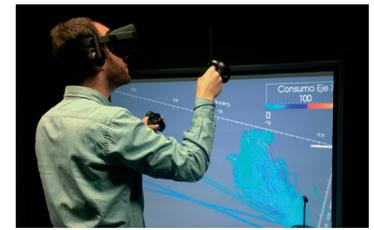


# Optimización del proceso de mecanizado de grandes piezas de fundición mediante la monitorización remota y la visualización 3D



## Machining optimization of large casting components by remote monitoring and 3D visualization techniques



David Checa<sup>1</sup>, Juanjo Zulaika<sup>2</sup>, Iñigo Lazkanotegi<sup>2</sup> y Andrés Bustillo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Burgos. Departamento de Ingeniería Civil. Avenida Cantabria, s/n - 09006 Burgos (España).

<sup>2</sup> Tecnalia. Unidad Sistemas Industriales. Paseo Mikeletegi, 7 - 20009 San Sebastián (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8816> | Recibido: 05/05/2018 • Inicio Evaluación: 02/05/2018 • Aceptado: 26/06/2018

### ABSTRACT

- The development of the different technologies included in the Industry 4.0 paradigm opens the door to an intensive monitoring of machine-tools. A data acquisition platform for both 2D and 3D analysis of machine performance under real factory conditions is presented in this study. The platform is composed of: 1) a data acquisition system that processes the information collected from the control memory and any other sensor integrated in the machine; 2) a remote server that stores the collected data; and, 3) a set of 2D and 3D interfaces both of which permit real-time calculation of KPIs and analysis of a specific machining process in a 3D virtual environment using Oculus Rift and Oculus Touch to detect anomalies in the machining process. This platform has been validated in a gantry milling machine machining large casting components. The results of this study demonstrate the detection of three types of anomalies in the machining process and the extent to which the immersive 3D environment makes it easier for the process engineer, especially in the case of junior process engineers, to detect them.
- **Key Words:** machine-tool, virtual reality, key performance indicator, machining optimization.

### RESUMEN

El desarrollo en los últimos años de distintas tecnologías englobadas en el paradigma Industria 4.0 abre la puerta a la monitorización intensiva de las máquinas herramienta. En este trabajo se presenta una plataforma de adquisición y monitorización tanto 2D como 3D del funcionamiento de máquinas herramienta que busca facilitar la toma de decisiones para la optimización de la producción. Esta plataforma está compuesta por: 1) un sistema de adquisición de datos que procesa la información recopilada por el PLC y el CNC de la máquina y por cualquier otro sensor integrado en la misma, 2) un servidor remoto que guarda los datos recogidos y 3) un conjunto de interfaces 2D y 3D que permiten tanto calcular indicadores claves de rendimiento en tiempo real como analizar un proceso concreto de mecanizado en un entorno virtual 3D mediante Oculus Rift y Oculus Touch para detectar anomalías en el proceso de mecanizado. El funcionamiento de esta plataforma se ha validado en una fresadora de pórtico que realiza el mecanizado de una pieza de fundición de grandes dimensiones. El resultado de este estudio muestra cómo se pueden detectar tres tipos de anomalías en el proceso de mecanizado y cómo el entorno inmersivo

3D facilita que el ingeniero de proceso detecte estas anomalías, en especial en el caso de ingenieros de proceso junior.

**Palabras clave:** máquina herramienta, realidad virtual, indicadores claves de rendimiento, optimización del mecanizado.

### 1. INTRODUCCIÓN

Existen diferentes enfoques que los fabricantes de máquina herramienta puede seguir para mejorar de forma conjunta productividad y ecoeficiencia en las nuevas familias de máquinas: incorporar nuevos materiales más ligeros en las máquinas [1], mejorar las metodologías de diseño [2-3] o incorporar CNC dotados de algoritmos inteligentes [4] capaces de optimizar el proceso de mecanizado. Además, desde el advenimiento de las tecnologías englobadas en el concepto Industria 4.0, a estos enfoques se les ha unido la monitorización intensiva de la máquina y sus procesos de corte y el análisis masivo de los datos extraídos de la misma, más allá de las fronteras del propio taller de mecanizado en la que se encuentra instalada la máquina, una realidad impensable hace apenas una década.

La idea de una plataforma de adquisición de datos aplicada a la industria manufacturera se presentó ya al comienzo de este siglo [5], aunque las implementaciones reales en talleres de mecanizado han sido hasta la aparición de la Industria 4.0 prácticamente nulas, debido en la mayoría de los casos a la falta de tecnologías de transmisión, almacenamiento y análisis masivo de datos y, en menor medida, a la falta de sensores específicos que capten el estado de la máquina. En los últimos años, se han presentado nuevos enfoques de plataformas colaborativas aplicadas a la industria de máquina herramienta, la mayoría de ellas enfocadas en la etapa de diseño [3] más que en la etapa de uso.

