

Factibilidad del uso de señales de emisión acústica para monitorear el estado del abrasivo en operaciones de lijado robotizado

Pablo Sanhueza-Carvajal¹, Ricardo Alzugaray-Franz², Eduardo Diez-Cifuentes²

¹Programa Magister en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad de La Frontera, Chile.

Email: pablo.sanhueza@ufrontera.cl

²Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad de La Frontera, Chile.

Email: ricardo.alzugaray@ufrontera.cl, eduardo.diez@ufrontera.cl

Resumen

En la industria de la madera, el lijado es esencial para suavizar superficies y mejorar el acabado superficial. Para esto, se utilizan abrasivos cuyo desempeño tiende a degradarse con el tiempo de corte y según las condiciones del proceso. Aunque las operaciones de lijado robotizado han mejorado la eficiencia y la uniformidad del proceso, todavía no existe una solución eficaz para evaluar automáticamente el estado del abrasivo.

Este trabajo estudia una operación de lijado robotizado mediante una herramienta de lijado rotatoria en muestras de tableros de MDF y madera sólida de roble. Se analiza la señal de la emisión acústica (AE) y la corriente del motor de la herramienta como variables portadoras de información del proceso para la estimación indirecta del estado del abrasivo. Los resultados demuestran que las características en amplitud de ambas variables son aptas para monitorear la evolución del estado de la lija.

Palabras clave: Lijado robotizado, monitoreo en línea, estado del abrasivo, emisión acústica, corriente del motor, lijado de madera.

Abstract

In the woodworking industry, sanding is essential for achieving smooth surfaces and high-quality finishes. The performance of abrasives degrades over time and under different operating conditions. Despite advancements in robotic sanding, which have improved the efficiency and uniformity of the process, the development of an effective solution to automate the evaluation of the abrasive condition remains a challenge.

This work analyses a robotic sanding operation using a rotary sanding tool to process samples of MDF boards and solid oak wood. The analysis focuses on the measurement of the acoustic emission (AE) and motor current signals as process variables for indirect estimation of the abrasive condition. The findings reveal that amplitude characteristics extracted from both signals are effective for monitoring the evolution of the sandpaper performance.

Keywords: Robotic sanding, online monitoring, abrasive condition, acoustic emission, motor current, wood sanding.

1. Introducción

El lijado es un proceso de mecanizado que suaviza superficies ásperas mediante un abrasivo recubierto, eliminando imperfecciones y preparando la superficie para acabados posteriores [1]. Los abrasivos recubiertos se componen de granos minerales adheridos a un material base, que actúan como múltiples filos cortantes. Las características del material base determinan la resistencia, rigidez y capacidad de eliminación de material del abrasivo. La efectividad y vida útil del abrasivo está influenciada

por las propiedades de la madera [2], y también por la morfología y distribución de los granos en la lija, que determinan la fuerzas y la velocidad de corte que experimentan los granos [3].

En la industria de la madera es común que el estado de la lija sea evaluado por el operario de forma manual. Dado que el estado del abrasivo influye en la calidad del producto, el monitoreo de la evolución de su desempeño puede mejorar significativamente la eficiencia del proceso [3].

En los años 90, Matsumoto y Murase [4] estudiaron la influencia del tiempo de lijado, el tamaño de grano y la presión de lijado en las emisiones acústicas (AE). Para esto, utilizaron la tasa de eliminación de material, definida como la capacidad para eliminar material dentro un periodo de tiempo determinado, como un parámetro de medida de la eficiencia del proceso. Los resultados muestran que la tasa de eliminación de material aumenta con el tamaño del grano, aunque esta capacidad se reduce con el tiempo de lijado. Lo anterior, está directamente relacionado con la tasa de conteo de la emisión acústica (*AE count rate*), y que se atribuye a la menor penetración de los granos del abrasivo como consecuencia del desgaste y saturación con polvo.

Por otro lado, Carrano et al. [5] implementaron un sistema de monitoreo de saturación de la banda abrasiva en el lijado de madera utilizando sistemas de visión artificial y redes neuronales para estimar la vida útil del abrasivo con un nivel de certidumbre superior al 90%.

