

## Desarrollo de una célula de lijado robotizado inteligente para entornos de manufactura avanzada

Eduardo Diez-Cifuentes<sup>1</sup>, Fabián Iglesias-Quilodrán<sup>1</sup>, Ricardo Alzugaray-Franz<sup>1</sup>, Erardo Leal-Muñoz<sup>1</sup>, Pablo Sanhueza-Carvajal<sup>1</sup>, Ruben Castro-Sabaria<sup>1</sup>, Antonio Vizán-Idoipe<sup>2</sup>, Jorge González-Salazar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de La Frontera, Chile. Email: [eduardo.diez@ufrontera.cl](mailto:eduardo.diez@ufrontera.cl).

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de La Frontera, Chile. Email: [fabian.iglesias@ufrontera.cl](mailto:fabian.iglesias@ufrontera.cl).

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de La Frontera, Chile. Email: [ricardo.alzugaray@ufrontera.cl](mailto:ricardo.alzugaray@ufrontera.cl).

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de La Frontera, Chile. Email: [erardo.leal@ufrontera.cl](mailto:erardo.leal@ufrontera.cl).

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de La Frontera, Chile. Email: [pablo.sanhueza@ufrontera.cl](mailto:pablo.sanhueza@ufrontera.cl).

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de La Frontera, Chile. Email: [ruben.castro@ufrontera.cl](mailto:ruben.castro@ufrontera.cl).

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de La Frontera, Chile. Email: [jorge.gonzalez@ufrontera.cl](mailto:jorge.gonzalez@ufrontera.cl).

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica de Madrid, España. Email: [antonio.vizan@upm.es](mailto:antonio.vizan@upm.es)

### Resumen

Este trabajo presenta avances en el desarrollo de una célula de fabricación robotizada inteligente, que permite a un robot industrial realizar operaciones de lijado de manera autónoma a través de la evaluación en línea de variables del proceso correlacionadas con la evolución del acabado superficial de la pieza en proceso. La célula, que tiene una configuración modular, utiliza tecnologías de manufactura avanzada basadas en robótica colaborativa, sensores y visión artificial para desplegar las funciones de monitoreo en línea del proceso e inspección de producto en línea. Además, se desarrollan herramientas basadas en escáner 3D y manufactura aditiva para flexibilizar el diseño de la célula en aplicaciones con alta variedad de producto. Los resultados presentados servirán de base para las próximas etapas de la investigación centradas en la integración de los distintos módulos que componen la célula, y su validación de un entorno industrial.

**Palabras clave:** célula robotizada, proceso de lijado, procesos inteligentes, manufactura avanzada.

### Abstract

This work presents advances in the development of an intelligent robotic manufacturing cell, enabling an industrial robot to autonomously perform sanding operations through the online evaluation of process variables correlated with the evolution of the surface finish of the part being processed. The cell, which has a modular configuration, uses advanced manufacturing technologies such as collaborative robotics, sensors and machine vision to deploy in-line process monitoring and product inspection functions. In addition, it includes the development of cell design support tools based on 3D scanners and 3D printing, which will help address applications with high product variety. The results presented will serve as a basis for the following stages of research focused on integrating the different modules that make up the cell and its validation in an industrial environment.

**Keywords:** robotized cell, sanding process, intelligent processes, advanced manufacturing.

### 1. Introducción

En 2018, el informe “Análisis de la industria. Manufactura. Chile” [1] resaltó la importancia del sector manufacturero en la economía chilena, y la necesidad de impulsar la productividad del sector. Ese mismo año, el informe “Hoja de Ruta para Programa Estratégico de Manufactura Avanzada” [2] declaró entre las principales brechas que enfrenta el sector manufactura, el escaso conocimiento y acceso de las empresas a las nuevas tecnologías de fabricación (manufactura avanzada) y la escasa inversión en I+D+i relacionada con dichas tecnologías y su adopción en la

industria. El sector manufacturero de Chile, al igual que ocurre en el resto de Latinoamérica, presenta desde hace años una pérdida de competitividad producto de los altos costos operacionales (energía y mano de obra), sumado a las fluctuaciones del tipo de cambio [3].

Las tecnologías asociadas con la manufactura avanzada se presentan como una oportunidad para mejorar este escenario. La robótica industrial es una tecnología de automatización que lleva varias décadas de desarrollo y es actualmente uno de los pilares de la cuarta revolución industrial [4]. Sin embargo, a pesar

de su alto grado de madurez, la automatización inteligente de procesos con robot requiere aún de investigación y desarrollo que se asocia con un alto nivel de riesgo tecnológico. Según Verl et al. [5], las tendencias actuales del uso de robots en manufactura apuntan, entre otras, a la reconfigurabilidad de sistemas de fabricación, a la facilidad de programación y a la colaboración humano-robot, clave para la emergente Industria 5.0 [6].