Además de estas soluciones propuestas desde el mundo académico, actualmente existe una significativa variedad de plataformas de monitorización integral de activos industriales complejos. Grandes corporaciones industriales, como por ejemplo General Electric, Bosch o ABB, han desarrollado soluciones de monitorización masiva en la nube dedicada a la industria. Dichas plataformas, aunque pueden abarcar un amplio espectro de casos de usos, presentan una importante orientación hacia sectores o procesos industriales concretos, distintos a los propios de la máquina herramienta y en especial a fresadoras, cuya carga de trabajo es extremadamente variable y heterogénea. En contraposición con estas soluciones, empresas tecnológicas, como AWS de Amazon, Azure de Microsoft o Leonardo de SAP, han desarrollado soluciones con

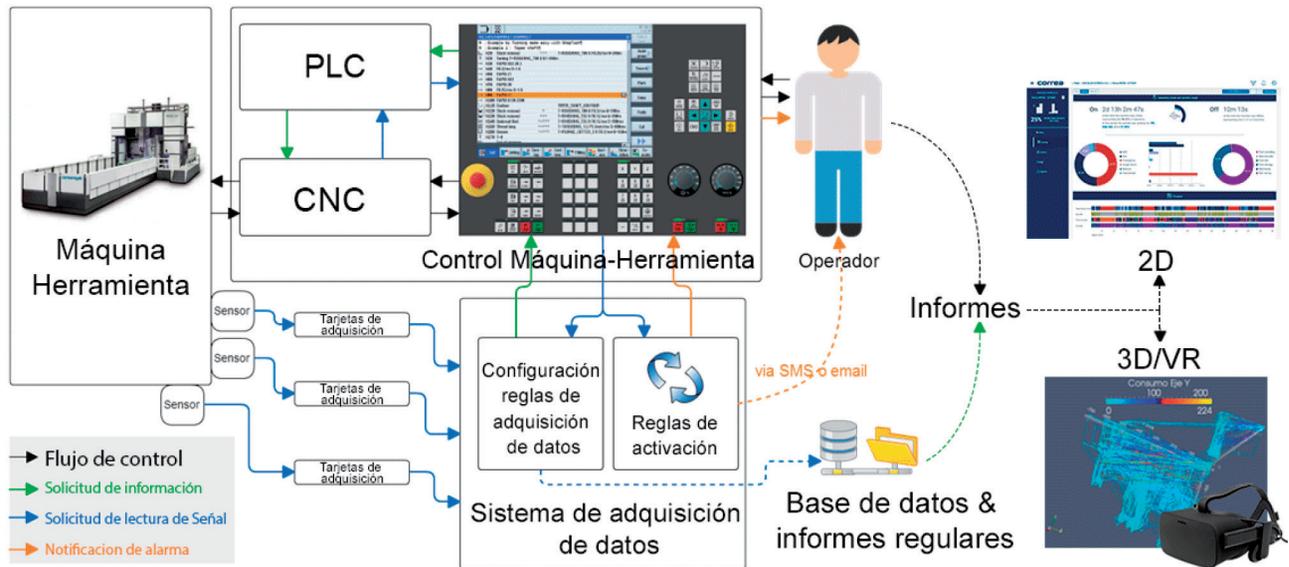


Fig. 1: Esquema de la plataforma de adquisición de datos propuesta

una orientación más transversal. Estas soluciones incluyen herramientas específicas para el mundo industrial, pero están muy lejos de ser una solución conectable a los CNCs y PLCs industriales con suficiente flexibilidad y control.

Aunque existen ejemplos de uso de Realidad Virtual en procesos de fabricación desde los años 90 [6,7] intentando alcanzar el objetivo de generar máquinas virtuales que simulen el comportamiento real de las máquinas [8], ha sido la aparición de las gafas de Realidad Virtual (conocidas habitualmente como HMDs según sus siglas en inglés *Head Mounted Displays*) comerciales tales como HTC Vive o Oculus Rift lo que ha permitido la democratización y el uso masivo de estas tecnologías. Pero la existencia de soluciones tecnológicas no es suficiente para alcanzar soluciones útiles a nivel industrial: es preciso también entender cómo puede la Realidad Virtual ayudar a mejorar los procesos de fabricación, esto es: dónde es más eficaz esta tecnología y cómo [6], considerando la experiencia de los profesionales que tienen que tomar decisiones en los talleres de fabricación y la disponibilidad de nuevos conjuntos de datos de fabricación cada vez más extensos. Este proceso de implementación industrial se ha realizado ya con éxito en el sector de máquina herramienta con otros objetivos menos ambiciosos tales como el análisis de riesgos en el uso de máquinas [9] o la exhibición de máquinas virtuales en ferias [10].

Por otro lado, la utilización de Internet para mejorar la eficiencia y la productividad en operaciones de mecanizado no es nueva: hace ya casi 20 años los primeros intentos se centraron en la monitorización del estado de la herramienta de corte [11]. En fechas más recientes, Internet ha servido para aumentar las capacidades de cómputo del CNC en distintas operaciones de mecanizado [4,12]. Además, la rápida extensión de los teléfonos inteligentes ha permitido el desarrollo de aplicaciones especialmente pensadas para sus sistemas operativos para la monitorización de máquinas herramienta [13]. Sin embargo, los CNC de arquitectura abierta que permiten estas aplicaciones no son mayoritarios en los talleres de mecanizado por lo que las implementaciones industriales se han tenido que limitar a transmitir por Internet al CNC cambios en sus parámetros en tiempo real [4,12].

