DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Escuela Técnica Superior de
Ingenieros Industriales

Estimación en proceso de las condiciones de corte en fresado periférico

Autor: D. Erardo Leal Muñoz
Ingeniero Civil Industrial

Directores: D. Antonio Vizán Idoipe
Dr. en Ingeniería Mecánica
D. Eduardo Diez Cifuentes
Dr. en Ingeniería Mecánica

*A mi esposa Natalia
y a nuestros hijos Mateo y Ariel*

Agradecimientos

La tesis doctoral que a continuación se presenta no habría sido posible sin el constante apoyo y motivación de cada una de las personas con las que me he relacionado en este periodo y que han sido partícipes de esta etapa.

Con especial atención agradezco a mi esposa Natalia por involucrarse en esta aventura y por su constante apoyo en cada una de las etapas que hemos pasado en nuestra estadía en España, por ser un pilar y por entregarme su amor incondicionalmente.

Le agradezco a los tutores de esta tesis, Profesor Antonio Vizán Idoipe y al Profesor Eduardo Diez Cifuentes, muchas gracias por el tiempo dedicado, el conocimiento y la guía en estos años. Eduardo, muchas gracias por animarme y ayudarme a no decaer. Profesor Vizán, gracias por el cariño hacia mi y mi familia, gracias por incentivar en mi una actitud reflexiva y crítica en todo ámbito, más allá de este trabajo.

Agradezco a los profesores del grupo de fabricación José Ríos, Jesús Pérez, Juan Carlos Hernández, Miguel Clavijo, Juan Márquez, Luis Ríos y José Ramón Álvarez por el tiempo compartido. Agradezco a la Profesora Hilde Pérez García de la Universidad de León por sus consejos y aportaciones a esta tesis. Le agradezco a los técnicos de laboratorio Ramón San Miguel y Javier Tena por su apoyo en la parte experimental de esta tesis, por su disposición y el conocimiento transmitido.

Les agradezco a mis compañeros del doctorado Marcelo Fajardo Pruna y Eugenio Ferreras Higuero, por su amistad, disposición y compañerismo. A Luis López Estrada por todas las charlas y cafés, gracias por tu amistad y apoyo.

Muchas gracias a mis amigos en España, en especial a Antonio Trasancos y Eduardo Caballero por hacer que el tiempo en Madrid haya sido todavía mejor, gracias por esos días frente a la roca madrileña. Seguro que volveremos a encordarnos.

Gracias a mis padres Cecilia y Erardo por su apoyo incondicional, por su crianza y por siempre incentivarme a cumplir mis sueños. Agradezco a mis familiares y hermanos, en especial a mi hermana Melitza, gracias por tus mensajes, definitivamente cada lunes comenzaba de una manera especial con tus muestras de afecto.

Agradezco a las instituciones que financiaron mi estancia en España, CONICYT Chile, mediante su programa Becas Chile, nº 72170282 y a la Universidad de La Frontera.

Índice general

Agradecimientos	IV
Resumen	XXI
Abstract	XXIII
1 Introducción	1
1.1 Objetivos de la tesis	2
1.2 Estructura de la tesis	3
2 Estado del arte	5
2.1 Metodologías de estimación de las profundidades de corte	5
2.2 Modelado de las fuerzas de corte en fresado	14
2.2.1 Modelos de estimación de las fuerzas de corte en fresado basados en la presión específica de corte	16
2.3 Análisis dinámico en procesos con arranque de viruta	19
2.4 Incertidumbre en las mediciones de procesos de fabricación	22
2.5 Conclusiones del capítulo	25
3 Bases para la estimación	27
3.1 Modelo de fuerzas de corte	27
3.2 Análisis de la influencia de las condiciones de mecanizado en la señal de fuerza de corte	33
3.2.1 Influencia de los parámetros de mecanizado en la forma de las señales de fuerza simuladas	34

3.3	Relación entre la geometría del proceso de corte y la señal temporal de las fuerzas de corte	37
3.4	Influencia del alabeo de la herramienta en el perfil de la señal de fuerza	38
3.5	Conclusiones del capítulo	40
4	Metodología de detección	41
4.1	Bases de la estimación de los parámetros de corte	41
4.2	Obtención de los tiempos de proceso en la señal de fuerza	44
4.3	Resultados preliminares	46
4.3.1	Estimación de la profundidad de corte radial	46
4.3.2	Estimación de la profundidad de corte axial	48
4.4	Respuesta dinámica del proceso de mecanizado y su influencia en la estimación de las profundidades de corte	50
4.4.1	Relación entre el tiempo de retraso y los parámetros de mecanizado	55
4.5	Conclusiones del capítulo	58
5	Análisis de incertidumbre y sensibilidad	61
5.1	Análisis de incertidumbre de la medida de los parámetros para la estimación de las profundidades de corte	61
5.1.1	Incetidumbre de la estimación de la profundidad de corte axial	62
5.1.2	Incetidumbre de la estimación de la profundidad de corte radial	64
5.1.3	Incetidumbre en la medida de los parámetros para la estimación de las profundidades de corte	65
5.1.4	Resultados del análisis de incertidumbre	69
5.2	Análisis de sensibilidad de los tiempos de entrada y salida en relación a las profundidades estimadas	73
5.3	Conclusiones del capítulo	75
6	Resultados experimentales	77
6.1	Procedimiento para los ensayos de estimación	77

6.2	Ensayos de mecanizado	81
6.2.1	Resultados con profundidad de corte radial variable	82
6.2.2	Resultados con profundidad de corte axial variable	84
6.2.3	Resultados con variación simultánea de la profundidad de corte radial y axial	87
6.3	Conclusiones del capítulo	90
7	Conclusiones	91
7.1	Trabajos futuros	93
7.1.1	Desarrollo de un sistema de control adaptativo para fresado	94
7.1.2	Estimación de las profundidades de corte en operaciones que presenten superposición de filos	94
	Bibliografía	95

Índice de figuras

2.1	Resultados de Altintas y Yellowley, (a) radio de inmersión y (b) profundidad axial de corte. (Altintas y Yellowley 1987)	6
2.2	Diagrama de flujo del algoritmo de estimación de las profundidades de corte de Hwang et al. (Hwang et al. 2003)	9
2.3	Clasificación de los tipos de corte para herramientas de más de un filo en fresado de acabado. (L. Yang et al. 2005)	10
2.4	Montaje de los sensores en Prickett et al. (Prickett et al. 2011) . . .	11
2.5	Arquitectura de la red neuronal para la estimación de la profundidad de corte radial. (Gaja y Liou 2016)	12
2.6	Tiempo de corte cuando sólo se encuentra un filo a la vez en contacto con la pieza. (Marinescu y Axinte 2009)	13
2.7	Resumen de las metodologías utilizadas en los diversos trabajos para la estimación de las profundidades de corte.	13
2.8	Modelado del sistema pieza herramienta en fresado. (Altintas, Stepan et al. 2008)	19
2.9	Diagrama de lóbulos para diversas condiciones de corte. (Gurdal et al. 2016)	20
2.10	Equipamiento para un ensayo de impacto. (Yan et al. 2016)	21
2.11	Tipos de análisis de incertidumbre.	23
2.12	(A) Propagación de incertidumbre según la GUM y (B) propagación de distribuciones basada en me método de Montecarlo. (P. Pérez et al. 2019)	24
3.1	Ángulos y parámetros geométricos.	28
3.2	Evolución de la presión específica de corte con el espesor de viruta.	31
3.3	Evolución de la presión específica de corte con el espesor de viruta. Reajuste de k_a . (a) PVC, (b) PTFE.	32

3.4	Fuerza de corte simulada ($D = 8$ mm, $n = 3.000$ rpm, $a_p = 4$ mm, $a_e = 0,5$ mm, $f_z = 0,2$ mm, $N = 3$).	33
3.5	Diferentes zonas a lo largo del paso del filo por la pieza de trabajo.	34
3.6	Evolución de la fuerza de corte con el aumento de a_p ($f_z = 0,12$ mm, $a_e = 0,5$ mm, $n = 1.200$ rpm, $D = 8$ mm, $N = 1$).	35
3.7	Evolución de la fuerza de corte con el aumento de a_e ($f_z = 0,04$ mm, $a_p = 12$ mm, $n = 1.200$ rpm, $D = 8$ mm, $N = 1$).	35
3.8	Evolución de la fuerza de corte con el aumento de f_z ($a_e = 0,5$ mm, $a_p = 8$ mm, $n = 3.000$ rpm, $D = 8$ mm, $N = 1$).	36
3.9	Ángulos en el proceso de fresado de acabado.	37
3.10	(A) trayectorias de los filos para una herramienta de dos filos con alabeo, (B) efecto del alabeo en una señal de fuerza.	39
3.11	Señales de fuerza (A) con alabeo, (B) sin alabeo ($D = 10$ mm, $n = 5.000$ rpm, $a_p = 4$ mm, $a_e = 1$ mm, $f_z = 0,1$ mm, $N = 2$, $\rho = 0,01$ mm, $\lambda = 0^\circ$).	39
4.1	Zona de corte de un filo para diferentes configuraciones de herramienta y condiciones de corte.	42
4.2	(A) Posición angular y (B) tiempos del proceso.	43
4.3	Ajuste del sensor de posición con respecto a la punta de la herramienta.	45
4.4	Tiempos considerados durante el procedimiento de medición.	45
4.5	Evolución de la fuerza simulada y medida para diferentes profundidades de corte radial.	47
4.6	Evolución de la fuerza simulada y medida para diferentes profundidades de corte axial.	49
4.7	Señal de fuerza real y señal de fuerza simulada.	50
4.8	Salida del filo de la herramienta para diferentes velocidades de giro del husillo.	51
4.9	Señal de fuerza real y señal de fuerza teórica.	53
4.10	Evolución del tiempo de retraso para diferentes profundidades de corte axial y velocidades de giro.	56
4.11	Evolución del tiempo de retraso para diferentes profundidades de corte radial y velocidades de giro.	57

5.1	Incertidumbre en la medición de la señal triangular.	66
5.2	Incertidumbre en la medición de la señal cuadrada.	67
5.3	Ajuste del retraso y su desviación.	69
5.4	Incertidumbre relativa de a_e para diferentes diámetros de herramienta.	70
5.5	Incertidumbre relativa de a_p para diferentes diámetros de herramienta.	70
5.6	Incertidumbre relativa de a_p para diferentes ángulos de hélice ($D = 8$ mm).	71
5.7	Incertidumbre relativa de a_p para diferentes configuraciones de muestreo (A) diámetro 8 mm, (B) diámetro 10 mm.	72
5.8	Incertidumbre relativa de a_e para diferentes configuraciones de muestreo (A) diámetro 8 mm, (B) diámetro 10 mm.	72
5.9	Sensibilidad del tiempo de entrada, (A) en periodo, (B) en velocidad de giro.	74
5.10	Sensibilidad del tiempo proyectado, (A) en periodo, (B) en velocidad de giro.	74
6.1	Equipamiento utilizado para los ensayos de mecanizado.	78
6.2	Disposición de los elementos en el centro de mecanizado.	78
6.3	Cadena de medición para los ensayos de mecanizado.	79
6.4	Diagrama del flujo de información en el programa de estimación implementado en LabVIEW 12.	80
6.5	Enfoque global adoptado para los ensayos de mecanizado.	81
6.6	Probeta para los ensayos de mecanizado con variación de la profundidad de corte radial.	82
6.7	Señal de fuerza obtenida durante el ensayo con profundidad de corte radial variable.	83
6.8	Profundidades de corte radiales estimadas durante el ensayo de mecanizado.	84
6.9	Probeta para ensayos de profundidad axial variable.	85
6.10	Señal de fuerza obtenida durante el ensayo con profundidad de corte axial variable.	86

6.11 Profundidades de corte axiales estimadas durante el ensayo de mecanizado.	86
6.12 Probeta para ensayo de profundidad axial y radial variables.	87
6.13 Resultados del ensayo de profundidad de corte axial y profundidad de corte radial variables en la señal de fuerza.	88
6.14 Resultados del ensayo de profundidad de corte axial y profundidad de corte radial variables.	89

Índice de tablas

2.1	Tipos de modelos según método de estimación de la fuerza. (H. Pérez 2012)	15
3.1	Condiciones de corte para ensayos de estimación de los coeficientes de la presión específica de corte.	31
3.2	Condiciones de corte para ensayos de estimación de los coeficientes de la presión específica de corte según metodología propuesta.	32
4.1	Condiciones de corte para el ensayo preliminar para la estimación de a_e	46
4.2	Resultados de la medición para distintos valores de a_e	47
4.3	Condiciones de corte para el ensayo preliminar para la estimación de a_p	48
4.4	Resultados de la medición para distintos valores de a_p	49
4.5	Condiciones de corte para el análisis de la salida de la herramienta para diferentes velocidades.	52
4.6	Funciones de transferencia ajustadas para diferentes condiciones de mecanizado.	54
4.7	Condiciones de corte para los ensayos de análisis del tiempo de retraso.	55
4.8	Resultados de la regresión lineal para la velocidad de giro y la profundidad de corte axial.	56
4.9	Resultados de la regresión lineal para la velocidad de giro y la profundidad de corte radial.	57
4.10	Resultados de la regresión lineal para la velocidad de giro, la profundidad de corte radial y la profundidad de corte axial.	58

5.1	Configuración de adquisición de datos para el análisis de incertidumbre de los tiempos de proceso.	67
5.2	Condiciones de corte para el ensayo de ajuste de la incertidumbre del tiempo de retraso.	68
6.1	Condiciones de corte para ensayo de profundidad de corte radial variable.	82
6.2	Resumen de resultados del ensayo para la profundidad de corte radial variable.	84
6.3	Condiciones de corte para ensayo de profundidad de corte axial variable.	85
6.4	Resumen de resultados del ensayo para profundidad de corte axial variable.	87
6.5	Condiciones de corte para ensayo de profundidad de corte radial y axial variables.	88
6.6	Resumen de resultados del ensayo para la profundidad de corte axial y profundidad de corte radial variables.	90

Nomenclatura

$\Delta_{t_{exit}}$	Tiempo de retraso	[s]
a_e	Profundidad de corte radial	[mm]
a_{e_i}	Profundidad de corte radial del filo i	[mm]
a_p	Profundidad de corte axial	[mm]
a_{pa}	Profundidad de corte axial actual	[mm]
a_{p_i}	Profundidad de corte axial del filo i	[mm]
D	Diámetro de la herramienta	[mm]
D_{r_i}	Diámetro real de la herramienta considerando el alabeo	[mm]
F_a	Fuerza de corte axial	[N]
F_r	Fuerza de corte radial	[N]
F_t	Fuerza de corte tangencial	[N]
F_x	Fuerza de corte en la dirección X	[N]
F_y	Fuerza de corte en la dirección Y	[N]
F_z	Fuerza de corte en la dirección Z	[N]
f_z	Avance por filo	[mm]
k_a	Presión específica de corte en la dirección axial	[N/mm ²]
k_r	Presión específica de corte en la dirección radial	[N/mm ²]

k_t	Presión específica de corte en la dirección tangencial	$[N/mm^2]$
k_{a0}	Coeficiente de la presión específica de corte en la dirección axial	$[-]$
k_{r0}	Coeficiente de la presión específica de corte en la dirección radial	$[-]$
k_{t0}	Coeficiente de la presión específica de corte en la dirección tangencial	$[-]$
n	Velocidad de giro del husillo	$[rpm]$
N	Número de filos de la herramienta	$[-]$
R_i	Radio del filo i	$[mm]$
S_r	Muestras por revolución	$[S/revolución]$
T	Periodo de giro del husillo	$[s]$
t'_{eni}	Tiempo de entrada del filo i con respecto a la medida	$[s]$
t'_{exit_i}	Tiempo de salida del filo i con respecto a la medida	$[s]$
t'_{pul}	Tiempo de entrada del pulso analógico con respecto a la medida	$[s]$
t'_{ref}	Tiempo para posicionar el pulso de referencia con respecto a la medida	$[s]$
t_{eni}	Tiempo de entrada del filo i con respecto a la referencia	$[s]$
t_{ex_i}	Tiempo de salida del filo i en relación al ángulo de salida	$[s]$
t_{exit_i}	Tiempo de salida del filo i con respecto a la referencia	$[s]$

t_{pri}	Tiempo proyectado del filo i	[s]
t_{pul}	Tiempo entre el pulso analógico y el pulso de referencia	[s]
V	Velocidad de avance	[m/min]
α	Ángulo entre la lamina reflectora y el filo de referencia	[rad]
δ	Incertidumbre	[-]
λ	Posición del alabeo de la herramienta	[rad]
λ_s	Ángulo de hélice de la herramienta	[rad]
ξ	Coeficiente de amortiguamiento	[-]
ρ	Alabeo de la herramienta	[μm]
φ	ángulo de posición del filo	[rad]
φ_{en}	Ángulo de entrada	[rad]
φ_{en0}	Ángulo de entrada nominal	[rad]
φ_{eni}	Ángulo de entrada del filo i	[rad]
φ_{pr}	Ángulo proyectado del filo de la herramienta	[rad]
ω_n	Frecuencia natural	[rad/s]

Resumen

Los sistemas modernos de fabricación impulsados por la industrial 4.0 y metodologías como la gestión de la vida del producto han propiciado sistemas de medida en línea para máquinas herramienta. El objetivo es tener la mayor cantidad de información para poder modificar parámetros durante el proceso a fin de optimizar el rendimiento general del sistema.

En este trabajo se propone una metodología que permite la estimación de las profundidades de corte en fresado periférico de acabado mediante la medición de los tiempos de entrada y salida de la herramienta en una señal de fuerza. La metodología desarrollada considera aspectos dinámicos relacionados con el sistema de fabricación (máquina herramienta) y el sistema de medición de fuerzas.

Se ha utilizado un modelo de fuerzas de corte basado en el espesor medio de viruta que considera el alabeo de la herramienta. Este modelo ha permitido estudiar el comportamiento de las señales de fuerza y su relación con los cambios en las condiciones de corte. El modelo de fuerzas de corte también ha sido utilizado en la implementación de una metodología para la determinación de los parámetros dinámicos del sistema de fabricación.

Se llevó a cabo un análisis de incertidumbre de los parámetros para la determinación de las profundidades de corte, detectando la influencia relativa que cada parámetro de la estimación tiene sobre las profundidades calculadas. En línea con este análisis de incertidumbre se realizó un análisis de sensibilidad con el objetivo de detectar el impacto que las variaciones de los parámetros tienen sobre las profundidades de corte.

La metodología propuesta se validó a través de una serie de ensayos de mecanizado. En estos ensayos se han utilizado probetas con una geometría variable, lo que permitió probar la capacidad de la metodología para identificar las variaciones en la profundidad de corte tanto axial como radial. También se han realizado ensayos en una probeta, que por su geometría genera una variación

de ambas profundidades de corte. Los resultados muestran que la metodología es capaz de determinar con un alto nivel de precisión las profundidades de corte radial y axial durante el proceso de manera simultánea, utilizando sólo una componente de la señal de fuerza.

Abstract

Modern manufacturing systems impulsed by Industry 4.0 and methodologies as Product Life Management has been propitiated on-line measuring systems in machine tools. The aim is have a big amount of information in order to modificate parameters in process, to optimize and improve the performance of the system.

In this work, a new methodology to estimate cutting depths in end milling is presented. The methodology works through the measuring of enter and exit time in a cutting force signal. Developed methodology considers dynamics aspects of the manufacturing system (machine tool) and force measuring system.

A cutting force model based on mean chip thickness that considers tool runout has been utilized. The cutting model has allowed to study the behaviour of force signals and it relation with cutting conditions. The cutting force model has been used in the implementations of a new methodology to determine dynamic parameters of the machining system.

An uncertainty analysis of depth of cut estimation parameters has been carried out. Through this uncertainty analysis has been possible to detect the influence of each estimation parameter in the estimated depth of cut value. Also an sensitivity analysis was performed. The main objective of this sensitivity analysis is study the impact that the variation of estimation parameters has in the estimated depth of cut.

A serie of cutting experiments has been carried out. Variable geometry workpiece has been used, this allows to test the estimation capacity of the proposed methodology. An experiment with a workpiece that allows to vary both axial depth of cut and radial depth of cut was carried out. Results shows that the methodology it is capable to determine with high accuracy radial and axial depth of cut. The detection is carried out during the process and from just one force signal.

Capítulo 1

Introducción

Hoy en día es frecuente encontrar sistemas de fabricación altamente automatizados. Acciones como las propuestas por la iniciativa Industria 4.0 (Roblek et al. 2016), están centradas en la inclusión de sistemas automáticos y sistemas de fabricación inteligente (Esmaeilian et al. 2016) apuntando a aumentar la productividad. Con todo ello, la intervención del operador se ha visto reducida en el sistema de producción. Sin embargo, muchos de esos procesos aún poseen un reducido nivel de autonomía y toma de decisión, por lo que aún requieren de la intervención del operador.

Desde una perspectiva técnica de la evolución de la industria, las operaciones de fresado con profundidades radiales pequeñas están siendo utilizadas cada vez con más frecuencia. Además de las operaciones típicas de fresado de acabado, actualmente es frecuente encontrar estrategias de fresado donde la profundidad radial es muy reducida, como es el caso, del fresado trocoidal en ranurado, fresado trocoidal lateral, entradas de la herramienta en arco, etc. En estas operaciones el valor de la profundidad de corte afecta considerablemente a las fuerzas de corte y a la estabilidad del proceso.

