



Temática: Matemática computacional

## Prueba de concepto de un gemelo digital para el monitoreo indirecto del desgaste herramental en procesos de corte

### *Proof of concept of a digital twin for indirect monitoring of tool wear in turning processes*

Teresa Pérez Sosa<sup>1\*</sup>, Ramón Quiza<sup>1</sup>, Marcelino Rivas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS). Universidad de Matanzas. Autopista a Varadero km 3.5 Matanzas 44740, Cuba.

\*Autor para correspondencia: [teresa.perez@umcc.cu](mailto:teresa.perez@umcc.cu)

#### Resumen

Este trabajo presenta un gemelo digital para predecir la velocidad de desgaste de la herramienta en un proceso de torneado, a partir de los parámetros de corte, la fuerza y la temperatura de corte, todos ellos tomados o medidos del sistema máquina-herramienta-pieza. A partir de la velocidad de desgaste, se puede estimar el desgaste de la herramienta, que es el núcleo del monitoreo indirecto en línea del desgaste de la herramienta y de un sistema predictivo de cambio herramienta. El gemelo digital siguió una arquitectura de seis capas, que divide las funciones de cada componente y facilita la implementación. El enfoque propuesto se implementó como prueba de concepto y se validó a través de datos experimentales para dos estudios de caso, correspondientes a diferentes condiciones de corte en el torneado de acero AISI 1045. En ambos casos, las predicciones del gemelo digital demostraron ser lo suficientemente precisas como para ser utilizadas en aplicaciones prácticas. También se destaca el desarrollo futuro de este trabajo, que aborda la implementación del gemelo digital en condiciones industriales prácticas.

**Palabras claves:** Gemelo digital, Proceso de torneado, Desgaste herramental, Monitoreo

#### Abstract

*This work presents a digital twin for predicting tool wear rate in a turning process, from cutting parameters, cutting force, and cutting temperature, all of them taken or measured from the machine-tool-part system. From the wear rate, the tool wear can be estimated, being the core of an indirect online tool wear monitoring and predictive tool change system. The digital twin followed a six-layer architecture, which splits the functions of each components and facilitates the implementation. The proposed approach was implemented as a proof of concept and validated through experimental data for two case studies, corresponding to different cutting conditions in turning AISI 1045 steel. In both cases, predictions from the digital twin showed to be accurate enough to be used in practical applications. Future developments of this work, addressing the implementation under practical industrial conditions, are also highlighted.*

**Keywords:** Digital twin, Turning process, Tool wear, Monitoring



## Introducción

El desgaste herramental juega un papel clave en los procesos de maquinado ya que no sólo provoca que el filo se deteriore, dejando inutilizable la propia herramienta (Youssef and El-Hofy, 2020), sino que puede causar defectos superficiales y dimensionales en la pieza elaborada (Sales et al., 2020) y, además, crear inestabilidades dinámicas que pueden llevar, incluso, a afectaciones en la integridad de la máquina utilizada (Prasad and Babu, 2017). Consecuentemente, el monitoreo del desgaste, con vistas a establecer una adecuada estrategia de sustitución de la herramienta, es un elemento valioso en cualquier sistema de maquinado (Mali et al., 2017).

Por otro lado, los gemelos digitales han emergido como un nuevo paradigma en la simulación de procesos (Semeraro et al., 2021). Al igual que otras tecnologías computacionales, como la internet de las cosas, la computación en la nube, la inteligencia artificial y la realidad aumentada, los gemelos digitales han recibido, en los últimos años, un interés creciente tanto en el entorno académico como en el industrial (VanDerHorn and Mahadevan, 2021).

Independientemente de diferentes definiciones que se han dado, un gemelo digital se caracteriza por tres rasgos esenciales: (1) un modelo del sistema real; (2) un conjunto de datos, en evolución, relacionados con dicho sistema; y (3) un medio para actualizar o ajustar dinámicamente el modelo de acuerdo con los datos (Wright and Davidson, 2020).

En la literatura especializada, se pueden encontrar varios trabajos enfocados al diseño e implementación de gemelos digitales, para predecir o monitorear el desgaste herramental en los procesos de maquinado (Bazaz et al., 2020; Xie et al., 2020; Qiao et al., 2019). No obstante, se nota la falta de una adecuada estructuración en las propuestas, las cuales muchas veces no se distinguen de los enfoques clásicos de modelación. En este sentido, Lee et al. (2015) desarrollaron una estructura de cinco capas, para sistemas ciberfísicos, denominada 5C. La misma, proporciona una guía paso a paso para desarrollar e implementar sistemas ciberfísicos en procesos de fabricación. Por su parte, Redelinghuys et al. (2020) han propuesto una arquitectura de seis capas que posibilita la implementación de una estructura basada en servicios y funcional a tiempo real, con integración horizontal y vertical.