El objetivo de este trabajo es el diseño y validación en un caso de uso industrial de una plataforma compuesta de un sistema de adquisición de datos conectado a una máquina herramienta, una

base de datos accesible a través de Internet y diferentes interfaces para configurar y visualizar los datos recopilados, tanto vía web en gráficas temporales como mediante un entorno virtual 3D donde analizarlos en relación con el volumen de trabajo de la máquina. Si bien existen plataformas con capacidades similares en la bibliografía, estas utilizan CNC de arquitectura abierta [4, 12], además de no plantearse la utilización de visores 3D para el análisis de los datos obtenidos. En este caso, la novedad de este trabajo reside 1) en que la plataforma propuesta es capaz de trabajar con máquinas con CNC con arquitectura no abierta con los que mantiene una comunicación completa de sus parámetros internos; 2) en la utilización de un sistema de visualización final de los resultados recogidos en 3D que mejora el análisis de los mismos por parte del ingeniero de proceso; y 3) en la validación final del sistema en una aplicación industrial de una tarea real no repetitiva, el fresado de grandes componentes de fundición.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA DE ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

La plataforma propuesta se compone de un sistema de adquisición de datos conectado a la máquina herramienta, una base de datos accesible a través de Internet y de diferentes interfaces para la configuración y utilización de esos elementos, entre ellos un entorno 3D de análisis de los datos medidos, Figura 1.

### 2.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema de adquisición de datos funciona según el mismo principio que la caja negra de un avión, comunicándose, sólo en modo lectura, con el CNC de la máquina a través del PLC de la misma, además de con cualquier otro tipo de sensor independiente al CNC instalado en la máquina (por ejemplo, sensores de vibraciones). Al acceder al CNC sólo en modo lectura este sistema no puede alterar la ejecución del programa.

El sistema de adquisición de datos puede realizar un seguimiento de hasta dos mil parámetros diferentes a una frecuencia nominal de 1 Hz. Esta tasa de adquisición es suficiente para señales térmicas, consumos eléctricos o alarmas entre otros. Para señales que necesitan una frecuencia más alta, tales como vibra-

ciones, se activa el almacenamiento de hasta diez señales en búfer a una velocidad mayor, de hasta 30 kHz, siguiendo dos opciones:

1. Las señales se recogen mediante la interfaz de control del CNC, activándose el modo osciloscopio de esta interfaz para la adquisición de estas señales.
2. Las señales se adquieren mediante un sensor externo: la tarjeta de adquisición utilizada entre el dispositivo de registro y el sensor (generalmente un acelerómetro) se utiliza para calcular un valor medio a la frecuencia programada y se almacena en un búfer para su transmisión. Este caso es especialmente adecuado si el sistema de adquisición se instala en una máquina que ya se encuentra en uso y que no esté dotada de sensores para el análisis de vibraciones, por lo que estos sensores deben instalarse de forma independiente al CNC.

Cuando el búfer se llena, los datos se transmiten al sistema de adquisición de datos. En el primer caso, el búfer es una zona de memoria del CNC mientras que, en el segundo, el búfer está ubicado en la tarjeta de adquisición. Ambas soluciones permiten configurar tanto el tamaño máximo como el tiempo de adquisición (por ejemplo, un límite de 10 s en el osciloscopio a 3 kHz).

## 2.2. LA BASE DE DATOS Y LOS SISTEMAS DE VISUALIZACIÓN

Todos los datos grabados se almacenan en una base de datos accesible de forma remota. La conexión entre la base de datos y la máquina herramienta se realiza a través de una conexión Ethernet o mediante protocolo profibus. La transmisión de datos se realiza de forma periódica en segundo plano a través de solicitudes de la base de datos. De esta forma, los informes de funcionamiento de máquina se actualizan de forma automática, con una frecuencia determinada por el usuario, mientras que los informes específicos sobre situaciones concretas o pocos habituales se pueden configurar a demanda. En línea con trabajos similares [14-15], los datos almacenados en la base de datos permiten calcular muchos indicadores clave de rendimiento y productividad de la máquina tales como: consumo energético, tiempo de inactividad corregido, porcentaje de fallo en componentes de máquina o vida útil restante para componentes actuales críticos, todos ellos de forma individual para una máquina o de forma comparada con otra u otras máquinas.

Pero los datos almacenados en la base de datos pueden ser de mucha más utilidad utilizando herramientas propias del paradigma Industria 4.0 como es la Realidad Virtual. Estos datos pueden ser extraídos y reproducidos en función de sus coordenadas espaciales en el volumen de trabajo de la máquina. En primera instancia, la representación se puede hacer mediante gráficos 3D en un visor 2D, pero la extracción de información de utilidad por parte del ingeniero de proceso es mayor en el caso de su visionado en entornos de Realidad Virtual. Como coordenadas espaciales se utiliza la posición del cabezal de la máquina herramienta en relación con el volumen de trabajo; se utiliza también un código de colores para mostrar la variable seleccionada, ya sea esta una temperatura, el consumo energético de un eje, u otra variable de interés para el análisis del proceso de corte. Este tipo de representación 3D puede ser útil para comprender, por ejemplo, las situaciones en la que un motor alcanza su máxima temperatura durante un programa de mecanizado, pudiendo modificar el programa para extender la vida útil del motor o de la herramienta de corte. En la siguiente sección se muestran diferentes ejemplos de estas gráficas 3D tanto proyectadas sobre pantallas 2D como en entornos virtuales 3D para el caso concreto de estudio seleccionado.