Debido a las situaciones antes mencionadas y con objeto de mantener las condiciones óptimas del fresado, deberían cambiarse simultáneamente las condiciones de mecanizado. Para ello, sería preciso reconocer el ancho y la profundidad real en cada momento durante el mecanizado con el fin de reaccionar en tiempo real sobre la máquina. La determinación de estos parámetros para optimizar las condiciones de corte, también tiene interés en otras situaciones como en el caso de la determinación y corrección de defectos y deformaciones en el fresado flexible (Masmiati et al. 2016), en el fresado con herramientas poco rígidas o en el microfresado (X. Zhang, Ehmann et al. 2016), donde el ancho y la profundidad de corte determinan la carga a la que está sometida la herramienta

y también su utilización óptima.

En este sentido, es importante enfatizar el rendimiento de sistemas en línea con el objetivo de obtener información sobre el estado del proceso de mecanizado y como se está desarrollando. Por todo ello el desarrollo de un método que permita identificar en cada momento las profundidades axiales y radiales de la herramienta, es un paso previo necesario para conseguir un proceso de fresado más eficiente mediante la optimización de las condiciones de corte o la corrección de errores de deformación en tiempo real con sistemas de control adaptativo.

Con el objetivo de avanzar en la dirección de tener procesos de fabricación más inteligentes y acordes a la evolución general propiciada por la Industria 4.0, esta tesis busca determinar las profundidades de corte radial y axial en línea a partir del estudio de los tiempos de entrada y salida de la herramienta en operaciones de fresado periférico de acabado.

1.1 Objetivos de la tesis

El objetivo general de esta tesis es el desarrollo de una metodología que permita estimar las profundidades de corte en fresado periférico a partir de la determinación de los tiempos de entrada y salida de la herramienta en una señal medida durante el proceso.

Para la consecución del objetivo de esta tesis se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- Proponer un procedimiento para estimar profundidades de corte axiales y radiales en fresado periférico.
- Identificar el efecto de la variación de las profundidades radiales y axiales en la señal de fuerza mediante el uso de un modelo de fuerzas de corte.
- Desarrollar una metodología de estimación de las profundidades de corte axiales y radiales basada en los tiempos de entrada y salida del filo de la herramienta para fresas periféricas en operaciones de acabado.
- Evaluar la respuesta dinámica del sistema de mecanizado y su influencia en la señal de las fuerzas de corte y en la respuesta de la entrada y salida de la herramienta.

- Realizar un análisis de la capacidad y precisión de la metodología propuesta mediante un análisis de sensibilidad e incertidumbre.
- Proponer un método de estimación en proceso de las profundidades de corte radiales y axiales para fresado de acabado.

1.2 Estructura de la tesis

Esta tesis está dividida en siete capítulos, a continuación se presenta un breve resumen de los temas desarrollados en cada uno de ellos.

En el Capítulo 1 se establece el marco en el que se desarrolla esta tesis, los objetivos propuestos y un resumen de los temas tratados en cada capítulo.

El capítulo 2 muestra un resumen de los fundamentos teóricos que dan sustento a esta tesis, se muestran los principales aportes de otros investigadores en cuanto a modelado de fuerzas de corte y en cuanto a metodologías para la estimación de parámetros de mecanizado en fresado y otras operaciones con arranque de viruta.

En el capítulo 3 se desarrolla el modelo de fuerzas de corte basado en la presión específica de corte, se presenta una nueva metodología para la obtención de los parámetros de la presión específica de corte y se evalúa la influencia de los principales parámetros de mecanizado en la forma de las fuerzas de corte.

El capítulo 4 presenta el método de estimación de las profundidades de corte. Se desarrollan las expresiones de estimación basadas en la medición de los tiempos de entrada y salida de la herramienta y se realiza una primera estimación de prueba.

Dado que se identifica la influencia de la dinámica del proceso de fresado en la capacidad de estimación de las profundidades de corte, se estudia y caracteriza el sistema de mecanizado y medición mediante un sistema dinámico ajustado a partir de la señal de fuerza obtenida mediante el modelo de fuerzas de corte. Además se realiza un modelado mediante regresión lineal de los parámetros que influyen la respuesta dinámica del proceso, mediante la incorporación de la variable del tiempo de retraso. Mediante el modelo de regresión es posible relacionar las variables con un alto nivel de correlación.

En el capítulo 5 se analiza la sensibilidad de los parámetros de tiempo del proceso en cuanto a la variación que producen en los resultados de las profundidades de corte que se obtienen. Se realiza un análisis de incertidumbre, por

lo que se establecen expresiones extendidas de las profundidades de corte que consideran su incertidumbre, a partir de ello, se evalúa la influencia de cada parámetro aislado y la incertidumbre que se añade mediante los procedimientos de obtención de estos parámetros. Se identifican los parámetros más influyentes y se establece un marco para el cual es posible limitar el nivel de incertidumbre de las estimaciones de las profundidades de corte radial y axial.

El capítulo 6 presenta los resultados obtenidos en el desarrollo de esta tesis. Se explica el proceso para el desarrollo de la experimentación, indicando métodos y equipamiento utilizado. Se muestra el programa de ordenador desarrollado para la medición y estimación de los parámetros de corte. Finalmente se exponen los resultados obtenidos mediante ensayos de variación de los parámetros de corte, se muestra la influencia de esta variación en la señal de fuerza, los valores estimados mediante la metodología de estimación y los valores de error e incertidumbre obtenidos.

Finalmente, en el capítulo 7 se resumen las principales aportaciones de este trabajo y las conclusiones obtenidas. Además se presenta una breve descripción de las posibles futuras líneas de trabajo que se desprenden de esta investigación.

Capítulo 2

Estado del arte

En este capítulo se expone una revisión de los fundamentos que dan sustento a este trabajo, así como también los avances científicos en modelado de fresado y estimación de parámetros de corte. La Sección 2.1 expone los trabajos de otros investigadores en que se ha buscado estimar las profundidades de corte radial y axial en operaciones de fresado, explicando los principales aportes de cada investigador. La Sección 2.2 está destinada a entregar una perspectiva en cuanto a los avances en modelado de fuerzas de corte para fresado, mostrando los tipos de modelos más ampliamente aceptados e indicando la labor del modelado en los avances de la fabricación mediante procesos con arranque de viruta. Se ha realizado una recopilación de la caracterización e identificación del comportamiento dinámico del proceso. Finalmente se recogen los principales avances en cuanto a la determinación de incertidumbre en métodos de estimación de procesos y ajuste de parámetros.

2.1 Metodologías de estimación de las profundidades de corte

La estimación de parámetros para procesos de fresado se ha desarrollado en diversos ámbitos, para la optimización del proceso, centrándose en el acabado de la pieza, en desgaste de la herramienta o en controlar la potencia consumida durante el proceso. El desarrollo de metodologías de control adaptativo en fresado ha generado interés en conocer parámetros del proceso durante su ejecución con el fin de entregar información para los modelos y las estrategias de control. Por una parte existen investigaciones que buscan obtener parámetros de la máquina, otros se han centrado en la fuerza de corte y por último en la obtención de condiciones de mecanizado como las profundidades de corte.

Dado que el establecimiento de las profundidades de corte condiciona en varios aspectos el resultado de una operación de fresado, diversos investigadores han desarrollado metodologías para identificar las profundidades de corte desde distintos enfoques. Algunos trabajos han utilizado la fuerza de corte medida desde el proceso, otros basándose en modelos de fuerza de corte o mediante una medida directa de los parámetros de corte con el uso de diversos sensores y sistemas electrónicos.

Los investigadores Altintas y Yellowley (Altintas y Yellowley 1987) propusieron un método de estimación que utiliza una razón de fuerzas calculada a partir de dos componentes de la fuerza de corte medidas durante el proceso. La profundidad de corte radial es estimada como una función de la razón de fuerzas y el radio de inmersión nominal, la profundidad de corte axial es estimada a partir de una función llamada esfuerzo normalizado y la resultante de las fuerzas. La profundidad de corte radial y axial es calculada a partir de funciones polinomiales. Los parámetros de estas funciones polinomiales son calculados en cortes de calibración y son registrados para ser utilizados en el procedimiento de estimación de las profundidades. En la Figura 2.1 se observa que el método permite obtener valores relativamente cercanos a los valores reales, pero no es capaz de detectar variaciones abruptas en la profundidad de corte.

Figura 2.1: Resultados de Altintas y Yellowley, (a) radio de inmersión y (b) profundidad axial de corte. (Altintas y Yellowley 1987)

Tarn y Tomizuka (Tarn y Tomizuka 1989) desarrollaron un método para estimar la profundidad de corte radial en una herramienta enteriza de dos filos usando una señal de fuerza. El procedimiento considera una zona en que la fuerza de corte se encuentra en torno al cero y por lo tanto la herramienta no está cortando, luego la fuerza de corte aumenta debido a que la herramienta entra en la pieza. Detectando esos instantes y midiendo el periodo en que la herramienta permanece fuera de la zona de no corte es posible estimar el tiempo de corte de la herramienta y relacionándolo con el periodo de giro es posible estimar la profundidad de corte radial. La principal limitación de la metodología es la precisión en la estimación, que está determinada por las muestras por el número de muestras por cada giro de la herramienta.

Choi y Yang (J.-G. Choi y M.-Y. Yang 1999) desarrollaron un algoritmo que estima las profundidades de corte a partir del patrón de los valores RMS del promedio de dos fuerzas de corte ortogonales. Este trabajo, a diferencia de los anteriores, no requiere cortes de calibración y es capaz de ser aplicado a un mayor rango de condiciones de corte, pero requiere de dos componentes de la fuerza de corte y es necesario realizar un procesamiento de la señal.

La profundidad de corte radial es estimada a partir de la geometría del corte y de factores de corrección obtenidos del patrón de la fuerza de corte. A partir de las Ecuaciones 2.1 y 2.2.

$$\varphi_{en} = \cos^{-1} \left(1 - \frac{a_e}{R} \right) \quad (2.1)$$

$$\hat{\varphi}_{en} = \text{resto de } \left\{ \left(k \frac{2\pi}{N} - \alpha_a \right) / \frac{2\pi}{N} \right\}, \quad k = 1, \dots, N \quad (2.2)$$

k se determina se determina por la condición $0 < \hat{\varphi}_{en} \leq (2\pi/N)$. Si se considera el valor de la profundidad radial estimada por el algoritmo como $\hat{a}_{en}$, el valor de a_e sería el siguiente:

$$a_e = \hat{a}_{en} + m \frac{2\pi}{N} \text{ donde } m = 0 \text{ o } 1 \quad (2.3)$$

El valor de m se determina a partir de la Ecuación 2.4

$$m = \begin{cases} 1 & \text{si } \tan^{-1}(F_x/F_y) \geq \{\pi/2 + w(\hat{\varphi}_{en} - \pi/4)\} \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (2.4)$$

La profundidad axial es estimada del ángulo de empañe y el ángulo de hélice de la herramienta, los valores son corregidos en función del nivel de superposición de los filos, que finalmente se obtiene de la Ecuación 2.5

$$a_p = \frac{F}{k_c f_z a_e} \quad (2.5)$$

Donde k_c es la presión específica de corte del material. Los resultados expuestos por los autores muestran la estimación de la profundidad axial para condiciones variables y se observa que el procedimiento es capaz de detectar las variaciones en la geometría de la pieza de corte, aunque requiere un laborioso procedimiento para determinar cada parámetro.

Un enfoque diferente es presentado por Kwon y Choi y Hwang et al. (Kwon y D. Choi 2002; Hwang et al. 2003) que está basado en la relación entre la fuerza de corte en la dirección de avance y la dirección perpendicular al avance. La metodología permite la estimación del radio de inmersión que está relacionado con la profundidad de corte radial según:

$$\phi_s = \tan^{-1} \frac{r(h(\phi_s)) - dF_y/dF_x}{r(h(\phi_s)) \prod dF_y/dF_x + 1} \quad (2.6)$$

Donde $r(h(\phi_s))$ es la relación entre la fuerza en la dirección de avance y la dirección perpendicular al avance y ϕ_s es el ángulo de inmersión.

La relación entre las fuerzas radial y tangencial se establece como:

$$F_r = r(h(\phi_s))F_t \quad (2.7)$$

Haciendo el cambio de coordenadas para relacionarlo con las fuerzas F_x y F_y , según las Ecuaciones 2.8 y 2.9.

$$F_x = F_t \cos(\phi) + F_r \sin(\phi) \quad (2.8)$$

$$F_y = F_r \cos(\phi) - F_t \sin(\phi) \quad (2.9)$$

De esta manera se obtiene la expresión que se muestra en la Ecuación

2.10.

$$\frac{F_y(\phi_s)}{F_x(\phi_s)} = \frac{r(h(\phi_s)) - \tan(\phi_s)}{1 + r(h(\phi_s)) \tan(\phi_s)} \quad (2.10)$$

El método establece que determinando el valor de $r(h(\phi_s))$, el ancho de corte puede ser determinado a partir de las fuerzas de corte. El procedimiento requiere determinar $r(h(\phi_s))$ en experimentos preliminares.

La Figura 2.2 muestra el diagrama de flujo del algoritmo de estimación del trabajo de Hwang et al. (Hwang et al. 2003).

Figura 2.2: Diagrama de flujo del algoritmo de estimación de las profundidades de corte de Hwang et al. (Hwang et al. 2003)

El procedimiento está desarrollado para planeado con herramientas de plaquitas considerando múltiples plaquitas en la zona de corte. Durante el fresado, la razón entre fuerzas es relacionada con la fuerza medida del proceso, esto permite estimar el radio de inmersión mediante un procedimiento iterativo. El procedimiento requiere de cortes de calibración para establecer el valor inicial de la razón de fuerzas. La metodología es capaz de identificar variaciones en la profundidad de corte radial con errores máximos del 9 %.

El trabajo desarrollado por Yang et al. (L. Yang et al. 2005) muestran un procedimiento de estimación de las profundidades de corte a partir de la forma de la señal de fuerza basándose en la geometría del proceso y el uso de dos índices relacionados con el nivel de superposición de los filos, como se muestra en la Figura 2.3.

Figura 2.3: Clasificación de los tipos de corte para herramientas de más de un filo en fresado de acabado. (L. Yang et al. 2005)

El nivel de superposición se clasifica en tres categorías. Los índices de fuerza están relacionados, uno con la distancia entre los picos y los valles en la señal de fuerza y el otro con la fuerza promedio. La metodología estima las profundidades de corte usando las ecuaciones desarrolladas para cada combinación de tipos de corte y nivel de superposición y discrimina los valores basándose en la diferencia con el valor de la profundidad nominal. La novedad del método es que es posible la estimación incluso con filos en superposición.

Basado en un enfoque geométrico, Tarng and Shyur (Tarng y Shyur 1993) trabajaron en un sistema basado en la geometría del proceso de corte mediante CAD/CAM para la identificación de la profundidad radial en rutinas de conformado de cajas. La variación de la profundidad de corte radial es identificada en el programa de control numérico (NC), luego el avance es ajustado en función de

las variaciones de profundidad, que en la práctica se identifican a partir de variaciones en la fuerza de corte. El ajuste del avance permite remover más material cuando la profundidad radial disminuye. El método propuesto permite mejorar la productividad del proceso mediante el ajuste de condiciones de corte óptimas. Los resultados expuestos por los investigadores muestran una reducción del tiempo de mecanizado del 20 % para fabricación de cajas.

Prickett et al. (Prickett et al. 2011) desarrollaron un sistema para medir la profundidad de corte axial a partir de la señal de dos sensores de ultrasonido montados en la carcasa del husillo de la máquina, como muestra la Figura 2.4.

Figura 2.4: Montaje de los sensores en Prickett et al. (Prickett et al. 2011)

El objetivo de la investigación es medir la profundidad axial para integrarla en un sistema de monitoreo del proceso de corte enfocado en el desgaste de la herramienta. El sistema es capaz de medir incluso con el uso de refrigerante, esto representa una novedad y además permite el uso de la metodología en un entorno de fabricación real. Por otra parte, el procedimiento es limitado por el alineamiento requerido entre la herramienta y los sensores, por la resolución de los sensores (0,2 mm) y la viruta, que produce diferencias importantes en los valores de profundidad que se estiman.

Yan et al. (Yan et al. 2016) consideraron el efecto de las profundidades de corte en torno fresado. En torno fresado se presenta una variación simultánea de la profundidad de corte axial y radial. Los investigadores desarrollaron un modelo de fuerzas de corte específico para torno fresado que considera la evolución de las profundidades de corte y su influencia en la estabilidad del proceso.

Gaja y Liou (Gaja y Liou 2016) utilizaron mediciones de emisiones acústicas (AE) y un modelo basado en redes neuronales para estimar la profundidad de

corte axial en fresado de acabado. El modelo de redes neuronales fue utilizado para establecer la relación entre las emisiones acústicas y la profundidad de corte, luego esta red neuronal es capaz de predecir la profundidad de corte en proceso. La Figura 2.5 muestra la arquitectura de la red neuronal utilizada.

Figura 2.5: Arquitectura de la red neuronal para la estimación de la profundidad de corte radial. (Gaja y Liou 2016)

La red neuronal estima la profundidad de corte partir de las emisiones acústicas y de otros tres parámetros: velocidad de giro del husillo, avance por filo y el estado del filo de la herramienta, como se observa en la Figura 2.5.

Recientemente se han desarrollado otros enfoques para la detección de eventos específicos que ocurren durante el mecanizado. Castaño et al. (Castaño, Toro et al. 2015; Castaño, Haber et al. 2017) proponen un método basado en el contacto electrostático entre la herramienta y la pieza para determinar la longitud del filo activo en cada momento. El método consiste en la utilización una serie de interruptores, los cuales conmutan según exista o no contacto herramienta pieza.

Marinescu y Axinte (Marinescu y Axinte 2008; Marinescu y Axinte 2009) utilizaron señales de emisión acústica y técnicas de procesamiento tiempo frecuencia para detectar la entrada del filo en operaciones de fresado. En la Figura 2.6 se muestra un esquema del procedimiento cuando corta sólo un filo.

Figura 2.6: Tiempo de corte cuando sólo se encuentra un filo a la vez en contacto con la pieza. (Marinescu y Axinte 2009)

Estos dos últimos desarrollos podrían ser utilizados de forma similar a la propuesta que se hace en este trabajo, para estimar las profundidades de corte en fresado, utilizando la tecnología propuesta.

En la Figura 2.7 se muestra un resumen de los diferentes tipos de enfoques para las metodologías de estimación de las profundidades de corte que se han expuesto en esta sección.

Figura 2.7: Resumen de las metodologías utilizadas en los diversos trabajos para la estimación de las profundidades de corte.

De la Figura 2.7 se observa que la mayoría de los estudios centran su desarrollo en la información obtenida desde las fuerza de corte. Por otra parte, los trabajos más recientes presentan metodologías enfocadas en el uso de técnicas como las emisiones acústicas y el uso de sistemas de redes neuronales, que representan una parte importante del trabajo hasta ahora desarrollado. Se observa también que los procedimientos de medida directa ocupan casi una cuarta parte del total, aunque no han proliferado principalmente por su baja aplicabilidad industrial.

2.2 Modelado de las fuerzas de corte en fresado

En el estudio de los procesos de fabricación con arranque de viruta un elemento en que se han centrado los estudios es en la estimación de las fuerzas de corte. Las principales razones por las que se desea estimar las fuerzas de corte de manera confiable es debido a mejoras en la economía del proceso, para el dimensionamiento de los equipos y en el desarrollo de metodologías de control del proceso.

Existen diversos tipos de modelo de estimación de la fuerza de corte, los primeros estudios al respecto provienen del trabajo de Piispanen (Piispanen 1937; Piispanen 1948) quién concluyó que la deformación se produce por deslizamientos sucesivos de una zona próxima al filo de la herramienta. Luego el trabajo de Merchant (Merchant 1945) propuso, al igual que Piispanen, ecuaciones analíticas para calcular la fuerza de corte.

Las áreas del mecanizado para las que se ha estudiado el modelado de fuerzas es muy diverso, según los objetivos que se persiguen. Algunas de estas temáticas recogen la obtención de mejores calidades superficiales de la pieza, la optimización de las condiciones de corte, el monitoreo y aumento de la vida útil de la herramienta. También se busca estudiar la estabilidad del proceso, principalmente en operaciones de fresado con piezas de pared delgada o con estrategias modernas de mecanizado como el fresado trocoidal.

Los modelos de fuerza de corte pueden ser clasificados desde diferentes perspectivas. Una manera de clasificar los modelos es según la forma en que se estiman las fuerzas de corte (H. Pérez 2012). En la Tabla 2.1 se encuentra un resumen de las principales clasificaciones para los modelos.