En este trabajo se aborda el desarrollo de una célula robotizada inteligente para operaciones de lijado y pulido con aplicación al sector de manufactura de productos de madera de alto valor agregado. La célula, que incorpora tecnologías de robótica colaborativa, visión artificial, sensores, manufactura aditiva, y escáneres 3D, corresponde a un sistema de fabricación que despliega las funciones de lijado, monitoreo del desgaste del abrasivo, manipulación e inspección de piezas de forma inteligente, permitiendo la realización de procesos de lijado y pulido de forma autónoma, mejorando la calidad de producto y optimizando el uso del abrasivo para una operación sustentable.

## 2. Metodología

El desarrollo de la célula se abordó mediante el diseño y la implementación de cuatro módulos que recogen las funcionalidades que requiere la célula. Tres de los módulos están orientados a dar funcionalidad a la célula en la línea productiva: Alimentación de piezas, lijado robotizado inteligente con monitoreo del estado de la lija e inspección de piezas con visión artificial. Un cuarto módulo, llamado de preparación está orientado a apoyar al integrador y sirve como herramienta para acelerar el proceso de diseño de la célula. Cada módulo se desarrolló por un equipo de trabajo de manera independiente, poniendo énfasis en los desarrollos que conllevaban alta incertidumbre investigativa.

### 2.1. Antecedentes y resultados previos

La célula de lijado robotizado inteligente tiene su origen en una investigación aplicada dedicada al desarrollo de una herramienta terminal para operaciones de lijado robotizado [7], un efector final mecatrónico para robots industriales que permite al robot llevar a cabo operaciones de acabado tales como el lijado y el pulido de forma autónoma a través de la medición y procesamiento de señales propias del proceso. Esta investigación permitió determinar una estrecha relación entre los parámetros de la operación de lijado y las variables del proceso fuerza normal, par de lijado y emisión acústica [8], que sirve de fundamento para la operación del módulo de lijado robotizado inteligente, pieza clave en el funcionamiento de la célula.

Otro antecedente al desarrollo de la célula, son los avances en inspección automatizada desarrollados en el contexto de RuGo®, un proyecto de valorización de la investigación en la universidad [9] que permitió desarrollar un método de estimación de rugosidad a partir de imágenes de la superficie de piezas de madera [10], y que constituye la base para el desarrollo del módulo de inspección de piezas con visión artificial.

### 2.2. Diseño conceptual de la célula y sus módulos

El diseño conceptual de la célula se basa en la idea de concebir un sistema automatizado capaz de realizar operaciones de acabado de piezas complejas de distintos tipos de madera, con un nivel de desempeño similar al de un ser humano en términos de autonomía y calidad. La complejidad del producto podría estar definida por atributos relacionados con su tamaño, masa, geometría y materialidad. Sin embargo, desde el punto de vista del proceso de lijado, el tamaño y la masa solo determinarán el tamaño y capacidad del robot por lo cual no representan una verdadera dificultad. Por su parte, la geometría y la materialidad si representan un desafío debido a las variaciones que inducen en la respuesta de las variables que se utilizan para dotar al robot de autonomía para desarrollar el proceso.



Figura 1: operación de lijado manual en laboratorio.  
Fuente: elaboración propia.

En una operación de lijado manual el operario manipula la herramienta lijadora contra la pieza intentando mantener una fuerza de lijado constante. Las variaciones en la fuerza aplicada dan lugar a que la presión de lijado no sea uniforme y se puedan producir marcas en la pieza.

Como parte de la metodología de desarrollo del proyecto, se realizaron ensayos de lijado manual en

laboratorio, en que un operario calificado lijó una pieza montada sobre una plataforma dinamométrica (ver Figura 1), con el objetivo de medir la fuerza normal de la operación, analizar su efecto en la rugosidad final de la pieza y conocer aspectos prácticos sobre el desarrollo de la operación.

Tabla 1. Operaciones necesarias para el lijado de una pieza compleja y necesidad de I+D para automatizar la operación con las tecnologías disponibles.

Operación	Tecnologías disponibles	Necesidad de I+D para automatizar
<b>Alimentación y manipulación:</b> de la pieza, carga y descarga.	Robótica Neumática Vacio Sensores y actuadores	Nula
<b>Lijado:</b> Seguimiento de trayectorias curvas	Robótica Sensores Procesamiento de señales	Media o elevada
<b>Lijado:</b> Decisión del instante de término de la operación	Sensores Procesamiento de señales	Elevada
<b>Lijado:</b> Monitoreo del estado del abrasivo	Sensores Procesamiento de señales	Elevada
<b>Inspección:</b> de defectos, decisión de reprocesar	Robótica Visión artificial Sensores	Media
<b>Inspección:</b> de rugosidad, decisión de reprocesar	Robótica Visión artificial Sensores	Elevada
<b>Preparación:</b> Generación de trayectoria	Robótica Visión artificial CAD CAM	Nula o elevada
<b>Preparación:</b> Diseño de utillajes	Visión Escáner 3D Impresión 3D	Nula o elevada

Las operaciones que debe realizar una persona que lija una pieza de madera compleja se listan en la Tabla 1, indicando además una valoración acerca de la necesidad de realizar actividades de I+D para automatizar dicha operación con las tecnologías disponibles actualmente. Las tareas de manipulación de pieza tales como carga y descarga de la pieza, necesarias en cualquier sistema automatizado, no conllevan incertidumbre investigativa, por lo cual no requieren de I+D para su desarrollo. Por otro lado, las tareas que forman parte de la operación de lijado, seguimiento de trayectorias curvas, decisión del instante de término de la operación o monitoreo del estado del abrasivo, que un operario realiza de forma natural, tienen un alto grado de incertidumbre asociada

a su automatización por lo que requieren de la realización de actividades de I+D para su desarrollo. Lo mismo ocurre con las tareas asociadas a la operación de inspección y con las tareas asociadas al diseño y preparación de la célula.

