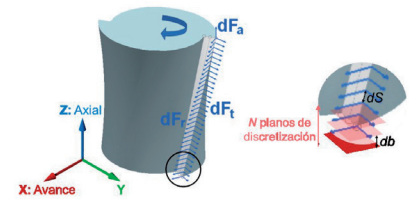


# Proceso de mecanizado fiable mediante uso intensivo de modelización y monitorización del proceso: enfoque 2025



## A reliable machining process by means of intensive use of modelling and process monitoring: approach 2025



Haizea González-Barrio<sup>1</sup>, Itxaso Cascón-Morán<sup>2</sup>, Jon-Ander Ealo<sup>1,2</sup>, Fernando Santos-Barrena<sup>4</sup>, Txomin Ostra-Beldarrain<sup>5</sup>, Mikel Cuesta-Zabaljauregui<sup>6</sup>, Aitor Madariaga-Zabala<sup>6</sup>, Pedro Arrazola-Arriola<sup>6</sup> y Luis-Norberto López de Lacalle<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad del País Vasco. UPV/EHU. Dpto. Ingeniería Mecánica. Plaza Torres Quevedo, s/n - 48013 Bilbao (España).

<sup>2</sup> IK4- Tekniker. Parque Tecnológico. Calle Iñaki Goenaga, 5 - 20600 Eibar, Gipuzkoa (España).

<sup>3</sup> IK4-Ideko. Arriaga Industrialdea, 2 - 20870 Elgoibar, Gipuzkoa (España).

<sup>4</sup> IK4-Azterlan. Aliendalde Etxetaldea, 6 - 48200 Durango, Bizkaia (España).

<sup>5</sup> Tecnalia. Parque Científico y Tecnológico de Gipuzkoa. Paseo Mikeletegi, 2 - 20009 San Sebastián, Gipuzkoa (España).

<sup>6</sup> Universidad de Mondragón. Calle Loramendi, 4 - 20500 Arrasate, Gipuzkoa (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8841> | Recibido: 11/05/2018 • Inicio Evaluación: 28/05/2018 • Aceptado: 12/09/2018

### ABSTRACT

- This paper covers three significant aspects. Firstly, a global approach to manufacture high-added value components is presented.. This process involves a holistic perspective for the entire process: from design conception to market implementation. It needs to be emphasized that the manufacturing process implies a global challenge in term of modeling and systems integration. Moreover, particular progresses in programming, modeling, measuring, monitoring and customers' quality requirements involved a global improvement in the mentioned cycle. Secondly, inside the different defined stages there are several developments of industrial interest.. On the one hand, a cutting forces predictive model implies parameters optimization in terms of swarf section (feed, axial and radial depth of cut). On the other hand, modeling the finishing process to determine thermal load and induced stresses, leads to the possibility of limiting the cutting speed ( $V_c$ ) adequately to the process specifications. Finally, in-situ monitoring collects information that indicates machining program issues or efforts out from desired levels. Moreover, monitoring would be able to predict batch production threshold value limits. In order to apply described approach, an aeronautical industry high-added value component was selected as demonstrator. Defined component consists of a single blade of Inconel 718 with thin walls, generated by Selective Laser Melting (SLM) additive process. Results showed that applying predictive models inside a global vision implied an adequate control of the process (spindle loads and unexpected cutting forces). This ensures in a further future a stable production of this type of components, such as Integral bladed rotors, coming from additive manufacturing.
- **Keywords:** Monitoring, mechanistic model, residual stresses, integral bladed rotor, Selective Laser Melting (SLM).

### RESUMEN

En este trabajo se abarcan tres aspectos destacables. En primer lugar, una visión global para el proceso de mecanizado de componentes de elevado valor añadido. Se expone una visión holística

del proceso durante todo su ciclo de fabricación, desde la concepción hasta la implantación en el mercado. El proceso de fabricación implica un reto relacionado con la integración de modelos; concretamente en programación, modelización, medición, monitorización y cumplimiento de los requisitos de calidad industriales a lo largo del ciclo mencionado.

En segundo lugar, dentro de cada etapa definida existen avances de gran interés, entre ellos la modelización mecánica del proceso. Por una parte, el modelo para establecer las fuerzas de corte implica la optimización de los parámetros en cuanto a sección de viruta (*avance, profundidad axial y radial*). Por otra parte, la modelización del proceso de acabado para determinar el posible nivel de carga térmica y tensiones inducidas implica la posibilidad de delimitar el valor de la velocidad de corte ( $V_c$ ) adecuada al proceso.

Finalmente, la monitorización in-situ recoge información que puede indicar defectos en el programa de mecanizado o esfuerzos fuera del nivel esperado. Además, la monitorización delimitaría los valores umbrales para una producción en lotes.

Como demostrador para lo descrito anteriormente, se selecciona un componente de alto valor añadido perteneciente a la industria aeronáutica. El componente es un álabe de Inconel 718 y paredes delgadas, impreso de SLM (*selective laser melting*). Los resultados mostraron que la aplicación de los modelos dentro de una visión global conlleva un mayor control de lo que sucede durante el proceso (sobrecargas del cabezal o fuerzas inesperadas). De este modo, se puede asegurar a futuro una producción estable de componentes como los *integral blade rotors* partiendo de fabricación aditiva.

**Palabras clave:** monitorización, modelización mecánica, tensiones residuales, rotores integrales, Selective Laser Melting (SLM).

### 1. INTRODUCCIÓN

En línea con la filosofía *Industry 4.0*, existe una tendencia emergente hacia la virtualización de las máquinas-herramienta y de los procesos de fabricación, conocido como Gemelos virtuales [1]. Para realizar dicha digitalización, no sólo es importante co-