Tabla 2.1: Tipos de modelos según método de estimación de la fuerza. (H. Pérez 2012)

MODELOS		FORMULACIÓN
Modelos basados en el plano de deslizamiento		$F_c = \frac{\tau_s \cdot b \cdot h}{\sin \varphi_n} \frac{\cos (\rho_n - \gamma_n)}{\cos (\varphi_n + \rho_n - \gamma_n)}$
Modelos basados en la presión de corte		$F_c = k_c \cdot h \cdot a_p$
Modelos basados en líneas de deslizamiento		$F_c = \int p \sin \theta \, ds + \int k \cos \theta \, ds$
Modelos basados en métodos numéricos		$F_c = [B]^T [D] [B] [\delta]$

Dados los diversos fenómenos que se presentan en el fresado, a través del tiempo los investigadores han centrado el modelado en alguno de estos fenómenos. Es así, que un segundo enfoque de clasificación es basándose en los fenómenos que se presentan en el proceso de corte. En este sentido hay modelos que se centran en la geometría de la herramienta, el alabeo de la herramienta (Kline y DeVor 1983), la trayectoria del filo (Martellotti 1945), estrategias de mecanizado (Otkur y Lazoglu 2007; Rauch et al. 2009; Shixiong et al. 2016) y la dinámica propia del proceso de fresado.

Hoy en día, una parte importante del modelado de procesos de fresado ha estado centrada en estrategias no convencionales de mecanizado, como el fresado trocoidal. El fresado trocoidal se ha establecido como una estrategia alternativa para operaciones como el cajeteado y el ranurado. Estos procesos se

han intentado mejorar mediante la optimización de las estrategias convencionales (Choy y Chan 2003; Liu et al. 2007; Tajima y Sencer 2016), es así que el desarrollo del fresado trocoidal para estas operaciones como una alternativa, ha generado una nueva área en el modelado del fresado.

Debido a su simplicidad y bajo coste computacional, uno de los grupos de modelos que más se han extendido son los basados en la presión específica de corte.

2.2.1 Modelos de estimación de las fuerzas de corte en fresado basados en la presión específica de corte

En los modelos basados en la presión específica de corte, la determinación de la presión específica es clave. Esto se debe a que existe una relación establecida entre la presión específica de corte, la sección de viruta y la fuerza de corte.

$$k_c = \frac{F_c}{A_0} = \frac{F_c}{hb} \quad (2.11)$$

Donde A_0 es la sección de viruta, h es el espesor de viruta sin deformar y b es el ancho. Dado que el valor de k_c depende de la sección de viruta y de la fuerza de corte y ambos valores varían en función del espesor de viruta, es que se han desarrollado expresiones para relacionar presión específica con fuerzas de corte y geometría de la sección de viruta. Diversos tipos de expresiones fueron desarrolladas para estimar la presión específica, como se muestra a continuación.

Presión específica media de corte

La presión específica de corte, supone una simplificación, en que el valor medio de la presión específica se relaciona con el espesor de viruta. El trabajo de Sabberwal (Sabberwal 1962), presenta expresiones para el espesor medio de viruta en el caso de que los filos sucesivos no se superponen:

$$k_c = \frac{F_m v \varphi N}{a_e a_p V 2\pi} \quad (2.12)$$

También presenta una expresión en la caso de superposición de filos según

la Ecuación 2.13.

$$k_c = \frac{F_m v \varphi N}{a_e a_p V} \quad (2.13)$$

La expresión más extendida para determinar el espesor medio de viruta actualmente es mediante un ajuste de tipo potencial, (Altintas, Spence et al. 1991; Feng y Menq 1994; H. Pérez et al. 2013) como la que se muestra en la Ecuación 2.14.

$$k_c(\varphi) = k_{c0} [h(\varphi)]^{-m_c} \quad (2.14)$$

Espesor de viruta

Martellotti (Martellotti 1945), propuso una expresión para el espesor de viruta en trayectorias circulares.

$$h(\varphi) = f_z \sin(\varphi) + \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - f_z^2 \cos^2(\varphi)} \quad (2.15)$$

En los casos en que el avance es significativamente menor que el diámetro de la herramienta, la Ecuación 2.15, puede ser considerada como sigue (Feng y Menq 1994; Kang y Zheng 2013):

$$h(\varphi) = f_z \sin(\varphi) \quad (2.16)$$

Diversos trabajos han propuesto diferentes maneras de calcular el espesor de viruta, para aplicaciones específicas. Kang y Zheng (Kang y Zheng 2013) proponen un método basado en series de Fourier con aplicación a micro fresado. Johansson (Johansson et al. 2018) estudió la influencia del espesor de viruta en la vida de la herramienta. Yuan et al. (Yuan et al. 2018) determinan las fuerzas de corte en operaciones de micro fresado.

Trabajos posteriores establecen una expresión para el espesor de viruta en que el cálculo del espesor de viruta en cada instante es sustituido por un cálculo centrado en el ángulo proyectado (H. Pérez 2012; Diez, H. Pérez et al. 2015) que incorpora una importante ventaja desde el punto de vista del cálculo. Este valor se representa por el espesor medio de viruta que se obtiene mediante la

Ecuación 2.17.

$$\bar{h}(\varphi) = \frac{1}{\varphi_1 - \varphi_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} f_z \sin(\varphi_j) \quad (2.17)$$

Fuerzas de corte

La expresión general para determinar la fuerza de corte en fresado es del tipo:

$$F_c(\varphi) = k_c a_p h(\varphi) \quad (2.18)$$

Relacionando la fuerza de corte con el espesor de viruta, la presión específica de corte y la profundidad de corte axial. De ahí la importancia de determinar de manera apropiada la presión específica y el espesor de viruta, ya que de la precisión en su estimación depende el ajuste de las fuerzas que se puede obtener.

Usualmente se consideran tres fuerzas de corte, la fuerza radial, la fuerza tangencial y la fuerza axial. La expresión de las fuerzas en un sistema coordenado en que se considera que la dirección de avance es a lo largo del eje X, son las que se muestran a continuación (H. Pérez 2012). Fuerza en dirección de avance, F_x :

$$F_x(\varphi) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{Dk_c f_z}{4 \tan(\lambda_s)} \sin(2\varphi) d\varphi + \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{Dk_r f_z}{4 \tan(\lambda_s)} (1 - \cos(2\varphi)) d\varphi \quad (2.19)$$

Fuerza en la dirección perpendicular al avance, F_y :

$$F_y(\varphi) = - \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{Dk_c f_z}{4 \tan(\lambda_s)} (1 - \cos(2\varphi)) d\varphi + \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{Dk_r f_z}{4 \tan(\lambda_s)} \sin(2\varphi) d\varphi \quad (2.20)$$

Fuerza en la dirección axial, F_z :

$$F_z(\varphi) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{Dk_a f_z}{4 \tan(\lambda_s)} \sin(\varphi) d\varphi \quad (2.21)$$

2.3 Análisis dinámico en procesos con arranque de viruta

Los procesos de mecanizado con arranque de viruta en general y el fresado en particular son procesos naturalmente dinámicos, debido a la intermitencia de la operación y a la interacción que se produce entre la máquina, la herramienta y la pieza de trabajo.

La caracterización y modelado de la respuesta dinámica en los procesos de fresado ha sido considerada por diversos motivos, originando modelado de las fuerzas que consideran la dinámica del proceso con el fin de establecer condiciones propicias para una operación con resultados aceptables.

La dinámica ha sido considerada en modelos para operaciones de fresado de piezas de pared delgada (Diez, Leal-Muñoz et al. 2017; Diez, H. Pérez et al. 2015), en este caso se busca establecer una fuerza de corte ajustada para determinar la deformación que se producirá en la pieza por efecto de las fuerzas de corte. El sistema pieza herramienta se modela en la mayoría de las investigaciones como un sistema de dos grados de libertad (Altintas, Stepan et al. 2008; Moradi et al. 2013), como se muestra en la Figura 2.8.

Figura 2.8: Modelado del sistema pieza herramienta en fresado. (Altintas, Stepan et al. 2008)

Otro de los aspectos en los que la dinámica del proceso es importante, es para prevenir vibraciones durante el mecanizado, principalmente el fenómeno de retemblado (Fei et al. 2017; Graham et al. 2013; Yue et al. 2019; X. Zhang, Ehmann et al. 2016). El retemblado produce vibraciones excesivas durante el mecanizado lo que empobrece el acabado superficial de la pieza. En el estudio

del retemblado, lo que se busca, es establecer zonas de trabajo con condiciones de corte que permitan tener un proceso de mecanizado estable, para obtener acabados apropiados, de manera de extender la vida de la herramienta y de la máquina. Un ejemplo de las curvas que se obtienen en una investigación de las vibraciones durante el fresado se muestra en la Figura 2.9.

Figura 2.9: Diagrama de lóbulos para diversas condiciones de corte. (Gurdal et al. 2016)

Dentro del análisis de la dinámica del proceso de fresado, un asunto fundamental es la obtención de los parámetros dinámicos del sistema (Tlustý e Ismail 1980) que permiten caracterizar el conjunto de mecanizado y aportar información al modelo. Usualmente la expresión que se tiene para un sistema de un grado de libertad es del tipo:

$$m_1 \ddot{x} + c_1 \dot{x} + k_1 x = F_1 \quad (2.22)$$

De manera general para un sistema de n grados de libertad se tiene:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K} \mathbf{x} = \mathbf{F} \quad (2.23)$$

Donde se busca la obtención de las matrices de parámetros $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ y $\mathbf{K}$ que son las matrices de la masa modal, el coeficientes de amortiguamiento y los coeficientes de rigidez de un sistema determinado, ya que con estos parámetros es posible caracterizar la respuesta del sistema total de mecanizado (Yue et al. 2019).

Existen diversos métodos para la obtención de los parámetros de un sistema dinámico. Para la caracterización de sistemas mecánicos es posible realizar ensayos estructurales, mediante un martillo de impacto que excita la estructura

y se registra la respuesta vibratoria del sistema mediante acelerómetros o sensores de desplazamiento dependiendo de la frecuencia en que se encuentra la respuesta del sistema (Ding y Zhu 2016; Kiss et al. 2018), como se muestra en la Figura 2.10.

Figura 2.10: Equipamiento para un ensayo de impacto. (Yan et al. 2016)

Una vez que se ha obtenido la respuesta del sistema de mecanizado es necesario realizar un ajuste para obtener los parámetros dinámicos del sistema (m , c y k en el caso de un sistema mecánico). Para el ajuste de los sistemas se han utilizado métodos basados en elementos finitos (Campa et al. 2011; Ding y Zhu 2016) Campa et al. realiza un ajuste de la función respuesta en frecuencia mediante un análisis modal en un modelo de la estructura utilizando elementos finitos y luego realizan una corrección del amortiguamiento mediante datos experimentales. Perera et al. (Perera et al. 2008) realizan un ajuste mediante la función respuesta en frecuencia real del sistema, establecen un método propio en que se ajusta un modelo de tipo m , c y k variando los parámetros intentando minimizar la diferencia entre el modelo y la función respuesta real. Existen procedimientos de ajuste mediante métodos algebraicos (Beltran-Carbajal y Silva-Navarro 2015), Beltran-Carbajal propone el ajuste clásico basado en un cambio de variable que se reescribe bajo la notación de Mikusinski y se opera algebraicamente de manera que es posible obtener los parámetros del sistema de una manera eficiente sin problemas de singularidades y con bajos tiempos de cómputo.

2.4 Incertidumbre en las mediciones de procesos de fabricación

En diversas áreas de investigación se llevan a cabo análisis de incertidumbre, con la finalidad de realizar comprobaciones de métodos, modelos o mediciones. El análisis de incertidumbre permite determinar el peso que cada factor tiene en la determinación de variables que no pueden ser determinadas directamente o para mejorar una medición en base a establecer las variables que inducen incertidumbre en esa medición.

Para procesos de mecanizado, diversos autores han realizado análisis de incertidumbre y sensibilidad para un amplio espectro de métodos, máquinas y procedimientos. Estos análisis se han realizado tomando como referencia normativas vigentes o proponiendo nuevas metodologías para la determinación de los factores y la incertidumbre total.

La Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM por su sigla en francés) elabora la Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (*GUM, Evaluation of measurement data Guide to the expression of uncertainty in measurement 2018*) cuyo objetivo es establecer reglas generales para expresar la incertidumbre de mediciones en diferentes campos.

Las expresiones generales de la incertidumbre se definen como se muestra a continuación. En los casos en que un mesurando Y se determina a partir de otras N magnitudes, su relación es funcional, como se muestra en la Ecuación 2.24

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2.24)$$

La estimación de Y , que se representa por y , mediante las estimaciones x de las magnitudes X es:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2.25)$$

La evaluación de la incertidumbre se clasifica, según lo expuesto en la GUM, dependiendo de la estimación del mesurando en evaluación de tipo A y de tipo B. La incertidumbre de tipo A es evaluada mediante herramientas estadísticas como los análisis de varianza a partir de mediciones sucesivas. La in-

certidumbre de tipo B se evalúa por otros medios debido a que la medición no se obtiene a partir de una serie de mediciones, por lo que se basa en la información disponible como puede ser la incertidumbre de un dispositivo, de un instrumento de medida (escalas, resolución) o por especificaciones de fabricantes como se muestra en la Figura 2.11.

Figura 2.11: Tipos de análisis de incertidumbre.

Dentro de los estudios en fabricación en que se ha utilizado análisis de incertidumbre, las principales aplicaciones están relacionadas con la comprobación de procedimientos de modelado, para el estudio de la fiabilidad en procedimientos de medida y análisis de máquinas herramienta.

Mutilba et al. (Mutilba et al. 2019) analizan y proponen una metodología alternativa para la determinación del error sistemático en máquina herramienta sin la necesidad de una pieza patrón calibrada. El método se basa en la verificación volumétrica de la máquina. Se realiza una comparación de la incertidumbre obtenida con los procedimientos indicados en la especificación técnica ISO 15530-3.

El análisis de la incertidumbre en la medición de una pieza en máquina es desarrollado por Pérez et al. (P. Pérez et al. 2019) y se centra en analizar la influencia de los errores de la máquina y el sistema de medida utilizado (sistema

de *Laser tracker*). El análisis se desarrolla mediante el método de Montecarlo convencional. En la Figura 2.12, se muestra una comparación entre lo que se propone en la GUM y el método de Montecarlo.

Figura 2.12: (A) Propagación de incertidumbre según la GUM y (B) propagación de distribuciones basada en el método de Montecarlo. (P. Pérez et al. 2019)

Los y Mayer (Los y Mayer 2018) han propuesto un sistema de estimación de la incertidumbre en los errores geométricos de máquinas herramienta basado en el método de Montecarlo adaptado. La mejora del método presentado radica en la estimación de las incertidumbres para un sistema de múltiples salidas, que requiere menos ensayos y asegura la estabilidad del modelo.

La incertidumbre en máquinas herramienta portátiles fue determinada por Eguia et al. (Eguia et al. 2017). El trabajo presenta un análisis de la incertidumbre para determinar la influencia de una serie de factores como la alineación de la pieza, la deflexión de la pieza y los errores de trayectoria en la precisión de la máquina. Se presentan las expresiones clásicas para la estimación de la incertidumbre.

Peral et al. (Peral et al. 2017) proponen un análisis de incertidumbre en la evaluación del esfuerzo medido por el método de agujero taladrado y galgas extensiométricas. Se realiza un análisis de variables de tipo A mediante el método de Montecarlo para analizar la influencia de las propiedades del material, el sistema de medida con galgas y las características del agujero.

Parkinson et al. (Parkinson et al. 2014) muestra el desarrollo de un sistema de planificación para la medición de los errores en la calibración de máquinas herramienta considerando las variaciones de temperatura en un entorno de fábrica. Utiliza un sistema de inteligencia artificial para desarrollar la planificación del procedimiento de toma de datos, de manera de optimizar el procedimiento permitiendo disminuir la probabilidad de aceptación de valores fuera de rango.

Huang et al. (Huang et al. 2016) desarrollaron un modelo para fresado con el objetivo de minimizar el retemblado. Los trabajos hasta ahora habían considerado los parámetros de mecanizado constantes, en cambio este trabajo considera su variabilidad y la incertidumbre que su cambio induce. De esta manera

mediante el análisis de incertidumbre es posible ajustar los diagramas de lobulo.

Bhattacharyya et al. (Bhattacharyya et al. 2010) presentan un modelo de fuerzas de corte y realiza un análisis de incertidumbre para evaluar la propagación de errores en el calculo de los coeficientes del modelo de fuerzas de corte. Realiza análisis de tipo A y de tipo B para cada uno de los grupos de factores necesarios para la estimación de las fuerzas mediante el modelo.

2.5 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se ha mostrado el estado actual de las temáticas relacionadas con el desarrollo de esta tesis.

Se ha hecho una recopilación y análisis de las diversas metodologías para la estimación de las profundidades de corte en fresado, destacando sus puntos positivos y su campo de aplicación. Este análisis ha dejado de manifiesto los puntos que aún no se han explorados en este tema y que dan origen al desarrollo de esta tesis.

Se han mostrado los diferentes modelos de fuerzas de corte en fresado que actualmente son ampliamente aceptados, destacando sus ventajas desde el punto de vista de los recursos computacionales y de precisión en la estimación de las fuerzas de corte. En esta recopilación se han considerado las ventajas que supone la implementación de cada uno de los diversos modelos de fuerza.

En las secciones 2.3 y 2.4 se han expuesto las investigaciones relacionadas con la identificación de parámetros dinámicos en procesos de mecanizado y los análisis de incertidumbre en fabricación. Se han mostrado los principales enfoques para estimar parámetros de sistemas dinámicos en operaciones de fresado y los métodos de ajuste que actualmente se utilizan. Se ha puesto en contexto el valor del análisis de incertidumbre, los métodos frecuentemente utilizados se han presentado y se ha resumido su utilidad en temas relacionados a la fabricación.

Capítulo 3

Bases para la estimación de las condiciones de mecanizado en fresado

En este capítulo se analiza la influencia de los parámetros de mecanizado a través de un modelo de fuerzas de corte. Además se presentan las relaciones que es posible establecer entre la geometría del proceso y los parámetros de mecanizado, como una aproximación a la determinación en proceso de las profundidades de corte.

Los trabajos estudiados durante la revisión bibliográfica de esta tesis dan cuenta de que a partir de la fuerza de corte en fresado es posible obtener información relevante que puede ser relacionada con los parámetros de mecanizado, es por ello que se ha implementado un modelo de fuerzas de corte basado en la presión específica de corte con el objetivo de estudiar el comportamiento de la fuerza con las variaciones de las condiciones de corte si necesidad de realizar una vasta recolección de datos experimentales.

3.1 Modelo de fuerzas de corte

Para evaluar correctamente la posibilidad de obtener información de los parámetros de corte se ha implementado un modelo de fuerzas de corte basado en el espesor medio de viruta. Con este modelo es posible identificar la influencia que tiene la variación de los parámetros de corte (n , f_z , a_e , a_p) en la forma y la magnitud de la señal de fuerza. En la Figura 3.1 se muestran los principales ángulos que definen el proceso, junto con el ancho y la profundidad de corte (a_e , a_p).

Figura 3.1: Ángulos y parámetros geométricos.

La evaluación de la influencia de los parámetros de corte se ha hecho basándose en un modelo de la presión específica de corte (Diez, H. Pérez et al. 2015; H. Pérez et al. 2013) que ha mostrado una elevada precisión en la predicción de la magnitud de la fuerza. El modelo de fresado que a continuación se expone, se basa en la utilización del espesor medio de viruta de la parte del filo activo de la herramienta. El modelo también considera el efecto del alabeo de la herramienta en la fuerza de corte. Este procedimiento presenta ventajas computacionales en cuanto a tiempo de ejecución y de precisión en la magnitud de las fuerzas obtenidas. El espesor medio de viruta se expresa como:

$$\bar{h}(\varphi) = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} f_z \sin \varphi_j d\varphi + R_i(\varphi) - R_{i-1}(\varphi) \quad (3.1)$$

De manera que resolviendo la integral, el espesor medio de viruta $\bar{h}(\varphi)$ es:

$$\bar{h}(\varphi) = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} f_z \cos \varphi_1 - \cos \varphi_2 + R_i(\varphi) - R_{i-1}(\varphi) \quad (3.2)$$

Donde $R_i(\varphi) - R_{i-1}(\varphi)$ representa dos trayectorias consecutivas de la herramienta. Esta expresión es válida en los casos en que $f_z > R_i(\varphi) - R_{i-1}(\varphi)$.