En la célula de lijado y pulido inteligente, la capacidad del robot para realizar la operación de manera autónoma se consigue otorgando al robot inteligencia del proceso que se está desarrollando. Para ello, las operaciones que debe desarrollar la célula se clasifican en los siguientes módulos:

- Alimentación y manipulación
- Lijado inteligente
- Inspección inteligente
- Diseño y preparación

Los primeros tres módulos, forman parte de la célula en la línea productiva, sin embargo, el módulo de diseño y preparación está orientado al integrador que realizará el diseño, la implementación y la puesta en marcha de la célula en el proceso productivo. La Figura 2 recoge los ámbitos de acción de la célula inteligente para operaciones de lijado y pulido. A continuación, se da a conocer los principales aspectos metodológicos involucrados en el desarrollo de los módulos de lijado, inspección y preparación de la célula.

### 2.2.1 Módulo de diseño y preparación

El módulo de diseño y preparación está orientado a asistir el proceso de integración de la célula al sistema productivo. Esta tarea, llevada a cabo por un integrador, requiere de la valoración del tamaño y geometría de la pieza para definir el tipo de lijado, con herramienta terminal o con lijadora de banda. En este último caso, el robot manipulará la pieza contra una lija de banda accionada por una máquina lijadora. En cualquier caso, una vez definido el tipo de lijado se procederá al diseño de la herramienta de manipulación para el caso de lijado de banda, o diseño de utillajes para sujetar la pieza en el caso de lijado con herramienta rotatoria. En este módulo se propone el desarrollo de un sistema de asistencia a la programación de trayectorias del robot, que automatiza el proceso de programación y el diseño de utillajes. Las metodologías de desarrollo consideran el empleo de herramientas de manufactura avanzada entre las que se cuentan el uso de una impresora 3D, un escáner 3D Peel 3, el software SolidWorks como herramienta de diseño asistido por computador (CAD), y el lenguaje Python como herramienta de programación. La estrategia de generación automática desarrollada se validó experimentalmente con piezas reales.

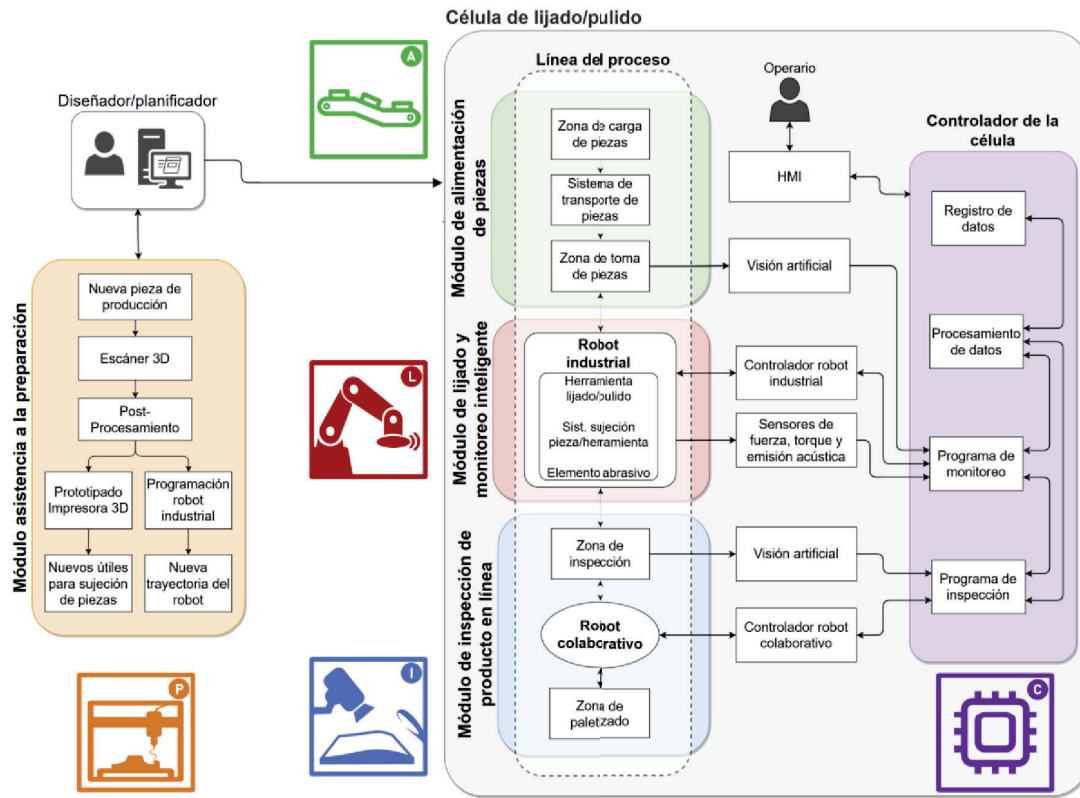


Figura 2: Diseño conceptual de la célula de lijado Fuente: Elaboración propia.

