Jordi Brull Calbet

Enginyer Industrial

Septiembre 2009 (pla 94)

Projecte de Fi de Carrera

Enginyer Industrial

Ampliación de un taller de fabricación de prototipos para fabricar ruedas dentadas en series cortas

ANEXO F: Cálculo de las condiciones de corte y tiempos
ANEXO G: Planos de piezas
ANEXO H: Análisis económico
ANEXO I: Tratamientos térmicos básicos en ruedas dentadas
ANEXO J: Especificaciones generales de fabricación
ANEXO K: Resto de maquinaria en la Fundación CIM y laboratorio común

Autor: Jordi Brull Calbet
Director: Joan Ramon Gomà Ayats

Convocatòria: Septiembre 2009 (plan 94)

Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona

F. CÁLCULO DE LAS CONDICIONES DE CORTE Y TIEMPOS..... 7

F.1. Parámetros principales que definen una rueda dentada y principales fórmulas que los definen..... 7

F.1.1. Ángulo de presión..... 7

F.1.2. Módulo normal..... 8

F.1.3. Ángulo helicoidal y orientación..... 9

F.1.4. Módulo aparente..... 9

F.1.5. Diámetro primitivo..... 10

F.1.6. Diámetro base..... 10

F.1.7. Diámetro de pie..... 10

F.1.8. Diámetro exterior..... 11

F.1.9. Altura de diente..... 11

F.1.10. Altura cordal..... 11

F.1.11. Espesor cordal..... 12

F.1.12. Distancia entre centros..... 12

F.1.13. Corrección de herramienta..... 12

F.2. Corrección de herramienta..... 12

F.2.1. Explicación del fenómeno..... 13

F.2.2. Ruedas dentadas con número de dientes inferior o igual a 13..... 14

F.2.3. Modificación en el cálculo de los parámetros vistos en el apartado F.1..... 15

F.3. Cálculo de parámetros de fabricación..... 17

F.3.1. Torneado y refrentado..... 17

F.3.2. Fresado..... 18

F.3.3. Taladrado 19

F.3.4. Tallado de ruedas con fresa madre 21

F.3.5. Tallado de ruedas con piñón cortador 23

F.3.6. Electroerosión con hilo 24

F.3.7. Electroerosión por penetración 24

F.4. Cálculo de tiempos de fabricación de ruedas dentadas rectas exteriores 24

F.4.1. Fase 00: Material de partida 24

F.4.2. Fase 10: Cilindrado y refrentado 25

F.4.3. Fase 20: Tallado de los dientes 28

F.4.4. Hoja de ruta 30

F.5. Cálculo de tiempos de fabricación de ruedas dentadas helicoidales exteriores 31

F.5.1. Fase 00: Material de partida 31

F.5.2. Fase 10: Cilindrado y refrentado 31

F.5.3. Fase 20: Tallado de los dientes 34

F.5.4. Hoja de ruta 36

F.6. Cálculo de tiempos de fabricación de ruedas dentadas rectas interiores empleando electroerosión 36

F.6.1. Fase 00: Material de partida 37

F.6.2. Fase 10: Cilindrado y refrentado 37

F.6.3. Fase 20: Tallado de los dientes 40

F.6.4. Fase 30: Eliminación de óxido 41

F.6.5. Hoja de ruta 42

F.7. Cálculo de tiempos de fabricación de ruedas dentadas rectas interiores empleando mortajadora..... 42

F.7.1. Fase 00: Material de partida..... 43

F.7.2. Fase 10: Cilindrado y refrentado..... 43

F.7.3. Fase 20: Tallado de los dientes..... 43

F.7.4. Hoja de ruta..... 45

F.8. Cálculo de tiempos de fabricación de ruedas dentadas helicoidales interiores empleando electroerosión..... 45

F.8.1. Fase 00: Material de partida..... 45

F.8.2. Fase 10: Cilindrado y refrentado..... 46

F.8.3. Fase 20: Tallado de los dientes..... 49

F.8.4. Fase 30: Eliminación de óxido..... 50

F.8.5. Hoja de ruta..... 51

F.9. Cálculo de tiempos de fabricación de ruedas dentadas helicoidales interiores empleando talladora..... 51

F.9.1. Fase 00: Material de partida..... 51

F.9.2. Fase 10: Cilindrado y refrentado..... 52

F.9.3. Fase 20: Tallado de los dientes..... 52

F.9.4. Hoja de ruta..... 54

G. PLANOS DE PIEZAS..... 55

G.1. Rueda con dentado exterior recto..... 55

G.2. Rueda con dentado exterior helicoidal..... 56

G.3. Rueda con dentado interior recto..... 57

G.4. Rueda con dentado interior helicoidal..... 58

G.5. Electrodo para rueda con dentado interior helicoidal 59

H. ANÁLISIS ECONÓMICO 61

H.1. Inversión inicial 61

H.1.1. Coste de desarrollo del proyecto 61

H.1.2. Coste del terreno y del edificio 61

H.1.3. Coste de la maquinaria 61

H.1.4. Coste de accesorios 62

H.2. Costes fijos 64

H.2.1. Costes de amortización 65

H.2.2. Costes de mano de obra indirecta 65

H.2.3. Coste energético 65

H.2.4. Costes generales 66

H.3. Costes variables 66

H.3.1. Coste de mano de obra directa 66

H.3.2. Coste de material 67

H.3.3. Coste energético variable 67

H.3.4. Coste de líquido de corte 67

H.3.5. Coste de las herramientas utilizadas 67

I. TRATAMIENTOS TÉRMICOS BÁSICOS EN RUEDAS DENTADAS 69

I.1. Carburizado 69

I.2. Nitrurado 69

I.3. Endurecimiento por inducción 70

I.4. Endurecido con llama 70

J. ESPECIFICACIONES GENERALES DE FABRICACIÓN..... 71

J.1. Fresas de módulo en fresadora convencional..... 71

J.2. Fresa madre en talladora..... 73

J.3. Electroerosión con hilo..... 74

J.4. Electroerosión por penetración..... 74

J.4.1. Observaciones sobre el electrodo..... 76

K. RESTO DE MAQUINARIA EN LA FUNDACION CIM Y LABORATORIO COMÚN 79

K.1. Fundación CIM..... 79

K.1.1. Danobat Danocenter NI-1200..... 79

K.1.2. Deckel Maho DMU 50 Evolution..... 79

K.1.3. GER S-80/40..... 80

K.1.4. Milltronics RH20..... 80

K.1.5. OKUMA MC40H..... 81

K.1.6. Prensa hidráulica Orion..... 82

K.1.7. Zoller V420..... 82

K.1.8. Mitutoyo BHN710..... 83

K.1.9. Torno manual y sierra..... 83

K.2. Laboratorio común de mecánica de la ETSEIB..... 83

K.2.1. Tornos, fresadoras, rectificadoras y sierras convencionales..... 83

K.2.2. Resto de Maquinaria..... 84

K.3. Formación del personal de la Fundación CIM..... 84

F. CÁLCULO DE LAS CONDICIONES DE CORTE Y TIEMPOS

Primeramente se definen los parámetros principales de las ruedas dentadas.

Posteriormente, para cada una de las diferentes fases del proceso, se detallan las acciones a realizar, maquinaria, utillajes y herramienta de corte empleada.

A continuación se detalla el estudio de tiempos de los diferentes procesos de fabricación empleados en la fabricación de las ruedas dentadas, respetando las condiciones generales de la maquinaria y de las herramientas de corte propuestas.

Para poder realizar un estudio cuantitativo de material y tiempos, en cada tipo de rueda dentada, se propone la pieza modelo, con planos en el anexo G.

En piezas por lotes, se tiene que tener en cuenta el tiempo entre afilados de herramientas, o la vida útil de la misma. Como se trata de fabricar piezas únicas, estos tiempos no se calculan.

F.1. Parámetros principales que definen una rueda dentada y principales fórmulas que los definen

En las próximas líneas se definen los principales parámetros que se calculan a lo largo del estudio y las principales fórmulas que los definen. Es importante resaltar que los valores numéricos que se encuentran en senos y cosenos están expresados en radianes, todo y que en la industria se mencione siempre en grados tanto en las herramientas de corte como en especificaciones. A la hora de realizar cálculos ha de tenerse en cuenta la conversión de grados a radianes. Los parámetros mencionados a continuación tienen base geométrica, y no resulta compleja la comprensión de las ecuaciones que los definen, pero por no ser objeto del presente estudio, se obvian sus deducciones teóricas, que pueden encontrarse en multitud de libros y manuales del sector mecánico incluidos en la bibliografía complementaria.

F.1.1. Ángulo de presión

Simbología: α. En el perfil de evolvente, es un parámetro que permanece constante (no así en perfiles cicloidales). Su valor normal, es de 20º. Se considera un dato de partida que el diseñador debe conocer e imponer.

Actualmente, muchos de los mecanismos usados industrialmente contienen ruedas dentadas con ángulo de presión de 20º, expresado anteriormente, si bien existen los siguientes ángulos estándar también empleados:

1. α = 20, ya mencionado, usado en transmisiones mecánicas.

2. α = 14'30, empleado antiguamente y en desuso en la actualidad.

3. α = 22 y α = 30, utilizados en la fabricación de ruedas dentadas diseñadas en bombas que transporten líquidos, caudalímetros GFM (Gear Flow Meter) y demás aparatos mecánicos en que aparezcan líquidos en movimiento y que precisen engranajes para su funcionamiento (ver ilustración f.1).

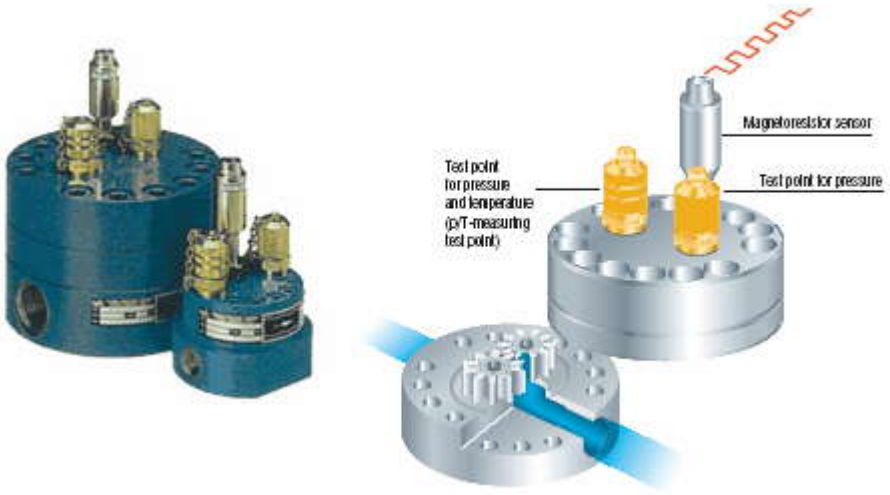


Ilustración F.1: Caudalímetro GFM de la marca Hydrotechnik

F.1.2. Módulo normal

Simbología: Mn. En los países anglosajones se emplea otra característica llamada Diametral Pitch, que es inversamente proporcional al módulo. El valor del módulo (expresado en milímetros) se fija mediante cálculo por resistencia de materiales en virtud de la potencia a transmitir y en función de la relación de transmisión que se establezca. A mayor potencia a transmitir, deberán elegirse módulos de valor numérico más elevado. Es importante destacar que dos ruedas dentadas que engranen tienen que tener el mismo módulo. Del mismo modo que ocurre en el caso anterior, es un dato de partida en la fabricación de la rueda dentada.

Así como en el caso del ángulo de presión se dispone, básicamente, de 4 tipos de ángulos estándar, en lo referente al módulo de la rueda dentada, existen muchos más tipos disponibles en el mercado.

A continuación, se muestra la tabla f.1 en que se observan los módulos estándar empleados en la mayoría de los mecanismos objetivo del proyecto:

1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4

Tabla F.1: Módulos estándar objetivo

A parte de los módulos mencionados anteriormente, en el mercado existen los módulos estándar mostrados en la tabla f.2 y la tabla f.3:

0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

Tabla F.2: Módulos estándar para engranajes pequeños

4,5	5	5,5	6	6,5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18
20	22	24	27	30	33	36	39	42	45	50	55	60	65	70	75

Tabla F.3: Módulos estándar para engranajes de gran tamaño

Los módulos para ruedas dentadas, que se encuentran en la tabla f.2, se emplean en la fabricación de engranajes ubicados en mecanismos de pequeño tamaño en los que se dispone de poco par y poco espacio, ya que, como se detalla con detenimiento más adelante, el tamaño de la rueda dentada es directamente proporcional al módulo de la misma.

Por el contrario, cuando se desee disponer de engranajes robustos, en que el tamaño no suponga un impedimento, se diseñan empleando los módulos correspondientes a la tabla f.3.

Así pues, salvo casos especiales, la mayor parte de los mecanismos emplean ruedas dentadas de módulos como los expresados en la tabla f.1.

F.1.3. Ángulo helicoidal y orientación

Simbología: β. Es el ángulo que forma la tangente a la hélice trazada sobre el cilindro primitivo con el eje de la rueda. Tiene un valor numérico de 0º en ruedas rectas, y un valor comprendido entre 0 y 90º en ruedas dentadas helicoidales. Se habla de orientación a derechas, si la rueda dentada cumple la regla de la mano derecha, y a izquierdas si se orienta en sentido contrario. Del mismo modo que sucede con el ángulo de presión y el módulo normal, vuelve a ser un dato de partida en la fabricación.

F.1.4. Módulo aparente

Simbología: Ma. Es la característica equivalente al módulo normal cuando tratamos con ruedas dentadas helicoidales en lugar de rectas. Se usa en el cálculo de los parámetros de las ruedas dentadas helicoidales. Su cálculo se rige por la siguiente fórmula:

$$Ma = \frac{Mn}{\cos(\beta)}$$

Ma : *Módulo aparente*

Mn : *Módulo normal*

β : *Ángulo helicoidal* (Ecuación F.1)

F.1.5. Diámetro primitivo

Simbología: Dp. Define la circunferencia en que se produce el contacto entre las dos ruedas dentadas. Está comprendido entre el diámetro de pie y el diámetro exterior, y puede calcularse mediante la fórmula:

$$Dp = M \cdot z$$

Dp : *Diámetro primitivo*

M : $Mn(ruedas\ rectas)\ o\ Ma(ruedas\ helicoidales)$

z : *Número de dientes* (Ecuación F.2)

F.1.6. Diámetro base

Simbología: Db. Define la circunferencia base que determina unívocamente la forma de los perfiles de evolvente de los dos flancos (ambos flancos son simétricos).

$$Db = Dp \cdot \cos(\alpha)$$

Db : *Diámetro base*

Dp : *Diámetro primitivo*

α : *Ángulo de presión* (Ecuación F.3)

F.1.7. Diámetro de pie

Simbología: Dpe. Define la circunferencia de fondo del entre diente del dentado que, en algunos casos, puede ser más pequeño que el círculo base y, producir errores de mecanizado, por lo que deben compararse estos valores antes de proceder al mecanizado.

La forma de calcularlo varía en función de si se trata de una rueda dentada exterior o interior.

$$Dpe = Dp - k \cdot Mn$$

Dpe : *Diámetro de pie*

Dp : *Diámetro primitivo*

Mn : *Módulo normal*

k : $2'32(dentado\ exterior)\ o\ 2(dentado\ interior)$ (Ecuación F.4)

Se observa que en el diámetro de pie (caso dentado exterior) y diámetro exterior (caso dentado interior) existe una distancia al diámetro primitivo de 2'32 veces el módulo. Esto se debe a que si fuese exactamente 2 veces el módulo, al menor defecto de fabricación, se produciría enclavamiento y no podría transmitirse el movimiento. Este valor varía en función de si se aplicarán tratamientos térmicos posteriores al mecanizado y de cómo afecten estos en las dimensiones del diente. En nuestro caso, los valores numéricos son los mencionados, si bien en caso de precisar tratamiento térmico superficial, debería realizarse un estudio más detallado de estos valores.

F.1.8. Diámetro exterior

Simbología: De. Define la circunferencia exterior hasta donde llega el dentado. En el caso de dentados exteriores, es el diámetro exterior del cilindro de partida. En el caso de dentados interiores, es el diámetro interior del cilindro de partida. Su valor se determina mediante la siguiente fórmula:

$$De = Dp + k' \cdot Mn$$

De : *Diámetro exterior*

Dp : *Diámetro primitivo*

Mn : *Módulo normal*

k' : $2(dentado\ exterior)\ o\ 2'32(dentado\ interior)$ (Ecuación F.5)

Se aplica el razonamiento análogo al caso anterior en la elección del parámetro k'.

