

Modelado integrado de fuerzas y motores de inducción aplicado al proceso de fresado

Trojaola, I.^{a,*}, Elorza, I.^a, Nieto-Ramos, E.^a

^a*Ikerlan Technology Research Centre, Arrasate-Mondragón, 20500 Gipuzkoa, Spain*

To cite this article: Trojaola, I., Elorza, I. 2023. Integrated Modeling of Forces and Induction Motors in the Milling Process XLIV Jornadas de Automática, 186-191. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.186>

Resumen

En este artículo se propone un modelo para el proceso de fresado que integra el modelado de los actuadores de la fresadora y las fuerzas generadas durante dicho proceso. El modelado de las fuerzas se realiza directamente a partir de los componentes de fuerza tangencial, axial y radial. Además, se desarrolla el modelado matemático de los motores de inducción, encargados de realizar el control de posición y velocidad de la fresadora. El modelado se lleva a cabo utilizando la librería *Simscape* de *MATLAB*, lo que proporciona una herramienta intuitiva y reproducible para simular el proceso de fresado bajo diferentes condiciones de ensayo. Los resultados de las simulaciones muestran cómo las dinámicas de los motores de inducción se ven afectadas por las fuerzas y los pares generados durante el proceso, lo cual permite adecuar los lazos de control de los motores a ellas.

Palabras clave: Proceso de Fresado, Motor de Inducción, Modelado, Simulación, Simscape.

Integrated Modeling of Forces and Induction Motors in the Milling Process

Abstract

This article proposes a model for the milling process that integrates the modeling of the milling machine's actuators and the forces generated during the process. The modeling of the forces is directly calculated based on the components of tangential, axial, and radial force. Furthermore, a model of the induction motors is developed, encompassing both steady-state and dynamic states. The modeling is conducted using the *Simscape* library in *MATLAB*, providing an intuitive and reproducible tool for simulating complex physical systems under different test conditions. The simulation results demonstrate how the dynamics of the induction motors are affected by the forces and torques generated during the milling process.

Keywords: Milling-Process, Induction Motor, Modelling, Simulation, Simscape.

1. Introducción

La utilización de la tecnología de simulación sigue ganando importancia a lo largo del ciclo de vida del producto. La modelización de sistemas complejos, como las herramientas y los procesos de mecanizado, facilita la eficiencia tanto en tiempo como en costes en la fabricación y el desarrollo de productos.

En el contexto del proceso de fresado, las herramientas de simulación facilitan la automatización de tareas complejas, como la generación de trayectorias de herramientas y la definición de condiciones de corte. De esta manera, los usuarios pueden centrarse en la toma de decisiones estratégicas y en la optimización de los parámetros de fresado sin tener que preocu-

parse por los detalles técnicos subyacentes. Estas herramientas proporcionan una interfaz gráfica interactiva que permite a los usuarios seleccionar y configurar los componentes del modelo, así como utilizar datos recopilados para mejorar la precisión de las simulaciones.

El modelado de la simulación basado en la física se puede llevar a cabo mediante lenguajes y herramientas como *Simulink* y *Modelica* Mathworks (2023); *Modelica* (2023), mientras que el modelado de eventos discretos y el modelado basado en agentes puede realizarse mediante los programas *AnyLogic* y/o *ARENA*. Estas herramientas de simulación permiten realizar un enfoque orientado a objetos, lo que permite describir los modelos de manera modular, escalable y reutilizable Shao et al.

*Autor para correspondencia: itrojaola@ikerlan.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

(2018-08).

En este estudio se ha optado por el uso de *Simscape*, herramienta integrada en *Matlab/Simulink*, debido a su entorno de simulación y modelado de sistemas dinámicos. *Simscape* permite el diseño de modelos físicos basados en ecuaciones algebraicas, y su solver automático adapta de manera eficiente los pasos de tiempo para garantizar una simulación precisa. Además, facilita el modelado multidominio, donde se pueden realizar simulaciones mecánicas, eléctricas, hidráulicas, etc. Este último punto es esencial para el modelado de un proceso de mecanizado, donde toman parte dinámicas mecánicas entre la pieza y la herramienta de corte, y las dinámicas eléctricas de los servo motores de cada eje.