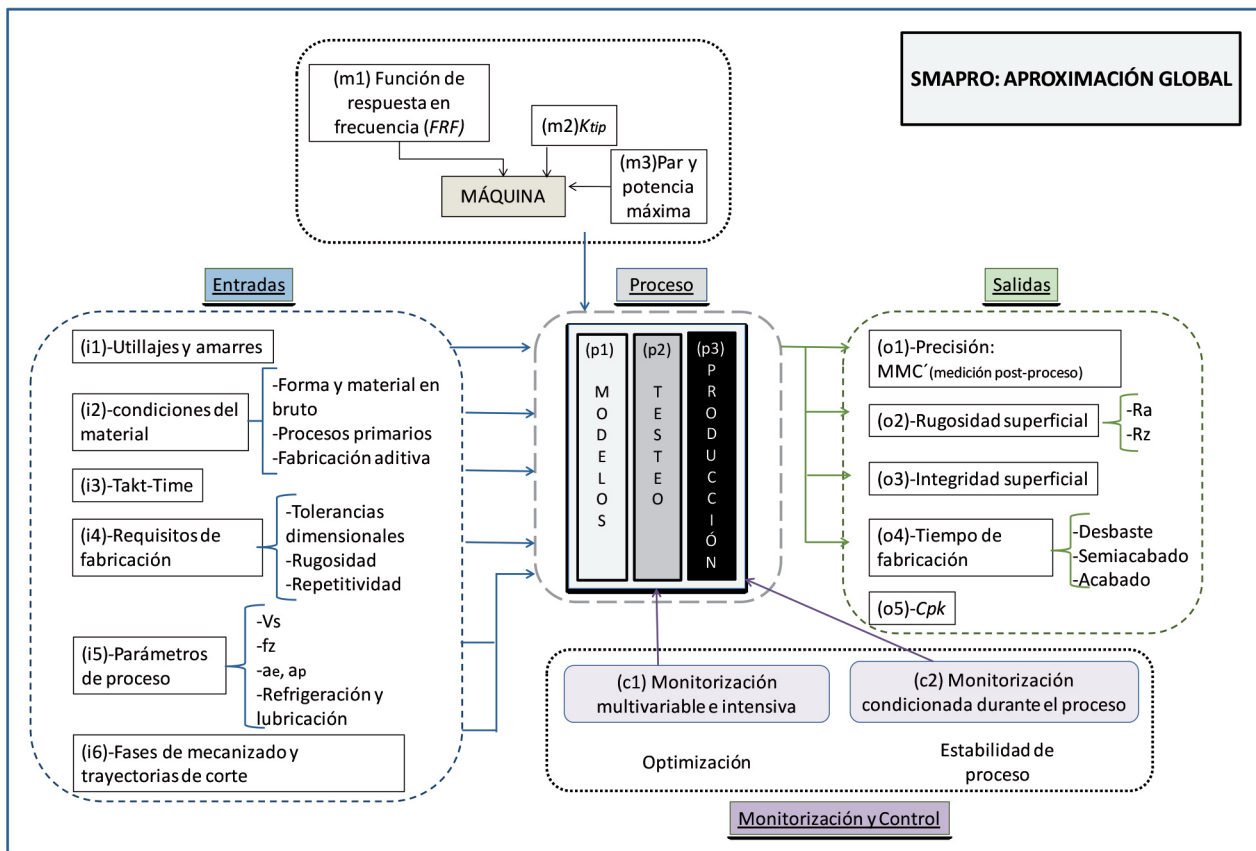


Fig. 1: Enfoque global del proceso, con referencias a los niveles de modelización y monitorización

nocer las variables del proceso propiamente dichas, sino el comportamiento de las máquinas-herramientas. En Altintas et al. [2] se presentó las diferentes etapas y las ventajas que presenta la virtualización, considerando por un lado el comportamiento estático y dinámico de la máquina, así como los parámetros relativos al proceso, como la simulación del CNC, de herramientas de corte y movimiento cinemático de la máquina. Para dar soporte a dicha digitalización, se requiere información obtenida de modelos mecánicos y monitorización in-situ.

Los modelos mecánicos se basan en el uso de coeficientes obtenidos experimentalmente y permiten calcular los esfuerzos de corte, consumos de potencia para trayectorias de mecanizado completas y desgastes de herramientas. Son numerosos los modelos mecánicos desarrollados para diferentes tipos de herramientas y posicionamiento de las mismas [3-8]. Por otra parte, también existen modelos predictivos de integridad superficial, tensiones residuales, cargas térmicas y rugosidad superficial para mejorar la productividad y la calidad del producto [9-13].

Para alimentar los modelos se requiere la monitorización del proceso cuando está siendo ejecutado. DMG Mori [14], remarcó la idea de que la conectividad de los datos es la clave para implementar Industry 4.0 implementando más de 60 sensores para monitorizar los distintos componentes de la máquina. Además los datos obtenidos pueden ser transmitidos vía Internet. Por lo tanto, las soluciones de monitorización de mecanizado pasan por implantar sensores y, posteriormente, la información proporcionada debe ser debidamente gestionada, almacenada y analizada, de

forma intuitiva para que el usuario pueda tomar decisiones adecuadas [15]. De hecho, en López de Lacalle et al. [16] se desarrolló una metodología para analizar procesos de mecanizado mediante una visualización en 3D fácilmente interpretable por el usuario de la máquina.

En la línea de los avances citados, este trabajo abarca tres aspectos destacables: en primer lugar una visión holística para los procesos de fabricación, considerando todas las variables críticas, en especial para piezas de alto valor añadido. En segundo lugar, como demostrador se selecciona un componente de alto valor añadido perteneciente a la industria aeronáutica. El componente es un álabe de Inconel 718 y paredes delgadas sometido a un proceso de fabricación híbrida, impreso en SLM (selective laser melting) y mecanizado mediante arranque de viruta. Finalmente, se realiza la digitalización del proceso basándose en datos experimentales adquiridos de la monitorización in-situ y la implementación virtual de los modelos mecánicos.

## 2. ENFOQUE GLOBAL

Actualmente, se requiere una visión global para asegurar la fabricación sin defectos de componentes de alto valor añadido. Este proceso implica un reto global para la integración de modelos y sistemas más sencillos; donde los avances concretos en programación, modelización, medición, monitorización y cumplimiento de los requisitos de calidad del cliente conllevan un avance a nivel global del ciclo mencionado. La Fig.1 presenta una visión holística

Ni	Cr	Fe	Nb & Ta	Mb	Ti	Co	Al	Mn	Si
50-55	17-21	balance	4,75-5,5	2,8-3,3	0,65-1,15	≤ 1	0,2-0,8	≤ 0,35	≤ 0,35
Cu	C	N	O	P	S	Ca	Mg	Se	Bo
≤ 0,30	0,02-0,05	≤ 0,03	≤ 0,03	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,005	≤ 0,005

Tabla I: Composición (%masa) del polvo de Inconel 718 utilizado [18]

que contempla las variables presentes en los procesos productivos; se hace distinción de 5 bloques diferentes:

**Entradas:** Engloba los inputs del proceso relativos al material, los sistemas de amarre, condiciones y parámetros de corte y estrategias de mecanizado.

**Máquina:** Contempla todas las variables relacionadas con el comportamiento de la máquina. Éstas variables se contemplan para la modelización del gemelo virtual de la misma.

**Monitorización y control:** Se realiza la división en la monitorización intensiva y multivariable, la monitorización intensiva posibilita el análisis de las variables críticas de cada proceso y el descarte de las que no se consideren condicionantes del mismo para la siguiente fase de estabilidad del proceso. Por otra parte la estabilidad del proceso que consiste en una monitorización in-situ de las variables seleccionadas para el proceso de fabricación en producción.

**Proceso:** Se centra en el proceso de fabricación per se. En este se constituyen los modelos mecanísticos y dimensionales desarrollados, los ensayos de validación de los mismos y la implantación del proceso en producción.

**Salidas:** Entre ellos se encuentran las mediciones con el fin de comprobar que los resultados cumplen los requisitos de diseño y fabricación (tolerancias dimensionales, integridad superficial, rugosidades y tiempos de mecanizado, entre otros).