F.1.9. Altura de diente

Simbología: h. Se define como la longitud radial del diente. Sirve para comprobar la exactitud de fabricación de la rueda dentada. Su valor viene determinado por los valores del diámetro de pie y exterior mediante la siguiente ecuación:

$$h = \frac{(De - Dpe)}{2}$$

h : *Altura de diente*

De : *Diámetro exterior*

Dpe : *Diámetro de pie* (Ecuación F.6)

F.1.10. Altura cordal

Simbología: ac. La altura cordal indica la altura a partir de la cual, partiendo del diámetro exterior, se mide el espesor cordal. Es un parámetro muy importante para la comprobación de la fabricación, y viene determinado por la fórmula:

$$ac = Mn + \frac{Dp}{2} \cdot \left(1 - \cos(\frac{\pi / 2}{z})\right)$$

ac : *Altura cordal*

Mn : *Módulo normal*

Dp : *Diámetro primitivo*

z : *Número de dientes*

(Ecuación F.7)

F.1.11. Espesor cordal

Simbología: ec. Se define como el espesor del diente a la altura del diámetro primitivo (lugar de contacto entre ruedas dentadas). Su valor se obtiene de la siguiente ecuación:

$$ec = M \cdot z \cdot sen(\frac{\pi / 2}{z})$$

ec : *Espesor cordal*

M : *Altura de diente*

z : *Número de dientes*

(Ecuación F.8)

F.1.12. Distancia entre centros

Simbología: dc. Se define como la distancia entre el centro de la rueda dentada conductora y la rueda dentada conducida. Este parámetro es muy importante en la construcción del mecanismo final, ya que pequeñas desviaciones de este valor provocan ruidos y vibraciones indeseados. Su valor viene determinado por los diámetros primitivos de las ruedas dentadas que engranan entre sí mediante:

$$dc = \frac{Dp1 + Dp2}{2}$$

dc : *Distancia entre centros*

$Dp1$: *Diámetro primitivo rueda* 1

$Dp2$: *Diámetro primitivo rueda* 2

(Ecuación F.9)

F.1.13. Corrección de herramienta

Simbología: X. Es la corrección que se aplica a la rueda con el fin de modificar la distancia entre centros sin modificar número de dientes ni módulo de la rueda.

F.2. Corrección de herramienta

En algunas ocasiones, se han de hacer pequeñas modificaciones en las ruedas dentadas porque se presentan varios problemas de diseño que se deben solucionar. Una de ellas puede

ser necesitar modificar la distancia entre los centros de las ruedas, ya que la obtenida tras mecanizar las ruedas dentadas (determinada a partir de los datos iniciales de diseño), difiere del que se precisa para la construcción del mecanismo (porque viene impuesto al formar parte de un árbol de engranajes). También hay ocasiones en que debido al número de dientes que se deseen obtener en las ruedas, al realizar el mecanizado por generación, se produzcan geometrías no deseadas.

A continuación se realizará una breve explicación de cómo se realizan las correcciones de herramienta y las implicaciones en el cálculo de los parámetros expresados en el apartado anterior, especialmente en el cálculo de la distancia entre centros.

F.2.1. Explicación del fenómeno

La corrección de herramienta es un concepto que se introduce para obtener la distancia entre centros deseada entre las ruedas dentadas sin variar número de dientes, ángulo de presión ni módulo de las ruedas.

Consiste en realizar un acercamiento / alejamiento de la herramienta de corte de forma que se modifican los parámetros que definen el dentado.

A la hora de realizar correcciones de herramienta, debe tenerse especial cuidado en conocer el parámetro que menciona el diseñador y el fabricante, ya que en algunas ocasiones se habla de valor adimensional y otras veces de valor con dimensiones longitudinales. (Dividiendo el valor dimensional entre el módulo, se obtiene el valor adimensional de la corrección de herramienta, y este es el más empleado en el sector).

Se habla de corrección positiva cuando alejamos la herramienta de la pieza al mecanizarla. En la ilustración f.2 se observa una rueda dentada exterior con corrección de herramienta positiva. En negro, el dentado original sin corrección, y sombreado, el nuevo perfil.

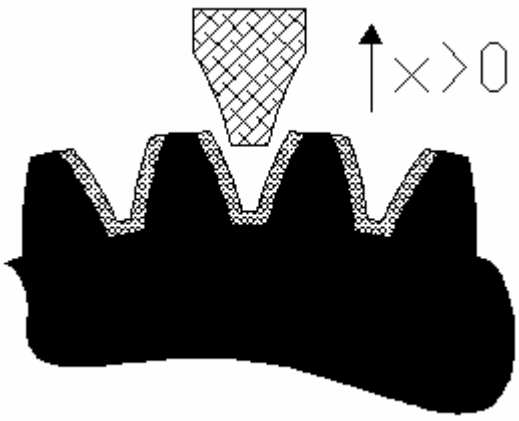


Ilustración F.2: Corrección de herramienta positiva en ruedas dentadas exteriores

Se observa que el dentado obtenido con corrección positiva posee un espesor cordal mayor.

En la siguiente ilustración, se muestra un dentado interior con corrección también positiva. En este caso, el espesor cordal obtenido es también mayor que el mismo dentado sin corrección:

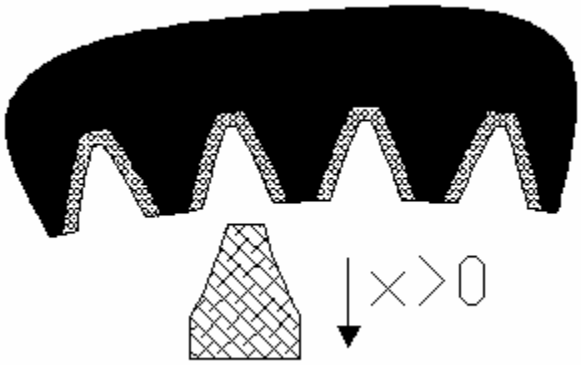


Ilustración F.3: Corrección de herramienta positiva en rueda dentada interior

Por el contrario, cuando la corrección sea de signo negativo, la fabricación del dentado se realiza acercando la herramienta de corte a la pieza, y se obtiene, por tanto, un espesor cordal menor y aumentando el espacio interdental.

F.2.2. Ruedas dentadas con número de dientes inferior o igual a 13

Cuando se han de fabricar ruedas dentadas con 13 dientes o menos empleando talladora de engranajes, se ha de comprobar que el diámetro base sea inferior al diámetro de pie, ya que en estos casos puede aparecer un perfil diferente al de evolvente en la base del diente. Este perfil aparece por propia generación de la talladora, ya que la evolvente no existe en radios inferiores al radio base, y por tanto se obtiene una oquedad con forma como la indicada en la ilustración f.4

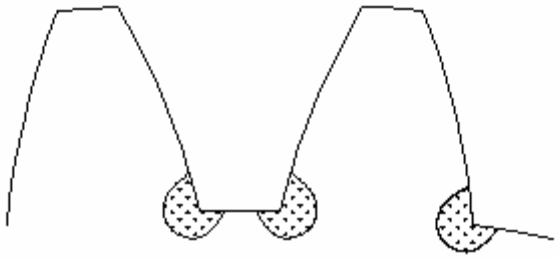


Ilustración F.4: Rotura de los dientes cuando z<13 empleando fresa madre en su mecanizado, si no se realiza corrección de herramienta

En caso de que no puedan realizarse correcciones de herramienta, se plantea proœder a la fabricación empleando otra metodología, como fresa de forma, o electroerosión.

F.2.3. Modificación en el cálculo de los parámetros vistos en el apartado F.1

F.2.3.1. Preámbulo

Sólo se muestran los parámetros vistos en el apartado F.1 que se ven modificados al aplicar una corrección de herramienta.

Simbología de la corrección de herramienta: x. Valor adimensional.

F.2.3.2. Diámetro de pie

$$Dpe' = Dpe + 2 \cdot x \cdot Mn$$

Dpe' : *Diámetro de pie corregido*
Dpe : *Diámetro de pie*
x : *Corrección de herramienta*
Mn : *Módulo normal*

(Ecuación F.10)

F.2.3.3. Diámetro exterior

$$De' = De + 2 \cdot x \cdot Mn$$

De' : *Diámetro exterior corregido*
De : *Diámetro exterior*
x : *Corrección de herramienta*
Mn : *Módulo normal*

(Ecuación F.11)

F.2.3.4. Altura cordal

$$ac' = ac + x \cdot Mn$$

ac': *Altura cordal corregida*
ac: *Altura cordal*
x: *Corrección de herramienta*
Mn: *Módulo normal*

(Ecuación F.12)

F.2.3.5. Espesor cordal

$$ec' = ec + 2 \cdot x \cdot Mn \cdot \tan(\alpha)$$

ec': *Espesor cordal corregido*
ec: *Espesor cordal*
x: *Corrección de herramienta*
Mn: *Módulo normal*
α: *Ángulo de presión*

(Ecuación F.13)

F.2.3.6. Distancia entre centros

Este es el parámetro más complejo de calcular, y a la vez más importante de cara al diseñador (no de cara al fabricante, como es el caso de estudio), si bien se ha considerado oportuno aclarar los pasos que deben seguirse para no cometer errores en el diseño del mecanismo si se realizan correcciones de herramienta en las ruedas dentadas.

En el caso anterior, las ruedas dentadas engranan diente con diente en su diámetro primitivo respectivo, de ahí que la distancia entre centros sea la suma de los radios primitivos.

En el caso de realizar correcciones de herramienta, el punto de engrane no se encuentra sobre la circunferencia primitiva, y por tanto, tiene que definirse el diámetro de funcionamiento como el diámetro sobre el cual se produce el engrane de ambas ruedas.

Una vez calculado el diámetro de funcionamiento, la distancia entre centros si se aplica corrección de herramienta en alguna de las dos ruedas dentadas es la siguiente:

$$dc' = \frac{Df1 + Df2}{2}$$

dc: *Distancia entre centros corregida*
$Df1$: *Diámetro de funcionamiento rueda* 1
$Df2$: *Diámetro de funcionamiento rueda* 2

(Ecuación F.14)

Cálculo del diámetro de funcionamiento

A continuación se muestra cómo realizar el cálculo del diámetro de funcionamiento:

$$Dfunci = Dp \cdot \frac{\cos \alpha_{aparent}}{\cos \alpha_{funci}} \qquad \text{(Ecuación F.15)}$$

Se observa que para realizar el cálculo del diámetro de funcionamiento, previamente debe calcularse el ángulo aparente y el de funcionamiento. Para hallar el ángulo aparente, se emplea la ecuación siguiente:

$$\tan \alpha_{ap} = \frac{\tan \alpha}{\cos \beta} \qquad \text{(Ecuación F.16)}$$

Y el ángulo de funcionamiento debe calcularse por iteración empleando la siguiente fórmula:

$$Evolvent(\alpha_{funci}) = Evolvent(\alpha_{aparent}) + 2 \cdot \left(\frac{x_1 + x_2}{z_1 + z_2} \right) \cdot \tan \alpha_{aparent} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Ev(\alpha_{funci}) = \tan \alpha_{aparent} - \alpha_{aparent} + 2 \cdot \left(\frac{x_1 + x_2}{z_1 + z_2} \right) \cdot \tan \alpha_{aparent};$$

$$\boxed{Ev(\alpha_{funci}) = \tan \alpha_{funci} - \alpha_{funci}} \qquad \text{(Ecuación F.17)}$$

Con el fin de facilitar y automatizar los cálculos expuestos en este punto (tanto con corrección de herramienta como sin ella) se realiza un archivo de extensión .xls que los realiza de forma automática a partir de los datos iniciales que facilita el proyectista. Este archivo se adjunta en formato digital ya que contiene fórmulas automatizadas y un programa que calcula la función evolvente mediante proceso iterativo.

F.3. Cálculo de parámetros de fabricación

En este apartado se definen las fórmulas empleadas para obtener las condiciones de corte y tiempos de corte en cada una de las operaciones realizadas en las piezas.

F.3.1. Torneado y refrentado

F.3.1.1. Velocidad de corte

$$Vc_{torno} = \left[\frac{m}{\min} \right] \qquad \text{(Ecuación F.18)}$$

F.3.1.2. Avance

El avance determina la rugosidad conseguida en la pieza, por lo que fijada la rugosidad, se obtiene el avance deseado:

$$a_{torno} = \sqrt{\frac{R_a\left[\mu m\right] \bullet r_p\left[mm\right]}{25}} = \left[\frac{mm}{vuelta}\right] \qquad \text{(Ecuación F.19)}$$

Siendo r_p el radio de la punta de la herramienta

F.3.1.3. Velocidad de giro de la pieza

$$n_r = \frac{1000\left[\frac{mm}{m}\right] \bullet Vc_{broca}\left[\frac{m}{\min}\right]}{\pi \bullet \phi_{pieza}\left[mm\right]} = \left[r.p.m.\right] \qquad \text{(Ecuación F.20)}$$

La velocidad de giro de la pieza se elegirá en función del radio de la pieza.

F.3.1.4. Tiempo de corte

$$t_{torno} = \frac{L\left[mm\right]}{a\left[mm\right] \bullet n\left[r.p.m.\right] \bullet \frac{1\left[\min\right]}{60\left[s\right]}} = \frac{60 \bullet \pi}{a \bullet 500 \bullet Vc} \bullet \frac{r_0^2 - r_f^2}{2} = \left[s\right] \qquad \text{(Ecuación F.21)}$$

F.3.2. Fresado

F.3.2.1. Velocidad de corte

$$Vc_{fresa} = \left[\frac{m}{\min}\right] \qquad \text{(Ecuación F.22)}$$

F.3.2.2. Avance

Avance por diente de la fresa:

$$a_z = \left[\frac{mm}{diente}\right] \qquad \text{(Ecuación F.23)}$$

$$z = \left[\frac{dientes}{fresa}\right] \qquad \text{(Ecuación F.24)}$$

F.3.2.3. Velocidad de giro de la pieza

$$n_{fresa} = \frac{1000\left[\frac{mm}{m}\right] \bullet Vc_{fresa}\left[\frac{m}{\min}\right]}{\pi \bullet \phi_{fresa}\left[mm\right]} = \left[r.p.m.\right] \qquad \text{(Ecuación F.25)}$$

F.3.2.4. Tiempo de corte

$$t_{torno} = \frac{L\left[mm\right]}{a_z\left[\frac{mm}{diente}\right] \bullet z\left[dientes\right] \bullet n\left[r.p.m.\right] \bullet \frac{1\left[\min\right]}{60\left[s\right]}} = \left[s\right] \qquad \text{(Ecuación F.26)}$$

F.3.3. Taladrado

En el taladrado se distinguirán las condiciones según la operación se realice con broca o con escariador

F.3.3.1. Velocidad de corte

$$Vc_{broca} = \left[\frac{m}{\min}\right] \qquad \text{(Ecuación F.27)}$$

$$Vc_{esc} = (0,3 \div 0,5) \bullet Vc_{broca} = \left[\frac{m}{\min}\right] \qquad \text{(Ecuación F.28)}$$

F.3.3.2. Avance

El avance viene fijado por el diámetro de la broca, y se calcula según:

$$a_{broca} = \frac{\phi_{broca}\left[mm\right]}{100} = \left[\frac{mm}{vuelta}\right] \qquad \text{(Ecuación F.29)}$$

$$a_{esc} = (4 \div 5) \bullet a_{broca} = \left[\frac{mm}{vuelta}\right] \qquad \text{(Ecuación F.30)}$$

F.3.3.3. Velocidad de giro de la broca

$$n_{broca} = \frac{1000\left[\frac{mm}{m}\right] \bullet Vc_{broca}\left[\frac{m}{\min}\right]}{\pi \bullet \phi_{broca}\left[mm\right]} = \left[r.p.m.\right] \qquad \text{(Ecuación F.31)}$$

$$n_{esc} = \frac{1000\left[\frac{mm}{m}\right] \bullet Vc_{esc}\left[\frac{m}{\min}\right]}{\pi \bullet \phi_{esc}\left[mm\right]} = \left[r.p.m.\right] \qquad \text{(Ecuación F.32)}$$

F.3.3.4. Tiempo de corte

En el tiempo de corte influye directamente la longitud a mecanizar, en la que se tiene que tener en cuenta la punta de la herramienta, tal como se observa en la ilustración siguiente:

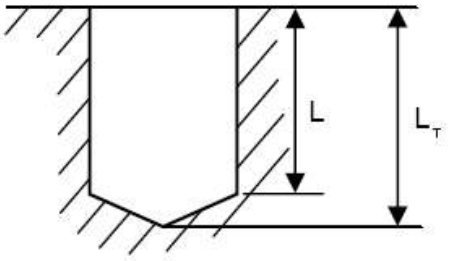


Ilustración F.5: Longitud de corte de la broca

$$L_T = L\left[mm\right] + \frac{\phi\left[mm\right]}{2} \bullet sen\left(\frac{\alpha_0}{2}\right) = \left[mm\right] \qquad \text{(Ecuación F.33)}$$

Y a partir de esta puntualización, se determina el tiempo de corte

$$t_{broca} = \frac{L\left[mm\right]}{a\left[mm\right] \bullet n\left[r.p.m.\right] \bullet \frac{1\left[\min\right]}{60\left[s\right]}} = \left[s\right] \qquad \text{(Ecuación F.34)}$$