### 2.2.2. Módulo de lijado inteligente

Este módulo representa el corazón de la célula, debido a que realiza la función principal para la cual ella ha sido concebida, el proceso de lijado. Se le denomina inteligente porque el robot es capaz de obtener información útil para controlar el proceso a medida que se desarrolla la operación de lijado, abarcando dos ámbitos importantes del proceso, como son:

- La evolución de la calidad superficial de la pieza.
- El estado del abrasivo.

El desarrollo del sistema de monitoreo de la evolución de la calidad superficial a medida que se desarrolla la operación se realizó a través de la evaluación de las solicitaciones mecánicas que genera el proceso sobre la lija. En una operación de lijado, las solicitaciones que genera la interacción entre la lija y la pieza van evolucionando a medida que la superficie trabajada cambia. Esta variable se ha llamado factor de solicitación de la lija, y representa una ponderación de las solicitaciones que está experimentando la herramienta de lijado a medida que la superficie de la pieza se lija.

Por otra parte, el monitoreo del estado del abrasivo se realizó a partir del análisis de la señal de emisión acústica producida durante la operación. En ambos casos se llevaron a cabo sendas campañas de experimentación que permitieron desarrollar las estrategias de monitoreo y control de trayectorias del robot utilizando la información extraída de las variables del proceso medidas para tal efecto.

### 2.2.3. Módulo de inspección

El módulo de inspección considera el uso de herramientas de visión artificial y robótica industrial para optimizar la evaluación de las piezas lijadas por la célula. El análisis de este mapa de solicitaciones permitirá decidir en qué puntos de la pieza conviene inspeccionar la pieza optimizando la inspección que será asistida mediante un robot industrial y se llevará a cabo empleando visión artificial para detección de defectos y estimación de rugosidad.

En el estado de desarrollo actual de la célula, el prototipo de sistema de inspección (Figura 3) se compone de:



- (1) Un reproductor KAISER Reprostativ RSX 5512.
- (2) Pieza a evaluar.
- (3) Soportes articulados y pinzas.
- (4) Iluminación LED Effilux con placa de difusión de luz con bajo ángulo de incidencia.
- (5) Cámara Genie Nano M4020 con una óptica de 8 mm Computar V0828-MPY2.

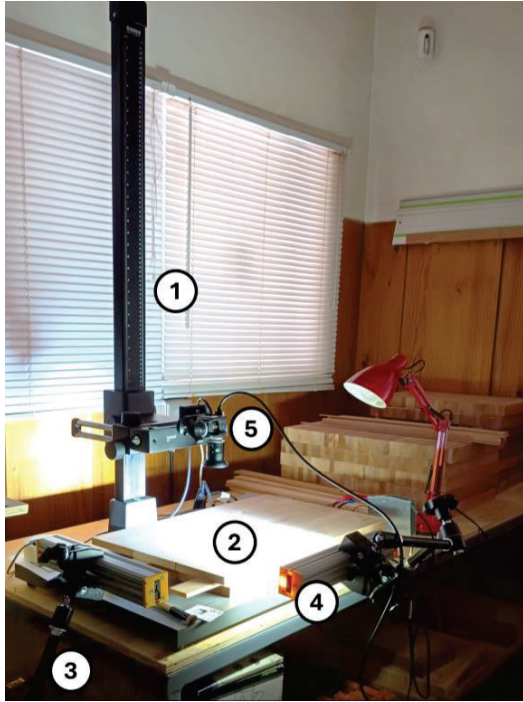


Figura 3. Prototipo de sistema de inspección.

Posterior a la captura fotográfica en escala de grises de la superficie de la pieza lijada, las imágenes son procesadas por un algoritmo que se encarga de estimar parámetros de rugosidad de la norma ISO 21920-2 a partir de la obtención de una característica de la matriz de coocurrencia de nivel de grises (GLCM, por sus siglas en inglés) de las imágenes, que han sido previamente tratadas con una máscara de convolución de detección de bordes.

Se ajusta un modelo lineal entre la característica que posee una mayor correlación con los parámetros de rugosidad. La estimación del modelo se realiza para cada material y condición de iluminación, etapa en la que es necesario medir la rugosidad con instrumentos convencionales como el rugosímetro por contacto, microscopio confocal, etc. Una vez finalizada la etapa de calibración, se procede al uso del modelo.

Para un mayor entendimiento del algoritmo de procesamiento de imágenes, véase [10].

### 3. Resultados

#### 3.1. Módulo de diseño y preparación

El módulo de diseño y preparación ha sido abordado desde dos focos que se han trabajado en paralelo: diseño de utillajes para sujeción de pieza y generación automática de trayectorias del robot.