La aplicación del enfoque global presentado, conlleva tener en cuenta todos los parámetros implicados, ofreciendo una herramienta más en la línea de alcanzar una producción estable de piezas complejas, entre otras, moldes o matrices y piezas de turbomaquinaria aeronáutica como los *integral blade rotors* (IBR). Para analizar la importancia de las diferentes variables del proceso de una manera más particular, se ha definido un caso de estudio que consiste en un álabe de Inconel 718 impreso mediante la técnica SLM su proceso de mecanizado por arranque de viruta. Las diferentes variables que se propone analizar son las siguientes:

- 1- Análisis del material y post-tratamientos necesarios para asegurar la calidad (i2).
- 2- Modelos mecanísticos de fuerzas y potencias de corte (p1), para optimizar variables de entrada como son los parámetros de proceso y estrategias de mecanizado (i5,i6).
- 3- Monitorización in-situ de consumo de potencia del cabezal y las fuerzas generadas durante el mecanizado (c1,c2).
- 4- Generación de un gemelo virtual de la máquina: modelización de todos los parámetros que corresponden al comportamiento estático/dinámico de la máquina (m1,m2,m3) y la virtualización del proceso incluyendo los modelos, los parámetros definidos para el mecanizado(p1, i1, i4, i5, i6).

### 3. CASO DE ESTUDIO Y MATERIA PRIMA

#### 3.1 EL PROCESO: IMPRESIÓN EN SLM

La tendencia hacia la fabricación aditiva, más en concreto la tecnología conocida como SLM presenta numerosas ventajas: flexibilidad de los procesos, reducción de material desechado, reducción de costes, o como solución a procesos de reparación [17]. Para este trabajo se optó por un proceso híbrido puesto que permite observar la importancia de las condiciones del material previo al proceso de arranque de viruta.

En lo que respecta al material escogido, se trata de la superaleación base níquel-hierro (Inconel 718), muy presente en el sector aeronáutico, concretamente en los componentes rotativos del motor. A continuación la *tabla 1* se recogen los datos de la composición del polvo de Inconel 718 utilizado para este caso de estudio.

Para la fabricación por SLM se ha utilizado una máquina de Renishaw AM400, con una potencia de láser pulsado máxima de  $P = 400$  W y un área de trabajo de  $250 \times 250 \times 285$  mm. Para la impresión del álabe en Inconel 718 se han realizado bajo los siguientes parámetros: capas de espesor de  $60 \mu\text{m}$  y potencia láser de  $P = 200$  W.

#### 3.2 POSTTRATAMIENTOS

La pieza después del proceso SLM se sometió a diferentes post-tratamientos. Estos tratamientos dependen del estado en bruto y las características finales deseadas. Para la definición de los posttratamientos se realizó una primera etapa que consiste en la caracterización avanzada del estado en bruto de SLM mediante:

- Estudio de la homogeneidad de composición química de los elementos principales y los residuales vía EDX-WDX a nivel micro de la pieza.
- Estudio de la sanidad interna de la pieza vía tomografía digital para la detección de poros de un tamaño superior a  $0,5$  mm.
- Realización de análisis metalográfico de la pieza para: la detección de porosidad a nivel microscópico y la identificación de las fases constituyentes, en especial la fase  $\gamma$ .
- Estudio de las tensiones residuales.

Con los datos obtenidos de la caracterización de la pieza en estado bruto, se realizó la modelización termodinámica de la formación de fases y termocinética de la precipitación y disolución de fases a diferentes temperaturas mediante modelos como Thermo-calc, Dictra y PRISMA [19-21]. En la *Fig.2* se muestran las modelizaciones realizadas para esta aleación Inconel 718.

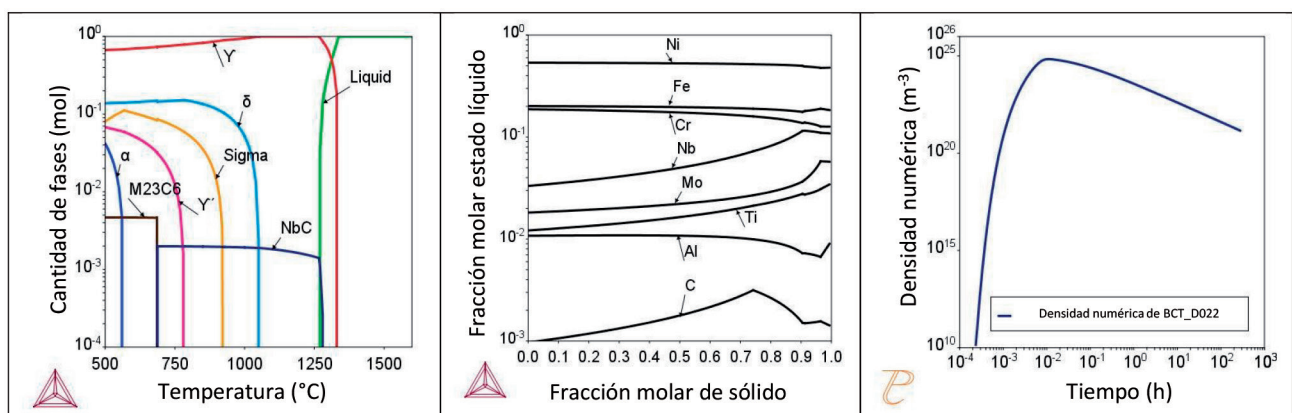


Fig. 2: Estudios para la predicción de fases, segregación y disolución de fases para Inconel 718

$K_{tc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$K_{te}$ [N/mm]	$K_{rc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$K_{re}$ [N/mm]	$K_{ac}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$K_{ae}$ [N/mm]
2155	365	1125	490	4470	425

Tabla II. Coeficientes específicos de corte para Inconel 718, obtenidos experimentalmente

Los tratamientos térmicos se seleccionaron en base a los resultados de caracterización y de modelización; se realizaron los siguientes tratamientos:

- Tratamiento de homogeneizado a 1050 a 1150 °C durante 2 ó 3 horas. Se aplicó este tratamiento ya que se detectaron algunas faltas de homogeneidad a nivel micro. La temperatura y el tiempo de tratamiento se estableció en relación a la severidad de la heterogeneidad y el enfriamiento se realizó diseñado en aire hasta una temperatura de menos de 500 °C. [22-23]
- Tratamiento HIP a temperaturas del orden de 1100-1200 °C con presiones mínimas de 100 MPa. El enfriamiento se controló hasta temperaturas del orden de 600-700 °C para ser posteriormente enfriada al aire.
- Tratamiento de disolución a una temperatura del orden de 950-1050°C durante 1-2 horas en el horno para enfriarla con una velocidad superior a la del aire. Este tratamiento se aplica directamente cuando se detecta la fase " tras el proceso de fabricación por SLM siempre y cuando no tenga la pieza falta de homogeneidad o bien tras el tratamiento HIP cuando presente heterogeneidades y poros internos [24-25]
- Tratamiento de estabilización a temperaturas del orden de los 400-500 °C y tiempos variables en función del nivel de tensiones existentes.
- Tratamiento de envejecimiento a 700-800 °C. Estos tratamientos son recomendables solo cuando no hay tratamiento

posterior de soldadura, como es este caso. Para aplicaciones con soldadura se omiten o se pueden aplicar tratamientos adicionales de sobre-envejecimiento [26].