Y del mismo modo, se deduce en el caso del escariado

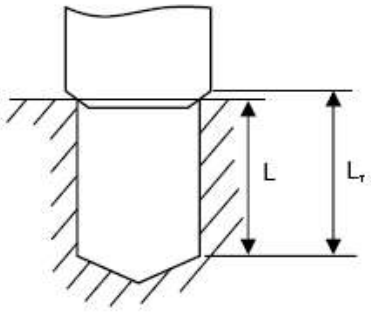


Ilustración F.6: Longitud de corte del escariador

$$L_T = L\left[mm\right] + \frac{\phi_{esc} - \phi_{broca}\left[mm\right]}{2} \bullet tg\left(\alpha_0\right) = \left[mm\right] \qquad \text{(Ecuación F.35)}$$

Y a partir de esta puntualización, se determina el tiempo de corte

$$t_{esc} = \frac{L[mm]}{a[mm] \bullet n[r.p.m.] \bullet \frac{1[\min]}{60[s]}} = [s] \qquad \text{(Ecuación F.36)}$$

F.3.4. Tallado de ruedas con fresa madre

F.3.4.1. Velocidad de corte

$$Vc_{fresa\ madre} = \left[\frac{m}{\min}\right] \qquad \text{(Ecuación F.37)}$$

F.3.4.2. Avance

Avance por diente de la fresa madre:

$$a_z = \left[\frac{mm}{diente}\right] \qquad \text{(Ecuación F.38)}$$

$$z = \left[\frac{dientes}{fresa}\right] \qquad \text{(Ecuación F.39)}$$

F.3.4.3. Velocidad de giro de la fresa

$$n_{fresa} = \frac{1000\left[\frac{mm}{m}\right] \bullet Vc_{fresa}\left[\frac{m}{\min}\right]}{\pi \bullet \phi_{fresa}[mm]} = [r.p.m.] \qquad \text{(Ecuación F.40)}$$

F.3.4.4. Tiempo de corte

En este parámetro influye directamente la longitud a mecanizar y la altura del diente:

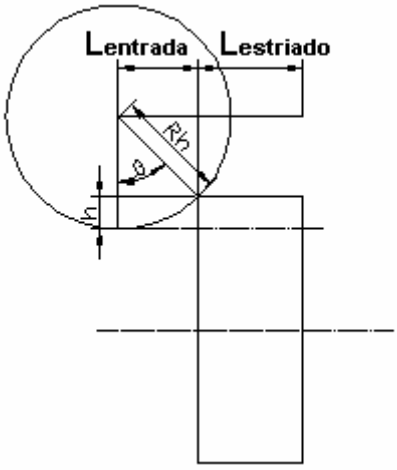


Ilustración F.7: Tiempo de corte de tallado de dientes

$$L_{entrada} = R_{herramienta} \bullet sen(\beta) = [mm]$$

$$\cos(\beta) = \frac{R_{herramienta}[mm] - E_{entrada}[mm]}{R_{herramienta}[mm]} \qquad \text{(Ecuación F.41)}$$

$$L = L_{entrada}[mm] + L_{estriado}[mm] = [mm] \qquad \text{(Ecuación F.42)}$$

En el caso de dentados helicoidales, la longitud de estriado real es la siguiente:

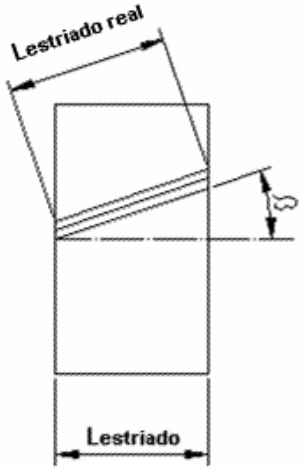


Ilustración F.8: Longitud de estriado en dentados helicoidales

Por lo que en la ecuación anterior debe modificarse la longitud de estriado por la siguiente:

$$L_{estriado\ real} = \frac{L_{estriado}[mm]}{\cos\beta} = [mm] \qquad \text{(Ecuación F.43)}$$

$\beta = Ángulo\ helicoidal$

$$t_{fresa\ madre} = \frac{L\left[\frac{mm}{diente}\right] \bullet z_r\left[dientes\right]}{a_z\left[\frac{mm}{diente}\right] \bullet z_f\left[dientes\right] \bullet n\left[r.p.m.\right] \bullet \frac{1[\min]}{60[s]}} = [s]$$

$z_f = dientes\ de\ fresadora$ (Ecuación F.44)

$z_r = dientes\ de\ rueda$

F.3.5. Tallado de ruedas con piñón cortador

F.3.5.1. Velocidad de corte

Fijado por el fabricante de la herramienta en función del material a mecanizar y de la vida útil esperada de la herramienta:

$$Vc_{piñón} = \left[\frac{m}{\min}\right] \quad \text{(Ecuación F.45)}$$

F.3.5.2. Avance

Característica también recomendada por el fabricante de la herramienta:

$$a_z = \left[\frac{mm}{vuelta}\right] \quad \text{(Ecuación F.46)}$$

F.3.5.3. Velocidad de giro de la herramienta

$$n_{hta} = \frac{1000\left[\frac{mm}{m}\right] \bullet Vc_{hta}\left[\frac{m}{\min}\right]}{\pi \bullet \phi_{hta}\left[mm\right]} = \left[r.p.m.\right] \quad \text{(Ecuación F.47)}$$

F.3.5.4. Tiempo de corte

Para el cálculo de la longitud se realizan las mismas operaciones que en el caso de fresa madre. Únicamente varían las condiciones de corte entre unos y otros debido a las herramientas de corte empleadas.

$$t_c = \frac{L\left[mm\right] \bullet z_r\left[dientes\right]}{a_z\left[\frac{mm}{vuelta}\right] \bullet n\left[r.p.m.\right] \bullet \frac{1[\min]}{60[s]} \bullet z_f\left[dientes\right]} = [s] \quad \text{(Ecuación F.48)}$$

F.3.6. Electroerosión con hilo

Por tratarse de un método de corte de pieza menos extendido, para el cálculo del tiempo de mecanizado se han empleado datos empíricos obtenidos tras realizar pruebas diversas y tras ser aconsejados por especialistas en la materia.

En líneas generales, el tiempo de mecanizado es función del grosor y longitud de la pieza. El tiempo estimado para realizar un dentado interno de un grosor de unos 5mm y de diámetro primitivo de 40mm son 2 horas. A este tiempo hay que añadirle preparación de máquina (una hora aproximadamente) y posterior pulido de la pieza (función de la pieza y del acabado, suele estar comprendido desde 5 a 30 minutos).

F.3.7. Electroerosión por penetración

Igual que el caso anterior, se trata de un método de corte de pieza menos extendido y para el cálculo del tiempo de mecanizado se han empleado datos empíricos obtenidos tras realizar pruebas diversas y tras ser aconsejados por especialistas en la materia.

El tiempo (experimental) que tarda en realizar el mecanizado se detalla a continuación:

- En 24 horas se han erosionado 4mm de una pieza de diámetro exterior corregido de 448’55mm de acero. VDI=24 (equivale a un GAP de 0’05). Previamente había sido mandrinado el diámetro interior hasta 0,5mm menos de la medida nominal

- En 24 horas se han erosionado 20mm de la misma pieza de diámetro exterior corregido 448’55mm de acero. VDI=32 (equivale a un GAP de 0’15).

F.4. Cálculo de tiempos de fabricación de ruedas dentadas rectas exteriores

Para el cálculo de tiempos, se tiene en cuenta una pieza como la mostrada en el Anexo G.1:Rueda con dentado exterior recto

F.4.1. Fase 00: Material de partida

Tal como se menciona en la memoria, se parte de barra cilíndrica de Ø50 adquirida a proveedor externo. Sólo se expone el coste de adquisición de material en bruto.

A continuación, se emplea la sierra de corte para realizar el corte a la longitud deseada con 5mm de excedente de material, es decir, corte para dejar la pieza de anchura 25mm.

F.4.2. Fase 10: Cilindrado y refrentado

Una vez realizada la fase anterior, se alimenta la barra en la máquina Mori Seiki, donde se cilindran y se refrentan ambas caras hasta la medida nominal.

F.4.2.1. Refrentado

- Herramientas

Para cilindrar y refrentar, se emplean plaquitas del fabricante Sandvik Coromant, del tipo CNMG 12 04 08 – WF que disponen de dos aristas de corte, i un radio de punta de 0,8 mm. Estas plaquitas se alojan en un portaherramientas del mismo fabricante, con especificación DCLNR2020K12.

- Condiciones de corte

Las condiciones de corte aconsejadas para el tipo de material a mecanizar y la herramienta seleccionada está determinada por el propio fabricante y son las siguientes:

$$Vc = 120 \frac{m}{\min}$$

$$a = 0'219 \frac{mm}{vuelta}$$

- Tiempo de corte

A partir de las expresiones vistas anteriormente, se calcula el tiempo de corte:

$$t_{torno} = \frac{60 \bullet \pi}{0'219 \bullet 500 \bullet 120} \bullet \frac{25^2 - 0^2}{2} = 4'48[s]$$

Este tiempo se emplea en ambas caras, por lo que se emplea un tiempo total en refrentar de 9’36s.

F.4.2.2. Cilindrado

- Herramientas

Las herramientas empleadas son las mismas que en el refrentado.

- Condiciones de corte

Las mismas que en el caso anterior

- Tiempo de corte

Con las condiciones especificadas, el tiempo de corte es el siguiente:

$$t_{torno} = \frac{20}{0'219 \bullet \frac{1000 \bullet 120}{\pi \bullet 46'25} \bullet \frac{1}{60}} = 6'63s$$

y dado que tienen que mecanizarse casi 4mm diametrales, y se recomienda mecanizar unos 2-3mm diametrales, se realizan dos pasadas, por lo que el tiempo de mecanizado en el cilindrado es de 13'26s.

F.4.2.3. Escariado del agujero central

- Herramientas

Se utiliza una broca del fabricante Stim Tools, con especificación 22 11 43, se trata de una herramienta helicoïdal de acero rápido rectificada con mango cilíndrico (DIN 345 RN), de 24mm de diámetro, y 128º de ángulo de punta. A continuación se realiza el escariado del agujero con un escariador del fabricante SECO, que permite garantizar la tolerancia deseada, con la especificación SR82-24.80H7 EN1, que lleva unas plaquitas del tipo P4-EN1-06, el escariador se fabrica bajo demanda, i se adapta perfectamente.

- Condiciones de corte

Las condiciones de corte aconsejadas para el tipo de material mecanizado son las siguientes:

$$Broca:$$

$$\rightarrow Vc = 60\frac{m}{\min}$$

$$\rightarrow a = \frac{\phi_{broca}}{100} = \frac{24}{100} = 0'24\frac{mm}{vuelta}$$

$$Escariador:$$

$$\rightarrow Vc = 20\frac{m}{\min}$$

$$\rightarrow a = 0'96\frac{mm}{vuelta}$$

- Tiempo de corte

Broca :

$$\rightarrow n = \frac{1000 \bullet Vc}{\pi \bullet D} = \frac{1000 \bullet 60}{\pi \bullet 24} = 796 r.p.m.$$

$$\rightarrow L = L + \frac{\phi}{2} \bullet sen\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 20 + \frac{24}{2} \bullet sen\left(\frac{128}{2}\right) = 30'79 mm$$

$$\rightarrow t = \frac{L}{a \bullet n} = \frac{30'79}{0'24 \bullet 796 \bullet \frac{1}{60}} = 9'67 s$$

Escariador :

$$\rightarrow n = \frac{1000 \bullet Vc}{\pi \bullet D} = \frac{1000 \bullet 20}{\pi \bullet 25} = 255 r.p.m.$$

$$\rightarrow L = L + \frac{\phi_{esc} - \phi_{broca}}{2} \bullet tg(\alpha) = 20 + \frac{25 - 24}{2} \bullet tg(45) = 20'5 mm$$

$$\rightarrow t = \frac{L}{a \bullet n} = \frac{20'5}{0'96 \bullet 255 \bullet \frac{1}{60}} = 5'02 s$$

F.4.2.4. Tiempo de preparación

En tratarse de piezas únicas, el tiempo de preparación carga directamente sobre la única pieza a fabricar. En el tiempo de preparación se incluyen los siguientes tiempos:

TIEMPOS DE PREPARACIÓN		
FASE 10: MORISEIKI		
Descripción de actividad	Tiempo máquina / tiempo hombre	t[min]
Realización de programa	Tiempo hombre	10
Preparar Garras	Tiempo máquina	5
Alimentar pieza	Tiempo máquina	2
Preparar herramientas	Tiempo máquina	5
Sacar pieza máquina	Tiempo máquina	3
	TOTAL (Tiempo máquina)	**15**

Tabla F.4: Tiempos de preparación de Mori Seiki en PFC-RP1

En la suma del tiempo total sólo se tiene en cuenta el tiempo máquina. En este caso, la realización del programa se puede hacer con la máquina en funcionamiento, por lo que no afecta al cómputo del tiempo máquina invertido.

F.4.2.5. Tiempo máquina

Además de los tiempos calculados, se deben tener en cuenta los siguientes tiempos:

- Acercar herramienta refrentar-cilindrar: 2s

- Alejar herramienta refrentar-cilindrar: 2s
- Sincronizar platos y cambiar plato de sujeción: 4s
- Acercar herramienta refrentar-cilindrar: 2s
- Alejar herramienta refrentar-cilindrar: 2s
- Cambio de herramienta: 10s
- Acercar broca: 2s
- Alejar broca: 2s
- Cambio de herramienta: 10s
- Acercar escariador: 2s
- Alejar escariador: 2s

F.4.2.6. Tiempo total empleado en el mecanizado

Con todos estos tiempos calculados, se obtiene un tiempo total de mecanizado en la fase 10 de:

$$2 + 9'36 + 2 + 4 + 2 + 13'26 + 2 + 10 + 2 + 9'67 + 2 + 10 + 2 + 5'02 + 2 = 77'31\text{s}$$

A este tiempo de operación, deben añadirse el tiempo de preparación de máquina de 45 minutos, que por tratarse de piezas únicas, recae directamente sobre la pieza a mecanizar.

F.4.3. Fase 20: Tallado de los dientes

Una vez obtenidas las dimensiones finales de la pieza según planos, se procede al dentado de la misma. Este dentado cumple la normativa DIN 5480.

- Herramientas de corte

Se necesita una fresa madre de acero rápido de módulo 1’25mm, se elige una fresa madre del fabricante Stim Tools, el diámetro exterior 63mm i 12 dientes de corte, con una longitud útil de 50 mm. Es una fresa madre de un único filo de corte.

- Condiciones de corte

Se siguen las consideraciones del fabricante en función del material a mecanizar:

$$Vc = 30\frac{m}{\min} \quad ; \quad a_z = 0'025\frac{mm}{vuelta \bullet diente}$$

$$n = \frac{1000 \bullet Vc}{\pi \bullet D} = \frac{1000 \bullet 30}{\pi \bullet 63} = 152 r.p.m.$$

- Tiempo de corte

Para realizar el cálculo del tiempo de corte, inicialmente se calcula la longitud de entrada de la herramienta y posteriormente los tiempos de corte, con lo que el tiempo de corte del dentado es de:

$$t_{fresa\ madre} = \frac{L \bullet z_r}{a_z \bullet z_f \bullet n \bullet \frac{1}{60}} = \frac{25'17 \bullet 35}{0'025 \bullet 12 \bullet 151'58 \bullet \frac{1}{60}} = 1162'32 s = 19'37 \min$$

F.4.3.1. Tiempo de preparación

En tratarse de piezas únicas, el tiempo de preparación carga directamente sobre la única pieza a fabricar. En el tiempo de preparación se incluyen los siguientes tiempos:

TIEMPOS DE PREPARACIÓN		
FASE 20: TALLADORA		
Descripción de actividad	Tiempo máquina / tiempo hombre	t[min]
Cálculo de ruedas	Tiempo hombre	10
Montaje de ruedas	Tiempo máquina	45
Alimentar pieza	Tiempo máquina	5
Fijación fresa madre	Tiempo máquina	10
Sacar pieza máquina	Tiempo máquina	5
	TOTAL (Tiempo máquina)	**65**

Tabla F.5: Tiempos de preparación de la talladora en PFC-RP1

En la suma del tiempo total sólo se tiene en cuenta el tiempo máquina. En este caso, la realización del programa se puede hacer con la máquina en funcionamiento, por lo que no afecta al cómputo del tiempo máquina invertido.

F.4.3.2. Tiempo máquina

Además de los tiempos calculados, se deben tener en cuenta los siguientes tiempos:

- Acercar herramienta tallar: 3s

- Alejar herramienta tallar: 5s

F.4.3.3. Tiempo total empleado en el mecanizado

Con todos estos tiempos calculados, se obtiene un tiempo total de mecanizado en la fase 20 de:

$$3 + 1162'32 + 5 = 1170'32s$$

A este tiempo de operación, deben añadirse el tiempo de preparación de máquina de 90 minutos, que por tratarse de piezas únicas, recae directamente sobre la pieza a mecanizar.