Asimismo, Saloni y Lemaster [6,7] desarrollaron un sistema de monitoreo en línea del desgaste y saturación de una banda abrasiva, utilizando un sensor óptico, un sensor de emisión acústica y un sensor de temperatura, logrando hacer una estimación en línea del estado de la lija y gestionar la limpieza periódica del abrasivo, aumentando su vida útil. Este sistema posibilitó el cambio oportuno de la lija cuando sus granos presentaban un desgaste excesivo que pudiera afectar la calidad superficial.

Estudios más recientes se han centrado en estudiar los mecanismos de desgaste, falla y la optimización del proceso de lijado usando tecnología óptica fuera de línea. Zhang [9] estudió las características de desgaste de la banda abrasiva y su efecto en la eliminación de material para tableros de fibra de media densidad (MDF), concluyendo que los patrones predominantes de desgaste de granos fueron fractura y abrasión. Por otra parte, Du [10] determinó que las bandas abrasivas que procesan MDF tienen dos mecanismos de falla: el desgaste del grano, que contribuye a la disminución de la altura máxima de protuberancia de los granos, y la saturación con polvo del espacio entre los granos abrasivos, resultando en un bloqueo de la banda.

Actualmente, el uso de robots industriales en operaciones de lijado ha aumentado debido a su capacidad para mejorar la eficiencia y la uniformidad del proceso en comparación con el lijado manual. Algunos de estos desarrollos consisten en herramientas terminales para robots [11,12]. Sin embargo, la automatización de la evaluación del estado del abrasivo sigue siendo un área poco explorada. Además, los estudios previos relacionados con el estado de la lija

han estado centrados mayormente en procesos de lijado con banda, y no se han reportado investigaciones de lijado con herramientas rotatorias.

Este trabajo evalúa la viabilidad de utilizar la emisión acústica (AE) y la corriente consumida por el motor de la herramienta terminal como variables para monitorear el estado del abrasivo en el proceso de lijado robotizado con herramienta terminal rotatoria. El objetivo es emplear estas variables para gestionar el oportuno reacondicionamiento del elemento abrasivo en el caso de saturación o bien su reemplazo en el caso de desgaste, mejorando así la autonomía y eficiencia del proceso.

2. Metodología

2.1. Diseño de experimentos

Para los experimentos se considera el uso de probetas de dos tipos de materiales: tableros de fibra de densidad media (MDF) y madera sólida de roble. El MDF permite inducir el estado de saturación con mayor facilidad que otros materiales, debido a su estructura y composición que libera gran cantidad de partículas que se adhieren a la superficie de la lija. Por otra parte, la madera de roble, cuya dureza es mayor que la del MDF, permite desgastar los granos abrasivos sin efectos significativos de saturación.

Las dimensiones de las probetas usadas en los experimentos son 180 mm de largo, 110 mm de ancho y 18 mm de espesor. Las probetas se sujetan mediante un utillaje de vacío. Los factores experimentales que se presentan en la Tabla 1 fueron determinados a partir de ensayos exploratorios.

Tabla 1. Factores experimentales. Fuente: elaboración propia.

Factores experimentales		
Factor	Saturación	Desgaste
Vel. Giro	3000 RPM	3000 RPM
Vel. Avance	10 mm/s	10 mm/s
F. Normal	10 N	10 N
Grano Lija	P150	P220

2.2. Configuración experimental y equipos

Para los experimentos, se fabricó una herramienta terminal accionada por un servomotor AKM-23D con un torque máximo de 1.1 Nm, que se fija a la muñeca del robot industrial (Figura 1). El controlador AKD-P00306 se configuró para controlar la velocidad de giro y proporcionar una salida analógica de la corriente consumida. La corriente del servomotor se utilizó como una medida indirecta del torque de lijado. Los