La Fig.3 muestra la visión holística aplicada al caso de estudio y las diferentes etapas que se siguieron en el ensayo experimental del mismo. Se contemplan las fases desde el diseño, el proceso primario y sus post-tratamientos (apartado 3) y los modelos, monitorización y parámetros correspondientes al proceso de fabricación de la pieza final (apartados 4 y 5). Para el proceso de mecanizado se utilizó una herramienta de diámetro  $d=16$  mm de metal duro con un recubrimiento de AlTiN. Las condiciones de corte que se aplicaron en el proceso de desbaste son:  $F = 45$  mm/min,  $S = 400$  r/min, profundidad de pasada axial  $a_p = 3$  mm. El sistema que se utilizó para la refrigeración es CryoMQL puesto que presenta numerosas ventajas con su comportamiento frente a este tipo de superaleaciones, más concretamente Inconel 718[27,28]. Esta técnica consiste en la inyección de micropartículas de aceite criogenizadas con CO2 en lugar de taladrina, logrando una técnica de refrigeración-lubricación ecosostenible.

### 3. MODELIZACIÓN MECANISTICA

En el enfoque de la Figura 1, se definen como datos de entrada los valores del proceso que determinan fuerzas y potencias de corte durante el mecanizado. La modelización del proceso debe ser la clave para definir estos valores, ya que los modelos predictivos ofrecen información previa a la ejecución del mecanizado real y, por tanto, permiten hacer modificaciones en las estrategias de corte y/o optimizar los parámetros para evitar sobre-esfuerzos, picos de potencia o efectos indeseados durante el proceso.

El modelo de predicción de fuerzas, específicamente para operación de fresado, que se aplica en este caso de estudio consiste en

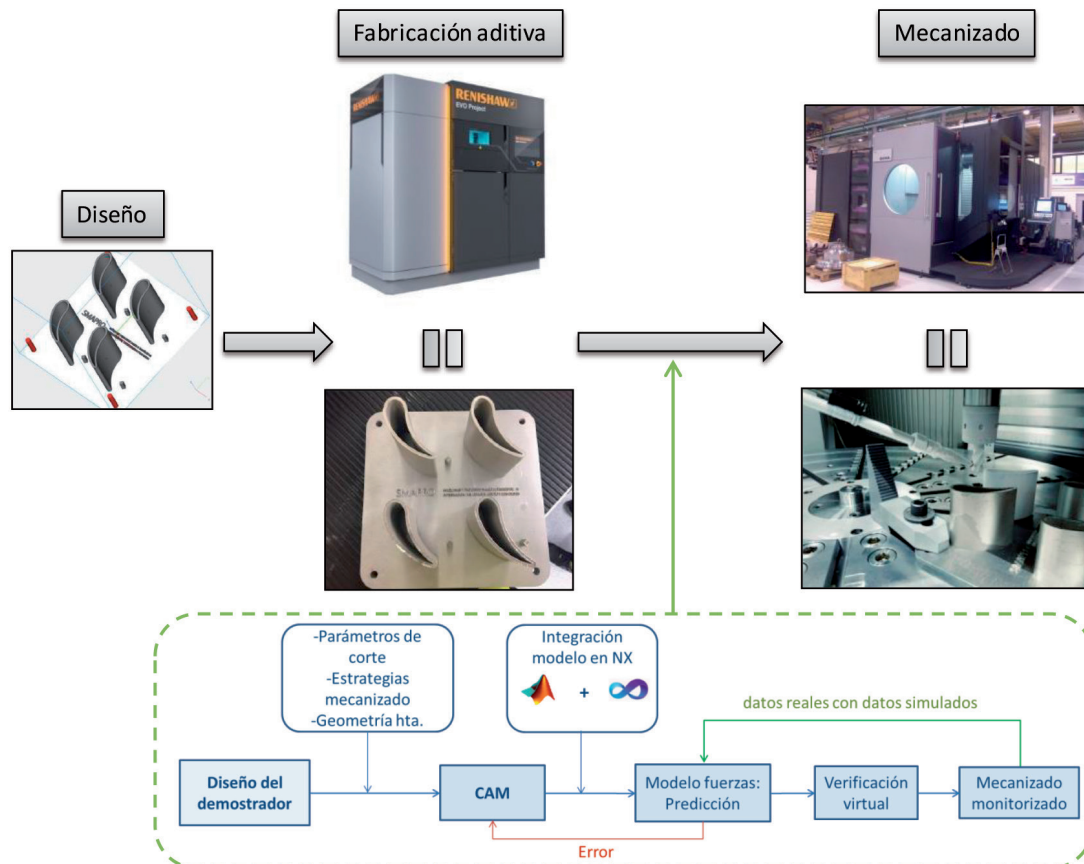


Fig. 3: Modelo global aplicado al caso de estudio: Álabe en Inconel 718

un modelo mecanístico integrado en software CAM, en concreto en Siemens NX. Este tipo de modelos llevan años en manos de universidades y centros tecnológicos, sin embargo, es su integración en CAM la que está promoviendo su utilización en la práctica y su aplicación a casos reales. Así pues, en este apartado, a continuación, se describen los pasos a seguir para la realización de la simulación, así como los fundamentos del modelo [29].

### Etapas del modelizado

#### 1. Pre-procesado: Lectura de datos desde el CAM

El principal objetivo de este paso es evitar errores en la transferencia de datos (habituales cuando se definen de manera manual). Los datos necesarios para la simulación se toman automáticamente del CAM y se transforman en dos archivos:

- **Archivo CL** (cutter location), con extensión \*.cls. Contiene la geometría de la fresa definida por 5 parámetros geométricos (D, R, h,  $\alpha$ ,  $\beta$ ), los puntos de la trayectoria (coordenadas XYZ y orientación de la herramienta), parámetros de corte (velocidad de giro y avance); además del material y el número de pasadas de la fresa.
- **Archivo STL** que contiene el bruto inicial para la operación a simular; puede ser el resultado de operaciones previas.

#### 2. Procesado: Cálculo mecanístico

El modelo propuesto se basa en las expresiones presentadas por Altintas [30], las cuales utilizan 6 coeficientes de corte específicos obtenidos experimentalmente:  $K_{tc}$ ,  $K_{rc}$ ,  $K_{ac}$ ,  $K_{te}$ ,  $K_{re}$  y  $K_{ae}$ .

$$dF_t = K_{te}dS + K_{tc}h_n db \quad (1)$$

$$dF_r = K_{re}dS + K_{rc}h_n db \quad (2)$$

$$dF_a = K_{ae}dS + K_{ac}h_n db \quad (3)$$

Las ecuaciones anteriores permiten calcular los diferenciales de fuerza en dirección tangencial,  $dF_t$  (dirección de la velocidad de corte); radial,  $dF_r$  (dirección normal al filo) y axial,  $dF_a$  (dirección del eje de la herramienta), teniendo en cuenta que la fresa de corte se discretiza en N planos en su dirección Z, donde  $dS$  es la longitud de cada elemento y  $db$  es su altura (Figura 4). Asimismo, se realiza una discretización de cada filo de corte en T diferencias angulares por revolución. Por último,  $h_n$  es el espesor de viruta que se obtiene de acuerdo con la siguiente ecuación, donde  $f_z$  es el avance por diente,  $\theta(t)$  es el ángulo de rotación, es el ángulo de posición,  $\alpha$  es la inclinación respecto al plano XY [31].