En el presente trabajo, se lleva a cabo el diseño, implementación y validación, de un gemelo digital, concebido bajo la arquitectura de seis capas de Redelinghuys y colaboradores, para la predicción del desgaste de flanco de la herramienta, en el proceso de torneado. Este gemelo digital tiene el propósito de ser el núcleo de un sistema de monitoreo indirecto del desgaste que permita llevar a cabo una estrategia predictiva de recambio de la herramienta. El trabajo está dividido en cuatro secciones. Luego de esta introducción, la sección materiales y métodos explica el diseño e implementación del gemelo digital, describiendo cada una de sus capas. Seguidamente, se explica la validación analizando los resultados obtenidos. Finalmente, se ofrecen las conclusiones

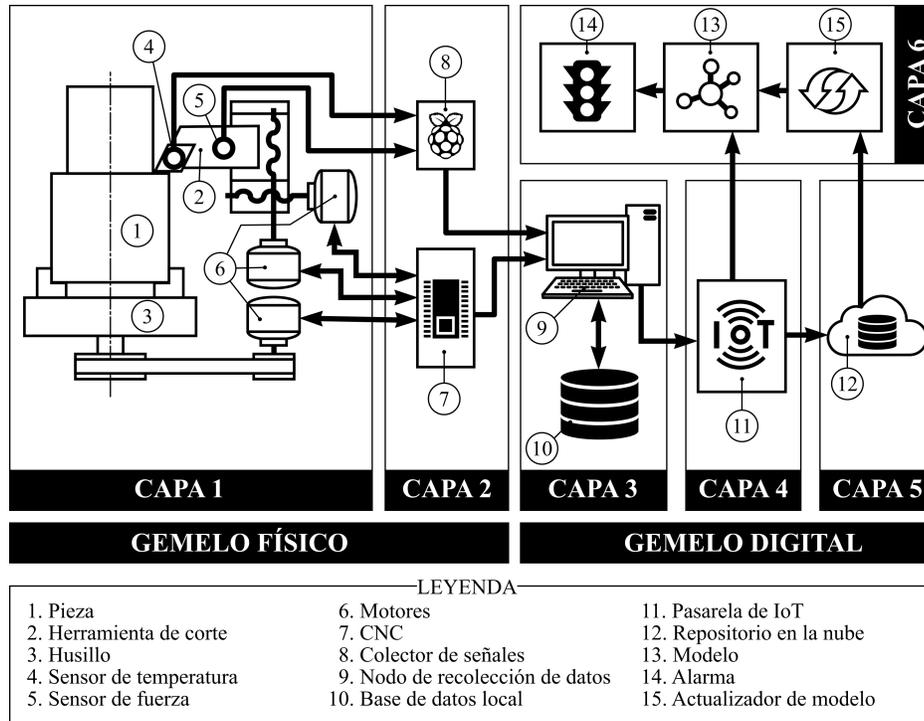


Figura 1: Arquitectura del gemelo digital implementado.

y se bosquejan las futuras vertientes de trabajo para el desarrollo de la propuesta.

## Materiales y métodos

### Descripción general

El gemelo digital propuesto se diseñó, tal como se comentó anteriormente, basado en la arquitectura de seis capas de Redelinghuys y colaboradores (ver Fig. 1). Las dos primeras capas corresponden al gemelo físico. En la primera, están los elementos del sistema físico, incluyendo sensores y actuadores. En el caso analizado, esto incluye la pieza, la herramienta y la máquina con todos sus mecanismos y dispositivos. También comprende dos sensores de fuerza (componente principal de la fuerza de corte) y temperatura, incorporados a la herramienta.