La zona de entrada del filo de la herramienta en la pieza ocurre cuando se cumple que $\varphi_{en} \leq \varphi_j \leq \varphi_{ex}$ y en esta situación el espesor medio de viruta toma el

valor dado por la Ecuación 3.3.

$$\bar{h}(\varphi) = \frac{1}{\varphi_j - \varphi_{en}} f_z (\cos \varphi_{en} - \cos \varphi_j) + R_i(\varphi) - R_{i-1}(\varphi) \quad (3.3)$$

En esta situación, la profundidad de corte axial aumenta mientras el filo de la herramienta entra en la pieza. El valor de la profundidad axial en cada instante se expresa como:

$$a_{pa}(\varphi) = \frac{\varphi_j - \varphi_{en}}{\varphi_{pr}} a_p \quad (3.4)$$

Cuando se entra en la zona de corte uniforme, esto es, cuando $\varphi_{ex} < \varphi_j \leq \varphi_{en} + \varphi_{pr}$, el espesor medio de viruta cambia según la siguiente ecuación:

$$\bar{h}(\varphi) = \frac{1}{\varphi_{ex} - \varphi_{en}} f_z (\cos \varphi_{en} - \cos \varphi_{ex}) + R_i(\varphi) - R_{i-1}(\varphi) \quad (3.5)$$

En este caso, la profundidad de corte axial es:

$$a_{pa}(\varphi) = \frac{\varphi_{ex} - \varphi_{en}}{\varphi_{pr}} a_p \quad (3.6)$$

Cuando el filo comienza a salir de la pieza, en que se cumple que $\varphi_{en} + \varphi_{pr} < \varphi_j \leq \varphi_{ex} + \varphi_{pr}$, el espesor de viruta se calcula como sigue:

$$\bar{h}(\varphi) = \frac{1}{\varphi_{ex} - (\varphi_j - \varphi_{pr})} f_z (\cos(\varphi_j - \varphi_{pr}) - \cos \varphi_{ex}) + R_i(\varphi) - R_{i-1}(\varphi) \quad (3.7)$$

Aquí, la profundidad de corte axial disminuye hasta que el filo sale completamente de la pieza. El valor de la profundidad de corte axial en esta zona se obtiene según la Ecuación 3.8.

$$a_{pa}(\varphi) = \frac{\varphi_{ex} - (\varphi_j - \varphi_{pr})}{\varphi_{pr}} a_p \quad (3.8)$$

Las fuerzas de corte en las direcciones tangencial, radial y axial en este

caso se obtienen como se muestra en las Ecuaciones 3.9, 3.10 y 3.11.

$$F_t(\varphi) = k_t(\varphi)a_{pa}\bar{h}(\varphi) \quad (3.9)$$

$$F_r(\varphi) = k_r(\varphi)a_{pa}\bar{h}(\varphi) \quad (3.10)$$

$$F_a(\varphi) = k_a(\varphi)a_{pa}\bar{h}(\varphi) \quad (3.11)$$

Los coeficientes k_t , k_r y k_a son los coeficientes de la presión específica de corte para la fuerza tangencial, radial y axial respectivamente y se determinan mediante experimentación para un material de pieza y herramienta en particular. Las expresiones utilizadas para la obtención de los coeficientes de la presión específica de corte se muestran en las Ecuaciones 3.12, 3.13 y 3.14.

$$k_t(\varphi) = k_{t_0} [h_j(\varphi_j)]^{-m_t} \quad (3.12)$$

$$k_r(\varphi) = k_{r_0} [h_j(\varphi_j)]^{-m_r} \quad (3.13)$$

$$k_a(\varphi) = k_{a_0} [h_j(\varphi_j)]^{-m_a} \quad (3.14)$$

De manera de poder referenciar las fuerzas de corte con respecto a una triada de ejes fijos X, Y, Z se han desarrollado expresiones para establecer el valor de las fuerzas F_x , F_y y F_z que se obtienen a partir de las fuerzas radiales, tangenciales y axiales.

$$F_x(\varphi) = k_t(\varphi)a_{pa}\bar{h}(\varphi) \cos \varphi_m + k_r(\varphi)a_{pa}\bar{h}(\varphi) \sin \varphi_m \quad (3.15)$$

$$F_y(\varphi) = -k_t(\varphi)a_{pa}\bar{h}(\varphi) \sin \varphi_m + k_r(\varphi)a_{pa}\bar{h}(\varphi) \cos \varphi_m \quad (3.16)$$

$$F_z(\varphi) = F_a(\varphi) \quad (3.17)$$

Para asegurar un correcto ajuste del modelo de fuerzas de corte es muy importante un correcto ajuste de los coeficientes de las presiones específicas de corte. Se han realizado ensayos de mecanizado con el objetivo de determinar el valor de los parámetros de la presión específica de corte para los materiales y las condiciones de corte que serán utilizadas en los ensayos de estimación de las profundidades de corte. En la Tabla 3.1 se encuentran las condiciones de corte de los ensayos para el ajuste de la presión específica.

Tabla 3.1: Condiciones de corte para ensayos de estimación de los coeficientes de la presión específica de corte.

Número de filos	Velocidad de giro	Avance lineal	Profundidad axial	Profundidad radial
N	n	f	a_p	a_e
-	rpm	mm/min	mm	mm
1	2.400	96	12	0,5
1	2.400	192	12	0,5
1	2.400	288	12	0,5
1	2.400	384	12	0,5

Material: AA 7075

Se ha realizado un ajuste de los coeficientes de la presión específica de corte mediante expresiones de tipo potencial. El ajuste de tipo potencial proporciona un mejor ajuste en comparación a expresiones del tipo polinomial (Altintas, Spence et al. 1991; Feng y Menq 1994). En la Figura 3.2 se muestra la evolución de la presión específica de corte a partir de la fuerza medida en los ensayos detallados en la Tabla 3.1.

Figura 3.2: Evolución de la presión específica de corte con el espesor de viruta.

En la Figura 3.2 se observa que el ajuste para k_t y k_r se consigue con un alto nivel de ajuste, mientras que el ajuste del valor de k_a no consigue un ajuste tan

adecuado. Debido a que se busca poder estudiar el comportamiento de todas las componentes de la fuerza de corte, se ha llevado a cabo una segunda campaña de medición con condiciones de corte que permiten mejorar el ajuste obtenido para k_a , tomando como referencia la metodología propuesta por Wan et al. (Wan et al. 2010) para la estimación de los coeficientes.

En la Tabla 3.2 se muestran las condiciones de corte utilizadas para la estimación de los coeficientes.

Tabla 3.2: Condiciones de corte para ensayos de estimación de los coeficientes de la presión específica de corte según metodología propuesta.

Número de filos	Velocidad de giro	Avance lineal	Profundidad axial	Profundidad radial
N	n	f	a_p	a_e
-	rpm	mm/min	mm	mm
1	2.400	25	2	6
1	2.400	75	2	6
1	2.400	125	2	6
1	2.400	175	2	6
1	2.400	225	2	6
1	2.400	275	2	6
1	2.400	325	2	6
1	2.400	375	2	2

Material: PVC
PTFE

En la Figura 3.3 se muestra el ajuste de los tres coeficientes de la presión específica de corte para dos materiales distintos (PVC, PTFE).

Figura 3.3: Evolución de la presión específica de corte con el espesor de viruta. Reajuste de k_a . (a) PVC, (b) PTFE.

Se observa que mediante este método el ajuste que se obtiene de los coeficientes de la presión específica de corte mantiene un buen ajuste para k_t y k_r , adicionalmente el ajuste obtenido para k_a mejora sensiblemente, con un coeficiente de correlación superior a 0,9.

La Figura 3.4 muestra un ejemplo de fuerzas de corte simuladas F_x , F_y y F_z obtenidas mediante el modelo propuesto. En secciones posteriores se expondrán comparativas con fuerzas de corte reales que dan validez al modelo propuesto.

Figura 3.4: Fuerza de corte simulada ($D = 8$ mm, $n = 3.000$ rpm, $a_p = 4$ mm, $a_e = 0,5$ mm, $f_z = 0,2$ mm, $N = 3$).

3.2 Análisis de la influencia de las condiciones de mecanizado en la señal de fuerza de corte

En las operaciones de fresado periférico con reducido ancho de corte es normal que el arco proyectado de la herramienta sea mayor que el arco de empañe y menor que el paso angular de la herramienta. En estos casos, la onda de fuerza más completa presenta tres zonas claramente diferenciadas (Figura 3.5). La primera zona es la que corresponde con la entrada del filo en la pieza lo que provoca que la longitud activa del filo aumente conforme la herramienta va girando, esto produce un aumento gradual de la fuerza de corte. La segunda zona es la que se produce cuando esta longitud es constante, aunque el punto de aplicación de la fuerza varíe según la posición angular del filo de la herramienta. Esta zona es la que se conoce como corte uniforme. La salida de la herramienta configura la tercera zona y en ella el filo activo se reduce en longitud. Para situa-

ciones en las que el arco de empañe sea reducido respecto de la profundidad de corte axial solo se tienen las zonas A y C, similar a la fuerza mostrada en la Figura 3.4.

Figura 3.5: Diferentes zonas a lo largo del paso del filo por la pieza de trabajo.

Mediante el modelo de fuerzas de corte se estudiará la influencia que tienen los parámetros de mecanizado en la fuerza de corte, el estudio está centrado principalmente en la profundidad de corte axial, la profundidad de corte radial y avance. Las características de la herramienta no serán consideradas dado que una vez establecidas, su influencia viene dada principalmente por su desgaste, tema que está fuera del alcance de esta tesis.

3.2.1 Influencia de los parámetros de mecanizado en la forma de las señales de fuerza simuladas

Influencia de la profundidad de corte axial

La variación de la profundidad de corte axial provoca un cambio en la forma de la onda de fuerza que se aprecia en la Figura 3.6. Conforme se incrementa la profundidad de corte axial, la salida de los filos en la pieza se retrasa, dando lugar a la aparición de una zona de corte uniforme que se hace más significativa conforme se incrementa la profundidad de corte axial.

Se observa que el aumento en la profundidad de corte axial no genera un aumento en la magnitud de la fuerza de corte, esto se debe a que a pesar de que hay un aumento de la profundidad de corte, el ángulo de empañe se mantiene constante.

Figura 3.6: Evolución de la fuerza de corte con el aumento de a_p ($f_z = 0,12$ mm, $a_e = 0,5$ mm, $n = 1.200$ rpm, $D = 8$ mm, $N = 1$).

Influencia de la profundidad de corte radial

Un aumento de la profundidad de corte radial provoca que el instante de entrada del filo en la pieza se adelante, tal como se observa en la Figura 3.7. Otra situación interesante es que se observa un aumento significativo en la magnitud de la fuerza de corte como consecuencia del aumento en el ángulo de empuje, una situación esperada, si se relaciona con las expresiones del modelo de fuerzas de corte.

Figura 3.7: Evolución de la fuerza de corte con el aumento de a_e ($f_z = 0,04$ mm, $a_p = 12$ mm, $n = 1.200$ rpm, $D = 8$ mm, $N = 1$).

A la luz de los resultados de simulación, para condiciones de corte que consideran sólo variaciones en la profundidad de corte radial, es evidente que es posible establecer una relación entre la magnitud de la fuerza y el ancho de corte, por lo que formalizar esta relación permitiría identificar la profundidad de corte radial a partir de la magnitud de la fuerza de corte.

Influencia del avance

En la Figura 3.8, se muestra la evolución de la fuerza de corte para distintos valores de avance f_z manteniendo ambas profundidades de corte constantes.

De la Figura 3.8, se observa que la magnitud de la fuerza aumenta conforme lo hace el avance, situación esperable, debido a la relación entre la fuerza y el avance en las ecuaciones del modelo de fuerzas de corte. También se observa que conforme aumenta el avance la relación entre F_x y F_y cambia, haciendo que en el caso de las condiciones de corte mostradas en la Figura 3.8, el aumento en el avance produce que la fuerza de mayor magnitud sea la fuerza F_x , que representa la fuerza en la dirección de avance.

Figura 3.8: Evolución de la fuerza de corte con el aumento de f_z ($a_e = 0,5$ mm, $a_p = 8$ mm, $n = 3.000$ rpm, $D = 8$ mm, $N = 1$).

Establecer una relación entre la magnitud de la fuerza de corte y la profundidad de corte radial a pesar de ser un procedimiento factible, presenta dificultades debido a que no es el único parámetro de mecanizado que produce un aumento de la fuerza y que además la magnitud de la fuerza para unas condiciones de corte fijas está condicionado por el material. Esto quiere decir que para cada material sería necesario establecer relaciones entre la magnitud de la fuerza y el ancho de corte si se quisiera implementar un método basado en este fenómeno.

Para la profundidad de corte axial se observa que su influencia en la magnitud de la fuerza no es significativa, por lo que un enfoque que considere su influencia en la magnitud no permitiría obtener información relevante acerca de las condiciones de corte.

3.3 Relación entre la geometría del proceso de corte y la señal temporal de las fuerzas de corte

A partir de los ángulos de entrada y salida de la herramienta en la pieza y sus parámetros de geometría (ángulo de hélice y diámetro) es posible establecer relaciones matemáticas que permiten obtener los valores de la profundidad y el ancho de corte teóricos.

En la Figura 3.9 se muestran los ángulos involucrados en el proceso de fresado de acabado.

Figura 3.9: Ángulos en el proceso de fresado de acabado.

El ángulo de entrada φ_{en} se relaciona con la profundidad de corte radial y la geometría de la herramienta según la Ecuación 3.18.

$$\varphi_{en} = \pi - \arccos \frac{D - 2a_e}{D} \quad (3.18)$$

Conociendo el ángulo de entrada φ_{en} es posible obtener la profundidad de corte radial según:

$$a_e = \frac{D}{2} [1 - \cos(\pi - \varphi_{en})] \quad (3.19)$$

La profundidad de corte axial a_p influye en el ángulo proyectado del filo de la herramienta. Cuando la profundidad crece el ángulo proyectado φ_{pr} es mayor ya que la herramienta permanece más tiempo cortando en contacto con la pieza. La relación entre la profundidad de corte axial y el ángulo proyectado es:

$$\varphi_{pr} = \frac{2 \tan(\lambda_s) a_p}{D} \quad (3.20)$$

Despejando en la Ecuación 3.20 se obtiene la profundidad de corte teórica, como se muestra en la Ecuación 3.21.

$$a_p = \varphi_{pr} \frac{D}{2 \tan(\lambda_s)} \quad (3.21)$$

Utilizando las expresiones de las Ecuaciones 3.19 y 3.21 sería posible determinar las profundidades de corte reales, si los parámetros que componen estas ecuaciones pudiesen ser determinados durante el proceso.

3.4 Influencia del alabeo de la herramienta en el perfil de la señal de fuerza

En en fresado, la presencia del alabeo de la herramienta es un fenómeno bastante frecuente. El eje geométrico difiere del eje de giro de la herramienta, debido a esto, las trayectorias reales de los filos tienen una desviación respecto de las trayectorias nominales. Por ello, cada filo tiene un radio efectivo diferente. El alabeo viene caracterizado por dos parámetros, la desviación de la herramienta ρ y su posición angular λ , en relación a un filo de referencia. La Figura 3.10 muestra el efecto del alabeo durante el proceso.

El alabeo genera que el periodo de la zona de corte y la magnitud de las señales de fuerza sean diferentes para cada filo (Figura 3.10b), debido a que cada filo tiene un arco de empañe distinto. El alabeo ha sido estudiado ampliamente en otras investigaciones (Kline y DeVor 1983; Matsumura y Tamura 2017; X. Zhang, J. Zhang et al. 2018).

En la Figura 3.11 se observa el efecto del alabeo en una señal de fuerza simulada. Por una parte para el filo que corta más material se produce un adelanto de la zona de entrada y por consiguiente un aumento de la magnitud de la fuerza. Para el filo que corta menos, por el contrario, se produce un retraso del punto de entrada y una consiguiente disminución del valor máximo de la fuerza.

Figura 3.10: (A) trayectorias de los filos para una herramienta de dos filos con alabeo, (B) efecto del alabeo en una señal de fuerza.

Figura 3.11: Señales de fuerza (A) con alabeo, (B) sin alabeo ($D = 10$ mm, $n = 5.000$ rpm, $a_p = 4$ mm, $a_e = 1$ mm, $f_z = 0,1$ mm, $N = 2$, $\rho = 0,01$ mm, $\lambda = 0^\circ$).

Dada la influencia del alabeo en la señal de fuerza, este fenómeno debe

ser tenido en cuenta para el desarrollo de las expresiones para la estimación de las profundidades de corte que se abordará en los capítulos siguientes.

3.5 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se ha desarrollado un modelo de fuerzas de corte que considera el efecto del alabeo de la herramienta, mediante este modelo se ha realizado un estudio de la influencia de los parámetros de corte y la posibilidad de utilizar la magnitud de la fuerza como un indicador de los parámetros de corte.

Se ha determinado que los parámetros de corte tienen una influencia significativa en la magnitud de la fuerza, pero que es necesario formalizar estas relaciones para cada material, debido a que las mismas condiciones de corte generan diferentes fuerzas en diferentes materiales. Además se ha comprobado que las variaciones de la profundidad de corte radial y de avance tienen un efecto similar en la magnitud de la fuerza, por lo que es necesario desacoplar su efecto si se quieren utilizar para determinar los parámetros de mecanizado.

Capítulo 4

Metodología para la estimación en proceso de las condiciones de corte en fresado

En este capítulo se exponen las expresiones y el procedimiento desarrollado para la determinación de los instantes de entrada y salida del filo de la herramienta. Se evalúan sus capacidades mediante ensayos preliminares de estimación de las profundidades de corte radial y axial, que permiten identificar las virtudes del procedimiento propuesto. Se expone un análisis de la respuesta dinámica del proceso y la influencia que tiene a la hora de estimar los parámetros de mecanizado. Se presenta una metodología para el ajuste de la respuesta dinámica del sistema de mecanizado, considerando como entrada la señal de fuerza simulada mediante el modelo presentado en el capítulo anterior. En la última parte de este capítulo se desarrolla un análisis estadístico de los parámetros de corte mediante regresión lineal, que permitirá realizar un mejor ajuste de los tiempos de entrada y salida del filo de la herramienta.

4.1 Bases de la estimación de los parámetros de corte

Las operaciones de acabado en fresado periférico tienen una profundidad radial reducida en relación a la profundidad de corte axial. Por este motivo normalmente se tiene un único filo activo de corte. También en operaciones donde la profundidad de corte en relación con el diámetro de la herramienta es reducida se tiene un solo filo de corte actuando sobre la pieza. La Figura 4.1 muestra las zonas en que dadas las condiciones de corte se encuentra cortando un filo simultáneamente, para herramientas de 2, 3 y 4 filos con ángulo de hélice de

30° y 45°. Se observa que existe un amplio rango de condiciones de corte en que se presenta esta situación. Estas condiciones de corte en el fresado, son muy utilizadas hoy en día, ya que además de las operaciones de acabado se realizan operaciones donde el ancho de corte es reducido como es el caso del mecanizado de alta velocidad, mecanizado trocoidal, fresado inverso, etc.

Figura 4.1: Zona de corte de un filo para diferentes configuraciones de herramienta y condiciones de corte.

El comportamiento de la herramienta en estas operaciones da lugar a distintas situaciones de corte. Una representación gráfica de estas situaciones a lo largo del arco de empañe se recoge en la Figura 4.2. En esta figura se representan las posiciones angulares que caracterizan el trabajo de la herramienta y los instantes de entrada y salida de los filos de la herramienta. También es posible observar cómo se relacionan los instantes de entrada y salida en una señal de fuerza.

El tiempo de entrada de la herramienta t_{en_i} del filo i en la pieza con respecto a una referencia es:

$$t_{en_i} = \frac{\varphi_{en_i}}{2\pi} T \quad (4.1)$$

Donde φ_{en_i} es el ángulo de entrada del filo i . El tiempo de entrada del filo i (t_{en_i}), considerando el alabeo de la herramienta, está relacionado con la profundidad de corte radial como se muestra en la Ecuación 4.2.

$$t_{en_i} = \frac{T}{2\pi} \left(\pi - \arccos \left(1 - \frac{2a_{e_i}}{D + 2\rho \cos \left(\lambda - \frac{2(i-1)}{N} \pi \right)} \right) \right) \quad (4.2)$$

Figura 4.2: (A) Posición angular y (B) tiempos del proceso.

La obtención del valor de la profundidad radial se obtiene a partir de conocer el diámetro real de la herramienta para el filo correspondiente y del valor del tiempo de entrada del filo en la pieza que está determinado por la velocidad de giro del husillo:

$$a_{ei} = \frac{D + 2\rho \cos\left(\lambda - \frac{2(i-1)}{N}\pi\right)}{2} \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi t_{eni}}{T}\right)\right) \quad (4.3)$$

Como se aprecia en la Ecuación 4.3, la precisión en la valoración de a_{ei} se verá influenciada por las fluctuaciones de la velocidad de rotación del husillo durante el mecanizado.

El tiempo de paso del filo t_{pr} es el tiempo que tarda el filo en recorrer el ángulo proyectado φ_{pr} . Este ángulo, es el ángulo de empañe máximo que puede tener un filo para un a_p determinado y un a_e igual al diámetro de la herramienta.

$$t_{pri} = \frac{T}{2\pi} \varphi_{pri} = \frac{T a_p \tan \lambda_s}{\pi \left(D + 2\rho \cos\left(\lambda - \frac{2(i-1)}{N}\pi\right)\right)} \quad (4.4)$$

De esta manera, el valor de la profundidad de corte axial se obtiene de la

Ecuación 4.5, aquí nuevamente el valor del diámetro real de la herramienta y la velocidad de giro son elementos determinantes en la precisión de la estimación.

$$a_{pi} = \frac{\pi}{T} t_{pri} \frac{D + 2\rho \cos\left(\lambda - \frac{2(i-1)}{N}\pi\right)}{\tan \lambda_s} \quad (4.5)$$

La obtención de los tiempos se puede realizar por diversos métodos, con la utilización de ultrasonido, con micrófonos aéreos, o mediante técnicas de medición piezoeléctricas. En este trabajo, los tiempos se obtendrán a partir de una señal de fuerza obtenida con una plataforma dinamométrica piezoeléctrica. La medida de la fuerza por este procedimiento presenta hoy en día un alto grado de fiabilidad y precisión, siendo tan solo afectada por la respuesta dinámica de la propia plataforma y por la deriva que durante un amplio tiempo de funcionamiento se pueda presentar como consecuencia de la utilización de técnicas piezoeléctricas. Además el uso de este tipo de sensores permite la obtención de datos con una frecuencia aceptable, con una bajo nivel de ruido y son señales que presentan una baja complejidad para ser procesadas en tiempo real.