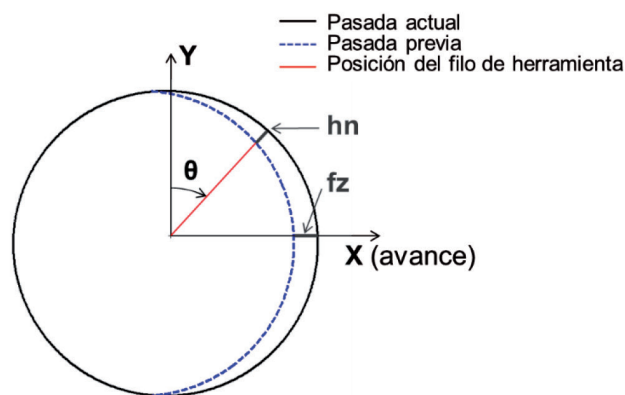


Fig. 5: Parámetros para la obtención del espesor de viruta,  $h_n$  (4)

$$h_n = f_z \cdot \sin(\theta(t)) \cdot \cos(\alpha) + f_z \cdot \sin(\alpha) / \tan(\kappa_r) \quad (4)$$

La integración de las fuerzas a lo largo de toda la trayectoria se divide en dos pasos: obtención de la interacción herramienta-pieza y el sumatorio de fuerzas.

#### 1.1. Obtención del contacto herramienta-pieza

Se denomina dominio de contacto herramienta pieza (*engagement domain*), al área geométrica donde el filo de corte está en contacto con la pieza. Este dominio se representa como una matriz booleana 4D, donde los puntos de contacto (con capacidad de corte) toman valor 1 y el resto 0. Para obtener dicha matriz, se utilizan, en primer lugar, ecuaciones analíticas de barrido de volúmenes (ec. 5) para identificar qué puntos han sido o no eliminados por las pasadas o movimientos previos.

$$(x - x_0(t))^2 + (y - y_0(t))^2 = r(z)^2 \quad (5)$$

donde  $x$ ,  $y$ ,  $z$  son las coordenadas del punto a analizar;  $x_0(t)$ ,  $y_0(t)$  indica la posición del centro de la herramienta a lo largo del tiempo y  $r$  es el radio de la herramienta. Resolviendo la ecuación, todos los puntos xyz que dan valores reales para  $x_0$  entre  $x_0(t_1)$  y  $x_0(t_2)$  están dentro del volumen. En segundo lugar, los puntos obtenidos previamente se analizan mediante un algoritmo dentro-fuera (in-out) que determina si los puntos están dentro de la geometría STL del bruto inicial.

#### 2.2. SUMATORIO DE FUERZAS

Al igual que la matriz booleana 4D del contacto, se calculan otras tres matrices 4D teniendo en cuenta las ecuaciones definidas por Altintas (1), (2), (3) [33]. Dichas matrices representan las

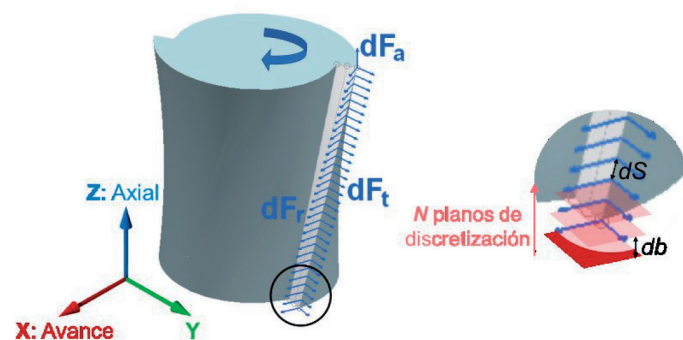
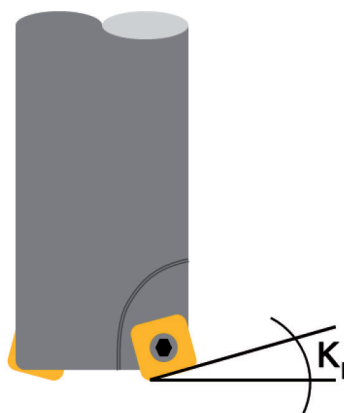


Fig. 4: Sistemas de coordenadas locales, relativos a la herramienta: componentes tangencial ( $t$ ), radial ( $r$ ), axial ( $a$ ); componentes X, Y, Z



componentes de fuerza tangencial, radial y axial que a continuación se transforman en las direcciones XYZ mediante una matriz de transformación. La fuerza total se obtiene de multiplicar las matrices de fuerzas por la matriz booleana de contacto y sumar las contribuciones de todos los elementos diferenciales (6); donde Z es el número de filos y N el número de planos de discretización.

$$\{F_t\} = \sum_1^Z \sum_1^N \{dF_t\} \quad (6)$$

Como consecuencia, se obtienen las fuerzas  $F_x$ ,  $F_y$  y  $F_z$  en el sistema de coordenadas local (relativo a la herramienta), que mediante rotación se transforman al Sistema de Coordenadas Absoluto.

La fuerza tangencial total se calcula del mismo modo, tal y como se muestra en (6) y, asimismo, la potencia y el par (7), (8).

$$\text{Potencia [W]} = \frac{F_t [N] \cdot V_c \left[\frac{m}{min}\right]}{60} \quad (7)$$

$$\text{Par [N}\cdot\text{m]} = F_t [N] \cdot R [m] \quad (8)$$

donde  $R$  es el radio de la herramienta.

### 3. POST-PROCESADO: PLOTEO COMPRENSIVO DE RESULTADOS

En este caso, la representación gráfica de los resultados se realiza sobre la propia trayectoria definida en el CAM y en el entorno del mismo software. Para ello, se selecciona el valor máximo de fuerza/potencia/par en cada tramo de trayectoria y se almacena en un archivo TXT que incluya las siguientes columnas:

- Coordenadas XYZ de los puntos de la trayectoria
- Máxima fuerza de corte, par y potencia para cada punto
- Números de identificación de color de NX, de acuerdo a las magnitudes anteriores.

Así pues, la integración se realizó a través de una aplicación programada en *NX open* que permite lanzar la simulación desde el propio entorno de NX. La figura 6 muestra a continuación la

aplicación del modelo sobre el caso de estudio. También se muestra una comparativa entre las fuerzas simuladas y las medidas, mediante una plataforma dinamométrica, durante el mecanizado, en las condiciones de la Tabla III, con una herramienta de 14mm de diámetro y 2 filos.

### 4. MONITORIZACIÓN DEL MECANIZADO

#### Análisis del proceso de mecanizado

Para realizar la monitorización del mecanizado del álabe, se instaló un sistema de adquisición de datos de control numérico y sensores en el centro de mecanizado *Ibarmia* que permitió analizar los siguientes aspectos: la elección de la herramienta de corte, la estrategia de mecanizado empleada y la predicción de la calidad. Durante la ejecución del programa de mecanizado se registró, por una parte, el consumo del cabezal para estimar el rendimiento del programa y la herramienta utilizada y, por otra parte, las fuerzas generadas durante el proceso de arranque de viruta. La Fig.7 muestra los datos registrados respecto a las dos variables monitorizadas en un ensayo sobre Inconel 718.