F.4.4. Hoja de ruta

ORDEN DE FABRICACIÓN Y CÓDIGO DE PIEZA: PFC - RP1

Descripción de la pieza: Rueda con dentado exterior recto

Realizado por: **Jordi Brull Calbet**
Fecha: 04/03/2009 Número de piezas: 1
Revisión nº: 1
Material: F155
Medidas previa Barra calibrada de Ø50

FASE	MÁQUINA	DESCRIPCIÓN DE LA FASE	Tprep[s]	Tciclo [s]
00	Sierra de corte	Se corta el cilindro inicial hasta la longitud deseada con un excedente de material de 5mm	60	120
10	Mori Seiki	Fijar con garras duras y cilindrar diàmetro exterior hasta límite con garras duras. Refrentar la cara. Fijar con garras blandas con el otro cabezal y cilindrar diàmetro exterior restante. Refrentar la otra cara	900	77,31
20	Talladora	Realizar el tallado de los dientes	3900	1172,32
30				
40				
50				
60				
70				
		TOTAL	**4860,00**	**1369,63**

Tabla F.6: Hoja de ruta de Rueda con dentado exterior recto

F.5. Cálculo de tiempos de fabricación de ruedas dentadas helicoidales exteriores

Para el cálculo de tiempos, se tiene en cuenta una pieza como la mostrada en el Anexo G.2:Rueda con dentado exterior helicoidal

F.5.1. Fase 00: Material de partida

Tal como se menciona en la memoria, se parte de barra cilíndrica adquirida a proveedor externo. Sólo se verá el coste de adquisición de material en bruto.

A continuación, se emplea la sierra de corte para realizar el corte a la longitud deseada con 5mm de excedente de material.

F.5.2. Fase 10: Cilindrado y refrentado

Una vez realizada la fase anterior, se alimenta la barra en la máquina Mori Seiki, donde se cilindran y refrentan ambas caras hasta la medida nominal.

F.5.2.1. Refrentado

- Herramientas

Las mismas empleadas en el caso anterior. Para cilindrar y refrentar, se emplean plaquitas del fabricante Sandvik Coromant, del tipo CNMG 12 04 08 – WF que disponen de dos aristas de corte, i un radio de punta de 0,8 mm. Estas plaquitas se alojan en un portaherramientas del mismo fabricante, con especificación DCLNR2020K12.

- Condiciones de corte

Ídem que el caso anterior. Las condiciones de corte aconsejadas para el tipo de material a mecanizar y la herramienta seleccionada está determinada por el propio fabricante y son las siguientes:

$$Vc = 120 \frac{m}{\min}$$

$$a = 0'219 \frac{mm}{vuelta}$$

- Tiempo de corte

A partir de las expresiones vistas anteriormente, se calcula el tiempo de corte:

$$t_{torno} = \frac{60 \bullet \pi}{0'219 \bullet 500 \bullet 120} \bullet \frac{25^2 - 0^2}{2} = 4'48s$$

Este tiempo se emplea en ambas caras, por lo que se emplea un tiempo total en refrentar de 9'36s.

F.5.2.2. Cilindrado

- Herramientas

Las herramientas empleadas son las mismas que en el refrentado.

- Condiciones de corte

Las mismas que en el caso anterior

- Tiempo de corte

Con las condiciones especificadas, el tiempo de corte es el siguiente:

$$t_{torno} = \frac{20}{0'219 \bullet \frac{1000 \bullet 120}{\pi \bullet 45'43} \bullet \frac{1}{60}} = 6'51s$$

y dado que tienen que mecanizarse casi 5mm diametrales, y se recomienda mecanizar alrededor de 2-3mm diametrales, se realizan dos pasadas, por lo que el tiempo de mecanizado en el cilindrado es de 13'02s.

F.5.2.3. Escariado del agujero central

- Herramientas

La misma que en el caso de PFC-RP1. Se utiliza una broca del fabricante Stim Tools, con especificación 22 11 43, se trata de una herramienta helicoidal de acero rápido rectificada con mango cilíndrico (DIN 345 RN), de 24mm de diámetro, y 128º de ángulo de punta. A continuación se realiza el escariado del agujero con un escariador del fabricante SECO, que permite garantizar la tolerancia deseada, con la especificación SR82-24.80H7 EN1, que lleva unas plaquitas del tipo P4-EN1-06, el escariador se fabrica bajo demanda, i se adapta perfectamente.

- Condiciones de corte

Las condiciones de corte aconsejadas para el tipo de material mecanizado son las mismas que en el caso anterior

- Tiempo de corte

Broca :

$$\rightarrow n = \frac{1000 \bullet Vc}{\pi \bullet D} = \frac{1000 \bullet 60}{\pi \bullet 24} = 796 r.p.m.$$

$$\rightarrow L = L + \frac{\phi}{2} \bullet sen\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 20 + \frac{24}{2} \bullet sen\left(\frac{128}{2}\right) = 30'79 mm$$

$$\rightarrow t = \frac{L}{a \bullet n} = \frac{30'79}{0'24 \bullet 796 \bullet \frac{1}{60}} = 9'67 s$$

Escariador :

$$\rightarrow n = \frac{1000 \bullet Vc}{\pi \bullet D} = \frac{1000 \bullet 20}{\pi \bullet 25} = 255 r.p.m.$$

$$\rightarrow L = L + \frac{\phi_{esc} - \phi_{broca}}{2} \bullet tg(\alpha) = 20 + \frac{25 - 24}{2} \bullet tg(45) = 20'5 mm$$

$$\rightarrow t = \frac{L}{a \bullet n} = \frac{20'5}{0'96 \bullet 255 \bullet \frac{1}{60}} = 5'02 s$$

F.5.2.4. Tiempo de preparación

Se calcula el tiempo de preparación del mismo modo que en el caso anterior:

TIEMPOS DE PREPARACIÓN		
FASE 10: MORISEIKI		
Descripción de actividad	Tiempo máquina / tiempo hombre	t[min]
Realización de programa	Tiempo hombre	10
Preparar Garras	Tiempo máquina	5
Alimentar pieza	Tiempo máquina	2
Preparar herramientas	Tiempo máquina	5
Sacar pieza máquina	Tiempo máquina	3
	TOTAL (Tiempo máquina)	**15**

Tabla F.7: Tiempos de preparación de Mori Seiki en PFC-RP2

F.5.2.5. Tiempo máquina

Además de los tiempos calculados, se deben tener en cuenta los siguientes tiempos:

- Acercar herramienta refrentar-cilindrar: 2s

- Alejar herramienta refrentar-cilindrar: 2s
- Sincronizar platos y cambiar plato de sujeción: 4s
- Acercar herramienta refrentar-cilindrar: 2s
- Alejar herramienta refrentar-cilindrar: 2s
- Cambio de herramienta: 10s
- Acercar broca: 2s
- Alejar broca: 2s
- Cambio de herramienta: 10s
- Acercar escariador: 2s
- Alejar escariador: 2s

F.5.2.6. Tiempo total empleado en el mecanizado

Con todos estos tiempos calculados, se obtiene un tiempo total de mecanizado en la fase 10 de:

$$2 + 9'36 + 2 + 4 + 2 + 13'02 + 2 + 10 + 2 + 9'67 + 2 + 10 + 2 + 5'02 + 2 = 77'07s$$

A este tiempo de operación, deben añadirse el tiempo de preparación de máquina de 45 minutos, que por tratarse de piezas únicas, recae directamente sobre la pieza a mecanizar.

F.5.3. Fase 20: Tallado de los dientes

Una vez obtenidas las dimensiones finales de la pieza según planos, se procede al dentado de la misma. Este dentado cumple la normativa DIN 5480.

- Herramientas de corte

Se necesita una fresa madre de acero rápido de módulo 4mm, se elige una fresa madre del fabricante Stim Tools, el diámetro exterior 56mm i 12 dientes de corte, con una longitud útil de 46 mm. Es una fresa madre de un único filo de corte.

- Condiciones de corte

Se siguen las consideraciones del fabricante en función del material a mecanizar:

$$Vc = 30\frac{m}{\min} \quad ; \quad a_z = 0'025\frac{mm}{vuelta \bullet diente}$$

$$n = \frac{1000 \bullet Vc}{\pi \bullet D} = \frac{1000 \bullet 30}{\pi \bullet 56} = 170 r.p.m.$$

- Tiempo de corte

Para realizar el cálculo del tiempo de corte, inicialmente se calcula la longitud de entrada de la herramienta y con él el tiempo de corte:

$$t_{fresa\ madre} = \frac{L \bullet z_r}{a_z \bullet z_f \bullet n \bullet \frac{1}{60}} = \frac{33'45 \bullet 20}{0'025 \bullet 12 \bullet 151'58 \bullet \frac{1}{60}} = 882'80 s = 14'71 \min$$

F.5.3.1. Tiempo de preparación

De nuevo se calcula el tiempo de preparación de esta fase en la pieza PFC-RP2:

TIEMPOS DE PREPARACIÓN		
FASE 20: TALLADORA		
Descripción de actividad	Tiempo máquina / tiempo homb	t[min]
Cálculo de ruedas	Tiempo hombre	20
Montaje de ruedas	Tiempo máquina	90
Alimentar pieza	Tiempo máquina	5
Fijación fresa madre	Tiempo máquina	15
Sacar pieza máquina	Tiempo máquina	5
	TOTAL (Tiempo máquina)	**115**

Tabla F.8: Tiempos de preparación de la talladora en PFC-RP2

F.5.3.2. Tiempo máquina

Además de los tiempos calculados, se deben tener en cuenta los siguientes tiempos:

- Acercar herramienta tallar: 3s
- Alejar herramienta tallar: 5s

F.5.3.3. Tiempo total empleado en el mecanizado

Con todos estos tiempos calculados, se obtiene un tiempo total de mecanizado en la fase 20 de:

$$3 + 882'80 + 5 = 890'80s$$

A este tiempo de operación, deben añadirse el tiempo de preparación de máquina de 90 minutos, que por tratarse de piezas únicas, recae directamente sobre la pieza a mecanizar.

F.5.4. Hoja de ruta

ORDEN DE FABRICACIÓN Y CÓDIGO DE PIEZA: PFC - RP2

Descripción de la pieza: Rueda con dentado exterior helicoidal

Realizado por: **Jordi Brull Calbet**
Fecha: 04/03/2009 Número de piezas: 1
Revisión nº: 1
Material: F155
Medidas previa Barra calibrada de Ø50

FASE	MÁQUINA	DESCRIPCIÓN DE LA FASE	Tprep [s]	Tciclo [s]
00	Sierra de corte	Se corta el cilindro inicial hasta la longitud deseada con un excedente de material de 5mm	30	120
10	Mori Seiki	Fijar con garras duras y cilindrar diàmetro exterior hasta límite con garras duras. Refrentar la cara. Fijar con garras blandas con el otro cabezal y cilindrar diàmetro exterior restante. Refrentar la otra cara	900	77,07
20	Talladora	Realizar el tallado de los dientes	6900	890,8
30				
40				
50				
60				
70				
		TOTAL		1087,87

Tabla F.9: Hoja de ruta de PFC-RP2

F.6. Cálculo de tiempos de fabricación de ruedas dentadas rectas interiores empleando electroerosión

Para el cálculo de tiempos, se tiene en cuenta una pieza como la mostrada en el Anexo G.3:Rueda con dentado interior recto.

F.6.1. Fase 00: Material de partida

Tal como se menciona en la memoria, se parte de barra cilíndrica adquirida a proveedor externo.

A continuación, se emplea la sierra de corte para realizar el corte a la longitud deseada con 5mm de excedente de material.

F.6.2. Fase 10: Cilindrado y refrentado

Una vez realizada la fase anterior, se alimenta la barra en la máquina Mori Seiki, donde se cilindran y se refrentan ambas caras hasta la medida nominal.

F.6.2.1. Refrentado

- Herramientas

Las mismas empleadas en el caso anterior. Para cilindrar y refrentar, se emplean plaquitas del fabricante Sandvik Coromant, del tipo CNMG 12 04 08 – WF que disponen de dos aristas de corte, i un radio de punta de 0,8 mm. Estas plaquitas se alojan en un portaherramientas del mismo fabricante, con especificación DCLNR2020K12.

- Condiciones de corte

Ídem que el caso anterior. Las condiciones de corte aconsejadas para el tipo de material a mecanizar y la herramienta seleccionada está determinada por el propio fabricante y son las siguientes:

$$Vc = 120 \frac{m}{\min}$$

$$a = 0'219 \frac{mm}{vuelta}$$

- Tiempo de corte

A partir de las expresiones vistas anteriormente, se calcula el tiempo de corte:

$$t_{torno} = \frac{60 \bullet \pi}{0'219 \bullet 500 \bullet 120} \bullet \frac{60^2 - 0^2}{2} = 25'82s$$

Este tiempo se emplea en ambas caras, por lo que se emplea un tiempo total en refrentar de 51’64s.

F.6.2.2. Cilindrado

- Herramientas

Las herramientas empleadas son las mismas que en el refrentado.

- Condiciones de corte

Las mismas que en el caso anterior

- Tiempo de corte

Con las condiciones especificadas, el tiempo de corte es el siguiente:

$$t_{torno} = \frac{20}{0'219 \bullet \frac{1000 \bullet 120}{\pi \bullet 55} \bullet \frac{1}{60}} = 7'89s$$

y dado que tienen que mecanizarse 5mm diametrales, y se recomienda mecanizar 2-3mm diametrales, se realizan dos pasadas, por lo que el tiempo de mecanizado en el cilindrado es de 15'78s.

F.6.2.3. Mandrinado del agujero central

- Herramientas

Se utiliza una broca del fabricante Sandvic Coromant, con especificación 880-D4500L40-02, se trata de una herramienta helicoidal de acero rápido rectificada con mango cilíndrico (DIN 345 RN), de 38mm de diámetro, y 128º de ángulo de punta. A continuación se realiza el mandrinado de la pieza hasta la medida nominal empleando plaquitas R825A-AF11STUP06T1A acopladas en el mango CoroTurn® 111 92º R825A-AFxxSTUC, ambos elementos del fabricante Sandvic Coromant. Condiciones de corte.

Las condiciones de corte aconsejadas para el tipo de material mecanizado son las siguientes:

$$Broca:$$

$$\rightarrow Vc = 60 \frac{m}{\min}$$

$$\rightarrow a = \frac{\phi_{broca}}{100} = \frac{45}{100} = 0'45 \frac{mm}{vuelta}$$

Mandrinado :

$$\rightarrow Vc_{\max} = 1200 \frac{m}{\min} \quad ; \quad Vc = 500 \frac{m}{\min}$$

$$\rightarrow a = 0'219 \frac{mm}{vuelta}$$

- Tiempo de corte

Broca :

$$\rightarrow n = \frac{1000 \bullet Vc}{\pi \bullet D} = \frac{1000 \bullet 120}{\pi \bullet 55} = 694'49 r.p.m.$$

$$\rightarrow L = L + \frac{\phi}{2} \bullet sen\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 20 + \frac{45}{2} \bullet sen\left(\frac{128}{2}\right) = 31'67 mm$$

$$\rightarrow t = \frac{L}{a \bullet n} = \frac{31'67}{0'45 \bullet 694 \bullet \frac{1}{60}} = 9'12 s$$

Mandrinado :

$$t_{torno} = \frac{60 \bullet \pi}{0'219 \bullet 500 \bullet 500} \bullet \frac{40'25^2 - 38^2}{2} = 1'27 s$$

F.6.2.4. Tiempo de preparación

Se calcula el tiempo de preparación del mismo modo que en casos anteriores

TIEMPOS DE PREPARACIÓN		
FASE 10: MORISEIKI		
Descripción de actividad	Tiempo máquina / tiempo hombre	t[min]
Realización de programa	Tiempo hombre	10
Preparar Garras	Tiempo máquina	5
Alimentar pieza	Tiempo máquina	2
Preparar herramientas	Tiempo máquina	5
Sacar pieza máquina	Tiempo máquina	3
	TOTAL (Tiempo máquina)	**15**

Tabla F.10: Tiempos de preparación en fase 10 de PFC-RP3

F.6.2.5. Tiempo máquina

Además de los tiempos calculados, se deben tener en cuenta los siguientes tiempos:

- Acercar herramienta refrentar-cilindrar: 2s
- Alejar herramienta refrentar-cilindrar: 2s

- Sincronizar platos y cambiar plato de sujeción: 4s
- Acercar herramienta refrentar-cilindrar: 2s
- Alejar herramienta refrentar-cilindrar: 2s
- Cambio de herramienta: 10s
- Acercar broca: 2s
- Alejar broca: 2s
- Cambio de herramienta: 10s
- Acercar herramienta mandrinar: 2s
- Alejar herramienta mandrinar: 2s

F.6.2.6. Tiempo total empleado en el mecanizado

Con todos estos tiempos calculados, se obtiene un tiempo total de mecanizado en la fase 10 de:

$$2 + 51'64 + 2 + 4 + 2 + 15'78 + 2 + 10 + 2 + 9'12 + 2 + 10 + 2 + 1'27 + 2 = 117'81\text{s}$$

F.6.3. Fase 20: Tallado de los dientes

Una vez obtenidas las dimensiones finales de la pieza según planos, se procede al dentado de la misma. Este dentado cumple la normativa DIN 5480 y se consigue cargando el perfil teórico en la máquina de electroerosión con hilo.