En este estudio se propone realizar el modelado de las dinámicas de los actuadores de un proceso de mecanizado, en particular un proceso de fresado, así como de las fuerzas y pares que aparecen en el mismo, con el fin de proporcionar un modelo intuitivo que permita al usuario realizar su análisis, optimización y control. El objetivo es utilizar el modelo para el diseño de nuevos controladores o condiciones de ensayo, facilitando así el desarrollo de mejoras en el proceso.

Tradicionalmente, los métodos de aproximación utilizados para obtener los coeficientes de fuerza generados en un proceso de fresado se han basado en ensayos experimentales para una geometría de fresa específica y una combinación de material herramienta-pieza específica. Estos métodos emplean técnicas de regresión desde un enfoque empírico, que establecen relaciones entre las variables involucradas en el proceso de mecanizado, como el avance, la profundidad de corte y la velocidad de corte, con las fuerzas de corte del proceso y la rugosidad de la superficie Alajmi and Almehal (2021-04-29); Lin et al. (2001-01); Bartarya and Choudhury (2012).

En los últimos años, las fuerzas en los procesos de mecanizado se han calculado utilizando dos métodos. En el primer método, los coeficientes de fuerza de corte se determinan utilizando el ángulo de cizalladura, el ángulo de fricción y el esfuerzo de corte resultante de las pruebas de corte ortogonal Merchant (1945-05); Jayaram et al. (2001-01); Zhu et al. (2001-08-01). En el segundo método, los coeficientes de fuerza de corte se estiman directamente a partir de pruebas de fresado realizadas para la combinación específica de herramientas de corte Merchant (1945-05); Kao et al. (2015-10-01). Este último, permite el uso de los coeficientes obtenidos experimentalmente para diferentes valores de velocidad de avance o profundidad de corte. Estos modelos se conocen comúnmente como modelos mecanísticos y predicen las fuerzas de corte basándose en un método desarrollado por F Koenigsberger (1961).

Existen modelados más complejos de procesos de mecanizado, cómo el modelado de elementos finitos, el cual es considerado el método de simulación más fiable y preciso. La calibración de los modelos de elementos finitos directamente con los datos de mecanizado suele ser difícil, ya que los modelos son costosos desde el punto de vista computacional y los métodos de optimización no lineales. La estimación de los parámetros de calibración desconocidos dan lugar a soluciones no únicas Fernandez-Zelaia and Melkote (2019-01).

Una de las tendencias actuales en el modelado de procesos de fresado es la inclusión de los actuadores en los modelos de simulación. Esto se debe a que los actuadores desempeñan un

papel fundamental en el control del proceso de mecanizado, y su comportamiento puede tener un impacto significativo en el rendimiento del sistema. La simulación de los actuadores permite obtener una visión más precisa y completa del proceso de fresado, lo que a su vez facilita la optimización del rendimiento del sistema mediante el uso de controles avanzados. Esta optimización puede conducir a una reducción de los costes de producción.

Algunos autores han realizado estudios sobre el proceso completo de mecanizado, desde el sistema de control hasta el corte de la pieza. Altintas et al. (2011) analizaron cada uno de los componentes involucrados en el proceso, incluyendo las guías de la máquina herramienta, los motores eléctricos y los sensores. Sin embargo, en cuanto al comportamiento de los motores eléctricos, se describe mediante una función de transferencia de primer grado que relaciona el par del motor con la fuerza de corte. Es común encontrar en la literatura el modelado de los motores eléctricos en forma de función de transferencia Gumono et al. (2021-11-25); Sato (2012-10-01); Kulkarni and Saha (2002).

Los motores eléctricos son sistemas no lineales y exhiben comportamientos dinámicos más complejos que requieren una representación más completa que una función de transferencia, ya que pueden incluir efectos de histéresis, saturación y retardo en la respuesta de par. Un enfoque de modelado más avanzado y detallado de los motores eléctricos fue realizado por Ju et al. (2022-12). Utilizando las transformadas de *Park* y de *Clarke*, llevaron a cabo el modelado de un motor síncrono Chattopadhyay et al. (2011). Este enfoque de modelado les permitió implementar un control en cascada para regular la velocidad y las corrientes de los motores, y así lograr la posición deseada de la herramienta de corte.

Crear un modelo de simulación personalizado para representar el sistema de control de movimiento de la herramienta de corte y el propio proceso de corte tiene ventajas en comparación con el uso de soluciones de software externas Ju et al. (2022-12). Estas ventajas incluyen mayor flexibilidad para implementar y modificar funciones, y un acceso completo a las variables de control asignadas y a la evaluación de las funciones del proceso al completo.