Para la visualización 3D en un entorno aceptable por Oculus Rift se utilizó el motor Unreal Engine 4 debido a la posibilidad de importar y manejar datos desde archivos csv. En primer lugar, los ficheros hdfs5 que se extraían del servidor eran convertidos a ficheros csv de forma automática por medio de un script preparado en python. El csv se importa en Unreal Engine, lo que permite visualizar los datos en realidad virtual, esto es escalar, mover y hacer mediciones entre ellos utilizando como interface los Oculus Touch. La Figura 2 muestra un ejemplo de usuario durante la manipulación y análisis de datos del proceso de mecanizado de la fresadora.

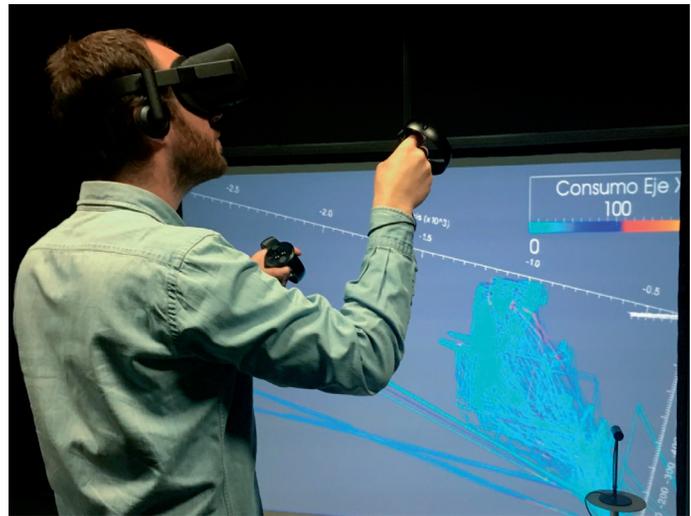


Fig. 2: Usuario visionando los datos en el sistema de realidad virtual

## 2.3. CÁLCULO DE LOS INDICADORES CLAVE DE FUNCIONAMIENTO DE MÁQUINA

A través de la interfaz de la plataforma, el usuario puede definir los indicadores claves de rendimiento, habitualmente denominados KPI por sus siglas en inglés *Key Performance Indicators*, según su caso concreto. Los KPI suelen estar relacionados con parámetros característicos, tales como temperatura, disponibilidad, consumo de energía o tiempo medio entre fallos. Un KPI especialmente interesante es el porcentaje de unidades de una máquina herramienta cuyos motores de avance y de mandrino se mantienen dentro de un rango de temperatura nominal asociado con su historial reciente o la frecuencia de eventos de temperatura fuera de ese rango. Dado que la definición exacta de interés en cada caso puede ser muy variable según la problemática de cada taller [15], la plataforma permite una configuración flexible y abierta de este KPI. En el caso anteriormente indicado y relativo al caso de estudio recogido en el Apartado 3, el KPI se configura de la siguiente manera: 1) indicando la extracción de datos de los sensores de temperatura incluidos en los accionamientos de la máquina; 2) fijando el rango de temperatura nominal, por ejemplo: 25 °C - 55 °C; 3) extrayendo el registro del historial reciente, por ejemplo 3 días; y 4) definiendo los niveles de eventos: por ejemplo cuatro niveles (nivel A o evento insignificante: entre 10 y 30 segundos fuera del rango de temperatura nominal, nivel B o evento menor: más de 30 segundos entre 55 °C y 65 °C, nivel C o evento mayor: más de 30 segundos entre 65 °C y 75 °C y nivel D o evento catastrófico: más de 10 segundos por encima de 75 °C).

Con el KPI propuesto, el operador de la máquina puede visualizar al rendimiento en tiempo real o su tendencia. Como ejemplo, la Figura 3 muestra la visualización de distintos parámetros de funcionamiento de la máquina entre ellos el KPI del tiempo de disponibilidad de máquina.



Fig. 3: Ejemplo de visualización de KPI

### 3. CASO DE ESTUDIO: MEJORA DEL PROCESO DE MECANIZADO DE UNA FRESADORA

#### 3.1. DESCRIPCIÓN DE LA FRESADORA

La plataforma descrita en la sección anterior ha sido validada sobre una fresadora Versa de la marca Correa (Figura 4). Esta máquina no está equipada con ningún sistema de medición de vibraciones, por lo que sus operaciones de mecanizado deben estudiarse a partir de variables indirectas tales como temperatura o consumo de los motores.

Esta máquina se utiliza principalmente para mecánica general en talleres que mecanizan grandes estructuras metálicas. Dado que estos talleres no reciben grandes cargas de trabajo repetitivas, estas fresadoras mecanizan un número muy limitado de unidades (menos

de 50 por año) de componentes diferentes, por lo que la optimización de sus procesos de fresado es especialmente compleja.

#### 3.2. PERSONALIZACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN

Durante este trabajo, las variables más interesantes para mejorar la productividad de la máquina se refieren a la posición del cabezal, las temperaturas y consumos de motores, las condiciones de corte, el estado del circuito hidráulico y las alarmas activadas. En total se recogieron 41 variables resumidas en la Tabla 1.

Estas variables se eligieron porque permiten la correlación de la trayectoria del cabezal de la fresadora con el comportamiento con la temperatura, el consumo de energía y las alarmas de ciertos componentes. Las señales recogidas por el sistema de adquisición de datos se transfirieron a un servidor FTP seguro donde está instalada la base de datos.