4.2 Obtención de los tiempos de proceso en la señal de fuerza

Como se ha presentado en la Sección 4.1, el método de estimación está basado en la determinación de los tiempos de entrada y salida de los filos de la herramienta en la pieza. Esta medida de tiempos se referencia respecto de un origen definido para cada vuelta, asociado con la posición de la punta del filo de la herramienta. Para ello se utiliza un fototacómetro que genera un pulso de referencia para cada giro del husillo. Con ello, se consiguen dos cosas, por una parte que la variación de la velocidad de giro del husillo sea tenida en cuenta en la determinación de los tiempos en cada momento y que los filos puedan estar claramente diferenciados.

A efectos de facilitar el tratamiento de los tiempos, se genera una señal de referencia programáticamente que coincide con el origen de medida de los ángulos de situación de los filos de la herramienta, a partir del pulso de referencia del fototacómetro. Este ajuste se realiza previo a los ensayos de mecanizado, la punta de la herramienta se identifica angularmente de manera de poder establecer su ubicación independientemente de las variaciones de velocidad. La Figura 4.3 expone el principio del procedimiento de ajuste.

Figura 4.3: Ajuste del sensor de posición con respecto a la punta de la herramienta.

Para establecer una relación entre el inicio de la medición que es independiente de la posición de la herramienta y los tiempos asociados con la medición del tiempo desde la entrada de la herramienta, se incluyen tres nuevos tiempos, t'_{pul} , t'_{ref} y t_{pul} que se muestran en la Figura 4.4.

Figura 4.4: Tiempos considerados durante el procedimiento de medición.

El tiempo t_{pri} de la Ecuación 4.4 puede ser determinado directamente en la

señal de fuerza, y está caracterizado tal como se muestra en la Figura 4.4. Debido a que la detección del tiempo en que efectivamente la herramienta comienza a salir de la pieza presenta complicaciones para su detección y afecta directamente en la precisión del método, el tiempo t_{pri} se determina indirectamente a partir de los tiempos que se muestran en la Ecuación 4.6.

$$t_{pri} = t'_{exit_i} - t'_{ref} - \frac{T}{2} \quad (4.6)$$

4.3 Resultados preliminares

Con el objetivo de evaluar la capacidad de estimación de la metodología propuesta se llevaron a cabo ensayos de mecanizado con condiciones de corte constante. Mediante estos ensayos ha sido posible establecer las potencialidades y las limitaciones del método de estimación y validar el modelo de fuerzas de corte.

4.3.1 Estimación de la profundidad de corte radial

En los ensayos de comprobación se determina el tiempo de entrada de los filos de la herramienta en la pieza para distintas profundidades de corte radial. En la Tabla 4.1 se muestran las condiciones de corte utilizadas para llevar a cabo este ensayo.

Tabla 4.1: Condiciones de corte para el ensayo preliminar para la estimación de a_e .

Parámetro	Unidades	Descripción	Valor
N	-	Número de filos	1
D	mm	Diámetro de la herramienta	8
λ_s	°	Ángulo de Hélice	30
n	rpm	Velocidad de rotación	1.200
f_z	mm	Avance por filo	0,040
a_p	mm	Profundidad de corte axial	12
a_e	mm	Profundidad de corte radial	0,3 - 0,5 - 1
			Herramienta: Garant 191080 Material: AA 6061

Los resultados obtenidos mediante el método de la estimación de a_e de estos ensayos se recogen en la Tabla 4.2 y se comparan con los valores medidos directamente sobre la pieza mecanizada.

Tabla 4.2: Resultados de la medición para distintos valores de a_e .

Valor nominal	Valor medido	Valor estimado	Diferencia
mm	mm	mm	%
0,3	0,280	0,281	<1
0,5	0,474	0,473	<1
1	0,980	0,981	<1

En la Figura 4.5 se recogen los resultados simulados y reales para la profundidad de corte radial. En la columna A se tiene los resultados simulados con el modelo de fuerzas de corte y en la columna B los resultados experimentales para las mismas condiciones de corte (Tabla 4.2). La línea punteada se mantiene como referencia para observar el efecto de la variación de la profundidad de corte radial en la señal de fuerza.

Figura 4.5: Evolución de la fuerza simulada y medida para diferentes profundidades de corte radial.

La diferencia temporal del tiempo de entrada de la onda de la señal de

fuerza para diferentes situaciones de mecanizado simuladas es de 0,9199 ms entre las pasadas con $a_e = 0,3$ mm y $a_e = 0,5$ mm y de 1,7298 ms entre $a_e = 0,5$ mm y $a_e = 1$ mm.

Cuando se consideran las señales reales medidas experimentalmente, la diferencia de los tiempos medidos respecto de la señal de referencia entre las pasadas con $a_e = 0,3$ mm y $a_e = 1$ mm es de 2,7096 ms. Este valor corresponde a un incremento de la profundidad radial medida directamente sobre la pieza de 0,702 mm lo que prácticamente coincide con los valores simulados con el modelo.

4.3.2 Estimación de la profundidad de corte axial

En los ensayos para evaluar la estimación de la profundidad de corte axial, se consideraron las condiciones de corte que se muestran en la Tabla 4.3. En la Figura 4.6 se recogen las fuerzas simuladas y experimentales variando la profundidad de corte axial. La diferencia de los tiempos en la salida de la herramienta respecto de la señal de referencia, entre las condiciones de $a_p = 4$ mm y $a_p = 8$ mm es de 4,5944 ms en el modelo simulado. Este incremento corresponde con una diferencia en la profundidad axial de 4 mm. De igual manera en el caso de variar la profundidad axial de $a_p = 8$ mm a $a_p = 12$ mm la diferencia es de 4,5944 ms. Aplicando de forma inversa el procedimiento de estimación de parámetros de corte a este valor de tiempo, se obtiene una profundidad axial de 4 mm.

Tabla 4.3: Condiciones de corte para el ensayo preliminar para la estimación de a_p .

Parámetro	Unidades	Descripción	Valor
N	-	Número de filos	1
D	mm	Diámetro de la herramienta	8
λ_s	°	Ángulo de Hélice	30
n	rpm	Velocidad de rotación	1.200
f_z	mm	Avance por filo	0,120
a_p	mm	Profundidad de corte axial	4 - 8 - 12
a_e	mm	Profundidad de corte radial	0,5
Herramienta: Garant 191080 Material: AA 6061			

En el caso de considerar las señales reales de las fuerzas, se tiene que las diferencias en el retraso de la salida del filo son semejantes. En este caso las diferencias obtenidas entre las pasadas con $a_p = 4$ mm y $a_p = 8$ mm son 4,5369 ms. Este valor corresponde con un incremento de la profundidad axial de 3,95

mm.

Figura 4.6: Evolución de la fuerza simulada y medida para diferentes profundidades de corte axial.

En la Tabla 4.4 se muestran los resultados de la estimación para el ensayo de la profundidad de corte axial.

Tabla 4.4: Resultados de la medición para distintos valores de a_p .

Valor nominal	Valor medido	Valor estimado	Diferencia
mm	mm	mm	%
4	3,951	4,861	18,72
8	7,972	8,817	9,58
12	12,011	12,787	6,07

De los resultados presentados en la Sección 4.3 se observa que la precisión de la estimación es buena para el caso de la profundidad de corte radial y menor para el caso de la profundidad de corte axial.

La diferencia entre el valor de a_p medido en la pieza y el valor estimado está relacionada con la detección del punto de salida de los filos en la pieza mediante la señal de fuerza. Cuando se produce un retraso o una oscilación de la señal respecto del momento de actuación del filo, se incrementa la imprecisión en la selección de estos instantes. Esta variación de los tiempos estimados en proceso, se ve afectada principalmente por la respuesta dinámica del sistema compuesto por la máquina herramienta, la pieza, la herramienta y la cadena de medición. Por lo tanto, la determinación de los tiempos de salida de la herramienta puede mejorarse considerando la respuesta dinámica del sistema total.

4.4 Respuesta dinámica del proceso de mecanizado y su influencia en la estimación de las profundidades de corte

En la Sección 4.3 se ha estudiado el nivel de ajuste en la estimación de las profundidades de corte, comparando el modelo de fuerzas de corte con señales de fuerza reales obtenidas durante el mecanizado. Se ha podido observar que aunque el nivel de ajuste es relativamente similar en cuanto a la magnitud de la fuerza, las señales reales presentan un retraso que se hace evidente principalmente en la zona de la salida de la herramienta, como se ve en la Figura 4.7. En esta sección de la tesis se estudia la respuesta dinámica del sistema de mecanizado y su influencia en el nivel de precisión en la estimación de las profundidades de corte, principalmente en la profundidad de corte axial.

Figura 4.7: Señal de fuerza real y señal de fuerza simulada.

En las Figura 4.7 se observa por una parte que la influencia en la zona de entrada de la herramienta no es significativa debido a que en la zona en que se realiza la medida el retraso apenas existe. Por otra parte se observa la diferencia

que se presenta en la zona de salida, donde la diferencia entre la señal real y teórica es superior.

Se ha evidenciado que durante el mecanizado, cuando las condiciones de corte son contantes, la influencia de la respuesta dinámica sobre las señales de fuerzas se mantiene relativamente constante, esta situación genera que se produzca un error sistemático en la medición que es responsable de la diferencia en los valores estimados de la profundidad de corte axial. Por ello se ha establecido un elemento de corrección en el algoritmo de detección de la salida del filo de la herramienta, que tiene en cuenta la dinámica del proceso, denominado tiempo de retraso (Δt_{exit}).

Figura 4.8: Salida del filo de la herramienta para diferentes velocidades de giro del husillo.

Cuando las condiciones del proceso varían, producto, por ejemplo de cambios en la geometría de la pieza o de modificaciones en los parámetros de corte, la respuesta dinámica del proceso también varía. En la Figura 4.8 se muestra la

zona de la salida del filo de la herramienta para diferentes velocidades de giro de la herramienta. Se realiza una comparación entre la señal de fuerza real normalizada y la fuerza teórica generada con el modelo de fuerza de corte. En la Tabla 4.5 se muestran las condiciones de corte utilizadas.

En la Figura 4.8 se observa que la variación en la velocidad de giro produce una diferencia entre el tiempo de salida esperado (Tiempo de salida nominal) y el tiempo de salida que efectivamente se presenta en una señal de fuerza medida.

Tabla 4.5: Condiciones de corte para el análisis de la salida de la herramienta para diferentes velocidades.

Parámetro	Unidades	Descripción	Valor
N	-	Número de filos	1
D	mm	Diámetro de la herramienta	10
λ_s	$^\circ$	Ángulo de Hélice	30
n	rpm	Velocidad de rotación	1.400 - 1.800 - 2.200 2.600 - 3.000
f_z	mm	Avance por filo	0,120
a_p	mm	Profundidad de corte axial	8
a_e	mm	Profundidad de corte radial	0,5
			Herramienta: Garant 191080 Material: AA 7075

Esta variación en el tiempo de salida puede ser explicada por la rigidez torsional de la herramienta. Las fuerzas aplicadas sobre la herramienta durante el mecanizado, dan lugar por una parte a un efecto a lo largo del eje axial de la herramienta que produce una deflexión. Estas mismas fuerzas de corte además producen un efecto de rotación de la herramienta sobre su eje longitudinal, que está determinado por las fuerzas de corte y por la rigidez torsional de la herramienta. Este fenómeno da lugar a que la posición real de la herramienta durante el mecanizado este levemente desfasada de su posición teórica.

Otro elemento que influye en la respuesta del sistema está relacionado con el sistema de medición, la respuesta de los instrumentos utilizados en la captación de las señales de fuerza tienen un respuesta propia, que aunque se intenta que tenga poca influencia en la medición, podría originar variaciones en la señal captada.

La determinación y cuantificación del efecto real que la rigidez torsional tiene sobre el comportamiento de la herramienta durante el mecanizado, tienen un alto interés, pero escapan al alcance y a los objetivos de esta tesis. Por ello a continuación se detalla el enfoque utilizado en este trabajo para la caracterización

del sistema de mecanizado, que considera todas las variables que influyen en la variación del tiempo de salida de la herramienta.

Teniendo en cuenta la influencia que la variación del tiempo de salida puede inducir en la variación de las condiciones de corte, se ha propuesto caracterizar el sistema de mecanizado mediante una función de transferencia para el proceso, que relaciona la fuerza teórica (nominal) con la fuerza medida para unas condiciones determinadas. Este procedimiento requeriría ajustar los parámetros del sistema para cada combinación de condiciones de corte. Un enfoque de este tipo implicaría establecer una base de datos con los ajustes, lo que es poco eficiente, además de tener una baja aplicabilidad industrial. Es por ello que a continuación se presenta un enfoque que aborda estos puntos.

Dado que la respuesta dinámica del proceso de mecanizado genera una modificación en la fuerza de corte nominal (estática), lo que produce la señal de fuerza real medida, se propone la construcción de un modelo dinámico de segundo orden y se realiza una análisis de la relación entre estas dos fuerzas. A partir de la relación entre las fuerzas es posible establecer los valores de corrección en la estimación de las profundidad de corte axial, considerando las condiciones de corte, mediante el ajuste del tiempo de salida del filo de la herramienta en la pieza.

En la Figura 4.9 se muestra un esquema que resume el procedimiento de caracterización según el método que aquí se propone.

Figura 4.9: Señal de fuerza real y señal de fuerza teórica.

Para determinar el valor del tiempo de retraso para diferentes condiciones de corte, se ha estudiado su relación con los diferentes parámetros de mecanizado V , a_e y a_p . Como se ha mencionado anteriormente, el sistema se ha caracterizado como un sistema dinámico de segundo orden. En la Tabla 4.6, se muestran algunas funciones de transferencia para condiciones de corte variadas que han sido ajustadas mediante la herramienta *System Identification Toolbox* de Matlab (*MATLAB version 9.2.0.556344 (R2017a) 2018*).

En la Tabla 4.6 se muestra la señal del modelo de fuerzas de corte, la señal de fuerza medida y la respuesta del sistema ajustado. Se observa que es posible predecir con un buen nivel de ajuste la respuesta del sistema de mecanizado para diferentes condiciones de corte.

Tabla 4.6: Funciones de transferencia ajustadas para diferentes condiciones de mecanizado.

Función de transferencia	Parámetros	Comparación
$H(s) = \frac{750,5s + 1,156e^6}{s^2 + 1742s + 1,157e^6}$	$a_e = 1 \text{ mm}$ $a_p = 12 \text{ mm}$ $n = 1.200 \text{ rpm}$ $f_z = 0,040 \text{ mm}$ $D = 8 \text{ mm}$
$H(s) = \frac{1440s + 9,62e^5}{s^2 + 2000s + 1e^6}$	$a_e = 0,5 \text{ mm}$ $a_p = 8 \text{ mm}$ $n = 2.400 \text{ rpm}$ $f_z = 0,080 \text{ mm}$ $D = 10 \text{ mm}$
$H(s) = \frac{332s + 6,975e^5}{s^2 + 1650s + 6,849e^5}$	$a_e = 0,3 \text{ mm}$ $a_p = 8 \text{ mm}$ $n = 3.000 \text{ rpm}$ $f_z = 0,120 \text{ mm}$ $D = 10 \text{ mm}$
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 5px; background-color: blue; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 5px; background-color: red; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 5px; background-color: green; margin-right: 5px;"></div> <div> <p>Modelo de fuerzas de corte</p> <p>Señal de fuerza</p> <p>Respuesta del modelo</p> </div> </div>		

El tiempo de retraso calculado para cada una de las funciones de transfe-

rencia ha sido obtenido mediante la Ecuación 4.7

$$\Delta t_{exit} = \frac{2\xi}{\omega_n} \quad (4.7)$$

Donde ξ es el coeficiente de amortiguamiento y ω_n es la frecuencia natural del sistema.

4.4.1 Relación entre el tiempo de retraso y los parámetros de mecanizado

Ya que se ha podido establecer que hay una relación bastante estable entre las variaciones de los parámetros de mecanizado y el valor del tiempo de retraso, se establecerán expresiones que permitan obtener el tiempo de retraso sin la necesidad del ajuste del sistema dinámico. Las expresiones para relacionar el tiempo de retraso con los parámetros de corte han sido obtenidas mediante un modelo de regresión lineal utilizando el programa informático R (R Core Team 2016).

Para la obtención de los valores para el modelo de regresión, se llevaron a cabo una serie de ensayos de mecanizado. En la Tabla 4.7 se muestran las condiciones de corte de estos ensayos.

Tabla 4.7: Condiciones de corte para los ensayos de análisis del tiempo de retraso.

Parámetro	Unidades	Descripción	Valor
N	-	Número de filos	1
D	mm	Diámetro de la herramienta	10
λ_s	°	Ángulo de hélice	30
n	rpm	Velocidad de giro	1.200 - 1.400 - 1.600 - 1.800 2.000 - 2.200 - 2.400 - 2.600 2.800 - 3.000
f_z	mm	Avance por filo	0,120
a_p	mm	Profundidad de corte axial	2 - 4 - 6 - 8 - 10 - 12
a_e	mm	Profundidad de corte radial	0,2 - 0,4 - 0,6 - 0,8 1,0 - 1,2 - 1,4
			Herramienta: Garant 191080 Material: AA 7075

En la Figura 4.10 se muestra la curva de ajuste y los puntos de los valores experimentales utilizados para el análisis.

Figura 4.10: Evolución del tiempo de retraso para diferentes profundidades de corte axial y velocidades de giro.

El resultado del análisis de regresión para la velocidad de giro del husillo, la profundidad de corte axial y el tiempo de retraso se muestra en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Resultados de la regresión lineal para la velocidad de giro y la profundidad de corte axial.

	Estimado	Desviación estándar	p-valor
Intercepción	3,389	7,025e-2	<2e-16
Velocidad	0,000 9717	2,838e-5	<2e-16
a_p	-0,1622	4,773e-3	<2e-16

Se observa que existe una alta correlación entre la velocidad la profundidad axial y el tiempo de retraso con p-valores muy pequeños.

La ecuación que relaciona la velocidad de giro con la profundidad de corte axial y el tiempo de retraso es:

$$\Delta t_{exit} = 3,389 + 0,0009717n - 0,1622a_p \quad R^2 = 0,975 \quad (4.8)$$

De manera análoga a la profundidad de corte axial, el resultado del análisis de regresión para la velocidad de giro del husillo, la profundidad de corte radial y el tiempo de retraso se muestra en la Tabla 4.9.

En la Figura 4.11 se muestra la curva ajustada junto con los valores experimentales utilizados para el análisis.

Figura 4.11: Evolución del tiempo de retraso para diferentes profundidades de corte radial y velocidades de giro.

Tabla 4.9: Resultados de la regresión lineal para la velocidad de giro y la profundidad de corte radial.

	Estimado	Desviación estándar	p-valor
Intercepción	2,339	6,884e-5	<2e-16
Velocidad	0,001 123	2,839e-8	<2e-16
a_e	-0,7749	4,002e-5	<2e-16

Se observa que existe una alta correlación con p-valoros muy pequeños al igual que en el caso de la profundidad de corte axial.

La ecuación que relaciona la velocidad de giro con la profundidad de corte radial y el tiempo de retraso se muestra en la Ecuación 4.9.

$$\Delta_{t_{exit}} = 2,339 + 0,001123n - 0,7749a_e \quad R^2 = 0,965 \quad (4.9)$$

Finalmente se ha realizado un ajuste lineal considerando los tres parámetros de mecanizado presentes en este análisis (velocidad de giro del husillo, profundidad de corte radial y profundidad de corte axial), para establecer una expre-

sión general que los relacione. En la Tabla 4.10 se muestra el resultado de este ajuste.

Tabla 4.10: Resultados de la regresión lineal para la velocidad de giro, la profundidad de corte radial y la profundidad de corte axial.

	Estimado	Desviación estándar	p-valor
Intercepción	3,524	7,047e-2	<2e-16
Velocidad	0,001 053	2,383e-5	<2e-16
a_e	-0,0855	4,139e-2	<2e-16
a_p	-0,1582	5,813e-3	<2e-16

La Ecuación 4.10 muestra el ajuste. El coeficiente de correlación es superior al 90 %, por lo que es un ajuste con un alto nivel de representatividad.

$$\Delta_{t_{exit}} = 3,524 + 0,001053n - 0,855a_e - 0,1582a_p \quad R^2 = 0,959 \quad (4.10)$$

Dadas las relaciones expuestas, es posible realizar este ajuste con un número reducido de puntos, los cuales pueden ser obtenidos durante las tareas de preparación de la máquina y ajuste de la herramienta. Este procedimiento es descrito con detalle en el Capítulo 6.