El objetivo de este trabajo no es presentar un nuevo modelo matemático de las fuerzas de corte en un proceso de mecanizado, dado que ya existen numerosos estudios que abordan este tema en profundidad. Sin embargo, en la literatura, se carece de estudios que aborden el modelado de los motores eléctricos encargados de mover la herramienta, así como de las fuerzas de corte que ocurren entre la pieza y la propia herramienta. La incorporación de estos aspectos permitiría analizar el comportamiento del proceso bajo diferentes condiciones de ensayo y utilizar dicha información para el diseño del controlador.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2, se describe el método utilizado para modelar las fuerzas de corte en un proceso de mecanizado. En la Sección 3 se describe el modelado matemático de un motor de inducción. En la Sección 4, se desarrolla la implementación del proceso de fresado y del modelo del motor de inducción en *Simscape*.

2. Modelo mecánico de la fuerza de corte

El modelado de las fuerzas de corte generadas durante el proceso de corte se ha realizado siguiendo el enfoque propuesto por Kao et al. (2015-10-01). En este enfoque, las fuerzas se modelan utilizando el modelo oblicuo, y los coeficientes de fuerza de corte se obtienen en condiciones de corte estable para minimizar los efectos de las vibraciones en el cálculo de los coeficientes. Como se mencionó anteriormente, el objetivo de este estudio no es proponer un nuevo método de modelado ni obtener nuevos coeficientes de corte, por lo tanto, se utilizan los coeficientes obtenidos previamente en Kao et al. (2015-10-01).

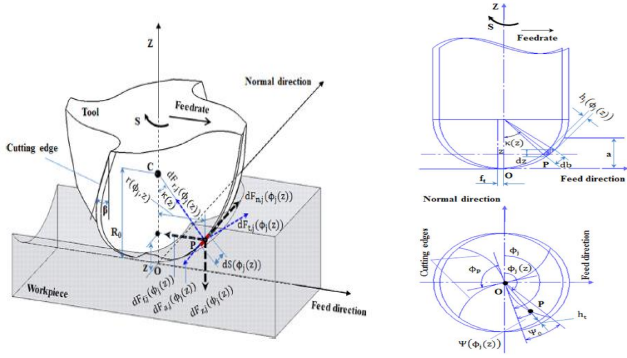


Figura 1: Geometría de la fresadora (izq) y la posición angular de las hélices (dcha) (Kao et al. (2015-10-01)).

Se considera que la herramienta de corte tiene forma semi-esférica y su inmersión se mide en sentido horario tomando como referencia el eje normal (ver Figura 1). Suponiendo que el extremo inferior de la hélice número uno se designa como ángulo de inmersión de referencia (ϕ_1), el extremo inferior de las hélices restantes se situará en el ángulo ϕ_j . La ecuación que define el ángulo ϕ_j viene dada por:

$$\phi_j = \phi_1 - (j - 1)\phi_p, \quad j = 1 - N_f. \quad (1)$$

Donde ϕ_p es el ángulo de inclinación de la hélice, que es el ángulo de desfase entre la hélice j y la hélice $j + 1$:

$$\phi_p = \frac{2\pi}{N_f}. \quad (2)$$

Las anteriores ecuaciones describen el ángulo de inmersión en el punto inferior de las hélices, sin embargo, dependiendo de la profundidad del corte, z , y considerando el ángulo de la hélice, el ángulo radial a cada profundidad, el ángulo de inclinación viene definido por:

$$\Psi(\phi_j(z)) = \frac{2\tan\beta}{D}z = \frac{\tan\beta}{R_0}z, \quad (3)$$

donde R_0 y β son el radio de la herramienta de corte y el ángulo de las hélices, respectivamente.

El máximo ángulo radial viene definido por la máxima profundidad de corte, a , y se obtiene:

$$\Psi_0 = \frac{\tan\beta}{R_0}a, \quad (4)$$

la dependencia con z se elimina.