##### 3.1.1. Diseño de utillajes

El diseño de utillajes contempla primeramente la identificación de la pieza y el tipo de lijado, de banda con herramienta terminal rotatoria. En función de ello, se proponen dos filosofías para el diseño de utillajes, ambos casos con una visión modular. En el caso de lijado de banda, se trabajó con un diseño paramétrico en SolidWorks, donde a partir de la información de la pieza se realizan ajustes sobre un diseño base para ser instalado en la muñeca del robot. Para el caso del lijado rotatorio, se tiene una estrategia de utillajes modulares que se instalan en paralelo para sujetar la pieza. De esta forma se genera una superficie para apoyar la pieza aprovechando sus caras planas. En los dos casos la tecnología de sujeción es mediante vacío, dado que ofrece una sujeción firme que no afecta las cualidades de la pieza de trabajo. En la Figura 4 se muestran ejemplos de los utillajes diseñados.

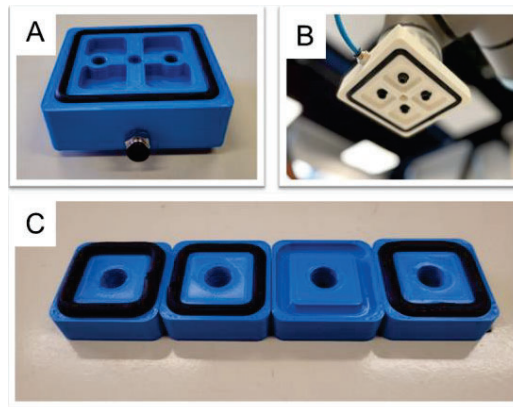


Figura 4: Utillajes modulares fabricados con impresión 3D.

##### 3.1.2. Generación automática de trayectorias

Para la generación automática de trayectorias se desarrollaron una serie de algoritmos que identifican características de la geometría de la pieza a partir de un archivo en formato 3D. Este archivo puede ser obtenido desde un CAD o desde un escáner 3D.

El algoritmo genera puntos sobre la superficie en función de la geometría de la herramienta de lijado y discrimina aquellos puntos que son redundantes. A

continuación, se genera una trayectoria que prioriza la obtención de una superficie óptima de manera de disminuir los cambios de trayectoria del robot. Una vez obtenidos los puntos de trayectoria el algoritmo genera un fichero que se carga en el controlador del robot para ejecutar la trayectoria. El diagrama de la Figura 5 muestra las etapas para obtener las trayectorias a partir de un archivo CAD con extensión *STL*.

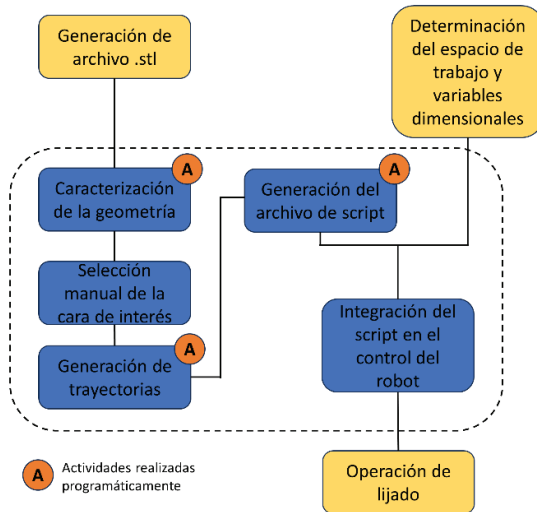


Figura 5: Etapas para la generación de la trayectoria

En el desarrollo del módulo se realizaron diversas pruebas de escaneo y se demostró que esta tecnología es complementaria con la generación automática de trayectorias del robot, especialmente cuando la geometría de la pieza es compleja y no se dispone de ella en formato CAD. La Figura 6 muestra las etapas en la obtención de un modelo tridimensional utilizando un escáner 3D. Dado que el uso de esta tecnología requiere de una etapa de post procesamiento que puede ser muy demandante en términos de tiempo, para piezas con geometría sencilla, será más conveniente dibujar la pieza en un CAD.

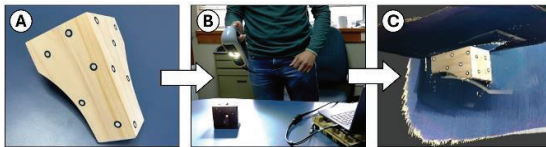


Figura 6. Etapas de obtención de un modelo tridimensional de una pieza usando escáner 3D: (a) definición de puntos de rastreo, (b) escaneo y (c) postprocesado.

### 3.2. Módulo de lijado robotizado inteligente

El desarrollo del módulo de lijado inteligente involucra la implementación de estrategias para el lijado con herramienta terminal y lijado con banda. La Figura 7 muestra el aparato experimental utilizado para la validación de las estrategias de lijado utilizando ambas configuraciones. La estrategia de lijado inteligente se basa en el monitoreo de la evolución del factor de sollicitación de la lija, calculado a partir de pares y fuerzas medidas durante la operación.