Fig. 4: Fresadora Versa y conexión del equipo de adquisición de datos a su CNC

Variable	Tipo de dato
Posición del cabezal	5 variables continuas
Temperaturas de los motores	6 variables continuas
Consumo eléctrico en los motores	6 variables continuas
Velocidad de giro de los motores	4 variables continuas
Modo de funcionamiento	1 variable discreta (6 valores posibles)
Velocidades programadas de cada eje	4 variables continuas
Velocidades reales de cada eje (valores de override del CNC)	2 variables continuas
Activación de 8 tipos de alarmas	8 variables continuas
Variables del circuito hidráulico	5 variables booleanas

Tabla 1: Datos recogidos del CNC y PLC de la fresadora

Las señales de consumo de los motores se consideran críticas en este caso por el impacto ecológico que el consumo energético tiene en este tipo de máquinas [16]. Todos los demás parámetros son necesarios para completar el análisis del consumo de energía y el rendimiento de los motores a lo largo del tiempo. La Figura 4 muestra el equipo de adquisición de datos conectado al CNC de la fresadora.

### 3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los datos extraídos de la plataforma se utilizaron para analizar el mecanizado del fundido de una bancada de fresadora de grandes dimensiones en el que esta máquina ejecuta distintos programas de mecanizado. Las variables que se tuvieron en cuenta para este análisis son el consumo de energía de los tres ejes cartesianos de la máquina (X, Y y Z) y del cabezal de la máquina, así como la temperatura de los motores y del cabezal. Estas variables no corresponden a los KPI del nivel de gestión de máquina presentados en la Figura 3, cuyo análisis permite optimizar la producción a nivel de carga de trabajo [13], pero son los más apropiados para la optimización en detalle de los procesos de mecanizado.

Para el análisis del proceso de mecanizado se eligió una representación 3D en la que la variable medida se muestra con un código de color sobre su posición espacial. Esta representación conecta la información relacionada con el consumo de energía (bien como consumo de motor o como temperatura del mismo) con la posición 3D donde ocurre. Con esta representación, el técnico puede detectar cualquier anomalía si está familiarizado con el programa de mecanizado. Se utilizaron dos estrategias alternativas para realizar la visualización: la utilización de un programa de proyección en perspectiva sobre pantalla 2D que permite realizar zooms y giros de vista de forma intuitiva y un sistema de visualización e interacción 3D basado en Oculus Rift y Oculus Touch. Las Figuras 5-7 muestran un ejemplo de este tipo de representación para las variables medidas. La Figura 5 se refiere al mecanizado de la superficie inferior de la bancada, mientras que las Figuras 6 y 7, se refieren a distintas operaciones de mecanizado de las caras laterales en distintas zonas de la bancada.

A partir de estas imágenes 3D se detectaron las siguientes anomalías:

- 1) Anomalía A: aumento en la temperatura del cabezal de más de 10°C durante el mecanizado de la bancada relacionado con un aumento del consumo de energía de este eje. Este calentamiento ocurre progresivamente durante las primeras operaciones de fresado frontal, aunque es especialmente significativo durante el mecanizado de

una esquina de la bancada (de -4,0 a -4,2 m en el eje X, donde la trayectoria de mecanizado pasa de azul oscuro a rojo lo que equivale a un aumento de alrededor de 5 °C y de forma proporcional en el consumo de energía en la Figura 5, zona señalada con un círculo). Después de este calentamiento rápido que dura menos de 3 minutos la temperatura se mantiene estable durante más de 6 horas (el tiempo total de mecanizado es aproximadamente 8 horas).

- 2) Anomalía B: aparición de picos de consumo durante el fresado de los laterales de hasta un 60% de la potencia máxima (Figura 6, zonas ampliadas). En la mayoría de los casos (puntos rojo-amarillo aislados), este comportamiento puede explicarse por irregularidades geométricas en la fundición de la bancada. Un error de medio milímetro en el modelo que sirve de base para la fundición de esta pieza aumentará considerablemente la profundidad de corte de la operación de desbaste y, por lo tanto, su consumo de energía. Sin embargo, el alto consumo que presenta una de las esquinas en  $X = -4,2$ ,  $Z = -400$  en la mayoría de las líneas de desbaste no se explica simplemente por un error en la estructura de fundición, sino que se debe a un error en las condiciones programadas de corte. Cabe señalar que esta posición es donde la temperatura del motor aumenta drásticamente en casi 5 °C.
- 3) Anomalía C: picos en el consumo de potencia del motor X e Y de hasta el 200% del consumo máximo de potencia de estos motores (Figura 7, zona ampliada) en el mecanizado de las superficies laterales de la bancada. Hay dos posibles razones para este comportamiento: 1) estas trayectorias están mal programadas o 2) hay un error sistemático en la longitud de la bancada que es ligeramente más larga de lo esperado. La primera de estas dos causas es la más verosímil, dado que el consumo de energía excesivo no aparece en todas las trayectorias correspondientes a las superficies laterales sino sólo en algunas de ellas.

Este análisis permitió realizar dos modificaciones en este proceso de mecanizado: primero reprogramar las trayectorias con mayor consumo de energía, reduciéndose un 30% la profundidad axial de corte en las mismas; posteriormente, en relación con los picos de consumo, se activó el control adaptativo del CNC para alargar la vida media de la herramienta para evitar los altos picos de consumo fruto de las irregularidades en el fundido.