A partir de las ecuaciones anteriores, para la hélice j , a una profundidad de corte z , el ángulo de inmersión $\phi_j(z)$ se expresa de la siguiente manera:

$$\phi_j(z) = \phi_j - \Psi(\phi_j(z)) = \phi_j - \frac{\tan\beta}{R_0}z. \quad (5)$$

Las fuerzas tangenciales, radiales, y axiales actuando en un elemento diferencial de la hélice se expresan de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} dF_{t,j}(\phi_j(z)) &= K_{tc} * h_j(\phi_j(z)) * db + K_{te} * dS(\phi_j(z)) \\ dF_{r,j}(\phi_j(z)) &= K_{rc} * h_j(\phi_j(z)) * db + K_{re} * dS(\phi_j(z)), \\ dF_{a,j}(\phi_j(z)) &= K_{ac} * h_j(\phi_j(z)) * db + K_{ae} * dS(\phi_j(z)) \end{aligned} \quad (6)$$

los coeficientes K_{tc} , K_{rc} , K_{ac} , K_{te} , K_{re} , K_{ae} establecen la relación entre la fuerza de corte y la fuerza en los filos con cada una de las tres fuerzas y son estimados a través de ensayos experimentales. Como se mencionó previamente, el enfoque de este trabajo no abarca el método de estimación de estos coeficientes, por lo tanto, se utilizarán los valores obtenidos por Kao et al. (2015-10-01)

Cada punto de corte en la hélice se caracteriza por una profundidad z y un ángulo de inmersión ϕ_j . En estos puntos, las fuerzas de corte se descomponen en tres coordenadas, como se muestra en la Ecuación 6. La dirección de avance es paralela al movimiento de la herramienta y perpendicular al eje de corte. La dirección normal es perpendicular al movimiento de la herramienta y al eje de corte. La dirección axial es paralela al eje de corte y perpendicular a la trayectoria de movimiento. Así, las fuerzas elementales de avance, normal y axial se calculan mediante las transformaciones de la Ecuación 8:

$$T = \begin{bmatrix} -\cos(\phi_j(z)) & -\sin(\kappa(z))\sin(\phi_j(z)) & -\cos(\kappa(z))\sin(\phi_j(z)) \\ \sin(\phi_j(z)) & -\sin(\kappa(z))\cos(\phi_j(z)) & -\cos(\kappa(z))\cos(\phi_j(z)) \\ 0 & \cos(\kappa(z)) & -\sin(\kappa(z)) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

donde $\sin(\kappa(z)) = r(\phi_j(z))/R_0$ y $\cos(\kappa(z)) = \frac{(R_0-z)}{R_0}$. Siendo $r(\phi_j(z)) = \sqrt{(R_0^2 - (R_0 - z)^2)}$.

Mediante la matriz de transformación mostrada en la Ecuación 8, se obtiene la siguiente relación:

$$\begin{bmatrix} dF_{f,j}(\phi_j(z)) \\ dF_{n,j}(\phi_j(z)) \\ dF_{a,j}(\phi_j(z)) \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} dF_{t,j}(\phi_j(z)) \\ dF_{r,j}(\phi_j(z)) \\ dF_{a,j}(\phi_j(z)) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Por medio de la Ecuación 8, se obtienen las fuerzas elementales de avance, normal, y axial. De esta forma las fuerzas son consistentes con las direcciones y movimientos asociados al proceso de fresado.

En la dirección de avance, normal y axial, las fuerzas de corte de N_f hélices por revolución pueden expresarse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\bar{F}_f &= \frac{N_f}{2\pi} \int_{z_1(\phi_j)}^{z_2(\phi_j)} \left(\int_0^{2\pi} dF_f(\phi_j(z)) \right) dz \\ \bar{F}_n &= \frac{N_f}{2\pi} \int_{z_1(\phi_j)}^{z_2(\phi_j)} \left(\int_0^{2\pi} dF_n(\phi_j(z)) \right) dz \\ \bar{F}_a &= \frac{N_f}{2\pi} \int_{z_1(\phi_j)}^{z_2(\phi_j)} \left(\int_0^{2\pi} dF_a(\phi_j(z)) \right) dz.\end{aligned}\quad (9)$$

De la Ecuación 9, se obtienen los valores de las fuerzas para una revolución en un intervalo de profundidad de corte. Sin embargo, para su implementación en *Simscape* se realiza una modificación de su cálculo. Para este estudio, no es interesante conocer las fuerzas generadas a cada diferencia de ángulo, ya que incrementaría considerablemente el tiempo computacional de la simulación. Por ello, se utiliza el valor medio de la integral entre $[0-2\pi]$, al cual denominamos $F_{q\phi}$, siendo $q = f, n, a$. De esta manera, se obtiene el valor medio de la fuerza en una revolución completa de la fresadora.