La segunda capa, por su parte, representa la fuente de datos en el gemelo físico, e incluye, en primer lugar, el sistema de control numérico computarizado (CNC) de la máquina, que permite el acceso a la información de los parámetros de corte utilizados en el proceso (i.e., velocidad de corte, avance y profundidad de corte). También, la segunda capa contiene un nodo basado en hardware de bajo costo para la captura y digitalización

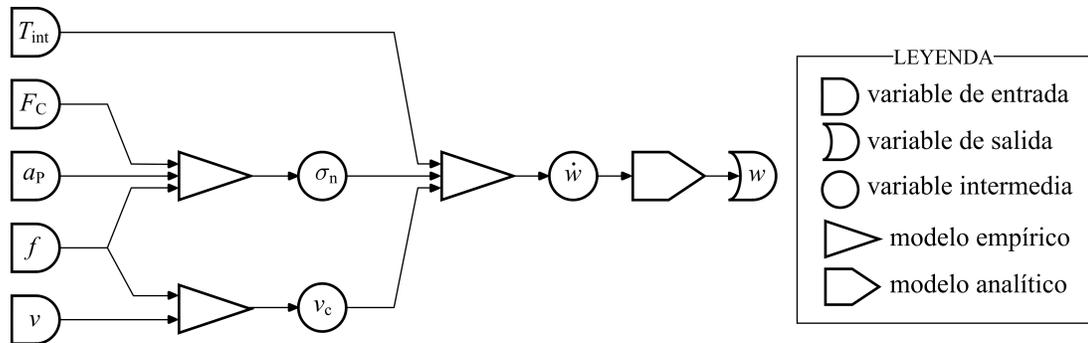


Figura 2: Representación gráfica del modelo de desgaste.

de las señales de fuerza y temperatura.

De la tercera a la sexta capa conforman el gemelo digital. La tercera comprende el repositorio local de datos, que está formado por el nodo de recolección de datos y un servidor de base de datos local. En el mismo se almacenan, además de los valores de parámetros de corte (velocidad de corte, avance y profundidad de corte) y señales medidas (fuerza de corte principal y temperatura en la zona de corte), otra información relevante del proceso (material de la pieza, herramienta y régimen de lubricación, los cuales son introducidos por el usuario, interactuando con el nodo de recolección de datos).

La cuarta capa, por su parte, constituye un nivel de conversión de datos en información. La misma utiliza el protocolo OPC/UA para comunicarse con el nodo de recolección de datos en la tercera capa, así como MySQL para hacerlo con el servidor de datos, implementado en la quinta capa.

Finalmente, la sexta capa constituye el núcleo del gemelo digital, al contener las funcionalidades de modelación, interpretación de los resultados (alarma) y actualización periódica de los modelos. Por su importancia, estos componentes son descritos, en detalle, en la siguiente subsección.

## Modelación, interpretación y actualización

La modelación, es el corazón de un gemelo digital, ya que permite determinar el estado del sistema a partir de las variables medidas. En el caso considerado, se estimó el nivel de desgaste de flanco,  $w$ , de la herramienta a partir de la velocidad de desgaste,  $\dot{w}$ , calculada a partir de los valores medidos de temperatura,  $T_{int}$ , y fuerza de corte,  $F_C$  (ver Fig. 2).



Los valores sucesivos del desgaste,  $w(t)$ , se calcula a intervalos de tiempo,  $\Delta t$ , mediante la expresión analítica:

$$w(t) = w(t - \Delta t) + \dot{w}\Delta t. \quad (1)$$

La determinación de la velocidad de desgaste, por su parte, se lleva a cabo mediante la expresión empírica de Usui (Quiza et al., 2012):

$$\dot{w} = A\sigma_n v_c \exp\left(-\frac{B}{T_{\text{int}}}\right); \quad (2)$$

donde  $\sigma_n$  es la tensión normal en la zona de contacto,  $v_c$  es la velocidad de deslizamiento de la viruta, y  $A = 1,198 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{MN}$  y  $B = 2195 \text{ K}^{-1}$  son dos coeficientes empíricos para el acero AISI 1045, con el que se realizó la validación del gemelo digital.

La tensión normal en la zona de contacto se determina por un modelo empírico de regresión, la cual se ajusta a partir de los valores obtenidos a partir de la aplicación del modelo mecanicista propuesto por La Fé Perdomo et al. (2018), para el material, la herramienta y las condiciones de corte consideradas:

$$\sigma_n = 1524 - 0,3853 \frac{F_C}{a_P f}; \quad (3)$$

siendo  $F_C$  la componente principal de la fuerza de corte y  $a_P$ , la profundidad de corte.