Por un lado, el consumo del cabezal constituye un aspecto crítico durante el mecanizado de piezas para el sector aeronáutico, como es el caso de estudio. Se puede observar la evolución de la carga del cabezal y el nivel de vibración registrado durante las operaciones de desbaste. Para registrar el nivel de vibración, el cabezal consta de un sensor de aceleración que mide y calcula el valor RMS de dicha señal y vincula este valor a una variable del control.

Por otro lado, para realizar el registro de las fuerzas durante el mecanizado se utilizó una mesa dinamométrica dotada de sensores

Condiciones	Rango
Velocidad de corte ( $V_c$ )	45 [m/min]
Avance por diente ( $f_z$ )	0,1 [mm/diente]
Profundidad de pasada axial ( $A_p$ )	0,5 [mm]
Profundidad de pasada radial ( $A_e$ )	14 [mm]

Tabla III: Condiciones de corte en mecanizado de Inconel 718

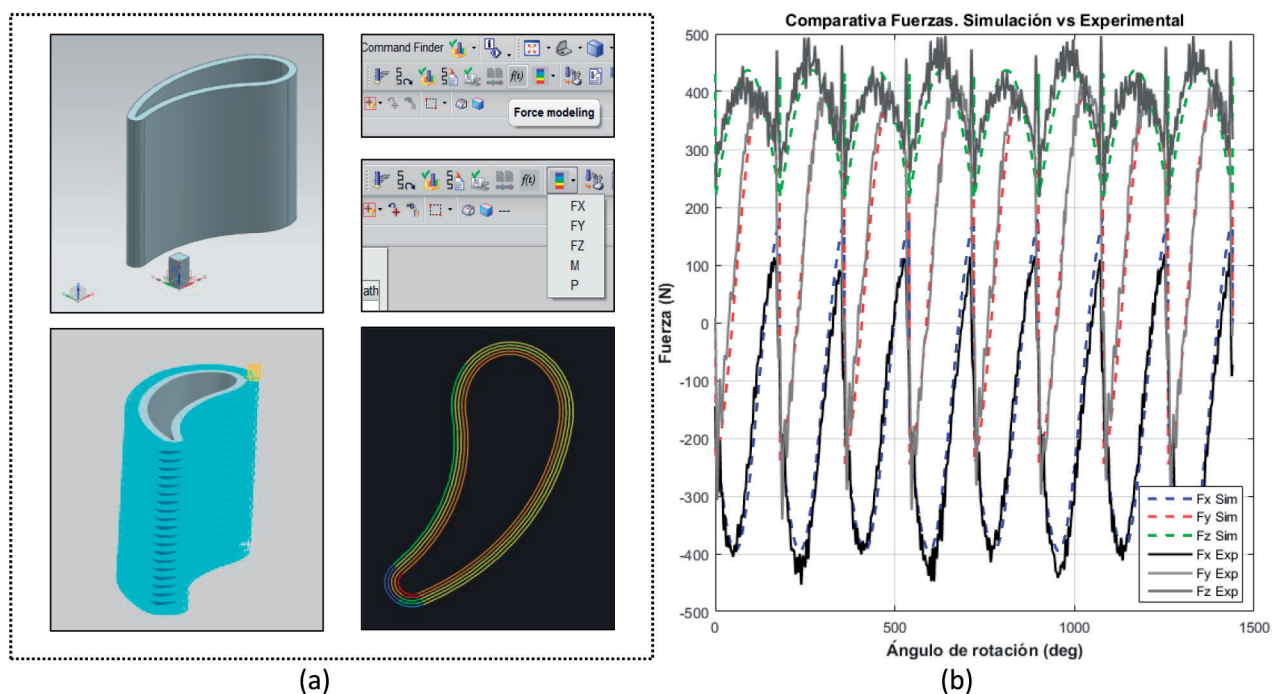


Fig. 6: (a) Imagen superior: comandos del entorno de trabajo NX y geometría de pieza. Imagen inferior: Trayectoria coloreada correspondiente al consumo de potencia. (b) Comparativa entre fuerzas simuladas y fuerzas medidas

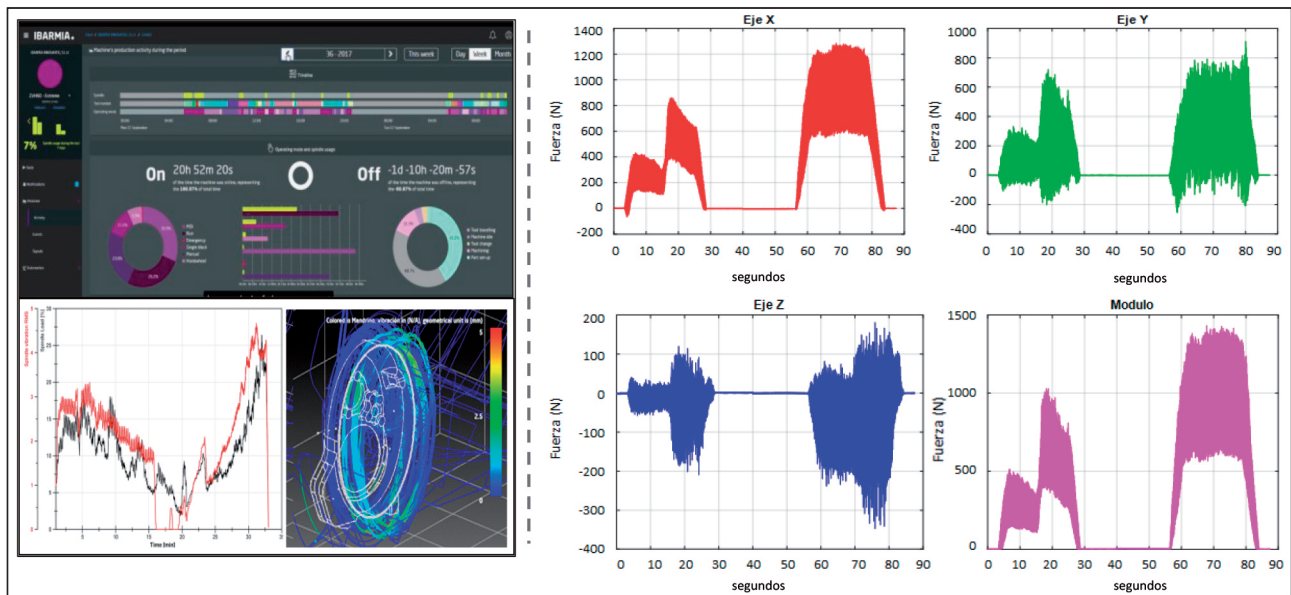


Fig. 7: Monitorización del consumo del cabezal y fuerzas generadas durante el mecanizado

piezoeléctricos Kistler 9255C. Los datos fueron analizados con un OROS® OR35 con una frecuencia de muestreo de 16.384 muestras/seg. Los datos obtenidos se utilizaron de *feedback* para optimizar el modelo de fuerzas desarrollado y expuesto en el apartado 4.