3. Modelado Motores de Inducción

El circuito equivalente en estado estacionario de un motor de inducción se muestra en la la Figura 2.

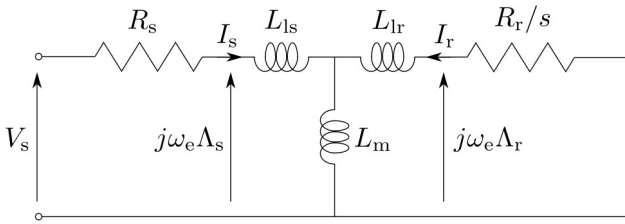


Figura 2: Circuito monofásico equivalente de un motor de inducción en estado estacionario Trzynadlowski (1994)

Para su modelado, se considera la aplicación de una tensión sinusoidal trifásica a los terminales del estator. Las bobinas del estator se configuran de tal manera que generan una onda magnética aproximadamente sinusoidal, que gira a una velocidad síncrona, ω_s , en estado estacionario. La velocidad síncrona está directamente relacionada con la frecuencia de la tensión aplicada, f , e inversamente proporcional al número de pares de polos por fase, p_p , de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\omega_s = 2\pi f / p_p. \quad (10)$$

Las corrientes del rotor son inducidas por la onda magnética giratoria, cuando la velocidad del rotor, ω_m , difiere de la velocidad síncrona. Estas corrientes, cuando se combinan con el campo magnético producido por el estator, generan un par. El comportamiento eléctrico se modela a partir de las siguientes ecuaciones Trzynadlowski (1994):

$$\begin{aligned}V_s &= R_s I_s + j\omega_e \Lambda_s \\ 0 &= \frac{R_r}{s} I_r + j\omega_e \Lambda_r \\ \Lambda_s &= L_s I_s + L_m I_r \\ \Lambda_r &= L_m I_s + L_r I_r.\end{aligned}\quad (11)$$

donde V_s es el fasor de la tensión del estator, I_s es el fasor de la corriente del estator, Λ_s es la fase del flujo del estator, Λ_r es la fase del flujo de rotor, R_s es la resistencia del estator, R_r es la resistencia del rotor, L_m es la inductancia magnética, L_s es la inductancia del estator y L_r es la inductancia del rotor. Las inductancias del rotor y del estator vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}L_s &= L_{ls} + L_m \\ L_r &= L_{lr} + L_m \\ \omega_e &= 2\pi f \\ j &= \sqrt{-1} \\ s &= \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s},\end{aligned}\quad (12)$$

donde L_{ls} y L_{lr} son la inductancia de fuga del estator y del rotor respectivamente, s es el deslizamiento del motor y ω_e la velocidad de rotación del sistema de referencia.

El par generado en estado estacionario viene dado por:

$$T = 3 \frac{R_r |I_r|^2}{\omega_s - \omega_m}. \quad (13)$$

Las ecuaciones 11-13, definen el comportamiento de un motor de inducción en estado estacionario. El circuito equivalente en estado dinámico se muestra en la Figura 3:

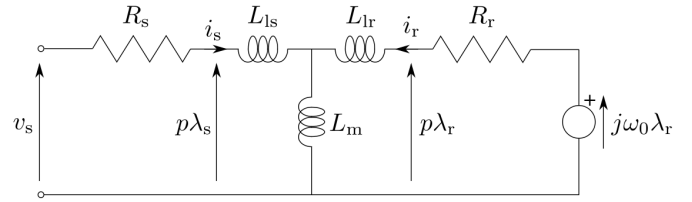


Figura 3: Circuito monofásico equivalente de un motor de inducción dinámico Trzynadlowski (1994)

En la Figura 3, la velocidad de rotación de las bobinas del estator pueden no ser constante, por lo que la velocidad síncrona ω_s desaparece. El par eléctrico resultante del modelo dinámico es:

$$T_e = \frac{3}{2} p_p \text{Re}(-j\lambda_r i_r^*). \quad (14)$$

donde * indica el la conjugada compleja. El par del eje del motor viene dado por:

$$T = T_e - J \frac{d\omega}{dt}, \quad (15)$$

donde J es la inercia del motor.

4. Implementación en Simscape

Para simular las fuerzas generadas en el proceso de fresado, se utiliza la Ecuación 9 como punto de partida. Esta ecuación no se implementa directamente en *Simscape*, sino que previamente se obtienen los valores correspondientes a condiciones de ensayo específicas, y los datos obtenidos se almacenan en archivos .mat para su posterior uso en un bloque de *Simscape*.