La ventaja de este procedimiento es que una vez que se ha realizado el ajuste, los valores son válidos para diferentes combinaciones de parámetros de mecanizado.

4.5 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se han desarrollado y expuesto las expresiones para la estimación de las profundidades de corte, además se han evaluado resultados preliminares que permitieron detectar algunas limitaciones del procedimiento de estimación. Finalmente se expuso un análisis de la respuesta dinámica del proceso de mecanizado, abordándolo desde la perspectiva de los sistemas dinámicos y proponiendo un procedimiento de ajuste fácil de generalizar.

El método de estimación propuesto permite la identificación simultánea de ambas profundidades de corte debido al desacoplamiento que existe en la señal de fuerza de ambos parámetros de mecanizado.

El estudio de la dinámica del sistema ha permitido realizar una caracteriza-

ción del sistema de mecanizado basado en el uso de la fuerza de corte obtenida desde el modelo, obteniendo un ajuste muy alto, este procedimiento representa una novedad en cuanto a los métodos existentes para la caracterización de un sistema dinámico de mecanizado.

El análisis estadístico de los parámetros ha mostrado que existe una alta correlación entre la velocidad de giro de la herramienta, las profundidades de corte y el tiempo de retraso en la salida de la herramienta en una señal medida.

Capítulo 5

Análisis de incertidumbre y sensibilidad del método de estimación

En este capítulo se expone un análisis de sensibilidad de los parámetros involucrados en el procedimiento de estimación para establecer la influencia que pequeñas variaciones de los parámetros tienen sobre los valores estimados. Se realiza también, un análisis de incertidumbre en la medida de todos los parámetros de las expresiones presentadas en el Capítulo 4.

La precisión en la estimación de los valores de a_e y a_p depende de los valores de las características de la herramienta (diámetro y ángulo de hélice), de la estimación de los tiempos de entrada y salida y de la medida de la velocidad de giro del husillo en tiempo real. Es por ello, que para comprobar la eficiencia del método que en esta tesis se propone, se realiza un análisis de sensibilidad que considera las variaciones de t_{en_i} y t_{pr_i} y un análisis de la incertidumbre en la obtención de los parámetros y tiempos.

5.1 Análisis de incertidumbre de la medida de los parámetros para la estimación de las profundidades de corte

Se ha llevado a cabo un análisis de la propagación de incertidumbre. El objetivo de este análisis es determinar y cuantificar la influencia de cada uno de los parámetros involucrados en el procedimiento de estimación.

Las variables a partir de las cuales se determinan las profundidades de

corte son independientes, es por ello que su incertidumbre se calcula a partir de la suma de cuadrados de cada una de sus incertidumbres.

Cuando se calcula la incertidumbre de una variable que se obtiene de manera indirecta, como es el caso de las profundidades de corte, su incertidumbre está dada por la suma de cuadrados de las incertidumbres de los parámetros a partir de los cuales se realiza la estimación. Si se tiene una variable q , que se ha medido a partir de las variables independientes $x, \dots, z$, tal que:

$$q = f(x, \dots, z) \quad (5.1)$$

Las variables $x, \dots, z$ tienen una incertidumbre $\delta x, \dots, \delta z$, entonces la incertidumbre de la variable q es una función de las incertidumbres de las variables.

$$\delta q = f(\delta x, \dots, \delta z) \quad (5.2)$$

Para estimar la incertidumbre de q cuando es una función de variables independientes, se realiza mediante la Ecuación 5.3.

$$\delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial x}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial q}{\partial z}\right)^2} \quad (5.3)$$

5.1.1 Incertidumbre de la estimación de la profundidad de corte axial

La profundidad de corte axial depende de los valores de t_{pri} , λ_s , D y T . Las Ecuaciones 5.4, 5.5 y 5.6 muestran el periodo, el ángulo de hélice y el diámetro de la herramienta con su incertidumbre asociada.

$$T = T \pm \delta T \quad (5.4)$$

$$\lambda_s = \lambda_s \pm \delta \lambda_s \quad (5.5)$$

$$D = D \pm \delta D \quad (5.6)$$

El tiempo proyectado se estima experimentalmente según la Ecuación 4.6, debido a esto, se establecen las expresiones para t'_{exit_i} y t'_{ref_i} que consideran su incertidumbre:

$$t'_{exit_i} = t'_{exit_i} \pm \delta t'_{exit_i} \quad (5.7)$$

$$t'_{ref_i} = t'_{ref_i} \pm \delta t'_{ref_i} \quad (5.8)$$

De esta manera, a partir de la Ecuación 4.6, t_{pr_i} se reescribe según la siguiente expresión:

$$t_{pr_i} = t'_{exit_i} - t'_{ref_i} - \frac{T}{2} \pm (\delta t'_{exit_i} + \delta t'_{ref_i} + \delta T) \quad (5.9)$$

Debido a que experimentalmente existe una dependencia entre t'_{exit_i} y t'_{ref_i} la expresión para t_{pr_i} considera la suma ordinaria de las variables, esto con el objetivo de no subestimar la incertidumbre asociada al calculo de t_{pr_i} .

Para obtener la expresión de a_p considerando la incertidumbre asociada a cada una de las variables de estimación se han obtenido las expresiones 5.10 a 5.13.

$$\frac{\partial a_p}{\partial T} = \frac{\pi}{T^2} \left(t'_{ref_i} - t'_{exit_i} \right) \frac{D}{\tan \lambda_s} \quad (5.10)$$

$$\frac{\partial a_p}{\partial \lambda_s} = \frac{\pi}{T} \left(t'_{exit_i} - t'_{ref_i} - \frac{T}{2} \right) \frac{D \sec^2 \lambda_s}{\tan^2 \lambda_s} \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial a_p}{\partial D} = \frac{\pi}{T} \left(t'_{exit_i} - t'_{ref_i} - \frac{T}{2} \right) \frac{1}{\tan \lambda_s} \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial a_p}{\partial t_{pr}} = \frac{\pi}{T} \frac{D}{\tan \lambda_s} \quad (5.13)$$

En la Ecuación 5.14 se muestra la expresión para la profundidad de corte axial que considera la influencia de las variables de estimación y su incertidumbre.

$$a_p = \frac{\pi}{T} \left(t'_{exit_i} - t'_{ref_i} - \frac{T}{2} \right) \frac{D}{\tan \lambda_s} \quad (5.14)$$

$$\pm \left[\left(\frac{\pi}{T^2} (t'_{ref_i} - t'_{exit_i}) \frac{D}{\tan \lambda_s} \delta T \right)^2 + \left(\frac{\pi}{T} \left(t'_{exit_i} - t'_{ref_i} - \frac{T}{2} \right) \frac{D \sec^2 \lambda_s}{\tan^2 \lambda_s} \delta \lambda_s \right)^2 + \left(\frac{\pi}{T} \left(t'_{exit_i} - t'_{ref_i} - \frac{T}{2} \right) \frac{1}{\tan \lambda_s} \delta D \right)^2 + \left(\frac{\pi}{T} \frac{D}{\tan \lambda_s} \delta t_{pr} \right)^2 \right]^{1/2}$$

5.1.2 Incertidumbre de la estimación de la profundidad de corte radial

Para el caso de la incertidumbre de a_e existe dependencia de los valores de D , T y t_{eni} . Las expresiones que consideran la incertidumbre para T y D son las Ecuaciones 5.4 y 5.6 respectivamente. La expresión para t_{eni} es:

$$t_{eni} = t_{eni} \pm \delta t_{eni} \quad (5.15)$$

De manera análoga al procedimiento utilizado para la incertidumbre de a_p se obtienen las Ecuaciones 5.16, 5.17 y 5.18

$$\frac{\partial a_e}{\partial D} = \frac{1 + \cos \frac{2\pi t_{eni}}{T}}{2} \quad (5.16)$$

$$\frac{\partial a_e}{\partial t_{eni}} = \frac{D}{2} \left(1 - \sin \frac{2\pi t_{eni}}{T} \right) \quad (5.17)$$

$$\frac{\partial a_e}{\partial T} = \frac{D}{2} \left(1 + \frac{1}{T^2} \sin \frac{2\pi t_{eni}}{T} \right) \quad (5.18)$$

De esta manera, la ecuación que permite calcular la incertidumbre asociada a la estimación de la profundidad de corte radial, es la siguiente:

$$a_e = \frac{D}{2} \left(1 + \cos \frac{2\pi t_{en}}{T} \right) \pm \left[\left(\frac{1 + \cos \frac{2\pi t_{en}}{T}}{2} \delta D \right)^2 + \left(\frac{D}{2} \left(1 - \sin \frac{2\pi t_{en}}{T} \right) \delta t_{en} \right)^2 + \left(\frac{D}{2} \left(1 + \frac{1}{T^2} \sin \frac{2\pi t_{en}}{T} \right) \delta T \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.19)$$

5.1.3 Incertidumbre en la medida de los parámetros para la estimación de las profundidades de corte

Para poder realizar el cálculo de la incertidumbre de las profundidades de corte, se analiza la incertidumbre asociada con la obtención de los valores de cada parámetro. Esta incertidumbre viene dada principalmente por el método que se utiliza para obtener sus valores.

El procedimiento de estimación requiere valores precisos de cada una de las variables con el objetivo de obtener información significativa. Dentro de las variables consideradas en este trabajo, se han agrupado las referentes a las características de la herramienta y las referentes a la medición de tiempos durante el proceso.

Además, dado que el tiempo proyectado se ajusta mediante el valor del tiempo de retraso, esta corrección influye en la incertidumbre debido al ajuste lineal, por lo que su aporte en la incertidumbre debe ser considerado.

Características de la herramienta

Dado que las características de la herramienta están relacionadas con la capacidad de estimación de la metodología, se han comprobado los valores del diámetro y el ángulo de hélice de la herramienta. El ángulo de hélice de la herramienta se ha medido usando un microscopio Tesa Visio 200 GL. El diámetro real de la herramienta se mide en el microscopio y luego se comprueba su valor una vez instalada en el centro de mecanizado mediante un sensor de medida de la herramienta por contacto Renishaw TS27R ([Sonda de reglaje de herramientas TS27R 2018](#)).

La incertidumbre se ha obtenido a partir de una serie de mediciones realizadas para herramientas de diferente diámetro, mediante la Ecuación 5.20. Donde

N_m es el número de mediciones realizadas.

$$\hat{\sigma}(\varepsilon) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N_m}} \quad (5.20)$$

La medición del ángulo de hélice en el microscopio se obtiene con un nivel de incertidumbre de $\pm 0,034^\circ$ en el rango de $28^\circ - 45^\circ$, valores usuales en una herramienta enteriza. Este valor está determinando por la precisión del microscopio y la operatoria que realiza para calcular el ángulo entre dos líneas.

Para el caso del diámetro de la herramienta, es posible medir con un nivel de precisión en el rango de micrómetros, con una incertidumbre de $5 \mu m$ lo que para el procedimiento de estimación representa variaciones menores al 0,0067 % en los valores de a_e y a_p .

Los valores de diámetro y ángulo de hélice de la herramienta son tomados previo a la realización de los ensayos y su magnitud es considerada constante durante el mecanizado.

Medición de los tiempos de entrada y proyectado

Para poder evaluar la incertidumbre en la medición de los tiempos en el proceso (T , t_{en_i} y t_{pr_i}) se ha realizado una medición de comparación utilizando el equipamiento que es usado para los ensayos de mecanizado. Se han generado señales mediante un generador de señales HAMEG HM8150. Se generaron señales rectangulares y triangulares debido a que son formas de onda similares a las señales reales que son adquiridas durante el fresado. Se adquirieron señales a diferentes frecuencias de emisión y con diferentes configuraciones de muestreo en el sistema de adquisición de datos.

Figura 5.1: Incertidumbre en la medición de la señal triangular.

En la Figura 5.1 se muestran los resultados para la adquisición de la señal triangular, asociada con la medida de los tiempos de entrada y proyectado. La incertidumbre para la estimación de t_{eni} y t_{pri} es de $1 \mu s$.

En la Tabla 5.1 se muestran las configuraciones de muestreo evaluadas.

Tabla 5.1: Configuración de adquisición de datos para el análisis de incertidumbre de los tiempos de proceso.

Tipo de señal	Frecuencia de emisión [Hz]				Frecuencia de muestreo [kHz]
C	20				10
C-T	20				20
C	20				30
C-T	20				40
C-T	20	50			50
C-T	20				60
T	20				80
C-T	20	50	100	200	100
T	20				120
C-T		50			150
C-T		50	100	200	200
C-T		50			250
C-T		50	100		300
T			100	200	400
T			100	200	500
T			100	200	600

C: Señal cuadrada
T: Señal triangular

En la Figura 5.2 se muestran los resultados para la adquisición de la señal cuadrada, asociada con la medida del periodo T , la incertidumbre en la obtención del periodo es de $2 \mu s$.

Figura 5.2: Incertidumbre en la medición de la señal cuadrada.

Incertidumbre en el ajuste del tiempo de retraso

El valor del tiempo de retraso se obtiene de las expresiones revisadas en el Capítulo 4, y se obtienen mediante un ajuste lineal. Por lo tanto, la incertidumbre que se genera en la obtención del tiempo de retraso está directamente relacionada con la incertidumbre de las expresiones del ajuste. Para determinar la incertidumbre de un ajuste lineal, se utiliza la Ecuación 5.21.

$$\sigma_y(\epsilon) = \sqrt{\frac{1}{N_m - 2} \sum_{i=1}^n (y_i - A - Bx_i)^2} \quad (5.21)$$

Donde A, B, y_i y x_i son los parámetros del ajuste. En la Tabla 5.2 se muestran las condiciones de corte de los ensayos llevados a cabo para establecer uno de los ajustes realizados.

Tabla 5.2: Condiciones de corte para el ensayo de ajuste de la incertidumbre del tiempo de retraso.

Parámetro	Unidades	Descripción	Valor
N	-	Número de filos	1
D	mm	Diámetro de la herramienta	10
λ_s	°	Ángulo de Hélice	30
n	rpm	Velocidad de rotación	1.200 - 1.400 - 1.600 - 1.800 2.000 - 2.200 - 2.400 - 2.600 2.800 - 3.000
f_z	mm	Avance por filo	0,120
a_p	mm	Profundidad de corte axial	4
a_e	mm	Profundidad de corte radial	0,5
			Herramienta: Garant 191080 Material: AA 6061

En la Figura 5.3 se muestran los valores del tiempo de retraso para las condiciones de corte de la Tabla 5.2.

Para el caso expuesto, el valor de la incertidumbre del retraso es de 0,06 μs . Para un amplio grupo de condiciones de corte se realizó la estimación de la incertidumbre del retraso y en los casos estudiados su influencia se encontraba en el rango de las centésimas de microsegundo con una influencia máxima del 4 %.

Figura 5.3: Ajuste del retraso y su desviación.

5.1.4 Resultados del análisis de incertidumbre

Una vez cotejadas las fuentes de incertidumbres más significativas para el proceso de estimación, que son aquellas relacionadas con las ecuaciones para estimar la profundidad de corte radial y la profundidad de corte axial, se ha estudiado la influencia que cada una de las fuentes de incertidumbre tiene en la incertidumbre total del proceso.

Este procedimiento de análisis es importante, ya que permite identificar las variables que mayor influencia tienen en la incertidumbre total del proceso de estimación y por lo tanto es posible establecer aquellas en que se debe prestar especial atención para poder tener un método de estimación competente y que genere valores de incertidumbre pequeños en comparación con los valores estimados.

Se ha hecho una evaluación de la incertidumbre para herramientas de distinto diámetro y distinto ángulo de hélice. Se ha evaluado la incertidumbre considerando diferentes configuraciones de muestreo, esto permite evaluar la influencia que presentan las variaciones en el cálculo del tiempo de entrada, el tiempo de salida y el periodo.

Se ha evaluado la evolución de la incertidumbre relativa para diferentes diámetros de herramienta, manteniendo constante los otros parámetros para la estimación.

En la Figura 5.4 se muestran los valores de la incertidumbre relativa para la profundidad de corte radial analizando herramientas de cuatro diámetros distintos (4 mm, 6 mm, 8 mm y 10 mm).

Figura 5.4: Incertidumbre relativa de a_e para diferentes diámetros de herramienta.

Se observa que las variaciones en el diámetro de la herramienta no generan variaciones significativas en la incertidumbre del valor estimado de la profundidad de corte radial a_e , con una incertidumbre relativa máxima del 5 % para el caso de la herramienta de diámetro 10 mm y una incertidumbre relativa mínima del 3 % en la herramienta de 4 mm.

En la Figura 5.5 se muestra la incertidumbre relativa para diferentes diámetros de herramienta para el caso de la profundidad de corte axial.

Figura 5.5: Incertidumbre relativa de a_p para diferentes diámetros de herramienta.

De la Figura 5.5 se aprecia, que la influencia del cambio de diámetro es

inferior que para el caso de a_e , además hay una disminución de la incertidumbre para diámetros mayores.

Se ha hecho la evaluación para el ángulo de hélice de la herramienta, este parámetro sólo tiene influencia en la incertidumbre que se genera en a_p . En la Figura 5.6 se muestran los resultados para ángulos de hélice de 28° , 30° y 45° en una herramienta de 8 mm.

Figura 5.6: Incertidumbre relativa de a_p para diferentes ángulos de hélice ($D = 8$ mm).

Al igual que en el caso del diámetro de la herramienta, la influencia de los cambios de ángulo de hélice no generan variaciones significativas en la incertidumbre relativa.

Con esta información, es claro que los parámetros de la herramienta no tienen una influencia significativa en la incertidumbre de la estimación de los parámetros de corte y que mediante los métodos de cálculo utilizados en esta tesis, se obtienen valores lo suficientemente ajustados. Por otra parte la determinación de los tiempos de entrada y salida del filo si tienen una influencia importante.

La incertidumbre que se genera con la medición de los tiempos se presenta a partir de las muestras por revolución S_r , de esta manera es posible relacionar la influencia que estos parámetros tendrán bajo distintas configuraciones de muestreo, debido a que como se ha visto en esta misma sección, los valores de su incertidumbre varían en relación con la configuración de muestreo.

En la Figura 5.7 se muestra la incertidumbre relativa de la profundidad de corte axial para diferentes valores de S_r y para herramientas de diámetro 8 mm y

10 mm.

Aquí se observa la influencia predominante que tiene las diferentes configuraciones de muestreo en la incertidumbre, además se evidencia que los cambios entre los dos diámetros de herramienta no son significativos entre las herramientas de 8 mm y 10 mm, tal como se muestra en la figura.

Figura 5.7: Incertidumbre relativa de a_p para diferentes configuraciones de muestreo (A) diámetro 8 mm, (B) diámetro 10 mm.

En la Figura 5.8 se muestra la incertidumbre relativa en la profundidad de corte radial para diferentes valores de muestras por revolución, también para el caso de herramientas de 8 mm y 10 mm.

Figura 5.8: Incertidumbre relativa de a_e para diferentes configuraciones de muestreo (A) diámetro 8 mm, (B) diámetro 10 mm.

En esta figura se observa un comportamiento similar al de la Figura 5.7, con variaciones importantes a diferentes configuraciones de muestreo y una variación poco significativa entre los dos diámetros de herramienta que se presentan. También es claro que la incertidumbre en la estimación de la profundidad de corte radial es superior que el caso de la profundidad de corte axial.

De ambas figuras es claro que aproximadamente desde 3.000 muestras por revolución, la disminución que se produce en la incertidumbre relativa no es tan significativa, lo cual es ventajoso para desarrollar un procedimiento que no requiere un equipamiento excesivamente sofisticado.

5.2 Análisis de sensibilidad de los tiempos de entrada y salida en relación a las profundidades estimadas

En el caso del método de estimación, mediante el análisis de sensibilidad, lo que se busca es establecer si pequeñas variaciones en las profundidades de corte del proceso pueden ser detectadas a partir de las expresiones propuestas.

Los valores de las características de la herramienta se obtienen previo a los ensayos de mecanizado como se explicó en la Sección 5.1 y se ha visto que su influencia no es significativa en comparación a los demás parámetros. Por ello el análisis de sensibilidad se centra en evaluar la influencia sobre el tiempo de entrada y el tiempo de salida de la herramienta en la pieza.

Para una herramienta determinada (diámetro y ángulo de hélice) y en relación con las Ecuaciones 4.3 y 4.5 del Capítulo 4, la variable que influye en la determinación de las profundidades de corte, aparte del tiempo de entrada y el tiempo de salida, es el periodo de giro de la herramienta, que depende directamente de la velocidad de giro del husillo durante el mecanizado.

Para determinar la relación entre el tiempo de entrada y el tiempo proyectado del filo de la herramienta, sus valores se han establecido en relación a los demás parámetros. En la Ecuación 5.22 se muestra el tiempo de entrada en función de los demás parámetros de estimación.

$$t_{en} = \frac{T}{2\pi} \left(\pi - \arccos \left(1 - \frac{2a_e}{D} \right) \right) \quad (5.22)$$

En la Figura 5.9a se muestra la relación entre el tiempo de entrada t_{en_i} , el

periodo y la razón de inmersión radial. En la Figura 5.9b se expone la relación entre el tiempo de entrada, la velocidad de giro del husillo y la razón de inmersión radial.

Figura 5.9: Sensibilidad del tiempo de entrada, (A) en periodo, (B) en velocidad de giro.