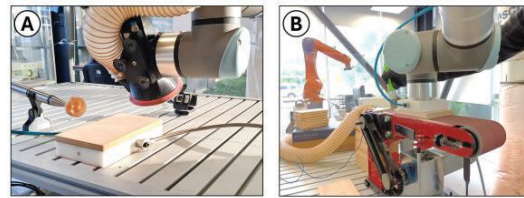


Figura 7: (a) lijado con herramienta terminal rotatoria y (b) lijado de banda.

En lo sucesivo, para este módulo se presentan resultados asociados al lijado con herramienta rotatoria. El módulo está compuesto por un robot colaborativo UR10e equipado con una herramienta terminal de lijado rotatoria. La herramienta terminal (Figura 8), accionada por un servomotor, está sujeta a la muñeca del robot con una pieza tipo adaptador que sirve de soporte al motor, y a la vez da soporte a la estructura del sistema de extracción de polvo y a tres ventosas que se pueden utilizar para manipulación.

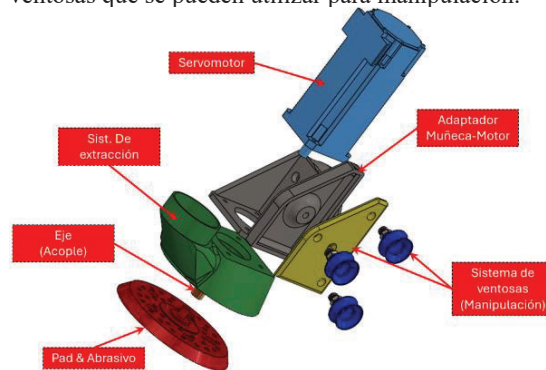


Figura 8: Herramienta terminal de lijado.

#### 3.2.1. Lijado inteligente

La estrategia de lijado supervisa la evolución de una variable del proceso, denominada factor de sollicitación de la lija, que está asociada con la evolución de la calidad superficial durante la operación de lijado. La Figura 9 muestra la evolución del factor de sollicitación de la lija, para pasadas sucesivas de la herramienta utilizando lijas de cuatro granos distintos: P80, P120, P180 y P240 en una pieza plana de madera sólida de

pino radiata. Los valores fueron normalizados respecto del valor de la primera pasada. Para los cuatro tipos de lija, se observa un comportamiento regular similar decreciente a medida que aumenta el número de pasadas. Este comportamiento es indicativo, para condiciones de operación constantes, de la evolución de la rugosidad superficial que experimenta la pieza en cada pasada.

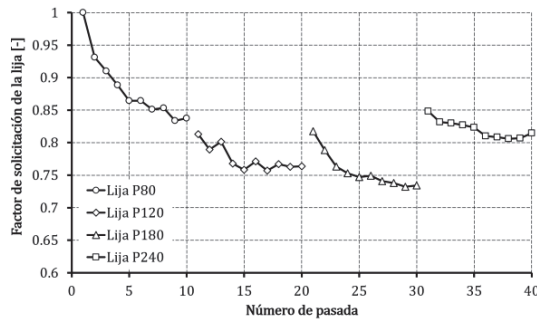


Figura 9: Evolución del factor de sollicitación de la lija en función del número de pasadas.

En una aplicación real, el monitoreo del factor de sollicitación de la lija permitirá al robot tomar decisiones sobre el desarrollo del proceso, por ejemplo, para decidir el término del mismo, o para cambiar el tipo de lija y seguir mejorando la calidad superficial del producto.

### 3.2.2. Monitoreo del estado de la lija

El estado de la lija depende de las condiciones de operación del proceso, fundamentalmente de la presión de lijado, velocidad de avance y velocidad de rotación de la herramienta de corte, así como de las propiedades de la lija y el material de trabajo. La combinación de estos elementos afecta el desgaste del elemento abrasivo y la saturación por acumulación de partículas entre los intersticios de los granos. Estos fenómenos degradan progresivamente el estado del abrasivo, reduciendo su capacidad de corte.

A diferencia de los sistemas convencionales, donde el reemplazo de la lija se realiza en base al tiempo de corte o por inspección del operario, en un sistema inteligente, el estado de la lija puede estimarse indirectamente mediante la medición de variables que aportan información sobre el desarrollo del proceso. Dado que la emisión acústica es una variable sensible a la condición del elemento abrasivo, se diseñó un experimento para analizar su respuesta durante la operación de lijado bajo condiciones de desgaste y saturación. En los experimentos, se confirma que la saturación afecta del rendimiento de la lija, reduciendo la tasa de remoción de material y disminuyendo la actividad de la emisión acústica, como se muestra en la

Figura 10(a). Esta característica puede utilizarse como un criterio para reacondicionar el elemento abrasivo, incrementando su vida útil. Por otra parte, en la Figura 10(b), los ensayos de desgaste muestran que la actividad de la emisión acústica tiende a disminuir en la fase inicial del desgaste, pero posteriormente aumenta cuando el desgaste es severo. Este comportamiento puede estar asociado a un cambio en el mecanismo de excitación, donde el rozamiento pasa a ser el fenómeno dominante sobre el corte.