Para obtener los valores de las fuerzas de forma *offline*, es necesario definir el material que se va a fresar, las propiedades

de la fresa y las condiciones de ensayo. El material se define mediante los coeficientes de corte (K_x), los mismos que se han utilizado en la Ecuación 6. Las propiedades de la fresa incluyen el radio (R_0), número de hélices (N_f) y ángulo de las hélices (β). Las condiciones de ensayo se determinan por el rango de profundidad de corte (z) que se aplicará durante el ensayo. Es importante establecer de antemano el rango de profundidad [z_2-z_1] de la Ecuación 9, ya que si se define un intervalo menor al que se utilizará posteriormente en la simulación, los valores de las fuerzas resultarán en interpolaciones poco precisas.

En la Figura 4 se muestra el modelo de simulación en *Simscape* de los motores de inducción y del proceso de fresado. A la derecha de la imagen se encuentra el bloque que genera las fuerzas de corte de avance, normal y axial a partir de una profundidad de corte y una velocidad de avance. Las fuerzas se generan en tres ejes de coordenadas, los cuales tienen actuadores independiente y a los cuales les afecta cada fuerza por separado. Los actuadores son motores de inducción, cuyo modelado se ha mostrado en la Sección 3 que controlan la posición/velocidad de la fresadora en cada eje. En el caso de los ejes axiales y normales se realiza un control de posición, mientras que en el eje de avance se controla la velocidad de avance de la fresadora.

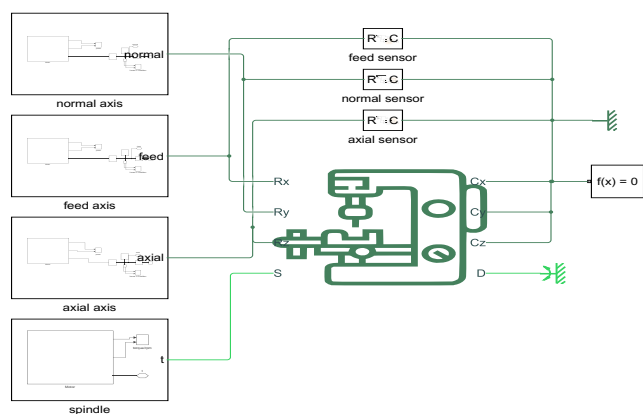


Figura 4: Modelo en *Simscape* del proceso de fresado y los motores de inducción de cada eje.

La velocidad de giro de la herramienta de corte se controla de manera independiente, y se ve afectado por el par generado durante el corte. El par T que se aplica al husillo está relacionado por la fuerza tangencial de corte F_t (ver Ecuación 6), y se calcula mediante la fórmula:

$$T = F_t * R_0. \quad (16)$$

El modelo del motor de inducción se muestra en la Figura 5, que incluye el control de par y vectorial, el inversor de corriente, el motor de inducción y sensores de par y de velocidad de rotación. Los bloques correspondientes a los sensores son propios de la librería de *Simscape*. El modelado del inversor, control vectorial y del motor de inducción se han desarrollado en Ikerlan.

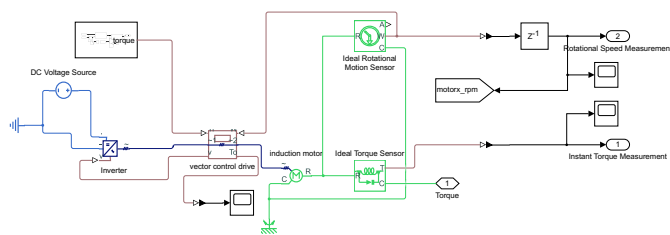


Figura 5: Modelo motor de inducción en *Simscape*

En la caracterización del motor de inducción, se emplean los parámetros proporcionados por el fabricante en los *datasheets*. En el caso de los ejes de avance, normales y axiales, se utilizan motores del tipo M2BAX 71MA 4 fabricados por ABB. Por otro lado, para el control de la velocidad de giro de la fresadora, se emplea un motor M2BAX 80MA 4, también fabricado por ABB.

Al modelar el motor de inducción, se obtiene la curva representada en la Figura 6, la cual muestra la relación entre la velocidad de giro y el par motor. En esta figura se presentan las curvas correspondientes a la operación continua, con una sobrecarga del 150 %, y el par alcanzando el límite de voltaje.