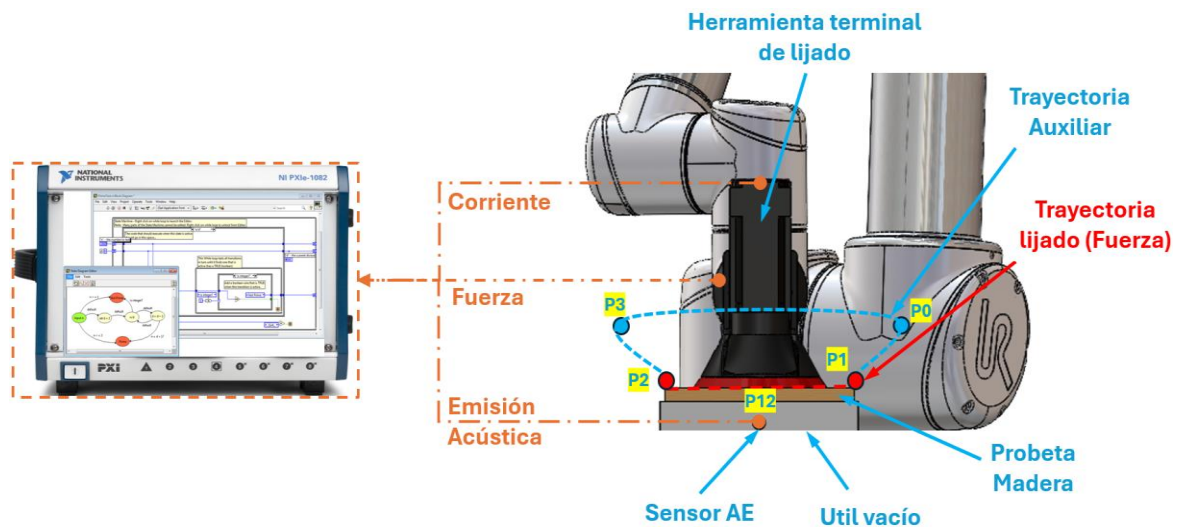


Figura 1. Esquema de la configuración experimental de la estación de lijado, trayectorias y adquisición de datos.

soportes de la herramienta y el sistema de extracción de partículas de polvo se imprimieron en PLA, resultando una herramienta ligera que facilita el control de la trayectoria del robot. La trayectoria de la herramienta terminal durante el lijado se realizó con una estrategia de control de fuerza.

2.3. Sistema de adquisición de datos, comunicación y control

La medición y registro de las variables del proceso emisión acústica (AE), fuerza normal de lijado y corriente del motor se llevó a cabo mediante un dispositivo PXI1062Q de National Instruments. Para la adquisición de datos, se utiliza una frecuencia de muestreo de 2 MHz para la señal de la emisión acústica (NI 6132) y 100 kHz para las señales de fuerza y la corriente del motor (NI 4472b).

La rutina de adquisición de datos se inicia con una señal digital que proviene del robot industrial cuando la trayectoria de la herramienta de lijado sobrepasa el punto P12 mostrado en la Figura 1. Esta señal corresponde a una señal de disparo para las tarjetas NI4472b y NI6132, que adquieren datos de manera simultánea durante un segundo, que es el tiempo equivalente a cincuenta giros completos del disco abrasivo sobre la probeta y el sensor AE.

Para la comunicación entre la computadora de control y el robot industrial se empleó la interfaz RTDE de Universal Robots. Mediante LabVIEW, se desarrolló una arquitectura de gestión de mensajes en cola (QMH) que además permitió gestionar la adquisición de

imágenes y el registro de la masa de las probetas procesadas.

2.4. Procesamiento y análisis de datos

La señal de la emisión acústica (AE), la corriente del servomotor y la fuerza normal se almacenan en el dispositivo NI PXI1062Q en formato TDMS y posteriormente se procesan con un programa de LabVIEW. Las señales se filtran entre 50 kHz y 400 kHz con un filtro Butterworth de quinto orden para eliminar la información que se encuentra fuera del rango de operación del sensor. Posteriormente se determina el valor de AE pico a pico y se registran los datos junto con la corriente media en una hoja de cálculo de Excel. La razón de remoción de material (RRM) se usa para determinar el rendimiento del abrasivo, calculando la relación entre la tasa de remoción en un momento dado (R) y la inicial (Ro), de acuerdo con lo explicado por Matsumoto y Murase [4]. La masa se registra cada 5 pasadas, que corresponde a 90 segundos de uso del abrasivo.