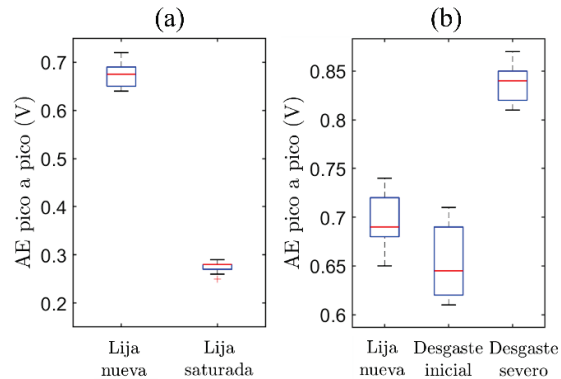


Figura 10: Respuesta de la emisión acústica según el estado del elemento abrasivo: (a) saturación y (b) desgaste.

Estos resultados confirman la viabilidad de desarrollar un sistema de monitoreo del estado del elemento abrasivo. Un sistema de este tipo permitiría mejorar la productividad del proceso y la calidad del producto al alertar sobre el momento óptimo para reemplazar o reacondicionar la lija y predecir su vida útil.

### 3.3. Módulo de inspección

La estimación de rugosidad se ha evaluado previamente con piezas planas de MDF obteniendo altas correlaciones [10].

Se realizó una validación del algoritmo en madera de roble en las instalaciones de la empresa Woodnic (Figura 10). Para ello se llevó a cabo una nueva calibración del algoritmo para la madera y las condiciones industriales específicas presentes en el taller de Woodnic.

Luego de la aplicación del algoritmo de calibración, se obtuvo un modelo para estimación de rugosidad de piezas de madera de roble que utiliza como característica de la imagen la correlación de la matriz de coocurrencia de nivel de grises (Figura 12).

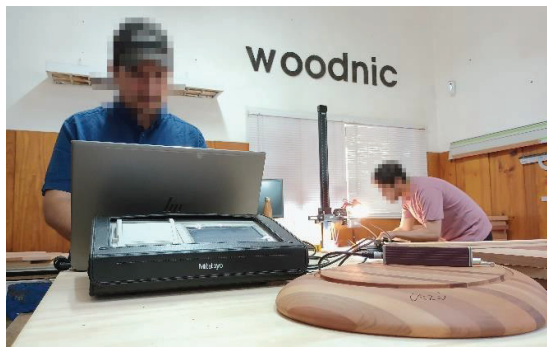


Figura 11. Campaña de validación del prototipo de inspección en entorno industrial.

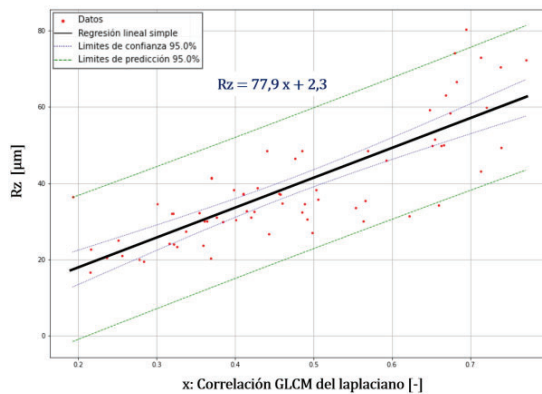


Figura 12. Modelo de estimación de rugosidad para piezas de madera de roble.

En base a pruebas aplicadas a madera sólida, roble y pino, se ha observado un aumento en la incertidumbre del modelo respecto a las pruebas en MDF. Este comportamiento se asocia a la variabilidad del material y la presencia de estructuras propias de la madera como nudos, grietas, entre otros, que confunden al modelo y que requieren de un procesamiento previo que identifique y elimine dichas estructuras. Otro aspecto determinante en el resultado del modelo es la variabilidad en la iluminación dependiente de la zona en que se capture la fotografía.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se han presentado los avances en el desarrollo de una célula inteligente para operaciones de lijado y pulido robotizado de piezas de madera. La célula, de configuración modular, tiene capacidades para desplegar las funciones de lijado e inspección de la pieza con autonomía gracias a la integración de distintas tecnologías de manufactura avanzada en los módulos que la componen.

El módulo de lijado inteligente estima la evolución de la calidad superficial de la pieza a partir del monitoreo

de las solicitaciones que experimenta la lija durante la operación. De esta forma el robot es capaz de decidir el instante de cambio de lija para finalizar la operación o dar continuidad al proceso utilizando un abrasivo de menor tamaño de grano. Además, este módulo es capaz de supervisar el estado del abrasivo y distinguir entre los estados de saturación de la lija con residuos del proceso y desgaste de los granos que afectan la eficiencia del proceso y la calidad del producto. De esta forma el robot es capaz de conocer cuando la lija ha perdido su capacidad abrasiva y debe ser reemplazada.