### 5. COMPORTAMIENTO VIRTUAL DE LA MÁQUINA-HERRAMIENTA: GEMELOS VIRTUALES

Finalmente, se debe tener en cuenta que la digitalización de los procesos productivos ofrece múltiples ventajas para el sector de la máquina-herramienta. En esta línea, se realizó un gemelo virtual de la máquina Ibarmia utilizada. La Fig.8 muestra las diferentes variables que se consideraron a la hora de diseñar dicho gemelo virtual. Para ello, se ha dividido en dos sectores: la virtualización del proceso y la modelización del comportamiento de máquina.

Para la **virtualización de proceso**, por una parte, se implementaron en el software CAD/CAM/CAE de NX los modelos desarrollados anteriormente, englobando en un mismo entorno el modelo de predicción de fuerzas, consumo de potencia durante el mecanizado, estimación de tolerancias dimensionales y el modelo de predicción de la integridad superficial. Gracias a la monitoriza-

ción de las fuerzas y las mediciones post-proceso, estos modelos reciben un *feedback* cerrando un ciclo de optimización modelo-proceso. Por otra parte, se realizó el diseño de los componentes de la máquina y el montaje de la cinemática de la máquina. Esto permite considerar los límites de máquinas y la detección de colisiones, especialmente crítico cuando la fabricación requiere de un mecanizado en 5 ejes simultáneos.

Para la **modelización**, se ha tenido en cuenta tanto el proceso de mecanizado como el comportamiento de la máquina. Dicho comportamiento se divide en estático y dinámico. Mientras el estático se ha abordado mediante el conocido Método de Elementos Finitos (FEM) como se puede observar en la Fig.8, el dinámico ha requerido el uso de una metodología más compleja. La dificultad de la modelización de la dinámica de la estructura se encuentra en la identificación de los parámetros dinámicos de las uniones. Para ello, se requieren de modelos teórico-experimentales como el Acomplamiento de Receptancias Inverso (IRC) para su cálculo [32] "ISSN": "08906955", "abstract": "Machine tool components are connected by joints that provide relative motion between contact interfaces. These joints add flexibility to the load path from the tool tip to the foundation and, therefore, the correct

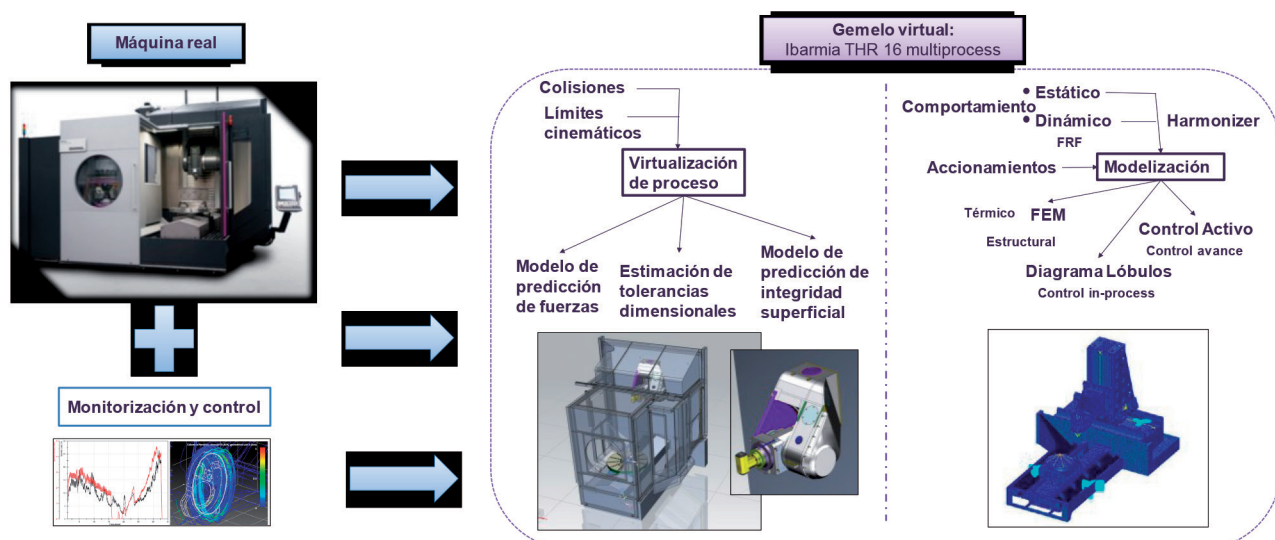


Fig. 8: Configuración del gemelo virtual de la máquina Ibarmia THR 16 multiprocess

determination of joint properties becomes a crucial step if the whole machine performance is to be analyzed. A well suited experimental method to characterize these properties is the Inverse Receptance Coupling Substructure Analysis (IRCSA). Estos modelos son capaces de predecir bajo qué conjunto de condiciones el corte es estable y en cuáles el *chatter* supondría un problema.

## 6. CONCLUSIONES

La fabricación de componentes críticos aeronáuticos, como el caso de estudio, engloba una gran magnitud de factores y variables que son necesarios controlar. A lo largo del trabajo realizado se obtienen las siguientes conclusiones:

- Es imprescindible el conocimiento en profundidad de todas las fases del proceso de fabricación, así como los parámetros que intervienen. En este caso en lo que se refiere a la materia prima, la pieza a mecanizar proviene de un proceso de aporte por SLM, lo que implica la necesidad de realizar una serie de tratamientos para eliminar impurezas y tensiones previas al mecanizado final.
- El material es una aleación termorresistente de base Níquel conocida por su buen comportamiento en condiciones extremas de trabajo a altas temperaturas, pero a su vez por su baja maquinabilidad. En situaciones que comportan un desafío para el proceso de fabricación, la correcta selección de parámetros a controlar así como la modelización de variables (como es el caso de las fuerzas) ofrecen información sobre el proceso: estimar el volumen de viruta teórico que ha mecanizado, comparar rendimientos de herramientas en operaciones similares, cuantificar el rendimiento de nuevas herramientas, etc.
- Finalmente, el gemelo virtual permite un procesamiento de datos de manera que sustituye a su realización física obteniendo valores semejables a la realidad. En este caso, dentro del gemelo virtual se encuentran los modelos desarrollados, por lo que se realizó una estimación de fuerzas de mecanizado previa a la fabricación, optimizando de esta manera las condiciones de corte bajo las que se estimaban sobreesfuerzos. Por otra parte, la digitalización del proceso permitió adaptar las estrategias programadas evitando colisiones entre distintos componentes implicados, en la primera programación se estimó una posible colisión del portaherramientas al adentrar en profundidad de la pieza.