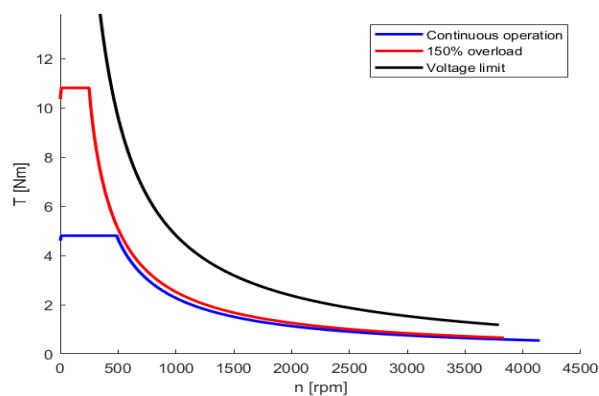


Figura 6: Curva velocidad de giro Vs par, del motor M2BAX 71MA 4.

En el modelo, los ejes de avance, normales y axiales están conectados al proceso de fresado mediante el dominio de traslación de *Simscape*. Para lograr esto, se incluye una reductora entre el motor de inducción y el proceso de fresado, que transforma el sistema de rotación en uno de traslación. Esto permite controlar la posición y velocidad de los tres ejes de forma independiente.

Las fuerzas modeladas en la Ecuación 9 afectan individualmente a cada motor de los ejes. Por lo tanto, la fuerza de avance generada en el proceso afectará al motor del eje de avance, y de igual manera en los ejes normal y axial. En el caso del eje que controla la velocidad de giro de la fresadora, no se utiliza una reductora, por lo que el dominio que conecta el proceso de fresado y el motor de inducción es el de rotación.

En la Figura 7 se muestran las fuerzas y el par generado durante el proceso de fresado. Es en el instante $x \approx 41s$ cuando la fresadora entra en contacto contra la pieza. Utilizando los coeficientes de corte adoptados para modelar las fuerzas según Kao et al. (2015-10-01), se observa que las fuerzas generadas son de pequeña magnitud en comparación con el par producido

por los motores de los ejes de avance, normal y axial. Como resultado, apenas se aprecia una perturbación en la posición de la fresa debido al contacto entre la herramienta y la pieza.

Sin embargo, el par generado en el proceso es de mayor magnitud, lo cual resulta en una perturbación significativa en la velocidad de giro de la fresadora, tal y como se puede ver en la gráfica inferior de la Figura 7.

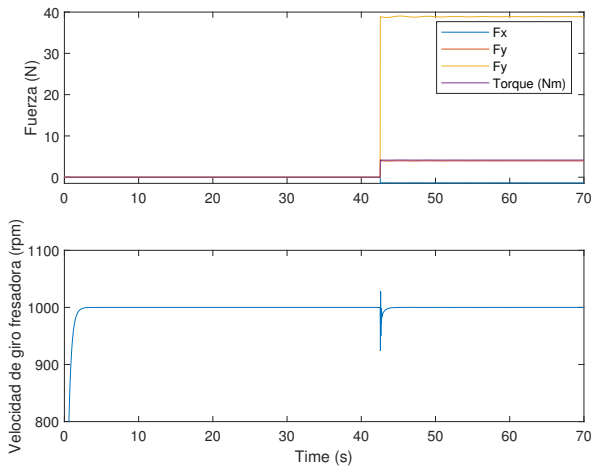


Figura 7: Simulación fuerzas (sup.) y par (inf.) de un proceso de fresado.

5. Conclusiones

Se ha realizado el modelado de un proceso de fresado que incluye los actuadores que controlan la posición y velocidad de la fresa, motores de inducción, y también se han incorporado las fuerzas y el par generados durante el fresado. El modelado se ha llevado a cabo utilizando la herramienta *Simscape*, la cual permite resolver simultáneamente las ecuaciones del sistema para determinar su respuesta a lo largo del tiempo.

Para el modelado de las fuerzas y el par generados durante el proceso se han utilizado parámetros previamente obtenidos. Los resultados de la simulación destacan cómo el motor de inducción encargado de controlar la velocidad de giro de la fresadora se ve afectado cuando se produce el contacto con la pieza.