Tras realizar diversas, pruebas y ante la imposibilidad de obtener fórmulas teóricas para el cálculo de tiempos de corte, se constata que el tiempo de mecanizado es función del grosor y longitud de la pieza. El tiempo estimado para realizar un dentado interno de un grosor de unos 20mm y de diámetro de pie de 40mm son 2 horas.

Así pues, tiempo estimado de esta operación

$$t = 120\,\text{min} = 7200s$$

F.6.3.1. Tiempo de preparación

A continuación se detalla el tiempo empleado en la preparación de la pieza:

TIEMPOS DE PREPARACIÓN		
FASE 20: ELECTROEROSIÓN		
Descripción de actividad	Tiempo máquina / tiempo hombre	t[min]
Obtención de dentado	Tiempo hombre	30
Creación de programa	Tiempo hombre	10
Alimentar pieza	Tiempo máquina	5
Fijación de pieza	Tiempo máquina	5
Sacar pieza máquina	Tiempo máquina	5
	TOTAL (Tiempo máquina)	**15**

Tabla F.11: Tiempos de preparación en electroerosión con hilo

F.6.4. Fase 30: Eliminación de óxido

Después de realizar la electroerosión, la pieza queda con una fina capa de óxido que es preciso eliminar mediante un lijado manual. No afecta a la funcionalidad de la pieza final porque se trata de una capa completamente superficial y se elimina con facilidad mediante el lijado.

No precisa de tiempo de preparación de máquina, ya que lo único que ha de tenerse en cuenta es preparar la lima antes de que finalice la fase anterior.

Teniendo en cuenta el tamaño de la pieza, se emplean unos 10 minutos (600 segundos) en realizar el pulido completo de la pieza.

F.6.5. Hoja de ruta

ORDEN DE FABRICACIÓN Y CÓDIGO DE PIEZA: PFC - RP3

Descripción de la pieza: Rueda con dentado interior recto

Realizado por: **Jordi Brull Calbet**
Fecha: 04/03/2009 Número de piezas: 1
Revisión nº: 1
Material: F155
Medidas previa Barra calibrada de Ø60

FASE	MÁQUINA	DESCRIPCIÓN DE LA FASE	Tprep [s]	Tciclo [s]
00	Sierra de corte	Se corta el cilindro inicial hasta la longitud deseada con un excedente de material de 5mm	30	150
10	Mori Seiki	Fijar con garras duras y cilindrar diàmetro exterior hasta límite con garras duras. Refrentar la cara. Fijar con garras blandas con el otro cabezal y cilindrar diàmetro exterior restante. Refrentar la otra cara	900	117,81
20	Electroerosión con hilo	Sujetando la pieza por el exterior, realizar el tallado de los dientes	900	7200
30	Manual	Realizar el pulido de la pieza empleando lima	-	600
40				
50				
60				
		TOTAL		8067,81

Tabla F.12: Hoja de ruta de rueda con dentado interior recto

Por lo que se emplea un tiempo total de fabricación de 8067’81s = 2 horas y casi 15 minutos por pieza (sin tener en cuenta preparación de máquina).

F.7. Cálculo de tiempos de fabricación de ruedas dentadas rectas interiores empleando mortajadora

Para el cálculo de tiempos, se tiene en cuenta una pieza como la mostrada en el Anexo G.3:Rueda con dentado interior recto.

F.7.1. Fase 00: Material de partida

Igual que en el caso anterior.

F.7.2. Fase 10: Cilindrado y refrentado

Igual que en el caso anterior.

F.7.3. Fase 20: Tallado de los dientes

En este caso el tallado se realizará mediante mortajadora.

- Herramientas de corte

Se emplea un piñón generador de acero rápido, de módulo 1'75 y diámetro exterior 25mm., con 12 dientes de corte, del fabricante Stim Tools. Se trata de un piñón generador de un único filo de corte.

- Condiciones de corte

Se recomiendan las siguientes condiciones de corte:

$$Vc = 30\frac{m}{\min}$$
$$a_z = 0'2\frac{mm}{vuelta}$$
$$n = \frac{1000 \bullet 30}{\pi \bullet 25} = 381'97\left[r.p.m.\right]$$

- Tiempo de corte

$$t_{piñón} = \frac{26'42 \bullet 20}{0'025 \bullet 12 \bullet 381'97 \bullet \frac{1}{60}} = 276'64s = 4'61\min$$

F.7.3.1. Tiempo de preparación

Se calcula el tiempo de preparación del mismo modo que en casos anteriores

TIEMPOS DE PREPARACIÓN		
FASE 20: TALLADORA		
Descripción de actividad	Tiempo máquina / tiempo hombre	t[min]
Realización de programa	Tiempo hombre	20
Preparación herramientas	Tiempo máquina	10
Alimentar pieza	Tiempo máquina	5
Sacar pieza máquina	Tiempo máquina	5
	TOTAL (Tiempo máquina)	**20**

Tabla F.13: Tiempos de preparación en fase 10 de PFC-RP3 empleando talladora

F.7.3.2. Tiempo máquina

Además de los tiempos calculados, se deben tener en cuenta los siguientes tiempos:

- Acercar herramienta: 2s
- Alejar herramienta: 2s

F.7.3.3. Tiempo total empleado en el tallado

Con todos estos tiempos calculados, se obtiene un tiempo total de mecanizado en la fase 20 de:

$$2 + 276'64 + 2 = 280'64s$$

F.7.4. Hoja de ruta

ORDEN DE FABRICACIÓN Y CÓDIGO DE PIEZA: PFC - RP3

Descripción de la pieza: Rueda con dentado interior recto

Realizado por: **Jordi Brull Calbet**
Fecha: 04/03/2009 Número de piezas: 1
Revisión nº: 1
Material: F155
Medidas previa Barra calibrada de Ø60

FASE	MÁQUINA	DESCRIPCIÓN DE LA FASE	Tprep [s]	Tciclo [s]
00	Sierra de corte	Se corta el cilindro inicial hasta la longitud deseada con un excedente de material de 5mm	30	150
10	Mori Seiki	Fijar con garras duras y cilindrar diàmetro exterior hasta límite con garras duras. Refrentar la cara. Fijar con garras blandas con el otro cabezal y cilindrar diàmetro exterior restante. Refrentar la otra cara	900	117,81
20	Talladora	Realizar el tallado de los dientes	1200	280,64
30				
40				
50				
60				
70				
		TOTAL		548,45

Tabla F.14: Hoja de ruta de PFC-RP3 empleando mortajadora

Por lo que se emplea un tiempo total de fabricación de 548'45s = 9 minutos y 9 segundos por pieza (sin tener en cuenta preparación de máquina).

F.8. Cálculo de tiempos de fabricación de ruedas dentadas helicoidales interiores empleando electroerosión

F.8.1. Fase 00: Material de partida

De nuevo se parte de barra cilíndrica adquirida a proveedor externo.

A continuación, se emplea la sierra de corte para realizar el corte a la longitud deseada con 5mm de excedente de material.

F.8.2. Fase 10: Cilindrado y refrentado

Una vez realizada la fase anterior, se alimenta la barra en la máquina Mori Seiki, donde se cilindran y se refrentan ambas caras hasta la medida nominal.

F.8.2.1. Refrentado

- Herramientas

Las mismas empleadas en el caso anterior. Para cilindrar y refrentar, se emplean plaquitas del fabricante Sandvik Coromant, del tipo CNMG 12 04 08 – WF que disponen de dos aristas de corte, i un radio de punta de 0,8 mm. Estas plaquitas se alojan en un portaherramientas del mismo fabricante, con especificación DCLNR2020K12.

- Condiciones de corte

Ídem que el caso anterior. Las condiciones de corte aconsejadas para el tipo de material a mecanizar y la herramienta seleccionada está determinada por el propio fabricante y son las siguientes:

$$Vc = 120 \frac{m}{\min}$$

$$a = 0'219 \frac{mm}{vuelta}$$

- Tiempo de corte

A partir de las expresiones vistas anteriormente, se calcula el tiempo de corte:

$$t_{torno} = \frac{60 \bullet \pi}{0'219 \bullet 500 \bullet 120} \bullet \frac{500^2 - 0^2}{2} = 1793'14$$

Este tiempo se emplea en ambas caras, por lo que se emplea un tiempo total en refrentar de 3586’28s.

F.8.2.2. Cilindrado

- Herramientas

Las herramientas empleadas son las mismas que en el refrentado.

- Condiciones de corte

Las mismas que en el caso anterior

- Tiempo de corte

Con las condiciones especificadas, el tiempo de corte es el siguiente:

$$t_{torno} = \frac{20}{0'219 \bullet \frac{1000 \bullet 120}{\pi \bullet 500} \bullet \frac{1}{60}} = 71'73s$$

y dado que tienen que mecanizarse 5mm diametrales, y se recomienda mecanizar 2-3mm diametrales, se realizan dos pasadas, por lo que el tiempo de mecanizado en el cilindrado es de 143'45s.

F.8.2.3. Mandrinado del agujero central

- Herramientas

Se utiliza una broca del fabricante Sandvic Coromant, con especificación 880-D6300L40-03, se trata de una herramienta helicoïdal de acero rápido rectificada con mango cilíndrico (DIN 345 RN), de 63mm de diámetro, y 128º de ángulo de punta. A continuación se realiza el mandrinado de la pieza hasta la medida nominal empleando plaquitas R825A-AF11STUP06T1A acopladas en el mango CoroTurn® 111 92º R825A-AFxxSTUC, ambos elementos del fabricante Sandvic Coromant.

- Condiciones de corte

Las condiciones de corte aconsejadas para el tipo de material mecanizado son las siguientes:

$$Broca:$$

$$\rightarrow Vc = 60 \frac{m}{\min}$$

$$\rightarrow a = \frac{\phi_{broca}}{100} = \frac{63}{100} = 0'63 \frac{mm}{vuelta}$$

$$Mandrinado:$$

$$\rightarrow Vc_{\max} = 1200 \frac{m}{\min} \quad ; \quad Vc = 500 \frac{m}{\min}$$

$$\rightarrow a = 0'219 \frac{mm}{vuelta}$$

- Tiempo de corte

Broca :

$$\rightarrow n = \frac{1000 \bullet Vc}{\pi \bullet D} = \frac{1000 \bullet 600}{\pi \bullet 63} = 471'63 r.p.m.$$

$$\rightarrow L = L + \frac{\phi}{2} \bullet sen\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 20 + \frac{63}{2} \bullet sen\left(\frac{128}{2}\right) = 34'53 mm$$

$$\rightarrow t = \frac{L}{a \bullet n} = \frac{34'53}{0'63 \bullet 471'63 \bullet \frac{1}{60}} = 13'20 s$$

Mandrinado :

$$t_{torno} = \frac{60 \bullet \pi}{0'219 \bullet 500 \bullet 500} \bullet \frac{448'55^2 - 63^2}{2} = 339'51 s$$

F.8.2.4. Tiempo de preparación

TIEMPOS DE PREPARACIÓN		
FASE 10: MORISEIKI		
Descripción de actividad	Tiempo máquina / tiempo hombre	t[min]
Realización de programa	Tiempo hombre	10
Preparar Garras	Tiempo máquina	5
Alimentar pieza	Tiempo máquina	8
Preparar herramientas	Tiempo máquina	5
Sacar pieza máquina	Tiempo máquina	8
	TOTAL (Tiempo máquina)	**26**

Tabla F.15: Tiempo de preparación de PFC-RP4, fase 10

En tratarse de piezas únicas, el tiempo de preparación carga directamente sobre la única pieza a fabricar. Se estima que el tiempo de preparación de máquina y programación es de unos 26 minutos, desglosados en la tabla anterior.

F.8.2.5. Tiempo máquina

Además de los tiempos calculados, se deben tener en cuenta los siguientes tiempos:

- Acercar herramienta refrentar-cilindrar: 2s
- Alejar herramienta refrentar-cilindrar: 2s
- Sincronizar platos y cambiar plato de sujeción: 4s
- Acercar herramienta refrentar-cilindrar: 2s

- Alejar herramienta refrentar-cilindrar: 2s
- Cambio de herramienta: 10s
- Acercar broca: 2s
- Alejar broca: 2s
- Cambio de herramienta: 10s
- Acercar herramienta mandrinar: 2s
- Alejar herramienta mandrinar: 2s

F.8.2.6. Tiempo total empleado en el mecanizado

Con todos estos tiempos calculados, se obtiene un tiempo total de mecanizado en la fase 10 de:

$$2 + 3586'28 + 2 + 4 + 2 + 143'45 + 2 + 10 + 2 + 13'20 + 2 + 10 + 2 + 339'51 + 2 = 4122'44s$$

A este tiempo de operación, deben añadirse el tiempo de preparación de máquina de 45 minutos, que por tratarse de piezas únicas, recae directamente sobre la pieza a mecanizar.

F.8.3. Fase 20: Tallado de los dientes

Una vez obtenidas las dimensiones finales de la pieza según planos, se procede al dentado de la misma. Este dentado cumple la normativa DIN 5480 y se consigue fabricando la rueda dentada que hará las veces de electrodo, tal y como se ha visto anteriormente. Para facilitar el cálculo de las medidas del electrodo, se ha realizado la hoja de cálculo anexa en formato digital, gracias a la cual, tras introducir los datos de la rueda dentada a fabricar, calcula el electrodo haciendo los cambios pertinentes (si el electrodo es a derechas, la rueda dentada es a izquierdas, la altura del diente es distinta la del electrodo que si se tratara de una rueda dentada).

Tras realizar diversas, pruebas y ante la imposibilidad de obtener fórmulas teóricas para el cálculo de tiempos de corte, se constata que el tiempo de mecanizado es función del grosor y longitud de la pieza. En 24 horas se han erosionado 20mm de la pieza RP4 de diámetro exterior corregido 448’55mm de acero. VDI=32 (equivale a un GAP de 0’15), que se considera que la pieza tiene un acabado correcto.

Así pues, tiempo estimado de esta operación

$$t = 24 horas = 86400 s$$

F.8.3.1. Tiempo máquina

En este caso el tiempo máquina es largo debido a que en cada caso tiene que fabricarse el electrodo que hará de herramienta de corte. El desglose de tiempos se detalla a continuación

TIEMPOS DE PREPARACIÓN		
FASE 20: ELECTROEROSIÓN		
Descripción de actividad	Tiempo máquina / tiempo hombre	t[min]
Realización programa	Tiempo hombre	20
Fabricación electrodo	Tiempo máquina	120
Alimentar pieza	Tiempo máquina	5
Fijación pieza y electrodo	Tiempo máquina	15
Sacar pieza máquina	Tiempo máquina	5
	TOTAL (Tiempo máquina)	**145**

Tabla F.16: Tiempo de preparación de PFC-RP4, fase 20 electroerosión

F.8.4. Fase 30: Eliminación de óxido

Igual que en el caso anterior, la pieza necesita ser limpiada del óxido exterior. En este caso en tratarse de una erosión más agresiva para el material, el tiempo empleado es ligeramente superior.

F.8.5. Hoja de ruta

ORDEN DE FABRICACIÓN Y CÓDIGO DE PIEZA: PFC - RP4

Descripción de la pieza: Rueda con dentado exterior helicoidal

Realizado por: **Jordi Brull Calbet**
Fecha: 04/03/2009 Número de piezas: 1
Revisión nº: 1
Material: F155
Medidas previa Barra calibrada de Ø50

FASE	MÁQUINA	DESCRIPCIÓN DE LA FASE	Tprep [s]	Tciclo [s]
00	Sierra de corte	Se corta el cilindro inicial hasta la longitud deseada con un excedente de material de 5mm	60	180
10	Mori Seiki	Fijar con garras duras y cilindrar diàmetro exterior hasta límite con garras duras. Refrentar la cara. Fijar con garras blandas con el otro cabezal y cilindrar diàmetro exterior restante. Refrentar la otra cara	1560	4122,44
20	Electroerosión	Realizar el tallado de los dientes	8700	86400
30	Manual	Eliminación de óxido	-	1200
40				
50				
60				
70				
		TOTAL		91902,44

Tabla F.17: Hoja de ruta de rueda con dentado interior helicoidal

Por lo que se emplea un tiempo total de fabricación de 91902'44s = 25 horas y casi 32 minutos por pieza (sin tener en cuenta preparación de máquina).

F.9. Cálculo de tiempos de fabricación de ruedas dentadas helicoidales interiores empleando talladora

F.9.1. Fase 00: Material de partida

Igual que en el caso anterior.

F.9.2. Fase 10: Cilindrado y refrentado

Igual que en el caso anterior.

F.9.3. Fase 20: Tallado de los dientes

En este caso, del mismo modo que el interior recto, el tallado se realizará mediante mortajadora.

- Herramientas de corte

Se emplea un piñón generador de acero rápido, de módulo 1'75 y diámetro exterior 25mm., con 12 dientes de corte, del fabricante Stim Tools. Se trata de un piñón generador de un único filo de corte.