A su vez, la velocidad de deslizamiento de la viruta se determina, también a partir de los datos anteriores, mediante la expresión empírica:

$$v_c = -24,19 - 205,6f^2 + 138,1f + 3,778 \cdot 10^{-4}v^2 + 0,4414v + 0,2833fv; \quad (4)$$

donde  $v$  es la velocidad de corte y  $f$ , el avance.

La interpretación de los resultados, se realiza a través de dos criterios, ambos relacionados con el desgaste. El primero, es que se lanza una alerta de parada, si el valor de desgaste estimado supera el valor preestablecido como admisible:

$$w(t) > w_{\text{adm}} = 300 \mu\text{m}; \quad (5)$$

El segundo se basa en lanzar una alerta de advertencia, cuando el valor del desgaste, estimado con los valores máximos de velocidad, calculados para una confiabilidad del 90 %,  $w_{\text{sup}}$ , alcanza al valor admisible:

$$w^{\text{sup}}(t) > w_{\text{adm}} = 300 \mu\text{m}. \quad (6)$$



La implementación del modelo anteriormente descrito, se hace según el algoritmo mostrado en la Figura 3. En el mismo, se consideran dos períodos de tiempo: el período de muestreo,  $\delta t$ , y el período de actualización del desgaste,  $\Delta t$ . Para cada período  $\delta t$ , se muestrean los valores de las variables de entrada del modelo y, con las mismas se calcula el valor de la velocidad de desgaste,  $\dot{w}$ . El valor de desgaste calculado se incorpora a un conjunto de valores  $\{\dot{w}\}$ , que se inicia vacío en cada período de cálculo.

Una vez completado el número de muestreos que corresponden al período  $\Delta t$ , se procede a calcular el valor medio,  $\mu(\{\dot{w}\})$ , y la desviación estándar,  $\sigma(\{\dot{w}\})$ , del conjunto  $\{\dot{w}\}$ . A partir de ellos, se calculan el valor esperado (medio),  $\dot{w}_{\text{med}}$ , y el límite superior para una confiabilidad del 95 %,  $\dot{w}_{\text{sup}}$ :

$$\dot{w}_{\text{med}} = \mu(\{\dot{w}\}); \quad (7a)$$

$$\dot{w}_{\text{sup}} = \mu(\{\dot{w}\}) + 1,645\sigma(\{\dot{w}\}). \quad (7b)$$

Los valores de desgaste, tanto esperado,  $w_{\text{med}}$ , como superior,  $w_{\text{sup}}$ , se calculan, entonces multiplicando las respectivas velocidades por el intervalo  $\Delta t$  y sumándola a los valores previos:

$$w_{\text{med}}(t + \Delta t) = w_{\text{med}}(t) + \dot{w}_{\text{med}}\Delta t; \quad (8a)$$

$$w_{\text{sup}}(t + \Delta t) = w_{\text{sup}}(t) + \dot{w}_{\text{sup}}\Delta t. \quad (8b)$$

Una vez calculados estos valores, se evalúan si superan al desgaste admisible  $w_{\text{adm}}$  y se lanzan las alarmas correspondientes. Si estas alarmas son aceptadas por el usuario, se interrumpe el proceso.

Finalmente, la actualización del proceso se lleva a partir de los datos acumulados en el repositorio en la nube, donde se pueden incorporar, a voluntad del usuario, los datos reales de desgaste herramienta, medidos al terminar el proceso de corte. A partir de estos valores, se reajustan, los coeficientes de los modelos usados en el gemelo.