La sensibilidad de las ecuaciones de estimación con relación a los tiempos de entrada y salida, está dada por la pendiente de la curva que relaciona la magnitud de un parámetro con el tiempo para un periodo determinado.

En la Ecuación 5.9 se muestra el tiempo proyectado t_{pr} en función de los demás parámetros de estimación.

$$t_{pr} = \frac{T a_p \tan \lambda_s}{\pi D} \quad (5.23)$$

Figura 5.10: Sensibilidad del tiempo proyectado, (A) en periodo, (B) en velocidad de giro.

La Figura 5.10a muestra la relación entre el tiempo proyectado t_{pr} , el periodo y la razón de inmersión axial. En la Figura 5.10b se establece la relación

entre el tiempo proyectado, la velocidad de giro del husillo y la razón de inmersión axial.

De ambas figuras, se observa que para los dos casos un aumento de la velocidad de giro de la herramienta genera una disminución en la sensibilidad de la medición, esto quiere decir que variaciones en las profundidades de corte real generan pequeñas variaciones en el valor del tiempo de entrada y de salida. Esta disminución de la sensibilidad hace que existan variaciones en el proceso y que el sistema no pueda sea capaz de detectarlas. Para asegurar una medición fiable es importante utilizar condiciones de muestreo que permitan obtener una señal con una alta resolución temporal, tal como se estableció en el análisis de incertidumbre.

En el rango de las condiciones de corte que se utilizaron para este análisis y que están dentro de las condiciones de corte típicas para operaciones de fresado de acabado, la sensibilidad alcanzada se encuentra dentro de valores aceptables. Con las condiciones expuestas en esta tesis, es posible detectar variaciones de hasta $9\ \mu m$ para la profundidad de corte axial y de $4\ \mu m$ para el caso de la profundidad radial. Estos valores mejoran en condiciones de corte que consideren una baja velocidad de giro del husillo, pero dado lo expuesto en el análisis de incertidumbre, son valores poco representativos ya que no es posible establecer si son producto de una variación real o de la incertidumbre que involucra la metodología de estimación.

El nivel de sensibilidad que se alcanza mediante la metodología es suficiente para asegurar que es posible detectar pequeñas variaciones dentro del proceso, lo que es esencial para el desarrollo de un método de estimación preciso y robusto.

5.3 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se ha presentado un análisis de la incertidumbre asociado a la estimación de las condiciones de mecanizado, considerando los parámetros de las ecuaciones de las profundidades de corte y su influencia; se ha mostrado el método de obtención de cada parámetro y se ha incluido su incertidumbre individual. En la segunda parte se ha desarrollado un análisis de sensibilidad basado en las variaciones del periodo de giro de la herramienta.

A partir del análisis de incertidumbre se ha identificado que las variaciones en el diámetro de la herramienta y el ángulo de hélice tienen una baja influencia

en la variación de los valores de a_e y a_p mediante el procedimiento antes descrito. Además, dado el alto nivel de precisión con que estos parámetros son medidos, su influencia en la propagación de la incertidumbre también es bajo.

La configuración de muestreo tiene una influencia directa en la incertidumbre que se produce en la estimación, debido a su relación con la obtención de los tiempos de proceso. Mediante una evaluación a diversas configuraciones de muestreo se ha logrado establecer un rango en que se obtienen valores precisos y con una incertidumbre lo suficientemente baja.

Del análisis de sensibilidad se observa que existe una variación de la sensibilidad de los tiempos del proceso a lo largo de diversas profundidades de corte, que se relaciona con las diferentes velocidades de la herramienta y la forma en que los tiempos son obtenidos.

La sensibilidad para los tiempos de entrada y salida que se ha obtenido es suficientemente baja como para asegurar un procedimiento de identificación de las condiciones de mecanizado fiable y es en un gran número de casos absorbida por la incertidumbre del procedimiento.

Capítulo 6

Comprobación del método de estimación de los parámetros de mecanizado

En este capítulo se muestran los resultados experimentales de esta tesis, se muestran ensayos que permite comprobar la capacidad de la metodología para determinar las condiciones de corte en operaciones de mecanizado con variaciones en la geometría de la pieza, para diferentes condiciones de corte.

Se explica la implementación computacional de las expresiones que sustentan la metodología y se describe el equipamiento utilizado durante la experimentación, detallando los procedimientos utilizados para la obtención de los resultados que se expondrán.

La comprobación del método propuesto se ha realizado con pruebas de mecanizado sobre superficies uniformes y pruebas con condiciones de geometría variables que permitirán apreciar el potencial de la metodología desarrollada. Mediante los ensayos además es posible obtener valores en cada revolución de la herramienta.

6.1 Procedimiento para los ensayos de estimación

Para el desarrollo de los ensayos de mecanizado se comprueban los parámetros de la herramienta con el uso del microscopio y luego en máquina con el sensor medidor de herramienta. En un ordenador se encuentra alojado el programa que realiza la adquisición de datos y la estimación de las profundidades de corte. Durante las tareas de reglaje de la máquina y la pieza a mecanizar, se realizan pasadas de mecanizado que permiten ajustar los parámetros del tiempo

de retraso y para la situación del filo de la herramienta respecto del sensor de posición como se revisó en capítulos anteriores.

Figura 6.1: Equipamiento utilizado para los ensayos de mecanizado.

La Figura 6.1 muestra una situación panorámica del equipamiento para las mediciones que se compone del ordenador con el sistema de adquisición de datos y el equipamiento en máquina.

Figura 6.2: Disposición de los elementos en el centro de mecanizado.

La máquina utilizada para la experimentación es un centro de mecanizado vertical de tres ejes Deckel Maho DMG 1035 eco, el medidor de herramienta en máquina es un Renishaw TS27R. La parte de la cadena de medición que se encuentra en la máquina, está compuesta por una mesa dinamométrica piezoeléctrica Kistler 9257A, que permite medir fuerzas en tres ejes y el sensor de

detección Keyence FU-67V con un sistema de emisión Keyence FS-V11. En la Figura 6.2 se muestra la disposición de los elementos en el centro de mecanizado.

La cadena de medición está compuesta por un ordenador de escritorio en el que se encuentra el programa para la adquisición de señales y el cálculo de las profundidades de corte, el programa de medición y cálculo ha sido desarrollado en NI LabVIEW 12. La adquisición se completa con un módulo de adquisición de datos de alta velocidad NI PCI 6251 multifunción de 1,25 MS/s multicanal, un bloque de conectores NI BNC 2110 en donde se recogen las señales de la plataforma dinamométrica mediante canales analógicos y el sensor de posición mediante una entrada digital. Las señales de la mesa dinamométrica son amplificadas previo a ser adquiridas, mediante un amplificador Kistler 5070. En la Figura 6.3 se muestra un esquema de la cadena de medición utilizada durante los ensayos de mecanizado.

Figura 6.3: Cadena de medición para los ensayos de mecanizado.

El programa se basa en dos bucles operando en paralelo. En el primer bucle se realiza la configuración de muestreo, la adquisición de datos y el registro de las mediciones en un fichero de respaldo. En el segundo bucle las señales de fuerza y del sensor de detección desde el primer bucle son traspasadas y se procesan para obtener los tiempos del proceso y realizar la estimación de las profundidades de corte. En la Figura 6.4 se muestra un diagrama de la operatoria.

Para asegurar que no haya una pérdida de datos durante la ejecución de ambos bucles, se ha implementado una rutina que agrega los datos que se adquieren a una cola que los almacena y los traspasa al segundo bucle del programa. De esta forma se asegura que no se pierdan datos, y se logra que la ejecución de los bucles se realice completamente independiente, lo que mejora el rendimiento del programa.

Figura 6.4: Diagrama del flujo de información en el programa de estimación implementado en LabVIEW 12.

El programa de estimación, además fue implementado para su ejecución en *hardware* mediante el uso de un dispositivo de FPGA, esto se realizó mediante el uso de un módulo NI PCI 7831R y el programa LabVIEW FPGA 12. Este procedimiento ofrece un sistema determinista, desde la perspectiva de la estimación. La mejora en velocidad que ofrece este sistema no representa una ventaja evidente, pero para su implementación en una rutina de control representa una ventaja.

El diagrama del flujo general de las actividades para el procedimiento durante los ensayos se muestra en la Figura 6.5. Se ajustan los parámetros durante el prerreplaje de la máquina, incluyendo las características de la herramienta, el establecimiento de la posición relativa de la máquina con respecto al sensor de posición y se realiza el ajuste del tiempo de retraso. Luego, durante el mecanizado se adquieren las señales de fuerza en las tres direcciones y la señal de pulso. Simultáneamente se calculan los tiempos requeridos para la estimación y el periodo de giro de la herramienta. Con estos datos se obtienen las profundidades de corte.

Figura 6.5: Enfoque global adoptado para los ensayos de mecanizado.

6.2 Ensayos de mecanizado

Para la realización de los ensayos de mecanizado, se han fabricado tres tipos de probetas distintas. Dos de estas probetas permiten evaluar de manera independiente la profundidad de corte radial y la profundidad de corte axial a lo largo de una trayectoria rectilínea, una tercera probeta ha sido construida de manera que permitirá evaluar las variaciones de ambas profundidades de corte de manera simultánea durante el mecanizado.

Además de los resultados de estimación de las profundidades de corte, se muestra la evolución de la fuerza de corte real frente a las variaciones de las condiciones de corte durante los ensayos de mecanizado.

6.2.1 Resultados con profundidad de corte radial variable

Para estimar la profundidad de corte radial, se ha diseñado una probeta con una rampa que produce una variación de la profundidad radial de 0,4 mm, como se muestra en la Figura 6.6.

Figura 6.6: Probeta para los ensayos de mecanizado con variación de la profundidad de corte radial.

Se inicia el mecanizado con una profundidad de corte radial de 0,4 mm y se termina con 0,8 mm manteniendo la profundidad de corte axial en 4 mm. Las condiciones de corte este ensayo están recogidas en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Condiciones de corte para ensayo de profundidad de corte radial variable.

Parámetro	Unidades	Descripción	Valor
N	-	Número de filos	2
D	mm	Diámetro de la herramienta	4
λ_s	°	Angulo de hélice	30
n	rpm	Velocidad	2.000
f_z	mm	Avance por filo	0,080
a_p	mm	Profundidad de corte axial	4
a_e	mm	Profundidad de corte radial	variable 0,4 - 0,8
Herramienta: Garant 191000 Material: AA 7075			

Las fuerzas de corte obtenidas en este ensayo, se recogen en la Figura 6.7. En primer lugar, se aprecia que los valores máximos de la fuerza aumentan

como consecuencia de que una mayor profundidad de corte radial da origen en las condiciones de acabado a un aumento del espesor máximo de viruta. Por otro lado, se observa que el ancho de la onda de la señal de fuerza se ha aumentado al tener un mayor arco de empañe y sobre todo se ha adelantado el inicio de la onda respecto de la señal de referencia y respecto de las ondas originadas en la primera parte del ensayo.

Figura 6.7: Señal de fuerza obtenida durante el ensayo con profundidad de corte radial variable.

Para comprobar el valor real de las profundidades de corte axial y radial, se realizaron mediciones sobre la probeta mecanizada utilizando el microscopio Tesa Visio 200GL, además se comprobaron los valores obtenidos utilizando un tornillo micrométrico. Las mediciones con el microscopio se realizaron sobre cinco puntos en la probeta, esto asegura un alto nivel de precisión en el valor de la medida. La Tabla 6.2 muestra los resultados para el ensayo de con profundidad de corte radial variable.

Se observa en la Tabla 6.2 que los valores estimados son muy próximos a los valores medidos con el microscopio, además su incertidumbre en relación con los valores estimados es baja.

Tabla 6.2: Resumen de resultados del ensayo para la profundidad de corte radial variable.

Valor nominal	Valor medido	Valor estimado	Incertidumbre	Diferencia
<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	μm	%
0,4	0,411	0,413	6	<1
0,8	0,778	0,777	8	<1

Los resultados obtenidos por el sistema se recogen en la Figura 6.8. Aquí se aprecia que los cálculos siguen bien a las fluctuaciones del valor de las profundidades de corte y que el valor medio de las estimaciones de la profundidad de corte radial se acerca a los valores nominales de esta.

Figura 6.8: Profundidades de corte radiales estimadas durante el ensayo de mecanizado.

6.2.2 Resultados con profundidad de corte axial variable

El comportamiento del sistema para el caso de la profundidad axial variable se realiza con una probeta como la que aparece en la Figura 6.9. En esta probeta se tiene un cambio escalonado en la geometría de la pieza con unos incrementos de 2 mm, esto permite tener una variación en la profundidad de corte axial que van desde un valor de $a_p = 5$ mm a $a_p = 13$ mm.

Figura 6.9: Probeta para ensayos de profundidad axial variable.

La variación consecutiva de la profundidad axial en escalones de 2 mm permite observar durante el tiempo de ejecución, la estimación del parámetro de corte. La Tabla 6.3 muestra las condiciones de corte para el ensayo de profundidad de corte axial variable.

Tabla 6.3: Condiciones de corte para ensayo de profundidad de corte axial variable.

Parámetro	Unidades	Descripción	Valor
N	-	Número de filos	1
D	mm	Diámetro de la herramienta	10
λ_s	°	Angulo de hélice	30
n	rpm	Velocidad	2.400
f_z	mm	Avance por filo	0,080
a_p	mm	Profundidad de corte axial	variable 5 - 13
a_e	mm	Profundidad de corte radial	0,5
			Herramienta: Garant 191080 Material: AA 7075

Los valores de fuerza obtenidos por el sistema de adquisición de datos se recogen en la Figura 6.10. Las fuerzas de corte adquiridas tienen unos valores máximos sensiblemente constantes ya que el arco de empañe es constante. En cambio, el ancho de la onda sufre un aumento considerable debido a que la zona de corte uniforme se ha extendido. Paralelamente, el ángulo de salida se ha retrasado en cada uno de los escalones con respecto del anterior.

Figura 6.10: Señal de fuerza obtenida durante el ensayo con profundidad de corte axial variable.

Los resultados del sistema de estimación se muestra en la Figura 6.11.

Figura 6.11: Profundidades de corte axiales estimadas durante el ensayo de mecanizado.

De la Figura 6.11 se observa que el sistema es capaz de detectar las variaciones en la geometría de la probeta, además de identificar las transiciones entre cada uno de los escalones. Los resultados se recogen la Tabla 6.4 donde se ve que la estimación de la profundidad axial es buena y que el error máximo que se ha obtenido es de 0,37 % (Tabla 6.4).

Tabla 6.4: Resumen de resultados del ensayo para profundidad de corte axial variable.

Valor nominal	Valor medido	Valor estimado	Incertidumbre	Diferencia
<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	μm	%
5	5,025	5,022	9	<1
7	7,000	7,026	11	<1
9	9,028	9,021	14	<1
11	11,011	11,015	17	<1
13	13,022	13,053	20	<1

A partir de estos resultados es claro que el sistema puede estimar con precisión la profundidad de corte axial y que es capaz de captar las fluctuaciones en la profundidad para cada uno de los escalones de la probeta. Ensayos con variaciones en rampa para a_p también fueron llevados a cabo, obteniendo resultados similares a los expuestos en esta tesis.

6.2.3 Resultados con variación simultánea de la profundidad de corte radial y axial

La variación combinada de las condiciones de corte se ha comprobado con una probeta como la que aparece en la Figura 6.12. En el mecanizado de esta probeta tanto la profundidad de corte axial como la profundidad de corte radial aumentan continuamente en una sección de rampa.

Figura 6.12: Probeta para ensayo de profundidad axial y radial variables.

Se mecanizaron dos zonas de corte uniforme tanto para a_e como para a_p y una zona en rampa con un incremento de 0,7 mm para la profundidad de corte radial y de 8 mm para la profundidad de corte axial. En la Tabla 6.5 se tienen los datos de las condiciones de corte utilizadas para el ensayo.

Tabla 6.5: Condiciones de corte para ensayo de profundidad de corte radial y axial variables.

Parámetro	Unidades	Descripción	Valor
N	-	Número de filos	1
D	mm	Diámetro de la herramienta	8
λ_s	°	Angulo de hélice	42
n	rpm	Velocidad	1.200
f_z	mm	Avance por filo	0,120
a_p	mm	Profundidad de corte axial	variable 8 - 16
a_e	mm	Profundidad de corte radial	variable 0,3 - 1

Herramienta: STD A9 9045
Material: AA 7075

Figura 6.13: Resultados del ensayo de profundidad de corte axial y profundidad de corte radial variables en la señal de fuerza.

Las fuerzas de corte recogidas en este ensayo se muestran en la Figura 6.13, se observa que las ondas de la señal de fuerza medida aumentan su

amplitud originándose simultáneamente un adelanto del tiempo de entrada y un retraso en el tiempo de salida, además de un aumento en la magnitud de la fuerza originado por el aumento de la profundidad radial. Se observa además las dos zonas de corte uniforme y la zona de aumento de fuerza debido a la rampa en la probeta.

Figura 6.14: Resultados del ensayo de profundidad de corte axial y profundidad de corte radial variables. (A) Profundidad de corte axial y (B) profundidad de corte radial.

En la Figura 6.14 se muestran los resultados obtenidos por el método de estimación, se observa que es posible detectar la variación de ambas profundidades de corte de manera simultánea durante el mecanizado. El sistema sigue las fluctuaciones en la zona de corte uniforme y detecta los incrementos que se producen a lo largo de la zona de rampa.

El resumen de los resultados obtenidos durante los ensayos con ambas profundidades de corte variables se recogen en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6: Resumen de resultados del ensayo para la profundidad de corte axial y profundidad de corte radial variables.

	Valor nominal	Valor medido	Valor estimado	Incertidumbre	Diferencia
	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	μm	%
a_e	0,3	0,269	0,270	1	<1
	1	0,971	0,952	2	1,89
a_p	8	8,123	8,345	11	2,66
	16	16,047	16,034	22	<1

Los resultados de la Tabla 6.6 muestran que la metodología estima de manera precisa los valores de la profundidad de corte radial y axial, cuando se presentan una variación simultánea de ambas profundidades.

Como el efecto de la variación de la señal de fuerzas en el caso en que se presentan variaciones simultáneas de las dos profundidades de corte, está desacoplado, tal como se preveía en la simulación, la metodología permite la estimación de ambas profundidades de manera simultánea para una misma señal de fuerza sin incrementar la dificultad de los cálculos.

6.3 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se han presentado los resultados experimentales de esta tesis, se ha explicado la metodología utilizada para la experimentación y el equipamiento utilizado para la consecución de estos resultados. Se han mostrado ensayos con variación de las profundidades de corte de manera aislada para la profundidad de corte radial y axial, y un ensayo en que ambas profundidades de corte varían simultáneamente.

Se ha observado que el sistema sigue de manera correcta las fluctuaciones de las profundidades de corte a lo largo de una trayectoria de mecanizado.

Se ha comprobado que la estimación de las profundidades de corte radial y axial se encuentran desacoplados en la señal de fuerza, lo que hace posible la estimación de ambos parámetros de manera simultánea durante el proceso.

La profundidad de corte axial es estimada de manera muy precisa cuando se tiene en consideración la respuesta dinámica del proceso de mecanizado y se realizan las correcciones correspondientes en el tiempo de salida de la herramienta mediante el tiempo de retraso.

Capítulo 7

Conclusiones

En esta tesis se ha presentado el desarrollo de una metodología para la estimación de las profundidades de corte a través de una señal de fuerza en operaciones de fresado de acabado. La estimación se realiza mediante la medición de los tiempos de entrada y salida de la herramienta en la pieza de trabajo.

Se ha implementado un modelo de fuerzas de corte basado en el espesor medio de viruta, que considera la influencia del alabeo de la herramienta en el fresado. Se ha propuesto un método para la estimación de los parámetros de la presión específica de corte que permite obtener un buen ajuste en las fuerzas de corte radial, tangencial y axial.

Mediante este modelo de fuerzas de corte fue posible evaluar la influencia de las variaciones de las condiciones de corte en la señal de fuerza y de esta manera poder establecer un primer enfoque para la estimación de las profundidades de corte. Una vez establecida la metodología de estimación, además fue posible evaluar si los valores de estimación se ajustaban apropiadamente para diferentes condiciones de corte, sin la necesidad de realizar una extensa experimentación.

Se presentó un detallado análisis de la influencia de la dinámica del proceso de fresado en las señales de fuerza y de que manera esto afecta la estimación de las profundidades de corte. Se propuso un método de ajuste original basado en las señales del modelo de fuerza de corte que permite modelar la dinámica del proceso como un sistema de segundo orden. En el marco del estudio de la dinámica del proceso se realizó un análisis estadístico de los parámetros de corte y su influencia en el valor de la variable del tiempo de retraso, desarrollando modelos de regresión lineal que permitieron establecer las relaciones matemáticas entre la velocidad del husillo, las profundidades de corte y el tiempo de retraso.

Mediante el ajuste del tiempo de salida de la herramienta a partir del tiempo

de retraso se ha mostrado que es posible estimar de manera precisa y durante el proceso la profundidad de corte axial, teniendo en consideración las fluctuaciones propias del proceso de mecanizado como un proceso dinámico.