- Condiciones de corte

Se recomiendan las siguientes condiciones de corte:

$$Vc = 30\frac{m}{\min}$$
$$a_z = 0'2\frac{mm}{vuelta}$$
$$n = \frac{1000 \bullet 30}{\pi \bullet 25} = 381'97\left[r.p.m.\right]$$

- Tiempo de corte

$$t_{piñón} = \frac{42'90 \bullet 80}{0'025 \bullet 12 \bullet 170'52 \bullet \frac{1}{60}} = 4025'09s = 67'08\min$$

F.9.3.1. Tiempo de preparación

Se calcula el tiempo de preparación del mismo modo que en casos anteriores

TIEMPOS DE PREPARACIÓN		
FASE 20: TALLADORA		
Descripción de actividad	Tiempo máquina / tiempo hombre	t[min]
Realización de programa	Tiempo hombre	20
Preparación herramientas	Tiempo máquina	10
Alimentar pieza	Tiempo máquina	5
Sacar pieza máquina	Tiempo máquina	5
	TOTAL (Tiempo máquina)	**20**

Tabla F.18: Tiempos de preparación en fase 10 de PFC-RP4 empleando talladora

F.9.3.2. Tiempo máquina

Además de los tiempos calculados, se deben tener en cuenta los siguientes tiempos:

- Acercar herramienta: 2s
- Alejar herramienta: 2s

F.9.3.3. Tiempo total empleado en el tallado

Con todos estos tiempos calculados, se obtiene un tiempo total de mecanizado en la fase 20 de:

$$2 + 4025'09 + 2 = 4029'09s$$

F.9.4. Hoja de ruta

ORDEN DE FABRICACIÓN Y CÓDIGO DE PIEZA: PFC - RP4

Descripción de la pieza: Rueda con dentado exterior helicoidal

Realizado por: **Jordi Brull Calbet**
Fecha: 04/03/2009 Número de piezas: 1
Revisión nº: 1
Material: F155
Medidas previa Barra calibrada de Ø50

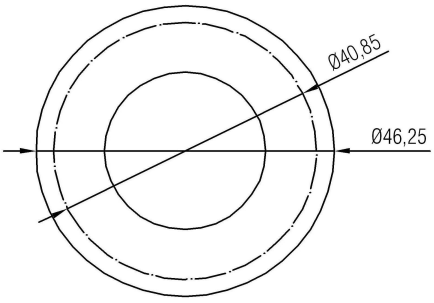
FASE	MÁQUINA	DESCRIPCIÓN DE LA FASE	Tprep [s]	Tciclo [s]
00	Sierra de corte	Se corta el cilindro inicial hasta la longitud deseada con un excedente de material de 5mm	60	180
10	Mori Seiki	Fijar con garras duras y cilindrar diàmetro exterior hasta límite con garras duras. Refrentar la cara. Fijar con garras blandas con el otro cabezal y cilindrar diàmetro exterior restante. Refrentar la otra cara	1560	4122,44
20	Talladora	Realizar el tallado de los dientes	1200	4029,09
30				
40				
50				
60				
70				
		TOTAL		8331,53

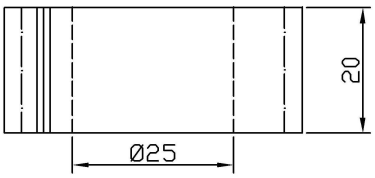
Tabla F.19: Hoja de ruta de PFC-RP4 empleando mortajadora

Por lo que se emplea un tiempo total de fabricación de 8331’53s = 2 horas y casi 19 minutos por pieza (sin tener en cuenta preparación de máquina).

G. PLANOS DE PIEZAS

G.1. Rueda con dentado exterior recto





DATOS DEL DENTADO RECTO EXTERIOR			
D/F	Módulo normal (mm)	Mn	1,25
D/F	Número de dientes	z	35
D/F	Ángulo de presión (º)	α	20
D/F	Corrección de herramienta (adim.)	x	0
F	Diámetro exterior corregido (mm)	De	46,25
F	Diámetro de pie corregido (mm)	Dpe	40,85
F	Altura de diente corregida (mm)	h	2,700
V	Espesor cordal corregido incluido juego piñón cero (mm)	ec	$1,96^{-0,05}_{-0,10}$
V	Altura cordal corregida (mm)	ac	1,27

FUNDACIÓ CIM

Pos	Cant	Material	Medidas en bruto	T.Térmico	Recubrimiento
1	1	F155	Ø50 – anchura 25mm	–	–

COTAS SIN TOLERANCIAS DIN 7168 EN GRADO MEDIO

Valores numéricos para medidas de longitud							Medidas angulares			
más de	0,5	3	6	30	120	315		10	50	120
hasta	3	6	30	120	315	1000	10	50	120	
	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1°	±30'	±20'	±10'

	Fecha	Nombre
Dibujado	10.8.2008	Jordi Brull
Comprobado	20.3.2009	Jordi Brull

MEDIDAS ENTRE CENTROS

AGUJEROS DE TORNILLOS ±0,2 | AGUJEROS DE PASADORES ±0,02

Suavizar aristas

UPC

ETSEIB

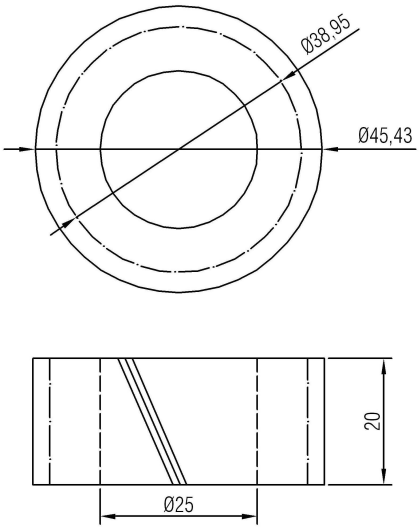
Escala: 1:1

Rueda con dentado exterior recto

Ref. plano PFC – RP1

Ref. Cliente PFC – RP1

G.2. Rueda con dentado exterior helicoidal



DATOS DEL DENTADO HELICOIDAL EXTERIOR			
D/F	Módulo normal (mm)	Mn	1,5
D/F	Número de dientes	z	20
D/F	Ángulo de presión (º)	α	20
D/F	Corrección de herramienta (adim.)	x	0
F	Ángulo de inclinación de la hélice	↔	Izquierda
D	Recubrimiento (Anchura*z/paso helicoidal > 1)	R	3,301
F	Ángulo helicoidal (º)	β	45
F	Diámetro exterior corregido (mm)	De	45,43
F	Diámetro de pie corregido (mm)	Dpe	38,95
F	Altura de diente (mm)	h	3,240
V	Espesor cordal corregido incluido juego piñón cero (mm)	ec	$1,18^{-0,05}_{-0,10}$
V	Altura cordal corregida (mm)	ac	1,51

FUNDACIÓ CIM

Pos	Cant	Material	Medidas en bruto	T.Térmico	Recubrimiento
1	1	F155	Ø50 – anchura 25mm	–	–

COTAS SIN TOLERANCIAS DIN 7168 EN GRADO MEDIO

	Valores numéricos para medidas de longitud						Medidas angulares			
más de	0,5	3	6	30	120	315		10	50	120
hasta	3	6	30	120	315	1000	10	50	120	
	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1°	±30'	±20'	±10'

	Fecha	Nombre
Dibujado	10.8.2008	Jordi Brull
Comprobado	20.3.2009	Jordi Brull

MEDIDAS ENTRE CENTROS
AGUJEROS DE TORNILLOS ±0,2 | AGUJEROS DE PASADORES ±0,02
Suavizar aristas

UPC
ETSEIB

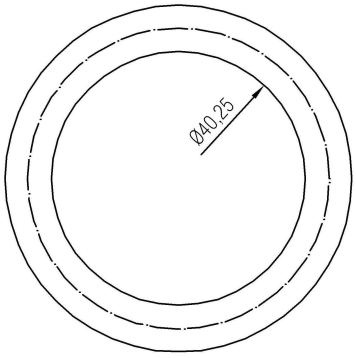
Escala: 1:1

Rueda con dentado exterior helicoidal

Ref. plano PFC – RP2

Ref. Cliente PFC – RP2

G.3. Rueda con dentado interior recto



DATOS DEL DENTADO RECTO INTERIOR			
D/F	Módulo normal (mm)	Mn	1,75
D/F	Número de dientes	z	25
D/F	Ángulo de presión (º)	α	20
D/F	Corrección de herramienta (adim.)	x	0
F	Diámetro exterior corregido (mm)	De	47,81
F	Diámetre de pie corregido (mm)	Dp	40,25
F	Altura de diente corregida (mm)	h	3,780
V	Espesor cordal corregido (mm)	ec	2,75
V	Altura cordal corregida (mm)	ac	1,79

FUNDACIÓ CIM

Pos	Cant	Material	Medidas en bruto	T.Térmico	Recubrimiento
1	1	F155	Ø60 – anchura 25mm	–	–

COTAS SIN TOLERANCIAS DIN 7168 EN GRADO MEDIO

Valores numéricos para medidas de longitud							Medidas angulares			
más de	0,5	3	6	30	120	315		10	50	120
hasta	3	6	30	120	315	1000	10	50	120	
	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1°	±30'	±20'	±10'

	Fecha	Nombre
Dibujado	10.8.2008	Jordi Brull
Comprobado	20.3.2009	Jordi Brull

MEDIDAS ENTRE CENTROS

AGUJEROS DE TORNILLOS ±0,2	AGUJEROS DE PASADORES ±0,02

Suavizar aristas

UPC

ETSEIB

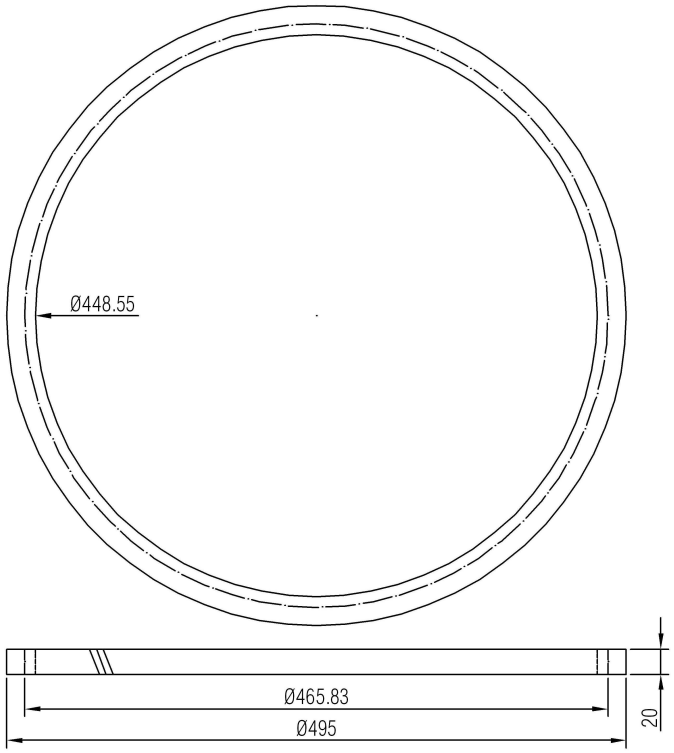
Escala: 1:1

Rueda con dentado interior recto

Ref. plano PFC – RP3

Ref. Cliente PFC – RP3

G.4. Rueda con dentado interior helicoidal



DATOS DEL DENTADO HELICOIDAL INTERIOR			
D/F	Módulo normal (mm)	Mn	4
D/F	Número de dientes	z	80
D/F	Ángulo de presión (º)	α	20
D/F	Corrección de herramienta (adim.)	x	0,5
F	Orientación	←→	izquierdas
D	Rodadura (Anchura*z/paso helicoidal > 1)	R	1,238
F	Ángulo helicoidal (º)	β	45
F	Paso helicoidal (mm)	Ph	1421,72
F	Diámetro exterior corregido (mm)	De	465,83
F	Diámetro de pie corregido (mm)	Dpe	448,55
F	Entrada a partir de tangencia (corregida) (mm)	h	8,640
V	Espesor cordal corregido incluido el juego extra	ec	4,60
V	Altura cordal corregida (mm)	ac	8,01

FUNDACIÓ CIM

Pos	Cant	Material	Medidas en bruto	T.Térmico	Recubrimiento
1	1	F155	Ø500– anchura 25mm	–	–

COTAS SIN TOLERANCIAS DIN 7168 EN GRADO MEDIO

Valores numéricos para medidas de longitud							Medidas angulares			
más de	0,5	3	6	30	120	315		10	50	120
hasta	3	6	30	120	315	1000	10	50	120	
	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1°	±30'	±20'	±10'

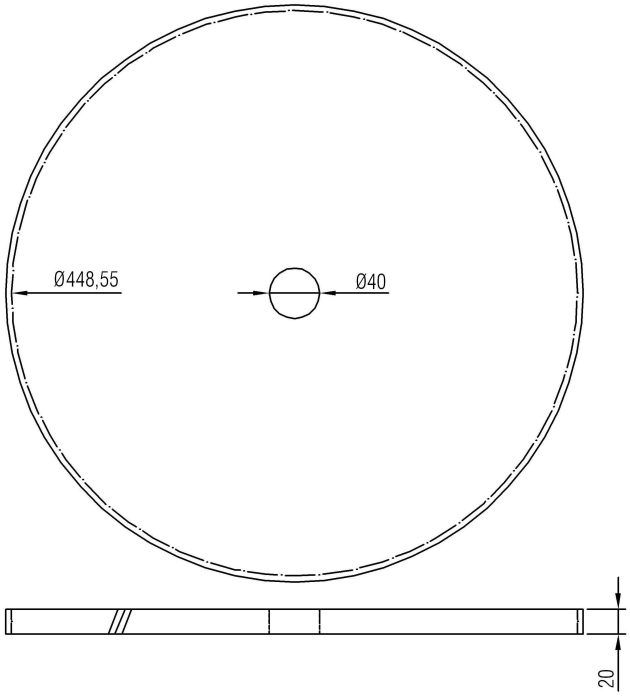
	Fecha	Nombre	MEDIDAS ENTRE CENTROS	
Dibujado	10.8.2008	Jordi Brull	AGUJEROS DE TORNILLOS ±0,2	AGUJEROS DE PASADORES ±0,02
Comprobado	20.3.2009	Jordi Brull	Suavizar aristas	

UPC

ETSEIB

Escala:		Ref. plano	PFC – RP4
1:5	Rueda con dentado interior helicoidal	Ref. Cliente	PFC – RP4

G.5. Electrodo para rueda con dentado interior helicoidal



DATOS DEL DENTADO HELICOIDAL EXTERIOR PARA FABRICAR INTERIOR			
D/F	Módulo normal (mm)	Mn	4
D/F	Número de dientes	z	80
D/F	Ángulo de presión (º)	α	20
D/F	Corrección de herramienta (adim.)	x	-0,5
F	Orientación	←→	derechas
D	Rodadura (Anchura*z/paso helicoidal > 1)	R	1,238
F	Ángulo helicoidal (º)	β	45
F	Diámetro exterior corregido (mm)	De	457,83
F	Diámetro de pie corregido (mm)	Dpe	448,55
F	Entrada a partir de tangencia (corregida) (mm)	h	8,640
V	Espesor cordal corregido incluido juego extra (mm)	ec	4,60
V	Altura cordal (mm) corregida (mm)	ac	8,01

FUNDACIÓ CIM

Pos	Cant	Material	Medidas en bruto	T.Térmico	Recubrimiento
1	1	F155	Ø500– anchura 25mm	–	–

COTAS SIN TOLERANCIAS DIN 7168 EN GRADO MEDIO

Valores numéricos para medidas de longitud							Medidas angulares			
más de	0,5	3	6	30	120	315		10	50	120
hasta	3	6	30	120	315	1000	10	50	120	
	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1°	±30'	±20'	±10'

	Fecha	Nombre
Dibujado	10.8.2008	Jordi Brull
Comprobado	20.3.2009	Jordi Brull

MEDIDAS ENTRE CENTROS
AGUJEROS DE TORNILLOS ±0,2 | AGUJEROS DE PASADORES ±0,02
Suavizar aristas

UPC
ETSEIB

Escala: 1:5

Electrodo para dentado interior helicoidal

Ref. plano: PFC – RP4 elec

Ref. Cliente: PFC – RP4 elec

H. ANÁLISIS ECONÓMICO

A continuación se adjunta un análisis de los costes que supone la implementación del proyecto. Se diferencia entre los costes de inversión iniciales y los costes fijos que se producen anualmente, así como las variables que dependen del volumen de piezas fabricadas.

Tras analizar los métodos empleados en la fabricación de ruedas dentadas en la Fundación, se han encontrado dificultades en el mecanizado y verificación de algún grupo de los mencionados. A causa de ello, a continuación se exponen las inversiones prioritarias dado que se prevé que se fabriquen aproximadamente unas 400 ruedas dentadas rectas exteriores, 300 ruedas dentadas helicoidales exteriores, 300 ruedas dentadas rectas interiores y 150 ruedas dentadas helicoidales interiores.