La filosofía 4.0 se construye desde bases sólidas de integración, donde proyectos, modelos y conocimiento previo se ubica al servicio de una estrategia, tal como se ha realizado en este proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Rosen R., Wichert G., Lo G., Bettenhausen Kurt D. "About the Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing" IFAC-PapersOnLine 48-3 (2015) 567-572

[2] Altintas Y., Brecher C., Weck M., Witt S., "Virtual Machine Tool", CIRP Annals, 2005

[3] Urbikain G., Artetxe E., de Lacalle LNL. "Numerical simulation of milling forces with barrel-shaped tools considering runout and tool inclination angles" Applied Mathematical Modelling, 2017, 47, 619-636

[4] Calleja A., Alonso M.A., Fernández A., Tabernero I., Ayesta I., Lamikiz A., López de Lacalle L.N.. "Flank milling model for tool path programming of turbine blisks and compressors" International Journal of Production Research, 2014

[5] López de Lacalle, L. N., Urbicain, G., Fernández-Valdivielso, A., Alvarez, A., González, H. "Wear-dependent specific coefficients in a mechanistic model for turning of nickel-based superalloy with ceramic tools" Open Eng. 2017; 7:175-184

[6] Chukwujekwu Okafor, A. AliSultan A. "Development of a mechanistic cutting force model for wavy-edge bull-nose helical end-milling of inconel 718 under emulsion cooling strategy" Applied Mathematical Modelling, 2016, Volume 40, Issue 4, Pages 2637-2660 <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.09.040>

[7] Zhou-Long Li, Jin-Bo Niu, Xin-Zhi Wang, Li-Min Zhu. "Mechanistic modeling of five-axis machining with a general end mill considering cutter runout" International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, Volume 96, Pages 67-79 <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2015.06.006>

[8] Artetxe E., González H., Calleja A., Fernández Valdivielso A., Polvorosa R., Lamikiz A., López de Lacalle L. Norberto "Optimised methodology for aircraft engine IBRs five-axis machining process". Int. J. Mechatronics and Manufacturing Systems, Vol. 9, No. 4, 2016

[9] Arrazola, P.-J., Özel, T., Umbrello, D., Davies, M., Jawahir, I., "Recent advances in modelling of metal machining processes", CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2013, 62: 695-718.

[10] Lazoglu I, Altintas Y "Prediction of Tool and Chip Temperature in Continuous and Interrupted Machining". International Journal of Machine Tools Et Manufacture, 2002, 42:1011-1022.

[11] Mondelin A, Valiorgue F, Rech J, Coret M, Feulvarch E. "Hybrid Model for the Prediction of Residual Stresses Induced by 15-5ph Steel Turning". Inter-national Journal of Mechanical Science, 2012, 58:69-85.

[12] Arizmendi M, Fernandez J, López de Lacalle LN, Lamikiz A, Gil A, Sánchez JA, Campa FJ, Veiga F "Model Development for the Prediction of Surface Topography Generated by Ball-End Mills Taking into Account the Tool Parallel Axis Offset". Experimental validation. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2008, 57(1):101-104.

[13] Urbikain, G., de Lacalle, LNL "Modelling of surface roughness in inclined milling operations with circle-segment end mills" Simulation Modelling Practice and Theory, 2018, 84, 161-176

[14] <http://en.dmgmori.com/products/software/dmg-mori-messenger>

[15] Kumar, M., Vaishya, R. "Real-Time Monitoring System to Lean Manufacturing" Procedia Manufacturing, 2018, Volume 20, Pages 135-140

[16] López de Lacalle L, Lamikiz A, Sánchez J.A., Fernández de Bustos I., 2005, "Simultaneous Measurement of Forces and Machine Tool Position for Diagnostic of Machining Tests"

[17] Xiaoping Wang, Tahmina Keya, Kevin Chou. "Build Height Effect on the Inconel 718 Parts Fabricated by Selective Laser Melting", Procedia Manufacturing, 2016, Volume 5, 1006-1017

[18] <http://www.renishaw.es/es/fichas-tecnicas-fabricacion-aditiva--17862-datasheet> "In718-0405 powder for additive Manufacturing"

[19] Jablonski Paul D., Cowen Christopher J., "Homogenizing a Nickel-Based Superalloy: Thermodynamic and Kinetic Simulation and Experimental Results", Metallurgical and Materials Transactions B, 2009, Vol. 40, Issue 2, pp 182-186.

[20] D'Souza N., Dong H.B., "An analysis of solidification path in the Ni-base superalloy, CMSX10K", Superalloys 2008, TMS, pp 261-269.

[21] Rettig R., Heckl A., Singer R. F., "Modeling of precipitation kinetics of TCP-phases in single crystal nickel-base superalloys", Advanced Materials Research, 2011, Vol. 278, pp 180-185,210.

[22] ASM Metals Handbook Vol. 4: Heat Treating. ASM International, 1991.

[23] ASM Metals Handbook Vol. 15: Casting. ASM International, 1992.

[24] Duvall D. S., Owczarski W. A., "Further Heat-Affected- Zone Studies in Heat Resistant Nickel Alloys", Welding Journal, Vol. 46, No. 9, 1967, pp. 423-432. - Open Access Library." [Online]. Available: <http://www.jourlib.org/references/7278045>. [Accessed: 28-Jul-2016].

[25] Thompson R. G., Dobbs J. R., Mayo D. E., "The Effect of Heat Treatment on Microfissuring in Alloy 718," Weld. J., p. 299, 1986.

[26] Sahw S.W.K., Response of IN-939 to process variations, Superalloy 1980, ed. John K. Tien et al., Metals Park, OH: American Society of Metals, 1980, pp. 275-284.

[27] Pereira O, Urbikain G, Rodríguez A, Fernández-Valdivielso A, Calleja A, Ayesta I, López de Lacalle LN. "Internal cryolubrication approach for Inconel 718 milling". Procedia Manufacturing, 2017, 13, 89-93.

[28] Pereira O, Rodríguez A, Fernández-Valdivielso A, Barreiro J, Fernández-Abia AI, López-de-Lacalle LN, "Cryogenic hard turning of ASP23 steel using carbon dioxide". Procedia engineering, 2015, 132, 486-491.

[29] Sarasua JA, Cascón I. "Integration of machining mechanistic models into CAM software". Journal of Machine Engineering, 2014, Vol. 14 No. 4, pp. 5-17, 2014.

[30] Altintas Y. "Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics Machine Tool Vibrations and CNC Design". Cambridge University Press, United Kingdom, 2000.

[31] Erdim H, Lazoglu I, Kaymakci M. "Free- Form Surface Machining and Comparing Feedrate Scheduling Strategies", Machining Science and Technology. 2007. Vol. 11, No. 1, pp. 117-133.

[32] Ealo J.A., Garitaonandia I., Fernandes M.H., Hernandez-Vazquez J.M., Muñoz A., "A practical study of joints in three-dimensional Inverse Receptance Coupling Substructure Analysis method in a horizontal milling machine", Int. J. Mach. Tools Manuf., 2018. 128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmactools.2018.02.002>.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece la ayuda a la realización de este trabajo al proyecto ELKARTEK 2017, SMAPRO, máquinas y procesos smart a través de la integración del conocimiento y los datos, financiado por el departamento de Desarrollo económico y competitividad del Gobierno Vasco.

Se agradece las contribuciones e ideas del Prof. A. Lamikiz, Ing. Javier Arzamendi, Dr. Octavio Pereira, Dr. Rikardo Bueno, Julen Muñoz, y el resto de los integrantes del equipo de SMAPRO.