El análisis de sensibilidad e incertidumbre permitió establecer la influencia que cada parámetro involucrado en la estimación tiene en el valor de las profundidades de corte que se estiman y además permitió evaluar la variabilidad del proceso. Se han obtenido las incertidumbres para cada parámetro de la expresiones de estimación y se han desarrollado expresiones para las profundidades de corte que consideran la incertidumbre. Se evaluó el peso de cada parámetro de estimación de manera que es posible controlar la incertidumbre en la estimación mediante la obtención con un ajuste apropiado de cada uno de los parámetros en la ecuaciones de estimación.

Se ha explicado el procedimiento para la experimentación y se ha detallado el programa desarrollado para las tareas de adquisición de datos y para la estimación en línea.

De la realización de esta tesis doctoral se desprenden las conclusiones que a continuación se enumeran:

1. Es posible hacer una estimación precisa de los parámetros de corte a partir de una señal de fuerza medida durante el mecanizado.
2. Es posible determinar el momento de entrada y salida de los filos de la herramienta a partir de una señal de fuerza. La precisión de la medida de fuerzas mediante sensores piezoeléctricos y la alta precisión que actualmente se consigue en la medida de la magnitud de tiempo ayudan a que esta detección se realice con precisión. Además la medición es robusta y por lo tanto fácilmente implementable en una máquina en condiciones reales de producción.
3. La estimación de la profundidad de corte radial a partir de los tiempos de entrada es posible realizarla con precisión de una forma directa cada vez que los filos de la herramienta entran en la pieza durante el mecanizado.
4. El enfoque orientado a detectar los instantes de entrada y salida del filo de la herramienta hacen posible que esta metodología pueda ser aplicada con otras tecnologías y tipos de sensores que permitan identificar la entrada y la salida de la herramienta en proceso.
5. La estimación de la profundidad de corte axial a partir de los tiempos de salida es posible realizarla con precisión siempre que se considere la respuesta di-

námica de la herramienta cada vez que sus filos salgan de la pieza durante el mecanizado, mediante el ajuste del tiempo de retraso.

6. Se ha mostrado que es posible estimar la profundidad de corte radial y axial de manera simultánea con una de las componentes de la señal de fuerza, independientemente de si existe variación de uno o ambos parámetros de corte durante el mecanizado.
7. La identificación de los parámetros dinámicos de la respuesta del sistema se puede realizar correctamente a través de un modelo de segundo orden. Esto se logra a partir de considerar las fuerzas calculadas con el modelo de fuerzas de corte como la entrada del sistema y la fuerza real como la respuesta.
8. Se ha comprobado que la utilización de un modelo de fuerzas basado en el espesor medio de viruta obtiene muy buenos resultados en la fuerza, lo que ha permitido utilizar la señal de fuerza como consigna en la identificación de los parámetros dinámicos del sistema.
9. Considerando una configuración de adquisición de datos con una alta frecuencia de muestreo, se produce una disminución significativa de la incertidumbre de los valores de las profundidades de corte estimadas.

7.1 Trabajos futuros

De los desarrollos expuestos en esta tesis, es posible continuar la investigación en diversas nuevas líneas. Estas nuevas investigaciones pueden dar origen a una ampliación de los campos de uso de la metodología propuesta, a su implementación en sistemas embebidos o en otro tipo de operaciones con arranque de viruta. Dentro de las líneas de investigación más relevantes se encuentran las siguientes:

- Desarrollo de un sistema de control adaptativo para fresado.
- Estimación de las profundidades de corte en operaciones que presenten superposición de filos.

7.1.1 Desarrollo de un sistema de control adaptativo para fresado

Dado que la metodología desarrollada en este trabajo permite estimar las profundidades de corte en operaciones de fresado con alta precisión, sería posible desarrollar un sistema de control adaptativo que permita corregir desviaciones durante el fresado. Durante el mecanizado, situaciones como el desgaste de la herramienta o la desviación sistemática de los ejes del centro de mecanizado dan lugar a errores en las piezas mecanizadas. El desarrollo de un sistema control de posicionamiento que corrija esta desviación permitiría dar lugar a un proceso más eficiente, obteniendo valores de la profundidad de corte más cercanos a las condiciones nominales.

7.1.2 Estimación de las profundidades de corte en operaciones que presenten superposición de filos

Las operaciones de acabado utilizan condiciones de mecanizado con reducidas profundidades de corte, por lo que no se suele encontrar superposición de filos. La superposición produce que mientras un filo se encuentra cortando el siguiente entra en la pieza, generando un perfil de fuerza en que los instantes de entrada y salida no aparecen directamente. Esta condición es frecuente en operaciones como el desbaste, donde se suele utilizar condiciones de corte más agresivas dado que el acabado de la pieza no es crítico. Por ello, a partir de las expresiones de esta tesis o ajustando en función del nivel de superposición sería posible estimar las profundidades de corte en condiciones de corte como las que se presentan durante el desbaste. A través de las profundidades de corte reales, sería posible optimizar las operaciones con estrategias como el cambio de velocidad en vacío o el ajuste de las profundidades en función de las irregularidades presentes en la pieza.

Bibliografía

- Altintas, Y., A. Spence y J. Tlustý (1991). «End Milling Force Algorithms for CAD Systems». En: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 40, págs. 31-34.
- Altintas, Y., G. Stepan, D. Merdol y Z. Dombovari (2008). «Chatter stability of milling in frequency and discrete time domain». En: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 1, págs. 35-44. DOI: [10.1016/j.cirpj.2008.06.003](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2008.06.003).
- Altintas, Y. e I. Yellowley (1987). «The identification of radial width and axial depth of cut in peripheral milling». En: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 27, págs. 367-381. DOI: [10.1016/S0890-6955\(87\)80010-X](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(87)80010-X).
- Beltran-Carbajal, F. y G. Silva-Navarro (2015). «On the algebraic parameter identification of vibrating mechanical systems». En: *International Journal of Mechanical Sciences* 92, págs. 178-186. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2014.12.006](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.12.006).
- Bhattacharyya, A., J. K. Schueller, B. P. Mann, J. C. Ziegert, T. L. Schmitz, F. J. Taylor y N. G. Fitz-Coy (2010). «A closed form mechanistic cutting force model for helical peripheral milling of ductile metallic alloys». En: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 50, págs. 538-551. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2010.03.003](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.03.003).
- Campa, F.J., L.N. Lopez de Lacalle y A. Celaya (2011). «Chatter avoidance in the milling of thin floors with bull-nose end mills: Model and stability diagrams». En: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51, págs. 43-53. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2010.09.008](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.09.008).
- Castano, F., R. E. Haber y R. M. del Toro (2017). «Characterization of tool-workpiece contact during the micromachining of conductive materials». En:

- Mechanical Systems and Signal Processing* 83, págs. 489-505. DOI: [10.1016/j.ymssp.2016.06.027](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.06.027).
- Castañó, F., R. M. del Toro, R. E. Haber y G. Beruvides (2015). «Conductance sensing for monitoring micromechanical machining of conductive materials». En: *Sensors and Actuators A: Physical* 232, págs. 163-171. DOI: [10.1016/j.sna.2015.05.015](https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.05.015).
- Choi, J-G. y M-Y. Yang (1999). «In-process prediction of cutting depths in end milling». En: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 39, págs. 705-721. DOI: [10.1016/S0890-6955\(98\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00067-4).
- Choy, H. S. y K. W. Chan (2003). «A corner-looping based tool path for pocket milling». En: *Computer-Aided Design* 35, págs. 155-166. DOI: [10.1016/S0010-4485\(02\)00049-0](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(02)00049-0).
- Diez, E., E. Leal-Muñoz, H. Pérez y A. Vizán (2017). «Dynamic analysis of a piezoelectric system to compensate for workpiece deformations in flexible milling». En: *Mechanical Systems and Signal Processing* 91, págs. 278-294. DOI: [10.1016/j.ymssp.2017.01.014](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.01.014).
- Diez, E., H. Pérez, J. Márquez y A. Vizán (2015). «Feasibility study of in-process compensation of deformations in flexible milling». En: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 94, págs. 1-14. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2015.03.008](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.03.008).
- Ding, Y. y L. Zhu (2016). «Investigation on chatter stability of thin-walled parts considering its flexibility based on finite element analysis». En: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94, págs. 3173-3187. DOI: [10.1007/s00170-016-9471-x](https://doi.org/10.1007/s00170-016-9471-x).
- Eguia, J., A. Lamikiz y L. Uriarte (2017). «Error budget and uncertainty analysis of portable machines by mixed experimental and virtual techniques». En: *Precision Engineering* 47, págs. 19-32. DOI: [10.1016/j.precisioneng.2016.07.001](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.07.001).
- Esmailian, B., S. Behdad y B. Wang (2016). «The evolution and future of manufacturing: A review». En: *Journal of Manufacturing Systems* 39, págs. 79-100. DOI: [10.1016/j.jmsy.2016.03.001](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.03.001).

- Fei, J., B. Lin, S. Yan, M. Ding, J. Xiao, J. Zhang, X. Zhang, C. Ji y T. Sui (2017). «Chatter mitigation using moving damper». En: *Journal of Sound and Vibration* 410, págs. 49-63. DOI: [10.1016/j.jsv.2017.08.033](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.08.033).
- Feng, H-Y. y C-H. Menq (1994). «The prediction of cutting forces in the ball-end milling process - I. Model formulation and model building procedure». En: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 34, págs. 697-710.
- Gaja, H. y F. Liou (2016). «Automatic detection of depth of cut during end milling operation using acoustic emission sensor». En: *The International Journal of Advance Manufacturing Technology* 86, págs. 2913-2925. DOI: [10.1007/s00170-016-8395-9](https://doi.org/10.1007/s00170-016-8395-9).
- Graham, E., M. Mehrpouya y S.S. Park (2013). «Robust prediction of chatter stability in milling based on the analytical chatter stability». En: *Journal of Manufacturing Processes* 15, págs. 508-517. DOI: [10.1016/j.jmapro.2013.08.005](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.08.005).
- GUM, *Evaluation of measurement data Guide to the expression of uncertainty in measurement* (2018). BIPM Bureau International des Poids et Mesures.
- Gurdal, O., E. Ozturk y N. D. Sims (2016). «Analysis of Process Damping in Milling». En: *Procedia CIRP* 55, págs. 152-157. DOI: [10.1016/j.procir.2016.09.012](https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.09.012).
- Huang, X., Y. Zhang y C. Lv (2016). «Probabilistic analysis of dynamic stability for milling process». En: *Nonlinear Dynamics* 86, págs. 2105-2114. DOI: [10.1007/s11071-016-3019-3](https://doi.org/10.1007/s11071-016-3019-3).
- Hwang, J. H., Y. T. Oh, W. T. Kwon y C. N. Chu (2003). «In-process estimation of radial immersion ratio in face milling using cutting force». En: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 22, págs. 313-320. DOI: [10.1007/s00170-002-1488-7](https://doi.org/10.1007/s00170-002-1488-7).
- Johansson, D., R. Lindvall, M. Fröström, V. Bushlya y J-E. Ståhl (2018). «Equivalent Chip Thickness and its Influence on Tool Life». En: *Procedia Manufacturing* 25, págs. 344-350. DOI: [10.1016/j.promfg.2018.06.102](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.102).
- Kang, Y. H. y C. M. Zheng (2013). «Mathematical modelling of chip thickness in micro-end- milling: A Fourier modelling». En: *Applied Mathematical Modelling* 37, págs. 4208-4223. DOI: [10.1016/j.apm.2012.09.011](https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.09.011).

- Kiss, A. K., D. Hajdu, D. Bachrathy y G. Stepan (2018). «Operational stability prediction in milling based on impact tests». En: *Mechanical Systems and Signal Processing* 103, págs. 327-339. DOI: [10.1016/j.ymssp.2017.10.019](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.10.019).
- Kline, W.A. y R.E. DeVor (1983). «The effect of runout on cutting geometry and forces in end milling». En: *International Journal of Machine Tool Design and Research* 23, págs. 123-140. DOI: [10.1016/0020-7357\(83\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0020-7357(83)90012-4).
- Kwon, W. Tae y D. Choi (2002). «Radial immersion angle estimation using cutting force and predetermined cutting force ratio in face milling». En: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 42, págs. 1649-1655. DOI: [10.1016/S0890-6955\(02\)00119-0](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00119-0).
- Liu, S-G., L. Zheng, Z-H. Zhang, Z-Z. Li y D-C. Liu (2007). «Optimization of the number and positions of fixture locators in the peripheral milling of a low-rigidity workpiece». En: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 33, págs. 668-676. DOI: [10.1007/s00170-006-0507-5](https://doi.org/10.1007/s00170-006-0507-5).
- Los, A. y J.R.R. Mayer (2018). «Application of the adaptive Monte Carlo method in a five-axis machine tool calibration uncertainty estimation including the thermal behavior». En: *Precision Engineering* 53, págs. 17-25. DOI: [10.1016/j.precisioneng.2018.02.011](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.02.011).
- Marinescu, I. y D. Axinte (2008). «A critical analysis of effectiveness of acoustic emission signals to detect tool and workpiece malfunctions in milling operations». En: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48, págs. 1148-1160. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2008.01.011](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.01.011).
- Marinescu, I. y D. Axinte (2009). «A time-frequency acoustic emission-based monitoring technique to identify workpiece surface malfunctions in milling with multiple teeth cutting simultaneously». En: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49, págs. 53-65. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2008.08.002](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.08.002).
- Martellotti, M. E. (1945). «An Analysis of the Milling Process, Part II-Down Milling». En: *International Journal of Machine Tool Design and Research* 63, págs. 233-251.
- Masmiati, N., A. Sarhan, M.A. Hassan y M. Hamdi (2016). «Optimization of cutting conditions for minimum residual stress, cutting force and surface rough-

- ness in end milling of S50C medium carbon steel». En: *Measurement* 86, págs. 253-265. DOI: [10.1016/j.measurement.2016.02.049](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.02.049).
- MATLAB version 9.2.0.556344 (R2017a) (2018). The Mathworks, Inc. Natick, Massachusetts.
- Matsumura, T. y S. Tamura (2017). «Cutting Force Model in Milling with Cutter Runout». En: *Procedia CIRP* 58, págs. 566-571. DOI: [10.1016/j.procir.2017.03.268](https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.268).
- Merchant, M. E. (1945). «Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip». En: *Journal of Applied Physics* 16, págs. 267-275.
- Moradi, H., G. Vossoughi, M. R. Movahhedy y M. T. Ahmadian (2013). «Forced vibration analysis of the milling process with structural nonlinearity, internal resonance, tool wear and process damping effects». En: *International Journal of Non-Linear Mechanics* 54, págs. 22-34. DOI: [10.1016/j.ijnonlinmec.2013.02.005](https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2013.02.005).
- Mutilba, U., E. Gomez-Acedo, A. Sandá, I. Vega y J. A. Yagüe-Fabra (2019). «Uncertainty assessment for on-machine tool measurement: an alternative approach to the ISO 15530-3 technical specification». En: *Precision Engineering*.
- Otkur, O. e I. Lazoglu (2007). «Trochoidal milling». En: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47, págs. 1324-1332. DOI: [/10.1016/j.ijmachtools.2006.08.002](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.08.002).
- Parkinson, S, A.P. Longstaff y S Fletcher (2014). «Automated planning to minimise uncertainty of machine tool calibration». En: *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 30, págs. 63-72. DOI: [10.1016/j.engappai.2014.02.002](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2014.02.002).
- Peral, D, J. de Vicente, J.A. Porro y J.L. Ocaña (2017). «Uncertainty analysis for non-uniform residual stresses determined by the hole drilling strain gauge method». En: *Measurement* 97, págs. 51-63. DOI: [10.1016/j.measurement.2016.11.010](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.11.010).
- Perera, R., C. Huerta y J. M. Orquín (2008). «Identification of damage in RC beams using indexes based on local modal stiffness». En: *Construction and*

- Building Materials* 22, págs. 1656-1667. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2007.06.012](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.012).
- Pérez, H. (2012). «Influencia de la variación de las condiciones de mecanizado en el fresado periférico». Tesis doct. España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Pérez, H., E. Diez, J. J. Márquez y A. Vizán (2013). «An enhanced method for cutting force estimation in peripheral milling». En: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 69, págs. 1731-1741. DOI: [10.1007/s00170-013-5153-0](https://doi.org/10.1007/s00170-013-5153-0).
- Pérez, P., S. Aguado, J.A. Albajez y J. Santolaria (2019). «Influence of laser tracker noise on the uncertainty of machine tool volumetric verification using the Monte Carlo method». En: *Measurement* 133, págs. 81-90. DOI: [10.1016/j.measurement.2018.10.012](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.012).
- Piispanen, V. (1937). «Theory of chip formation». En: *Teknillinen Aikaauslenti* 27, págs. 315-322.
- Piispanen, V. (1948). «Theory of Formation of Metal Chips». En: *Journal of Applied Physics* 19, págs. 876-881.
- Prickett, P. W., R. A. Siddiqui y R. I. Grosvenor (2011). «The development of an end-milling process depth of cut monitoring system». En: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 52, págs. 89-100. DOI: [10.1007/s00170-010-2711-6](https://doi.org/10.1007/s00170-010-2711-6).
- R Core Team (2016). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.
- Rauch, M., E. Duc y J-Y. Hascoet (2009). «Improving trochoidal tool paths generation and implementation using process constraints modelling». En: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49, págs. 375-383. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2008.12.006](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.12.006).
- Roblek, V., M. Mesko y Krapez (2016). «A Complex View of Industry 4.0». En: *SAGE Open* 6, págs. 16-21. DOI: [10.1177/2158244016653987](https://doi.org/10.1177/2158244016653987).

- Sabberwal, A.J.P. (1962). «Cutting forces in down milling». En: *International Journal of Machine Tool Design and Research* 2, págs. 27-41. DOI: [10.1016/0020-7357\(62\)90025-2](https://doi.org/10.1016/0020-7357(62)90025-2).
- Shixiong, W., M. Wei, L. Bin y W. Chengyong (2016). «Trochoidal machining for the high-speed milling of pockets». En: *Journal of Material Processing Technology* 233, págs. 29-43. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2016.01.033](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.01.033).
- Sonda de reglaje de herramientas TS27R (2018). Renishaw plc. Reino Unido. URL: <https://www.renishaw.es/media/pdf/es/f19cc609a2b141b3a823a72ff55c17a0.pdf>.
- Tajima, S. y B. Sencer (2016). «Kinematic corner smoothing for high speed machine tools». En: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 108, págs. 27-43. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2016.05.009](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.05.009).
- Tarn, J. H. y M. Tomizuka (1989). «On-Line Monitoring of Tool and Cutting Conditions in Milling». En: *Journal of Engineering for Industry* 111, págs. 206-212. DOI: [10.1115/1.3188751](https://doi.org/10.1115/1.3188751).
- Tarn, Y. S. e Y. Y. Shyr (1993). «Identification of Radial Depth of Cut in Numerical Control Pocketing Routines». En: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 33, págs. 1-11. DOI: [10.1016/0890-6955\(93\)90059-4](https://doi.org/10.1016/0890-6955(93)90059-4).
- Tlusty, J. y F. Ismail (1980). «Dynamic Structural Identification Tasks and Methods». En: *CIRP Annals* 29, págs. 251-255. DOI: [10.1016/S0007-8506\(07\)61331-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61331-6).
- Wan, M., W-H. Zhang, J-W. Dang e Y. Yang (2010). «A novel cutting force modelling method for cylindrical end mill». En: *Applied Mathematical Modelling* 34, págs. 1-14. DOI: [10.1016/j.apm.2009.09.012](https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.09.012).
- Yan, R., X. Tang, F. Y. Peng, Y. Wang y F. Qiu (2016). «The effect of variable cutting depth and thickness on milling stability for orthogonal turn-milling». En: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 82, págs. 765-777. DOI: [10.1007/s00170-015-7418-2](https://doi.org/10.1007/s00170-015-7418-2).
- Yang, L., R. E. DeVor y S. G. Kapoor (2005). «Analysis of force shape characteristics and detection of depth-of-cut variations in end milling». En: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 127, págs. 454-462. DOI: [10.1115/1.1947207](https://doi.org/10.1115/1.1947207).

- Yuan, Y., X. Jing, K F. Ehmann, J. Cao, H. Li y D. Zhang (2018). «Modeling of cutting forces in micro end-milling». En: *Journal of Manufacturing Processes* 31, págs. 844-858. DOI: [10.1016/j.jmapro.2018.01.012](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.01.012).
- Yue, C., H. Gao, X. Liu, S. Y. Liang y L. Wang (2019). «A review of chatter vibration research in milling». En: *Chinese Journal of Aeronautics* 61, págs. 27-47. DOI: [10.1016/j.cja.2018.11.007](https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.11.007).
- Zhang, X., K. Ehmann, T. Yu y W. Wang (2016). «Cutting forces in micro-end-milling processes». En: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 107, págs. 21-40. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2016.04.012](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.04.012).
- Zhang, X., J. Zhang, W. Zhang, J. Li y W. Zhao (2018). «A non-contact calibration method for cutter runout with spindle speed dependent effect and analysis of its influence on milling process». En: *Precision Engineering* 51, págs. 280-290. DOI: [10.1016/j.precisioneng.2017.08.020](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.08.020).