3. Resultados y discusión

3.1. Ensayos de saturación

Para estudiar el efecto de la saturación del elemento abrasivo se trabaja con dos materiales con distintas características: (1) tableros de MDF, que es un material que favorece la rápida saturación de los espacios intersticiales entre los granos del abrasivo, y (2) roble que es un material más duro y una menor tendencia a la saturación. Los experimentos consideran lijas con el mismo tipo de grano y factores operacionales, los que se encuentran recogidos en la Tabla 1.

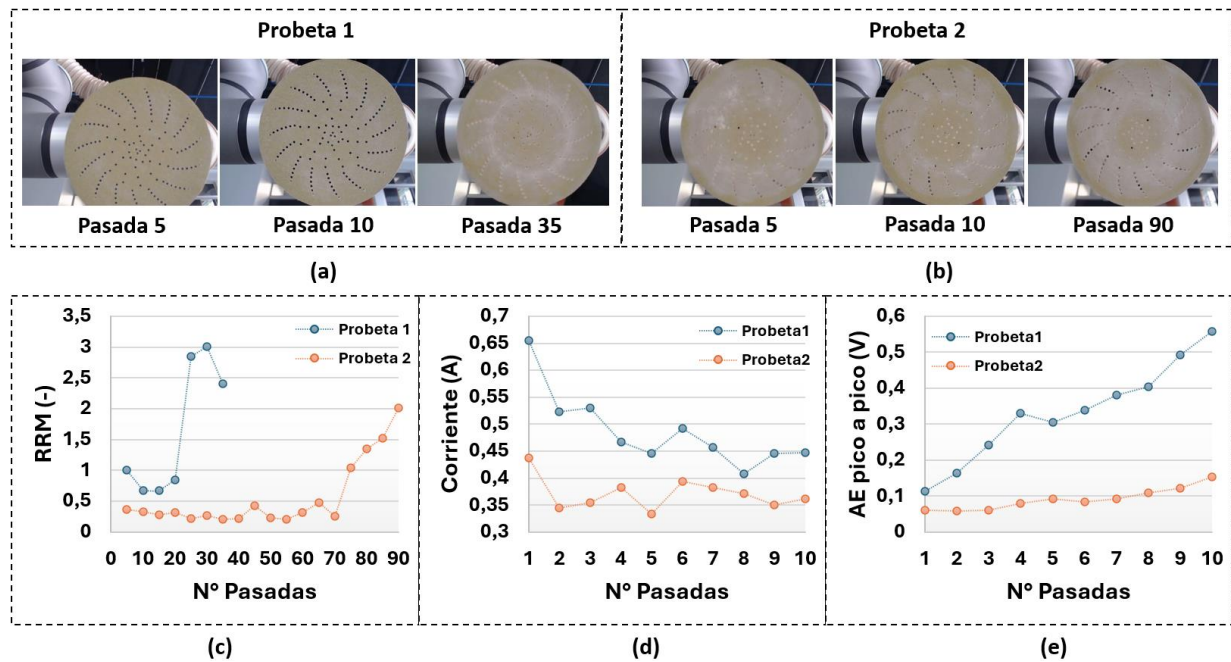


Figura 2. Evolución de las variables del proceso en los ensayos de saturación en MDF. (a) y (b) Imágenes del disco de lijado para para la probeta 1 y 2 respectivamente, (c) tasa de remoción de material, (d) valor pico a pico de AE y (e) valor medio de la corriente del motor.

3.1.1. Saturación en MDF

Estos ensayos consisten en un total de 125 pasadas consecutivas de una lija de grano P150 en dos probetas de MDF. Las 35 pasadas iniciales se hicieron en la primera probeta y las 90 siguientes en la segunda. El cambio de probeta se efectuó justo antes de que la reducción de espesor de la primera probeta alcance el límite operacional del sistema de sujeción por vacío. El tiempo total de corte del ensayo fue de 37.5 minutos. El estado inicial del disco de lijado se presenta en la Figura 2(a). El mayor número de pasadas en la segunda probeta se debe a la disminución del desempeño del abrasivo, y que está asociado a un estado de saturación tal como se muestra en la Figura 2(b).