H.1. Inversión inicial

Los costes que se tienen que afrontar para iniciar el proyecto son los citados a continuación:

H.1.1. Coste de desarrollo del proyecto

El coste de desarrollo del proyecto, incluye los honorarios del diseñador del proceso de fabricación, teniendo en cuenta que el diseñador del proceso de fabricación ha dedicado un total de 1000 horas, a un precio la hora fijo de 36€/hora, da como resultado unos honorarios de 32.400€.

H.1.2. Coste del terreno y del edificio

En ser una ampliación de la maquinaria existente, el coste en terreno y edificio no es un coste añadido al que ya tenía la Fundación, por lo que se desestima esta partida.

H.1.3. Coste de la maquinaria

En este apartado se necesitan tener presentes los costes de las máquinas escogidas para realizar los dentados interiores, que son las que mayor gasto temporal (y por tanto económico) producen.

Principalmente, la inversión consiste en la adquisición de una mortajadora / talladora de piñón tallador de la marca Liebherr LS 180, que tiene las siguientes características:

Módulo [mm]	1/5
Diámetro del engranaje [mm]	180
Largo de carrera [mm]	30/55
Número de carrera [DH/min]	1.800/3.000

Tabla H.1: Características técnicas básicas de mortajadora Liebherr LS 180

La mortajadora es de la familia LS, como la LS 80 mostrada en la ilustración h.1 pero de mayor tamaño

Ilustración H.1: Aspecto externo de la mortajadora Liebherr LS 80

El coste aproximado de esta máquina es de unos 55.000€, amortizables en 10 años.

H.1.4. Coste de accesorios

H.1.4.1. Utillajes y útiles de verificación

En estos costes se necesita incluir los diferentes utillajes para realizar la sujeción de las piezas en la máquina, útiles de verificación como micrómetros y demás. En la tabla siguiente se muestra un resumen de las inversiones a realizar:

Elemento	Cantidad	€/unidad	€ / posición
Micrómetro de platillos	2	35,00	70,00
Micrómetro de exteriores	2	60,00	120,00
Micrómetro de exteriores	2	70,00	140,00
Utillajes	-	-	2000,00
		TOTAL:	**2330,00**

Tabla H.2: Coste de utillajes y útiles de verificación

Puede comprobarse que el peso importante del coste de estos elementos radica en los utillajes básicos que deben mecanizarse para poder fabricar un amplio rango de

piezas, si bien, si se hubieran de tallar ruedas dentadas un poco especiales, tiene que valorarse el coste del mecanizado del utillaje a parte.

La amortización de estos elementos se estima en unos 5 años.

H.1.4.2. Elementos de almacenaje y otros elementos

A continuación se estiman los elementos necesarios para trasladar y almacenar los componentes del producto del taller. Dado que se trata de una ampliación del taller, no se adquieren más elementos de transporte a los existentes, y sólo se adquieren los siguientes elementos de almacenaje:

Elemento	Cantidad	€/unidad	€ / posición
Estanterías	3	200,00	600,00
Cajas metálicas	20	12,00	240,00
Palets	5	8,00	40,00
		TOTAL:	**880,00**

Tabla H.3: Coste de elementos de almacenaje

Elemento	Coste (€)
Material de oficina	1000,00
Software Mori Seiki	2000,00
Software MMC	1500,00
Material informático	2000,00
TOTAL:	**6500,00**

Tabla H.4: Coste de otros elementos

La inversión a realizar en estos elementos es mínima, dado que, ya se dispone de estos elementos básicos en la Fundación, y por tanto, solamente se trata de complementar los elementos ya existentes. El tiempo de amortización es de 10 años.

H.1.4.3. Elementos propios del mecanizado

En función de los elementos que se quieran mecanizar, se deben adquirir unos elementos u otros. En la siguiente tabla se presenta una inversión tipo en material básico para el mecanizado (placas, portaherramientas, escariadores, ...), sobre la que se puede basar un cálculo de costes estándar. No se especifican con exactitud, dado que es función de la pieza que pida el cliente

Elemento	Fabricante	Cantidad	€/unidad	€/posición
Mango cilindrico portaplacas tornear	Sandvik	5	180,00	900,00
Mango cilindrico portaplacas mandrinar	Sandvik	10	200,00	2000,00
Portaherramientas	Sandvik	10	80,00	800,00
Escariadores	Seco	10	300,00	3000,00
Brocas	Stim tools	10	80,00	800,00
			TOTAL:	**7500,00**

Tabla H.5: Coste de los elementos necesario para el mecanizado

Se calcula que con los materiales expuestos en la tabla previa se dispone del material necesario para la mecanización de las ruedas dentadas estimadas que se fabrican en los 10 primeros años de funcionamiento.

H.1.4.4. Otros materiales (oficina y otras zonas)

Para poder realizar programas automáticos sencillos en la máquina de medir por coordenadas, se propone la adquisición de software especializado (módulo de metrología en ruedas dentadas). Del mismo modo, se propone la adquisición del módulo de mecanizado de ruedas dentadas en el centro multifuncional Mori Seiki. También debe hacerse una pequeña inversión en material variado de oficina y en material informático. El cómputo global de estos costes se detalla en la tabla siguiente:

Elemento	Coste (€)
Material de oficina	1000,00
Software Mori Seiki	2000,00
Software MMC	1500,00
Material informático	2000,00
TOTAL:	**6500,00**

Tabla H.6: Coste de materiales varios

De nuevo se vuelve a estimar que la amortización de estos elementos es de 10 años.

H.2. Costes fijos

Los costes fijos, incluyen las partidas de costes que no dependen del número de piezas fabricadas.

En este apartado, se incluyen los costes de amortización de la inversión inicial, el coste de la mano de obra directa, así como el consumo energético que no depende de las máquinas. También se consideran como costes fijos los costes de comunicaciones, agua, mantenimiento, seguro, servicio de limpieza, vigilancia, impuestos y provisiones.

En el caso de la Fundación CIM, los costes de manos de obra directa y consumo energético se estiman según la carga de trabajo que supone el proyecto con respecto a la carga que puede asimilar el grupo. En este caso, se estima que para la fabricación de las piezas arriba mencionadas, la carga de trabajo en el grupo es de un 5% (en este valor se incluyen gastos de comunicaciones, agua, mantenimiento, seguro, limpieza, vigilancia, impuestos y provisiones).

H.2.1. Costes de amortización

Los costes de amortización que implica la inversión inicial ascienden a la cantidad de **8204,00 €/año**.

H.2.2. Costes de mano de obra indirecta

La estimación de personal indirecto necesario en la planta está incluido en la partida general de la Fundación, y no es necesario que se contrate a ningún contable extra, ni responsables de taller o calidad, ya que absorben las funciones los ya existentes.

Para poder cuantificarlo en los diversos proyectos que realiza la Fundación, se estima que un 5% de los gastos que genera el personal recae en este proyecto, obteniendo unos gastos de:

Personal	Cualificación	Cantidad	Sueldo [€ brutos/mes]	Coste [€]
Director general	Ingeniero	1	2.500	35.000
Comercial	Ingeniero	1	2.000	28.000
Contable	Lic. contable	1	2.000	28.000
Administrativo	F.P.	1	1.500	21.000
Responsable de calidad	Ingeniero	1	2.000	28.000
Responsable de taller	Oficial de 1ª	1	1.800	25.200
			5% TOTAL:	**8.260**

Tabla H.7: Coste de mano de obra indirecta

H.2.3. Coste energético

Se debe incluir en esta partida el canon mensual que se paga de electricidad más el consumo debido a la iluminación y consumo de aparatos extras (material informático, consumo de maquinaria de metrología). Puesto que forma parte de una ampliación de taller y la potencia consumida no es superior a la potencia contratada previamente, no se tienen en cuenta costes de iluminación extra, ni de material eléctrico de oficina, por lo que del mismo modo que en el caso anterior, se destina el 5% de la partida general de la

Fundación a este ámbito. Teniendo en cuenta el coste de la Fundación del año pasado, se obtiene:

Tipo de gasto	€/año
Canon fijo de potencia contratada	14.322
Coste energético fijo	2.500
5% TOTAL:	**841**

Tabla H.8: Coste energético

H.2.4. Costes generales

De nuevo gastos de comunicaciones, servicio de limpieza, seguros, e impuestos municipales ya estaban contratados previamente. Se resumen en la siguiente tabla:

Tipo de gasto	€/año
Consumo de agua	2.000
Seguros	5.000
Impuestos munucipales	3.000
Comunicaciones	1.500
Mantenimiento	2.000
Servicio de limpieza	4.000
5% TOTAL:	**875**

Tabla H.9: Costes generales

H.3. Costes variables

Los costes variables incluyen partidas de costes que dependen directamente del número de piezas fabricadas.

En ellos se incluye mano de obra directa, material en bruto, consumo de herramientas y líquido de corte.

H.3.1. Coste de mano de obra directa

A partir de la estimación de personal necesario para la realización de las tareas programadas, se estima que se precisa la incorporación de un operario con calificación de Oficial de tercera, si bien no se dedica de forma exclusiva a realizar tareas de mecanizado de ruedas dentadas

A parte, del mismo modo que en el caso anterior, tiene que tomarse el 5% de los gastos de personal de la Fundación en esta partida:

Personal	Cualificación	Cantidad	Sueldo [€ brutos/mes]	Coste [€]
Operarios	Oficial de 3ª	3	1.200	16.800
Responsable de proyecto	Ingeniero	1	2.000	28.000
			5% TOTAL:	2.240

Tabla H.10: Coste de mano de obra indirecta

H.3.2. Coste de material

La mayor parte del material en bruto proviene de cilindro calibrado de acero suministrado por proveedor externo.

Se estima que el coste del material de partida es el siguiente (teniendo en cuenta que deben dejarse excedentes):

Elemento	Piezas	Material	Material de partida [mm]	Coste unitario [€]	Coste conjunto [€]
PFC-RP1	600	F-155	Ø50 x 25	2,20	1320,00
PFC-RP2	450	F-155	Ø50 x 25	2,20	990,00
PFC-RP3	450	F-155	Ø60 x 25	2,50	1125,00
PFC-RP4	200	F-155	Ø500 x 25	4,50	900,00
				TOTAL:	4335,00

Tabla H.11: Coste de material de partida

H.3.3. Coste energético variable

A partir del porcentaje de ocupación de cada máquina, del consumo eléctrico medio y aplicando la tarifa contratada, se obtiene un total estimado de 2000€/año

H.3.4. Coste de líquido de corte

El consumo de líquido refrigerante y de aceite de corte asciende a una cantidad de 300€/año. Este material es necesario para alargar la vida útil de la herramienta de corte y garantizar un buen acabado de las piezas, ya que a ninguna de ellas se le efectúa un tratamiento de acabado posterior al mecanizado.

H.3.5. Coste de las herramientas utilizadas

En el siguiente apartado se contabilizan el número de herramientas de corte necesarias en cada uno de los diferentes tipos de ruedas dentadas mecanizadas.

Son cálculos aproximados de número de herramientas necesarios para realizar el mecanizado de las piezas estimadas.

Elemento	Fabricante	Cantidad	€/unidad	€/posición
Placas de torneado	Sandvik	20	3,00	60,00
Placas de mandrinar	Sandvik	15	4,00	60,00
Fresas madre	Sandvik	1	600,00	600,00
			TOTAL:	**720,00**

Tabla H.12: Herramientas de corte empleadas

I. TRATAMIENTOS TÉRMICOS BÁSICOS EN RUEDAS DENTADAS

Cuando los engranajes que se han fabricado tienen que transmitir grandes pares a velocidades elevadas, las ruedas dentadas se han de someter a tratamiento térmico con el fin de soportar las solicitaciones y esfuerzos requeridos.

La elección de uno u otro depende de las necesidades del engranaje a fabricar y del coste del tratamiento térmico.

Cabe destacar que realizar un tratamiento térmico a cualquier elemento (en este caso particular de las ruedas dentadas, también) provoca modificaciones dimensionales que deben preverse a la hora de mecanizar los elementos y obtener las medidas proyectadas teóricamente.

Los principales tratamientos que se le practican a las ruedas son los siguientes

I.1. Carburizado

Es uno de los métodos más empleados para el endurecimiento superficial de los dientes. La rueda mecanizada se coloca en un medio carburizante y se calienta la capa superficial de los dientes de la rueda. Con ello, se consigue que la capa exterior absorba el carbono del ambiente (por difusión). Se mantiene a una temperatura elevada en estas condiciones durante un cierto tiempo (experimental) hasta que se obtiene una capa dura de la profundidad requerida, que proporciona la dureza deseada.

I.2. Nitrurado

Es un procedimiento de endurecimiento superficial que se aplica a las ruedas de acero. La rueda dentada a nitrurar recibe un tratamiento de bonificado para darle un endurecimiento promedio. Las zonas que no van a ser nitruradas deben ser cubiertas con placas de cobre u otro material adecuado con el fin de que no sean afectadas por el tratamiento. Posteriormente se coloca en el horno de nitruración calentándolo a unos 550ºC. El nitrurado se efectúa mediante gas amonio que se descompone en nitrógeno atómico e hidrógeno.

El nitrógeno atómico penetra lentamente en la superficie del acero y se combina con otros elementos aleantes del acero para formar nitruros de extraordinaria dureza. Un

acero con aleación de carbono exclusivamente, no puede ser nitrurado con éxito, debido a que los nitruros que se forman no son los deseados.

I.3. Endurecimiento por inducción

La rueda dentada se endurece superficialmente por medio de corrientes alternas de alta frecuencia. El proceso consiste en enrollar una bobina de inducción alrededor de cada diente (generalmente la pieza es girada dentro de la bobina) y aplicar tensión. En pocos segundos los dientes alcanzan temperaturas superiores a la crítica, después de este proceso la rueda dentada es retirada 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 la rueda dentada debe ser tratada térmicamente para que los efectos de dureza conseguidos sean los deseados.

I.4. Endurecido con llama

Proporciona un endurecimiento poco profundo mediante una llama oxiacetilénica empleando quemadores especiales. Para obtener un calentamiento uniforme generalmente se hace girar la rueda dentada en torno a la llama. La rueda dentada es semi-endurecida y los dientes se rebajan unas décimas fruto de las tensiones internas que provocan contracciones del material. A continuación se les da el acabado final antes de endurecerlos.

J. ESPECIFICACIONES GENERALES DE FABRICACIÓN

A continuación se muestran algunas especificaciones generales concernientes a la fabricación de ruedas dentadas empleando la maquinaria de que se dispone.

J.1. Fresas de módulo en fresadora convencional

En el mercado, existen los siguientes módulos normalizados para las fresas de módulo:

1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5
2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,5
5	5,5	6	6,5	7	8	9
10	11	12	14	16	18	20

Tabla J.1: módulos normalizados en el mercado

Para cada módulo de los mencionados en la tabla j.1, existen los siguientes juegos de fresas (en función del módulo se trata de un juego de 8 o de 15 fresas):

Nº de Fresa	Z	Nº de Fresa	Z
1	12-13	5	26-34
2	14-16	6	35-54
3	17-20	7	55-134
4	21-25	8	>135

Tabla J.2: Juego de 8 fresas para módulos 1-10

Nº de Fresa	Z	Nº de Fresa	Z
1	12	5	26-29
1½	13	5½	30-34
2	14	6	35-41
2½	15-16	6½	42-54
3	17-18	7	55-79
3½	19-20	7½	80-134
4	21-22	8	>135
4½	23-25		

Tabla J.3: Juego de 15 fresas para módulos >10

En función de tamaño y material, el precio de una fresa de módulo oscila los 100€, el coste de un juego completo de 8 fresas para un determinado módulo, oscila los 600€ y el juego de 15 los 2000€ (son fresas de mayor tamaño y más robustas).

En condiciones de corte normales (35-40 m/min), pueden trabajar durante unas 3-4 horas, y en condiciones de corte de máxima producción, pueden trabajar durante 1-2 horas. A medida que se van mecanizando piezas, se observa un desgaste de la herramienta **d** representado en la ilustración j.1. Cuando este valor se aproxima a los 0'3-0'6 mm (en función del módulo de la fresa), se considera que la herramienta está suficientemente gastada y tiene que afilarse si se desea continuar mecanizando ruedas dentadas con ella. Como se mencionó anteriormente, el valor de **d** es orientativo, ya que el acabado de la rueda y la calidad de la misma están muy relacionados con este parámetro.