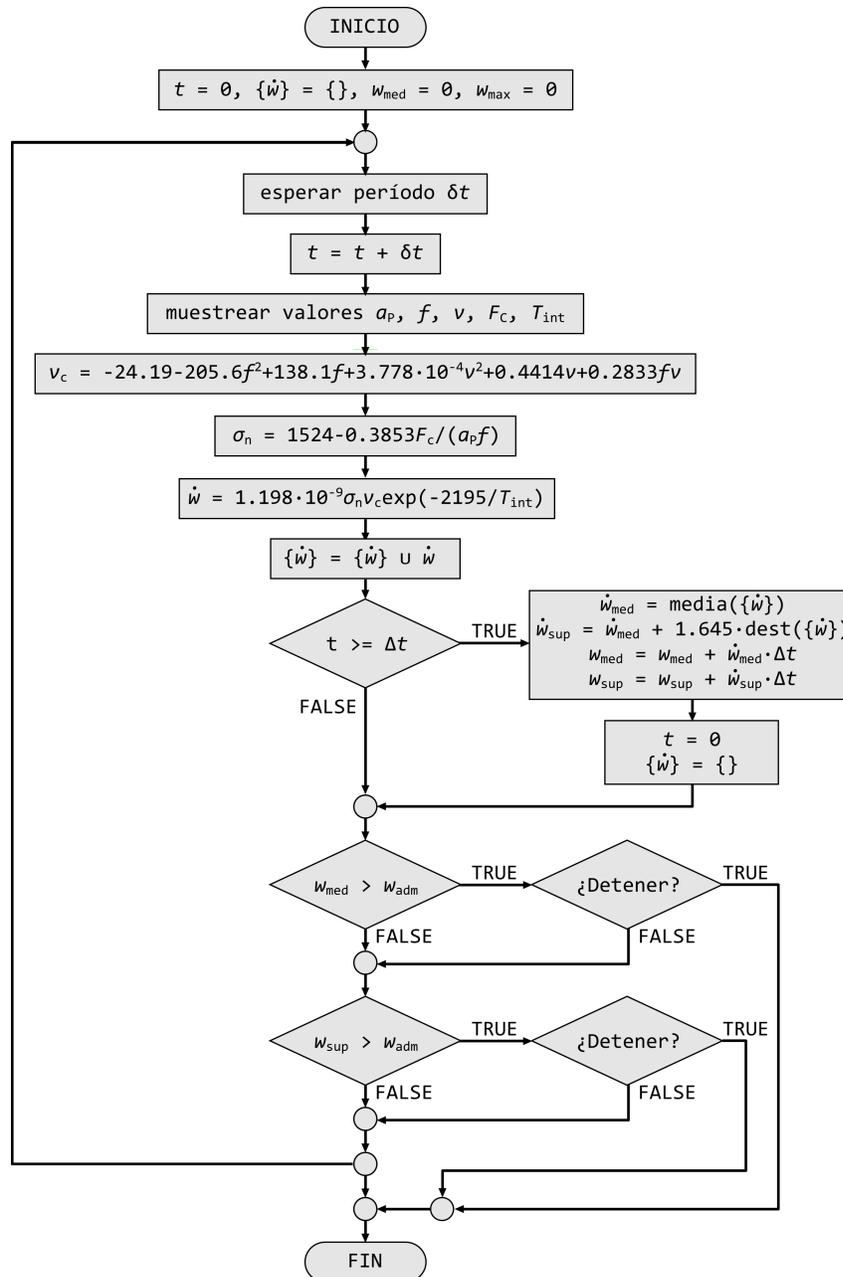


Figura 3: Algoritmo de la modelación.



## Resultados y discusión

Con el propósito de validar el gemelo digital diseñado, como una prueba de concepto, se simuló el comportamiento de un proceso de torneado de un acero AISI 1045, con una herramienta de carburo cementado ISO P25, revestido con tres capas de nitruro de titanio, óxido de aluminio y carburo de titanio, respectivamente, y con una geometría consistente en un ángulo de ataque de 5 deg, ángulo de salida de 0 deg y radio de la punta de 0,8 mm.

Dos regímenes de corte fueron considerados. El primero de ellos, correspondió a una profundidad de corte,  $a_p = 0,5$  mm; un avance,  $f = 0,15$  mm/rev; y una velocidad de corte,  $v = 200$  m/min. Como se puede observar (Fig. 4), los valores medidos de temperatura estuvieron en el intervalo de 1100 a 1200 K, mientras que la fuerza de corte, en el de 100 a 200 N. Los valores de desgaste aumentaron progresivamente, con una primera alarma, correspondiente al límite superior de confiabilidad, a los 21,5 min, y una segunda alarma, correspondiente al valor esperado del desgaste, a los 23,0 min. El valor medido del desgaste de la herramienta, al finalizar el proceso de corte, tomó un valor incluido dentro del intervalo de confiabilidad estimado.