El módulo de inspección permite estimar parámetros de rugosidad superficial de forma rápida, automática y objetiva, mediante el uso de herramientas de visión artificial, y permite a la célula identificar zonas de la pieza que requieran de operaciones de lijado adicionales. Para el correcto funcionamiento del módulo de inspección será necesario realizar una etapa de calibración cada vez que se cambie el material o las condiciones lumínicas a la que funcionará el sistema.

Como parte de los trabajos futuros que dan continuidad a la investigación, se espera integrar los módulos desarrollados en una célula específicamente diseñada para la producción de un producto real para su validación en laboratorio. En relación con la estrategia de lijado inteligente, se está trabajando en la evaluación del comportamiento del factor de solicitación de la lija y la emisión acústica en piezas con distintas geometrías y niveles de acabado. Desde el punto de vista de la inspección, para reducir la incertidumbre de los modelos de estimación de rugosidad se buscará desarrollar un utillaje para robot que incorpore iluminación constante en cada captura fotográfica, independiente de la zona de la pieza, lo que permitirá, además, inspeccionar piezas curvas. Otro aspecto pendiente del desarrollo en el contexto del proyecto consiste en la identificación y filtrado de defectos de la madera como nudos, grietas y otros, con lo que se espera obtener una clasificación automática y, al mismo tiempo, reducir la incertidumbre asociada a los modelos de estimación de rugosidad con imágenes.

Finalmente, la célula implementada en laboratorio será llevada a una fábrica donde se evaluará su desempeño en condiciones reales, con especial foco en la validación de sus características: inteligencia del proceso, autonomía para desarrollar las operaciones y calidad del producto. El proceso de validación incluirá una simulación del proceso y una evaluación económica del proyecto de implementación de la célula en un entorno real.

#### 5. Agradecimientos

Los autores del trabajo agradecen a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo por el



financiamiento para el desarrollo de esta investigación a través de los proyectos FONDEF IT21i0069 y FONDEF VIU22P0027.

Los autores también agradecen a las entidades asociadas al proyecto, la Universidad Politécnica de Madrid (España), Maderas Nativas Woodnic SpA y Robotec SA, por su participación en el desarrollo de los proyectos mencionados.

## 6. Referencias

- [1] Cial Dun & Bradstreet, “Análisis de la Industria Manufactura Chile,” 2018. [Online]. Available: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/external-reports/IA-Chile-Manufacturing2018.pdf>
- [2] CEOP, “Hoja de Ruta para Programa Estratégico de Manufactura Avanzada,” 2018. [Online]. Available: <https://www.corfo.cl/sites/Satellite?blobcol=urldata&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1475166894766>
- [3] A. Garcia-Herrero, E. Dos Santos, P. Urbiola, and R. S. Marcos Dal Bianco, Fernando Triana Soto, Mauricio Hernandez, Arnulfo Rodriguez, “Competitividad del sector manufacturero en América Latina: tendencias y determinantes,” *BBVA Work. Pap.*, vol. 14/10, pp. 1–80, 2014, doi: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3160573>.
- [4] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh, and R. Suman, “Substantial capabilities of robotics in enhancing industry 4.0 implementation,” *Cogn. Robot.*, vol. 1, pp. 58–75, Jan. 2021, doi: [10.1016/J.COGR.2021.06.001](https://doi.org/10.1016/J.COGR.2021.06.001).
- [5] A. Verl, A. Valente, S. Melkote, C. Brecher, E. Ozturk, and L. T. Tunc, “Robots in machining,” *CIRP Ann.*, vol. 68, no. 2, pp. 799–822, 2019, doi: [10.1016/j.cirp.2019.05.009](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.009).
- [6] M. H. Zafar, E. F. Langås, and F. Sanfilippo, “Exploring the synergies between collaborative robotics, digital twins, augmentation, and industry 5.0 for smart manufacturing: A state-of-the-art review,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 89, p. 102769, Oct. 2024, doi: [10.1016/J.RCIM.2024.102769](https://doi.org/10.1016/J.RCIM.2024.102769).
- [7] E. Diez-Cifuentes and J. González-Salazar, “ANID, FONDEF ID18i10042: Desarrollo de una herramienta terminal para operaciones de lijado robotizado inteligente con aplicación a la manufactura de productos de madera de alto valor agregado. Informe Final,” Temuco, 2021.
- [8] E. Diez-Cifuentes *et al.*, “Robotized Workstation for Intelligent Sanding Processes of Wooden Workpieces,” *Dyna*, vol. 98, no. 4, pp. 362–368, 2023, doi: [10.6036/10873](https://doi.org/10.6036/10873).
- [9] F. Iglesias-Quilodrán, R. Castro-Sabaria, and E. Diez-Cifuentes, “ANID, FONDEF VIU22P0027: RuGo: Solución tecnológica integral para la evaluación de la calidad superficial en productos de madera mediante algoritmos basados en imágenes,” 2024.
- [10] F. Iglesias, A. Aguilera, A. Padilla, A. Vizán, and E. Diez, “Application of computer vision techniques to estimate surface roughness on wood-based sanded workpieces,” *Measurement*, vol. 224, p. 113917, Jan. 2024, doi: [10.1016/J.MEASUREMENT.2023.113917](https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2023.113917).