Para evaluar las diferencias entre los resultados que se pueden obtener entre utilizar dispositivos clásicos de visualización 2D o los nuevos dispositivos 3D inmersivos, este análisis de anomalías fue realizado por 8 ingenieros de proceso distintos, cuatro de ellos con una larga experiencia en la preparación de programas de mecanizado (superior a 5 años) y los otros cuatro con una experiencia más breve (inferior a 3 años). Cada uno de estos dos grupos se dividió a su vez en otros dos grupos, realizando el análisis el primer grupo en pantalla 2D y el segundo en un entorno 3D mediante Oculus Rift. La Tabla 2 recoge las diferencias entre estos cuatro

Tipo ingeniero	Anomalía A	Anomalía B	Anomalía C	Tiempo (min)
Senior-2D	100%	100%	100%	6
Senior-RV	100%	100%	100%	12
Junior-2D	50%	100%	0%	10
Junior-RV	100%	100%	100%	19

Tabla 2. Tasa de detección de anomalías y tiempo empleado en el análisis de los datos

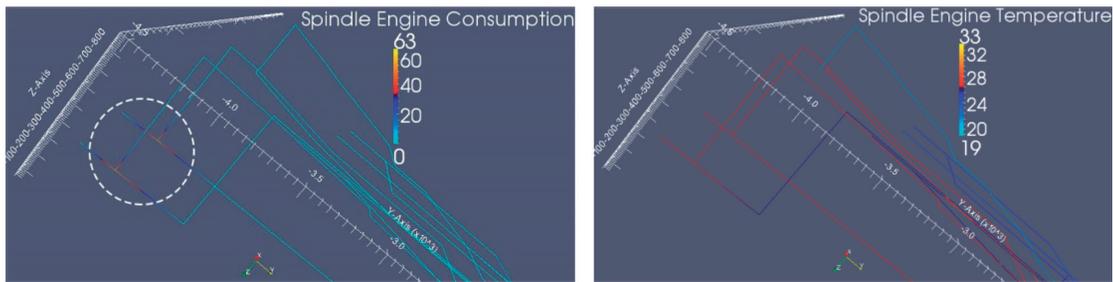


Figura 5: Representación 3D del consumo y temperatura del cabezal

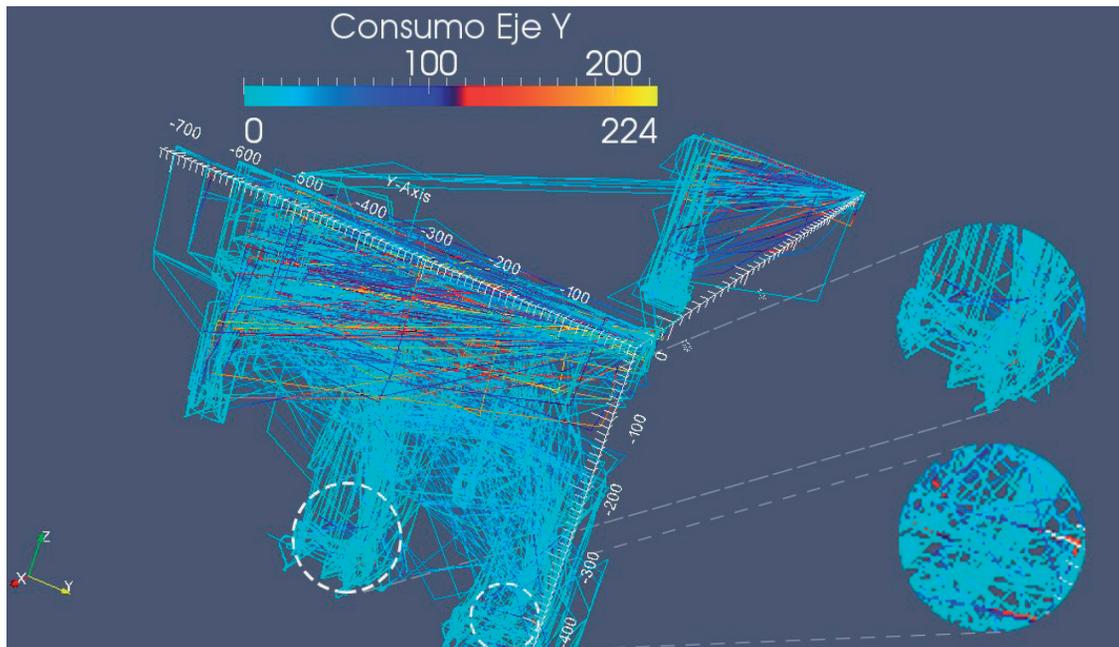


Figura 6: Representación 3D del consumo del motor del eje Y

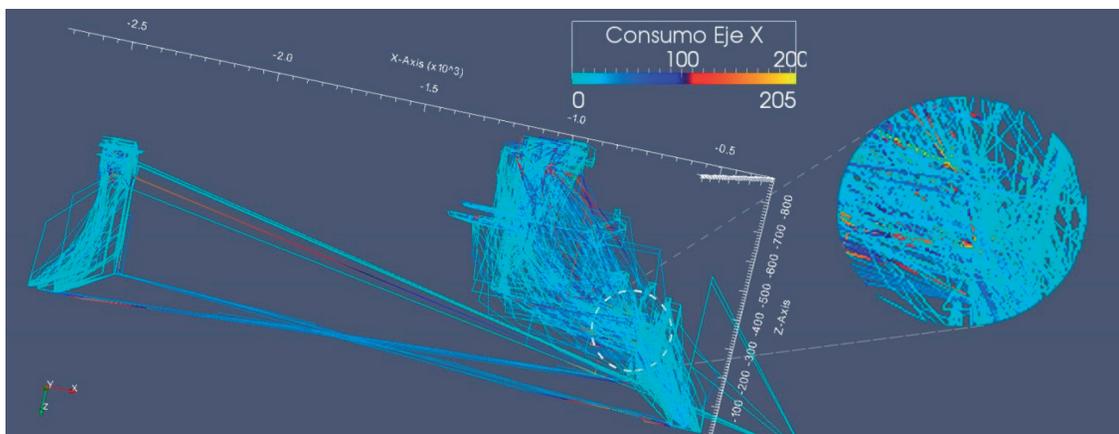


Figura 7: Representación 3D del consumo del motor del eje X

grupos, tanto en porcentaje de detección de las anomalías (no hubo discrepancias en las anomalías detectadas en cada grupo) como en tiempo promedio de realización del análisis.

De la Tabla 2 se pueden extraer distintas conclusiones, aunque debido a la pequeña muestra estas no tengan valor estadístico. En el caso de los ingenieros senior estos no tienen problemas para detectar las anomalías utilizando cualquiera de las dos técnicas de visualización, lo cual es esperable dado que conocen los programas de mecanizado y los problemas más habituales de mecanizar fundidos. Resulta más interesante el caso de los ingenieros junior; estos sí que presentan mayores tasas de identificación de

las anomalías usando el visor 3D de Realidad Virtual, en especial en aquellas anomalías (A y C) que ocurren en puntos muy concretos, lo que puede estar relacionado con que los ingenieros junior no disponen de la experiencia suficiente para saber dónde deben buscar esas anomalías en el volumen total de mecanizado. Hay que señalar que en este caso no sólo se identificaba mejor la existencia de una anomalía en una determinada zona, sino que el ingeniero junior era capaz de establecer mejor cómo tenía lugar la anomalía y proponía correcciones para la misma con más acierto. Este resultado puede derivarse de que las Oculus Touch permiten acercarse a cualquier posición espacial y visualizar su entorno,