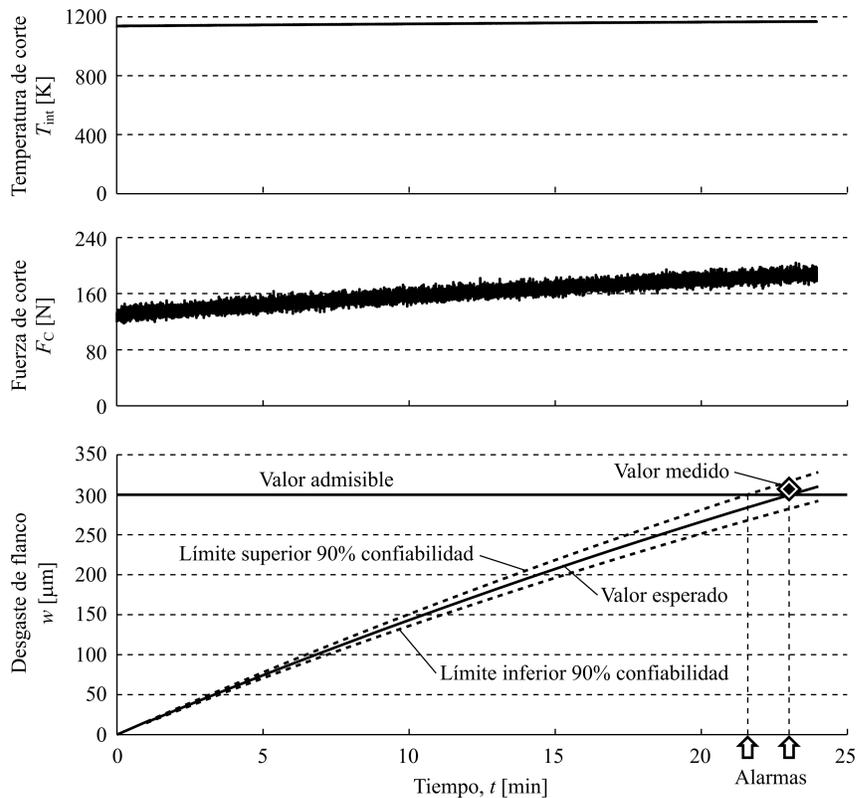


Figura 4: Simulación del primer caso.

El segundo régimen considerado, correspondió a una profundidad de corte,  $a_p = 2,0$  mm; un avance,  $f = 0,35$  mm/rev; y una velocidad de corte,  $v = 300$  m/min. En este caso, se observan valores mayores tanto para la temperatura (1350 a 1450 K) como para la fuerza (900 a 1200 N). Al igual que en el caso anterior, también se observa un crecimiento progresivo del desgaste, pero con una velocidad mucho mayor, lo que hace que las alarmas de alcancen a los 8,3 min y 8,5 min, respectivamente. También, de modo similar al primer caso, el valor medido del desgaste de la herramienta, al finalizar el proceso de corte, estuvo comprendido dentro de los límites de confiabilidad previstos.

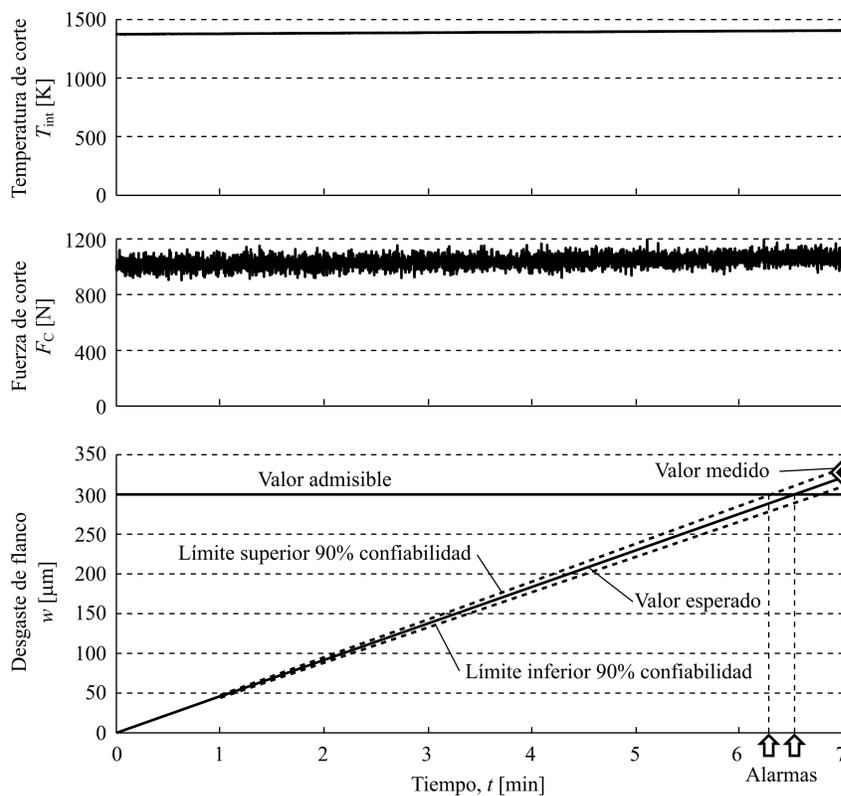


Figura 5: Simulación del primer caso.

