanical Modeling of the Ball End Milling Process for Multi-Axis Machining of Free-Form Surface*, Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 123: 369-379.