comprendiendo así mejor qué es lo que está ocurriendo en esa zona al evadir al usuario de las densas nubes de puntos que cruzan el espacio en un mecanizado complejo como el seleccionado en este trabajo. Respecto al tiempo empleado en la visualización de los datos, los dos grupos de ingenieros pasaron más tiempo en el sistema de Realidad Virtual. Este hecho puede deberse a dos causas recogidas en la bibliografía: la curiosidad que despiertan estos nuevos equipos 3D [17] o a la libertad que proporcionan para moverse entre las nubes de puntos de una forma más intuitiva e inmersiva que las pantallas 2D [9, 18].

#### 4. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Este trabajo presenta una plataforma de adquisición y análisis de datos para máquinas herramienta que combina gran parte de las tecnologías recogidas dentro del paradigma Industria 4.0. Esta plataforma está compuesta por 1) un sistema de adquisición de datos conectado por un lado al CNC de la máquina y por otro a cualquier otro sensor integrado en la máquina pero ajeno al CNC, 2) una base de datos accesible a través de Internet donde se recopila toda la información del sistema de adquisición y 3) diferentes interfaces de fácil uso para configurar estos elementos y visualizar los datos tanto en 2D como en 3D mediante Oculus Rift.

La validación de esta plataforma se ha realizado sobre una fresadora dedicada al mecanizado de grandes piezas de fundido; el objetivo buscado ha sido la optimización del mecanizado evitando la aparición de condiciones demasiado exigentes de corte durante el desbaste, o lo que es lo mismo, consumos del motor de mandrino superiores al 40% de su potencia nominal y de picos del consumo de los motores de avance superiores al 120% de su potencia nominal. El análisis de los datos recogidos fue realizado por distintos ingenieros de proceso, tanto senior como junior, utilizando distintos visores 2D y 3D para analizar las diferencias de rendimiento de estas tecnologías en la identificación de estos problemas de mecanizado. Entre las anomalías que este sistema permitió detectar se encontraban: trayectorias de mecanizado erróneamente programadas, áreas de mecanizado críticas para el desgaste de la fresa e irregularidades geométricas en el fundido a mecanizar.

El trabajo en un entorno 3D demostró tener ciertas ventajas frente a los visores 2D: ayuda a que el ingeniero se fije más en los datos y los pueda analizar con más libertad espacial, aumentando la identificación de anomalías frente a los visores 2D, especialmente en el caso de ingenieros junior. En ambos casos, senior y junior, la Realidad Virtual aumenta el tiempo que pasan los ingenieros visualizando el proceso de mecanizado, lo que podría contribuir a aumentar el número de anomalías detectadas.