La Figura 2(c) muestra la evolución de la razón de remoción de material (RRM) del ensayo completo, mientras que la Figura 2(d) y 2(e) muestra un resumen de las primeras 10 pasadas para el valor pico a pico de la emisión acústica y el valor medio de la corriente del motor respectivamente. Estos valores se consideran los más representativos del proceso, ya que, para un número mayor de pasadas, los resultados presentan una alta dispersión debido a la gran variación de la densidad del material en sus capas interiores.

En el caso de la emisión acústica, se observa que la respuesta del valor pico a pico tiende a aumentar con las pasadas, con un comportamiento similar a los resultados obtenidos para la razón de remoción de material. Sin embargo, se puede ver que la tasa de variación de la amplitud de la emisión acústica en la probeta 1 es mayor que en la probeta 2, lo que confirma que la actividad de la emisión acústica es sensible a la condición del elemento abrasivo, permitiendo obtener indicios del estado de saturación de la lija. En el caso de la corriente del motor, se observa el comportamiento inverso, donde el consumo de corriente tiende a bajar en la medida que el disco abrasivo pierde su capacidad de corte a causa del aumento de la superficie de saturación del disco de lijado.

3.1.2. Saturación en roble

Se realizaron ensayos de saturación en probetas de madera sólida con el objetivo de evaluar la evolución de las variables del proceso en un material con una estructura y densidad mucho más homogénea que el MDF. Estos ensayos consistieron en un total de 250 pasadas consecutivas sobre en dos probetas de roble. Las 150 pasadas iniciales se hicieron en la primera probeta y las 100 pasadas restantes en la segunda, con un tiempo total de corte de aproximadamente 75 minutos. La probeta 1 se procesa con una lija de grano

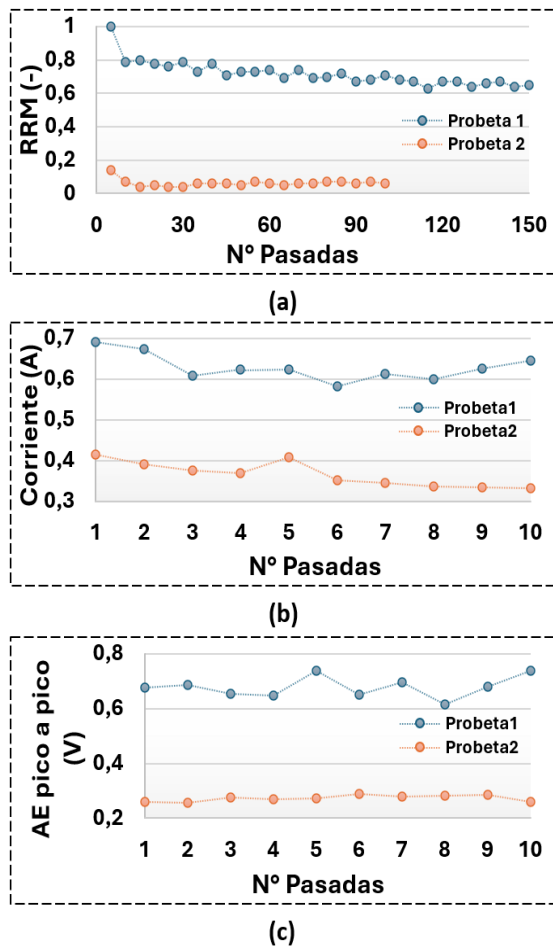


Figura 3. Evolución de las variables del proceso en los ensayos de saturación en roble. (a) tasa de remoción de material, (b) valor medio de la corriente del motor y (c) valor pico a pico de AE.