Los resultados obtenidos no se han validado frente a resultados experimentales, por lo que las conclusiones planteadas deben ser validadas en futuros trabajos. Sin embargo, con el modelo planteado se pueden observar las dinámicas de las fuerzas y los actuadores, aunque no hayan sido validadas, y utilizarlas como base para el diseño de controladores o características de ensayo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero del Gobierno Vasco a través de MECAPRES4.0 bajo el Contrato No.Exp

KK-2022/00106 y a la ayuda Horizonte Europa de la Unión Europea bajo el acuerdo de subvención n° 101057294, proyecto AIDEAS (AI Driven industrial Equipment product life cycle boosting Agility, Sustainability and resilience).

Referencias

- Alajmi, M. S., Almeshal, A. M., 2021-04-29. Modeling of Cutting Force in the Turning of AISI 4340 Using Gaussian Process Regression Algorithm 11 (9), 4055.
DOI: 10.3390/app11094055
- Altintas, Y., Verl, A., Brecher, C., Uriarte, L., Pritschow, G., 2011. Machine tool feed drives 60 (2), 779–796.
DOI: 10.1016/j.cirp.2011.05.010
- Bartarya, G., Choudhury, S., 2012. Effect of Cutting Parameters on Cutting Force and Surface Roughness During Finish Hard Turning AISI52100 Grade Steel 1, 651–656.
DOI: 10.1016/j.procir.2012.05.016
- Chattopadhyay, S., Mitra, M., Sengupta, S., Chattopadhyay, S., Mitra, M., Sengupta, S., 2011. Clarke and park transform, 89–96.
- F Koenigsberger, 1961. Chip section and cutting force during the milling operation 10 (1), 197–203.
- Fernandez-Zelaia, P., Melkote, S. N., 2019-01. Statistical calibration and uncertainty quantification of complex machining computer models 136, 45–61.
DOI: 10.1016/j.ijmactools.2018.09.004
- Gumono, G., Mira, M., Hadi, S., Perkasa, R. E., 2021-11-25. Design and Simulation of CNC Milling Machine on Matlab 4 (3), 164–169.
DOI: 10.33648/ijoaer.v4i3.156
- Jayaram, S., Kapoor, S., DeVor, R., 2001-01. Estimation of the specific cutting pressures for mechanistic cutting force models 41 (2), 265–281.
DOI: 10.1016/S0890-6955(00)00076-6
- Ju, S., Gross, D., Hanenkamp, N., 2022-12. Cutting force and vibration prediction of milling processes regarding the nonlinear behavior of cascade controlled feed drives 16 (6), 743–752.
DOI: 10.1007/s11740-022-01140-z
- Kao, Y.-C., Nguyen, N.-T., Chen, M.-S., Huang, S.-C., 2015-10-01. A combination method of the theory and experiment in determination of cutting force coefficients in ball-end mill processes 2 (4), 233–247.
DOI: 10.1016/j.jcde.2015.06.005
- Kulkarni, M. G., Saha, S. K., 2002. MECHATRONICS APPROACH TO CNC END MILLING STUDY.
- Lin, W., Lee, B., Wu, C., 2001-01. Modeling the surface roughness and cutting force for turning 108 (3), 286–293.
DOI: 10.1016/S0924-0136(00)00835-9
- Mathworks, 2023. Simulink User's Guide.
- Merchant, M. E., 1945-05. Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip 16 (5), 267–275.
DOI: 10.1063/1.1707586
- Modelica, 2023. OpenModelica User's Guide.
- Sato, R., 2012-10-01. Mathematical Model of a CNC Rotary Table Driven by a Worm Gear: 2 (4), 27–40.
DOI: 10.4018/ijimr.2012100103
- Shao, G., Brodsky, A., Miller, R., 2018-08. Modeling and optimization of manufacturing process performance using Modelica graphical representation and process analytics formalism 29 (6), 1287–1301.
DOI: 10.1007/s10845-015-1178-6
- Trzynadlowski, A. M., 1994. Dynamic Model of the Induction Motor. In: Trzynadlowski, A. M. (Ed.), The Field Orientation Principle in Control of Induction Motors. Springer US, pp. 1–41.
DOI: 10.1007/978-1-4615-2730-5_1
- Zhu, R., Kapoor, S. G., DeVor, R. E., 2001-08-01. Mechanistic Modeling of the Ball End Milling Process for Multi-Axis Machining of Free-Form Surfaces 123 (3), 369–379.
DOI: 10.1115/1.1369357