Los próximos trabajos se centrarán en la definición de KPI orientados al largo plazo que permitan mejoras de diseño en las máquinas. Se plantea igualmente que las nuevas versiones de la plataforma permitan actuar con los override del CNC o activar alarmas del PLC que permitan tanto la variación de los avances de la máquina durante la ejecución de un programa de mecanizado como la parada del programa si se detecta un fallo catastrófico. Para observar las posibilidades de la Realidad Virtual en el análisis espacial de grandes conjuntos de datos sería de gran interés disponer de medidas sobre piezas con mayor complejidad de mecanizado, o que presenten un abanico más amplio de anomalías a identificar, así como investigar las curvas de aprendizaje en la detección de anomalías con ingenieros junior utilizando visores 2D y 3D.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bustillo, A., Plaza, L. M., & Rodríguez, M. (2011). Nueva estrategia para el diseño y fabricación de cabezales de fresadora de altas prestaciones. *New Strategy for the Optimal Design and Manufacture of High Performance Milling Heads*, 47(6), 462–476. Retrieved from <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/1211/1222>
- [2] Zulaika, J. J., Campa, F. J., & Lopez De Lacalle, L. N. (2011). An integrated processmachine approach for designing productive and lightweight milling machines. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(7–8), 591–604. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2011.04.003>
- [3] Prösser, M., Moore, P., Chen, X., Wong, C.-B., & Schmidt, U. (2013). A new approach towards systems integration within the mechatronic engineering design process of manufacturing systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26(8), 806–815. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2013.785026>
- [4] Gajate, A., Bustillo, A., & Haber, R. E. (2012). Transductive neurofuzzy-based torque control of a milling process: Results of a case study. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 8(5 B).
- [5] Lee, J. (2003). E-manufacturing - Fundamental, tools, and transformation. In *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (Vol. 19, pp. 501–507). [https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(03\)00060-7](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(03)00060-7)
- [6] Choi, S., Jung, K., & Noh, S. D. (2015). Virtual reality applications in manufacturing industries: Past research, present findings, and future directions. *Concurrent Engineering*, 23(1), 40–63. <https://doi.org/10.1177/1063293X14568814>
- [7] Weidlich, D., Scherer, S., & Wabner, M. (2008). Analyses using VR/AR visualization. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 28(5), 84–86. <https://doi.org/10.1109/MCG.2008.89>
- [8] Neugebauer, R., Klimant, P., & Witt, M. (2012). Realistic machine simulation with virtual reality. In *Procedia CIRP* (Vol. 3, pp. 103–108). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.019>
- [9] Puschmann, P., Horlitz, T., Wittstock, V., & Schütz, A. (2016). Risk Analysis (Assessment) Using Virtual Reality Technology - Effects of Subjective Experience: An Experimental Study. *Procedia CIRP*, 50, 490–495. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.115>
- [10] Kao, Y.-C., Lee, C.-S., Liu, Z.-R., & Lin, Y.-F. (2017). Case study of virtual reality in CNC machine tool exhibition. In T. G.-Y. Tzou, G.-Y. (Ed.), *MATEC Web of Conferences* (Vol. 123). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712300004>
- [11] Ebrahimi, M., & Victory, J. L. (2000). Web-based machine tool condition monitoring. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* (Vol. 4208). <https://doi.org/10.1117/12.411776>
- [12] Wang, L., Orban, P., Cunningham, A., & Lang, S. (2004). Remote real-time CNC machining for web-based manufacturing. In *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (Vol. 20, pp. 563–571). <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2004.07.007>
- [13] Truong, N.-V., & Vu, D.-L. (2012). Remote monitoring and control of industrial process via wireless network and Android platform. *2012 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, (1), 340–343. <https://doi.org/10.1109/ICCAIS.2012.6466614>
- [14] Pelliccia, L., Klimant, P., Schumann, M., Pürzel, F., Wittstock, V., & Putz, M. (2016). Energy Visualization Techniques for Machine Tools in Virtual Reality. In *Procedia CIRP* (Vol. 41, pp. 329–333). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.10.013>
- [15] Palasciano, C., Bustillo, A., Fantini, P., & Taisch, M. (2016). A new approach for machine's management: from machine's signal acquisition to energy indexes. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1503–1515. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.030>
- [16] Dietmair A., Zulaika J., Sulitka M., Bustillo A., Verl A., 2010, "Lifecycle Impact Reduction and Energy Savings through Light Weight Eco-Design of Machine Tools", *Proceedings of the 17th CIRP International Conference On Life Cycle Engineering (LCE)*, 105–110.
- [17] Sousa Santos, B., Dias, P., Pimentel, A., Baggerman, J. W., Ferreira, C., Silva, S., & Madeira, J. (2009). Head-mounted display versus desktop for 3D navigation in virtual reality: A user study. *Multimedia Tools and Applications*, 41(1), 161–181. <https://doi.org/10.1007/s11042-008-0223-2>
- [18] Urbikain, G., & López De Lacalle, L. N. (2016). Training and learning of specialized engineers by means of a new advanced software. *Computer Applications in Engineering Education*, 24(2), 241–254. <https://doi.org/10.1002/cae.21702>

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Comisión Europea dentro del proyecto "NMP-246020-2- DEMAT- Dematerialised Manufacturing Systems: A new way to design, build, use and sell European Machine Tools". Los autores quieren agradecer la ayuda desinteresada del Ingeniero D. Desiderio Sutil de la empresa Nicolas Correa S.A.