P150 inicialmente nueva, mientras que la probeta 2 fue lijada por la misma lija, pero en un estado de saturación inducido artificialmente mediante un procesamiento previo con MDF. Los resultados del ensayo se resumen en la Figura 3. En todos los casos, se aprecia la misma tendencia en la evolución de la amplitud de las variables del proceso, tanto para la condición de la lija nueva como para la saturada. La Figura 3(a) muestra que la tasa de remoción de material cuando la lija está saturada es aproximadamente el 10% del valor registrado cuando la lija está nueva. En el caso de la corriente del motor, mostrado en la Figura 3(b), se mantiene el comportamiento de un menor consumo de corriente cuando el abrasivo está saturado. La emisión acústica, mostrada en la Figura 3(c), también presenta un menor nivel de actividad asociado con un estado de saturación.

Los resultados de estos ensayos confirman que los efectos de la saturación del abrasivo reducen su

capacidad de remoción de material, consecuencia de la disminución de la profundidad de penetración del grano y al aumento de la superficie de contacto entre el disco de lijado y el material que está siendo procesado. La emisión acústica y la corriente del motor son variables que permiten identificar de manera indirecta la saturación del elemento abrasivo, permitiendo generar acciones para su reacondicionamiento, lo que restituye su capacidad de corte e incrementa su vida útil.

3.2. Ensayos de desgaste

Los ensayos de desgaste se realizaron en probetas de madera sólida de roble con una lija de grano P220. Se llevaron a cabo 1400 pasadas consecutivas sobre tres probetas de roble. Al igual que los ensayos de saturación, el cambio de probeta se efectuó justo antes de alcanzar el límite operacional del sistema de sujeción por vacío. Las 300 pasadas iniciales se hicieron en la primera probeta, las siguientes 450 pasadas en la segunda probeta y las restantes 650 en la tercera, con un tiempo total de corte de aproximadamente 7 horas. Después de este periodo de tiempo, y dado que la lija no fue capaz de seguir reduciendo el espesor de la tercera probeta, se dio por concluido el ensayo. Debido a la larga duración de este ensayo, y habiendo demostrado la relación entre la corriente del motor y la tasa de remoción del material, se opta por no medir la masa de la probeta ni hacer registros fotográficos del disco de lijado.

Durante el ensayo, se realizaron inspecciones visuales del elemento abrasivo confirmando que no se produjo saturación, por lo que la disminución de su capacidad de corte se debe al desgaste, lo cual se verifica con la evolución de las variables del proceso y el tiempo de corte mostrado en la Figura 4.

En el caso de la corriente del motor, mostrado en la Figura 4(a), se observa una zona inicial con amplitud relativamente constante, la que se extiende durante aproximadamente 700 pasadas. Posteriormente, la amplitud decae a una nueva meseta con un nivel de amplitud inferior al anterior, el cual se mantiene constante hasta el final del ensayo. Esto indica que la lija llegó al fin de su vida útil después de 3.5 horas de corte. La Figura 5(a) muestra que incluso dentro de la zona transitoria de asentamiento de las nuevas probetas, tampoco alcanza el umbral del fin de la vida útil del abrasivo, lo que confirma que el consumo de corriente es un buen indicador del desgaste.

En cuanto a la emisión acústica, la tendencia del valor pico a pico, mostrada en la Figura 4(b), presenta una zona transitoria en las primeras pasadas de las tres probetas debido a la rugosidad inicial de la pieza. Sin embargo, bajo condiciones de corte uniformes, se