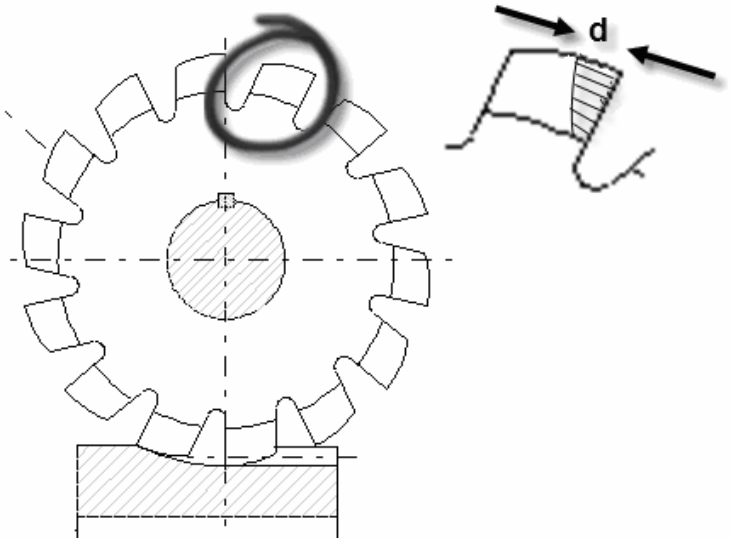


Ilustración J.1: Desgaste de la fresa de módulo

A continuación se presentan los datos técnicos propios de la maquinaria empleada en las pruebas de mecanizado realizadas en la Fundación:

1. La velocidad de corte tiene que estar comprendida entre los 20-25 mm/min

$$20 < Ø_{fresa\ módulo}[mm] * n[rpm] * \pi < 25$$

2. La fresadora horizontal empleada dispone de un plato divisor de constante 40. Esto quiere decir que si se desea fabricar una rueda dentada de 13 dientes (por ejemplo) se deberán realizar: $\frac{40}{13} = \frac{1}{13} + 3 = 3 + \frac{3}{39}$ vueltas de rueda, es decir, cada vez que se mecanice un diente, para mecanizar el siguiente se moverá la manivela del plato divisor hasta conseguir realizar las 3 vueltas completas y 3 agujeros del diámetro marcado con 39 divisiones.

J.2. Fresa madre en talladora

En el laboratorio común se dispone de una talladora de engranajes, con la que se pueden fabricar dentados exteriores de hasta 160 mm de diámetro, 120 mm de anchura y ángulo de hélice (en caso de precisar mecanizar ruedas cilíndricas helicoidales) de hasta 60º.

Además, según especificaciones de la máquina (obtenidas del manual) permite mecanizar ruedas dentadas de un mínimo de 6 dientes para dentado recto, y 12 y ángulo de hélice 20º en el caso de dentado helicoidal. Para un mayor número de dientes, el ángulo helicoidal puede ser mayor.

Para la adquisición de la fresa madre y poder así realizar el mecanizado de la rueda en la talladora de engranajes, se necesitan saber las siguientes características de la rueda dentada:

1. Ángulo de presión.

2. Módulo.

Cada fresa madre tiene un coste aproximado de unos 200-500€ (en función del módulo, fabricante y material de que esté realizada la fresa), pero para ruedas dentadas de módulos no mayores de 10 y materiales de construcción estándar, su precio ronda los 300€ y en condiciones de corte normales (mecanización de acero rápido y velocidades de corte de 35-40 m/min) tienen una durabilidad de unas 4-6 horas de corte. Una vez superada la vida útil de la herramienta, debería verificarse su desgaste de una forma similar al caso de la fresa de módulo y llevar a cabo el afilado que sea necesario o cambiarla por una fresa madre nueva.

Con respecto al afilado de la herramienta de corte, se debe tener en cuenta que si se demora mucho tiempo a afilarla, se perderá duración de vida de la herramienta, debido a que si no hay filos de corte (porque algunos están desgastados) o si están desgastados de forma muy desigual (y por tanto, unos filos trabajarán más que otros) unos filos sufrirán mucho el desgaste y otros apenas lo sufren, pudiendo provocar grietas tanto en la herramienta de corte como en la rueda dentada a mecanizar y además, se obtendrán peores acabados en la pieza a fabricar (una fresa madre muy gastada podría servir para hacer el desbaste de la rueda y a la hora de hacer acabados emplear una menos gastada, pero no sería viable por el coste que provocaría tanto tiempo de preparación de herramienta, y luego volver a hacer el centraje de la rueda dentada).

J.3. Electroerosión con hilo

En la máquina que se dispone en la Fundación, la pieza a mecanizar, se va refrigerando con un líquido que es una mezcla de agua y partículas antioxidantes. Dada la elevada cantidad de agua que contiene la mezcla, las piezas mecanizadas salen de la máquina con una capa externa de óxido que tiene que eliminarse mediante el soplado de aire y posterior pulido, con el fin de dar un mejor acabado. Las zonas por donde se fija la pieza a la máquina aparecen especialmente afectadas por este fenómeno de oxidación, por lo que estas zonas deben pulirse especialmente.

Con el fin de realizar el mecanizado del perfil, la máquina trabaja con programas CAM. En la Fundación, se trabaja con el programa Mastercam. Este programa es capaz de leer archivos almacenados en formato .dxf, crear el programa adecuado para mecanizar el perfil deseado y exportarlo a una extensión .nc (propia de la máquina de electroerosión).

El hilo de la máquina se va rompiendo conforme se va mecanizando la pieza, por lo que no puede hablarse de una duración de vida larga (con respecto al hilo de corte). Por lo que esta característica no afectará a la calidad final de la rueda mecanizada.

El tiempo de mecanizado es función del grosor y longitud de la pieza. El tiempo estimado para realizar un dentado interno de un grosor de unos 20mm y de diámetro de pie de 40mm son 2 horas. A este tiempo hay que añadirle preparación de máquina y posterior pulido de la pieza.

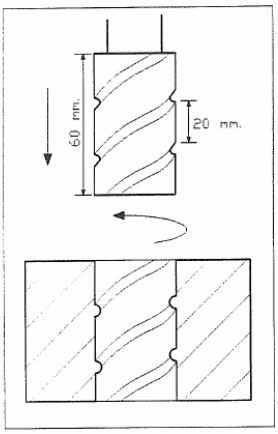
La corriente que pasa por el hilo es del orden de 1’5A, con una diferencia de potencial que ronda los 400V. Estos valores van oscilando a lo largo del mecanizado y varían en función del grosor y el material a mecanizar.

En la máquina de hilo pueden trabajarse piezas de acero, aluminio, cobre y otros materiales. Principalmente se mencionan estos materiales porque son los que suelen emplearse en los prototipos, salvo en el caso del cobre, pero en ser los electrodos de la máquina de electroerosión por penetración de este material, se ha querido incluir al cobre en el listado de materiales anterior.

J.4. Electroerosión por penetración

El lenguaje interno propio de la máquina ONA, permite realizar electroerosión helicoidal. La instrucción viene explicada en el manual y es la siguiente:

4.3.12. INTERPOLACION LINEAL/CIRCULAR/ HELICOIDAL INTERNA/HELICOIDAL EXTERNA.



EJEMPLO 4

Interpolación helicoidal interna horaria hasta –60 de paso 20 con retorno automático	N001 G06 X–60 P20 L08

Tabla J.4: Instrucción de máquina ONA TECHNO serie H

Primeramente, se tiene que fabricar el electrodo que mecaniza la pieza. Este electrodo es una rueda dentada helicoidal exterior con ciertas especificaciones diferentes. Las características que difieren entre el electrodo y una rueda dentada helicoidal exterior normal, son las siguientes (todas estas diferencias, están previstas en la hoja de cálculo adjunta en el CD Tabla de engranajes.xls):

1. La distancia Diámetro de pie – Diámetro primitivo es igual al módulo (en lugar de 1,16·M)

2. La distancia Diámetro primitivo – Diámetro exterior es igual a 1,16·M (en lugar de M)

3. Una corrección de herramienta positiva (negativa) en el dentado interior, implica una corrección de herramienta negativa (positiva) en el electrodo, que implica una reducción (ampliación) en el diámetro exterior.

4. Si el electrodo es a derechas, la pieza tiene dentado a izquierdas

Al fabricar mediante esta tecnología, se han de prever también los siguientes elementos:

1. GAP de erosión (es decir, coeficiente de corrección de herramienta provocado por la propia erosión que tiene que tenerse en cuenta para obtener las dimensiones deseadas en la pieza a mecanizar). Este coeficiente es función del material del electrodo, del material a erosionar y de un valor que se le introduce al programa interno de mecanizado llamado VDI. En una primera prueba, se aplica un GAP de

0'05 en radio. Este GAP puede depurarse más usando unas tablas incluidas en el manual de usuario de la máquina ONA.

2. Anchura del electrodo. Aunque la pieza tenga una anchura X, el electrodo debe mecanizarse con mayor anchura. De esta forma, se ahorra en cantidad de electrodos que tienen que mecanizarse para obtener una rueda dentada con un buen acabado y eliminar también con ella problemas de centrado de electrodos y pieza.

J.4.1. Observaciones sobre el electrodo

El electrodo, antes de ser introducido en la máquina de electroerosión, tiene que pulirse perfectamente, con el fin de que el perfil obtenido sea lo más perfecto posible y no se vea modificado por alguna pequeña viruta que pueda quedar incrustada en el electrodo. Además, cualquier imperfección afecta en una disminución de la velocidad de corte, puesto que tiene que erosionar y eliminar más material del debido.

Los datos del electrodo también pueden calcularse empleando la hoja de cálculo mencionada:

DATOS DEL DENTADO HELICOIDAL EXTERIOR PARA FABRICAR INTERIOR			
D/F	Módulo normal (mm)	Mn	4
D/F	Número de dientes	z	80
D/F	Ángulo de presión (º)	α	20
D/F	Corrección de herramienta (adim.)	x	-0,5
F	Orientación	↔	derechas
D	*Rodadura (Anchura*z/paso helicoidal > 1)*	*R*	*1,238*
F	Ángulo helicoidal (º)	β	45
F	*Diámetro exterior corregido (mm)*	*De*	*457,83*
F	*Diámetro de pie corregido (mm)*	*Dpe*	*448,55*
F	*Entrada a partir de tangencia (corregida) (mm)*	*h*	*8,640*
V	*Espesor cordal corregido incluido juego extra (mm)*	*ec*	*4,60*
V	*Altura cordal (mm) corregida (mm)*	*ac*	*8,01*

Tabla J.5: Cajetín de fabricación del electrodo

Con este electrodo se obtiene la siguiente rueda dentada helicoidal interior:

DATOS DEL DENTADO HELICOIDAL INTERIOR			
D/F	Módulo normal (mm)	Mn	4
D/F	Número de dientes	z	80
D/F	Ángulo de presión (º)	α	20
D/F	Corrección de herramienta (adim.)	x	0,5
F	Orientación	↔	izquierdas
D	*Rodadura (Anchura*z/paso helicoidal > 1)*	*R*	*1,238*
F	Ángulo helicoidal (º)	β	45
F	*Paso helicoidal (mm)*	*Ph*	*1421,72*
F	*Diámetro exterior exterior (mm)*	*De*	*465,83*
F	*Diámetro exterior (corregido) (mm)*	*Dpe*	*448,55*
F	*Entrada a partir de tangencia (corregida) (mm)*	*h*	*8,640*
V	*Espesor cordal corregido incluido el juego extra*	*ec*	*4,60*
V	*Altura cordal corregida (mm)*	*ac*	*8,01*

Tabla J.6: Cajetín de fabricación de la rueda dentada

El elemento comentado anteriormente como GAP, se introduce en la máquina mediante otro elemento íntegramente relacionado llamado VDI. Este elemento es también el principal valor que influye en el acabado de la pieza, puesto que está relacionado con la rugosidad deseada de la pieza mecanizada. En la tabla j.7 puede observarse la relación existente entre rugosidad de la pieza y VDI introducido en la máquina:

VDI 3402	Ra=CLA µm	Ra=CLA µinch	ISO 1302
0	0,10	4	N3
1	0,11	4,4	▽▽▽▽
2	0,12	4,8	
3	0,14	5,6	
4	0,16	6,4	
5	0,18	7,2	
6	0,20	8	N4
7	0,22	8,8	
8	0,25	10	
9	0,28	11,2	
10	0,32	12,8	
11	0,35	14	
12	0,40	16	N5
13	0,45	18	
14	0,50	20	
15	0,56	22,4	
16	0,63	25,2	
17	0,70	28	
18	0,80	32	
19	0,90	36	N6
20	1,00	40	▽▽▽
21	1,12	44,8	
22	1,26	50,4	

VDI 3402	Ra=CLA µm	Ra=CLA µinch	ISO 1302
23	1,40	56	
24	1,60	63	
25	1,80	72	N7
26	2,00	80	
27	2,2	88	
28	2,5	100	
29	2,8	112	
30	3,2	125	N8
31	3,5	140	
32	4,0	160	
33	4,5	180	
34	5,0	200	
35	5,6	224	
36	6,3	250	N9
37	7	280	▽▽
38	8	320	
39	9	360	
40	10	400	
41	11,2	448	
42	12,6	500	N10
43	14	560	▽
44	16	640	
45	18	720	

Tabla J.7: Relación entre GAP y rugosidad

Con un valor de 24 (que para un electrodo de cobre erosionando una pieza de acero equivale a un GAP 0'05) se obtiene un buen acabado de la rueda dentada.

El tiempo (experimental) que tarda en realizar el mecanizado se detalla a continuación:

- En 24 horas se han erosionado 4mm de una pieza de diámetro exterior corregido de 448’55mm de acero. VDI=24 (equivale a un GAP de 0’05)

- En 24 horas se han erosionado 20mm de la misma pieza de diámetro exterior corregido 448’55mm de acero. VDI=32 (equivale a un GAP de 0’15).

K. RESTO DE MAQUINARIA EN LA FUNDACION CIM Y LABORATORIO COMÚN

K.1. Fundación CIM

K.1.1. Danobat Danocenter NI-1200

Torno de control numérico de 5 ejes compuesto por 2 torretas donde pueden almacenarse hasta un máximo de 16 herramientas de corte simultáneamente (8 por cada torreta)

Puede llegar a tornear piezas (metálicas y plásticas) de hasta un máximo de 300 mm de diámetro y 400 mm de largo.

Ilustración K.1: Danobat Danocenter NI-1200

K.1.2. Deckel Maho DMU 50 Evolution

Centro de mecanizado de 5 ejes, con cabezal de alta velocidad y capacidad para almacenar hasta 32 herramientas.

Puede llegar a mecanizar piezas de unas dimensiones máximas de 300 x 300 x 300 mm

Ilustración K.2: Deckel Maho DMU 50 Evolution

K.1.3. GER S-80/40

Rectificadora hidráulica de superficies planas.

Máxima longitud rectificable: 800mm. Máxima anchura rectificable: 450mm. Recorrido del eje transversal: 400mm

Ilustración K.3: GER S-80/40

K.1.4. Milltronics RH20

Centro de mecanizado vertical de 3 ejes, que dispone de control numérico.

Recorrido máximo XYZ de 1015x510x610mm.

Ilustración K.4: Milltronics RH20

K.1.5. OKUMA MC40H

Centro de mecanizado de 4 ejes con almacén automático de hasta 30 herramientas de corte. Puede colocarse un palpador para el centraje de la pieza en bruto previo mecanizado.

Ilustración K.5: Okuma MC40H

K.1.6. Prensa hidráulica Orion

Maquinaria no empleada en el presente proyecto, pero a la que en un principio se estudió la posibilidad de incorporarle una herramienta de corte y emplearla como mortajadora.

Ilustración K.6: Prensa hidráulica Orion

K.1.7. Zoller V420

Máquina para la medida y presetting de las herramientas de corte

Ilustración K.7: Zoller V420

K.1.8. Mitutoyo BHN710

Máquina de medir por coordenadas para mediciones directas o para digitalizaciones.

Mediante esta máquina se realizan informes dimensionales, así como verificación de cotas y estudios de capacidad. Se realizó un programa para la verificación de perfiles de ruedas y comprobar las principales dimensiones.

Ilustración K.8: Mitutoyo BHN710

K.1.9. Torno manual y sierra

Torno de 2 ejes para realizar pequeños ajustes de piezas y sierra convencional para realizar el corte de la pieza tubular en bruto previa alimentación en máquina

K.2. Laboratorio común de mecánica de la ETSEIB

K.2.1. Tornos, fresadoras, rectificadoras y sierras convencionales

En el laboratorio común de mecánica de la ETSEIB se dispone de varios tornos manuales convencionales para el mecanizado de las diferentes piezas, así como de dos fresadoras universales. Se trata de máquinas de 2 ejes.

Además se dispone de una sierra para el precorte de la pieza en bruto así como una rectificadora que permite realizar operaciones de rectificado en las piezas mecanizadas en el laboratorio.

K.2.2. Resto de Maquinaria

Además de la maquinaria anteriormente descrita, en el laboratorio común de mecánica de la ETSEIB se dispone de una sala especialmente acondicionada para el cálculo de rugosidades de pieza y para la verificación de cotas. Esta sala está a temperatura controlada de forma que no pueda haber interferencias en la medida y verificación.

K.3. Formación del personal de la Fundación CIM

En la Fundación CIM se dispone de doctores en ingeniería, ingenieros, torneros y becarios procedentes de ingenierías superiores, ingenierías técnicas y de diversos módulos de mecanizado de piezas. Además se dispone de personal ampliamente cualificado y con una gran experiencia en el sector de I+D que permite realizar proyectos con una gran gama de aplicaciones.

Asimismo, se dispone de la ayuda en el desarrollo de los procesos teóricos por parte del personal de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), especialmente de la ETSEIB, y de otras instituciones adheridas al XARTAP (Red de referencia en técnicas avanzadas de la producción), institución a la que pertenece la Fundación CIM.