## Conclusiones

Como resultado del trabajo, se ha diseñado e implementado, como prueba de concepto, un gemelo digital para el proceso de torneado, el cual, a partir de la captura de los valores de los parámetros de corte, del CNC de la máquina, y de la medición en línea de la temperatura y la fuerza de corte, predice la velocidad del desgaste de la herramienta de corte.



Este gemelo digital, cuya novedad reside en el uso del enfoque de las seis capas, junto a la combinación de modelos empíricos y analíticos, constituye la base de un sistema de monitoreo indirecto del desgaste herramienta y de una estrategia predictiva de cambio de la herramienta, lo cual, más allá de los aportes teóricos, posee una aplicación práctica potencial, encaminada a mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los procesos de mecanizado.

El gemelo digital diseñado fue validado a partir de resultados experimentales, con dos casos de estudio, mostrando, en ambos, un elevado nivel de coincidencia entre las predicciones y las observaciones. En ambos casos, el error relativo estuvo por debajo del 10 %.

Como desarrollo futuro del trabajo, se impone, su implementación y despliegue como caso de estudio en una instalación industrial, para validar su funcionamiento en condiciones prácticas, así como evaluar otras características como su robustez y su tolerancia al ambiente. Se impone, además, un diseño más riguroso de la seguridad en el intercambio de los datos, lo cual permitiría su despliegue como parte de redes abiertas.

## Agradecimientos

El presente trabajo constituye un resultado parcial del proyecto “Arquitectura ligera, abierta e inteligente para la introducción de funcionalidades de Industria 4.0 en entornos productivos”, asociado al Programa Nacional de Automática, Robótica e Inteligencia Artificial.

## Referencias

- Bazaz, S. M., Lohtander, M., and Varis, J. (2020). The prediction method of tool life on small lot turning process: Development of digital twin for production. *Procedia Manufacturing*, 51:288–295.
- La Fé Perdomo, I., Quiza, R., Rivas, M., and Ramtahaling, V. (2018). Hybrid modelling and optimization of the oblique cutting of AISI 1045 steel. *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering*, 8(4):1–22.
- Lee, J., Bagheri, B., and Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3:18–23.
- Mali, R., Telsang, M., and Gupta, T. (2017). Real time tool wear condition monitoring in hard turning of Inconel 718 using sensor fusion system. *Materials Today: Proceedings*, 4(8):8605–8612.
- Prasad, B. S. and Babu, M. P. (2017). Correlation between vibration amplitude and tool wear in turning: Numerical and experimental analysis. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(1):197–211.



- Qiao, Q., Wang, J., Ye, L., and Gao, R. X. (2019). Digital twin for machining tool condition prediction. *Procedia CIRP*, 81:1388–1393.
- Quiza, R., López-Armas, O., and Davim, J. P. (2012). *Hybrid modeling and optimization of manufacturing: Combining artificial intelligence and finite element method*. Springer, Berlin.
- Redelinghuys, A. J. H., Basson, A. H., and Kruger, K. (2020). A six-layer architecture for the digital twin: a manufacturing case study implementation. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(6):1383–1402.
- Sales, W. F., Schoop, J., da Silva, L. R. R., Machado, A. R., and Jawahir, I. S. (2020). A review of surface integrity in machining of hardened steels. *Journal of Manufacturing Processes*, 58:136–162.
- Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., and Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 130:103469.
- VanDerHorn, E. and Mahadevan, S. (2021). Digital twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145:113524.
- Wright, L. and Davidson, S. (2020). How to tell the difference between a model and a digital twin. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, 7(1):13.
- Xie, N., Kou, R., and Yao, Y. (2020). Tool condition prognostic model based on digital twin system. *Procedia CIRP*, 93:1502–1507.
- Youssef, H. and El-Hofy, H. (2020). *Traditional machining technology*. CRC Press, Boca Raton, FL (USA).