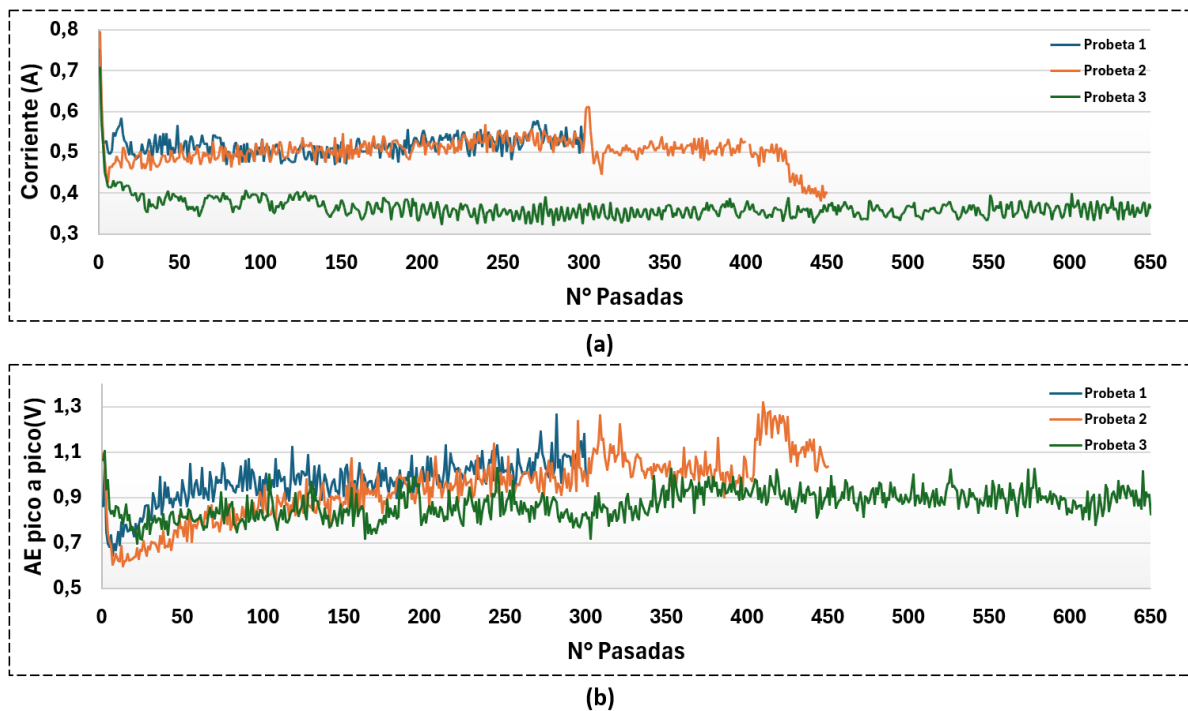


Figura 4. Evolución de las variables del proceso en los ensayos de desgaste en roble. (a) valor medio de la corriente del motor (b) valor pico a pico de AE.

observa una zona en los niveles de amplitud con una leve tendencia al alza, lo cual puede estar asociado a la disminución del espesor de la probeta, que modifica la distancia entre la fuente de las emisiones y el sensor. Posteriormente, después de aproximadamente 1000 pasadas, se aprecia que la tasa de cambio de la amplitud pico a pico de la emisión acústica se estanca, lo que sería una indicación del fin de la vida útil de la lija.

Por otro lado, la Figura 5 muestra la evolución de las variables del proceso en las primeras 10 pasadas de cada probeta. Estos resultados son representativos de una operación de lijado de acabado, cuyo objetivo no es alterar la dimensión de la pieza de trabajo, sino mejorar la calidad superficial de esta. Si no se consideran las primeras tres pasadas, cuyo comportamiento está dominado por la calidad superficial inicial de las piezas, se observa que un abrasivo desgastado se asocia con un nivel más bajo de consumo de corriente del motor. En el caso de la emisión acústica ocurre lo contrario, ya que el desgaste de la herramienta puede generar nuevas fuentes de emisión acústica asociadas a un mayor nivel de rozamiento debido a la acción de granos romos.

4. Conclusiones

En este trabajo se estudiaron los dos mecanismos de falla de típicos de un elemento abrasivo: desgaste y saturación. Se diseñó un experimento que permitió observar por separado la influencia de ambos

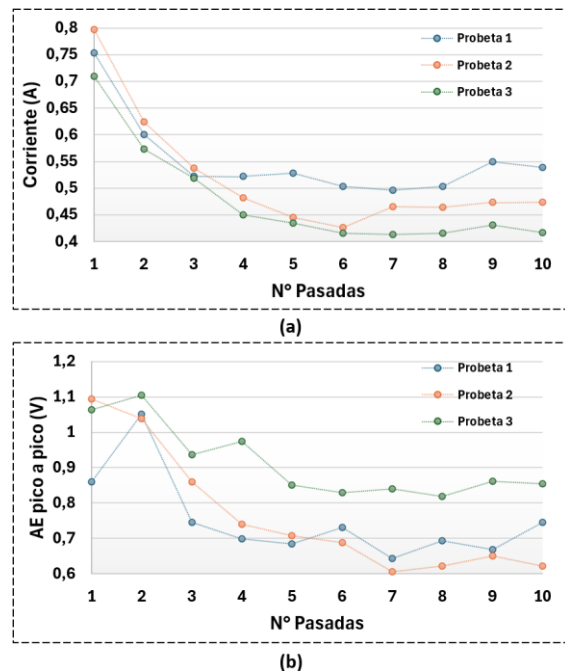


Figura 5. Evolución de las variables del proceso en las 10 pasadas iniciales del ensayo de desgaste en roble: (a) valor medio de la corriente del motor y (b) valor pico a pico de la emisión acústica.

fenómenos y analizar la respuesta de las variables indirectas de proceso emisión acústica y corriente del motor, con el objetivo desarrollar un sistema de monitoreo en línea en operaciones de lijado robotizado.

Se realizan experimentos de saturación para dos materiales diferentes, confirmando que las muestras de MDF favorecen una rápida saturación del abrasivo en comparación con una madera sólida de mayor dureza como es el roble. En ambos materiales, se observó que la saturación afecta del rendimiento de la lija, reduciendo la tasa de remoción de material, disminuyendo la corriente consumida por el motor y la actividad de la emisión acústica. Esta característica puede ser utilizada un como un criterio para reacondicionar el elemento abrasivo, incrementando su vida útil.

Por otra parte, los resultados del ensayo de desgaste muestran que el consumo de corriente del motor disminuye a medida que se desgasta el elemento abrasivo, mientras que la emisión acústica puede aumentar con el desgaste debido cambios en el mecanismo de generación dominante, principalmente asociados al rozamiento y no con el corte.

Los resultados expuestos sugieren que es viable un sistema de monitoreo en línea basado en variables indirectas del proceso como la emisión acústica y el consumo de corriente de la herramienta de lijado. Además, la metodología propuesta se puede extender a otros tipos de madera, sin embargo, se requieren ensayos de calibración para confirmar las observaciones realizadas en este estudio.

Finalmente, y aunque el análisis de las variables se realizó como una etapa de post procesamiento, el método propuesto es apto para sistemas de monitoreo en línea. Para esto, se requiere desarrollar un algoritmo que se integre al programa de lijado robotizado de diferentes piezas, que registre, procese y compare las variables en estudio durante la operación. Esto permitirá supervisar la evolución del estado del elemento abrasivo y generar acciones para su reacondicionamiento o reemplazo.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de La Frontera, por incentivar y apoyar la investigación en tecnologías de manufactura inteligente, a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo ANID (Chile) por el financiamiento de los proyectos FONDEF ID18i10042 y FONDEF IT21i0069 dedicados al desarrollo del proceso de lijado robotizado inteligente y, finalmente a las empresas Maderas Nativas Woodnic y 3M Chile por sus aportes de herramientas y consumibles para el desarrollo de esta investigación.

6. Referencias

- [1] Ratnasingam J., Sanding Process, in: Furniture Manufacturing: A Production Engineering Approach, Springer Singapore, 2022.
- [2] M. Sydor, R. Mirski, K. Stuper-Szablewska, T. Rogoziński, Efficiency of machine sanding of wood, Applied Sciences (Switzerland) 11 (2021). <https://doi.org/10.3390/app11062860>.
- [3] J. Ratnasingam, H.F. Reid, M.C. Perkins, The productivity imperatives in coated abrasives - Application in furniture manufacturing, Holz Als Roh-Und Werkstoff 57 (1999) 117–120.
- [4] H. Matsumoto, Y. Murase, Acoustic Emission Characteristics in Wood Sanding Amplitude distribution of acoustic emission in disc sanding process, Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University 43 (1998) 257–268. <https://doi.org/10.5109/24270>.
- [5] Carrano A, Vora B, Sahin F, Lemaster R, Monitoring of abrasive loading for optimal belt cleaning or replacement, Forest Product Journal 57 (2007) 78–83. <https://www.researchgate.net/publication/236870303>.
- [6] D.E. Saloni, R.L. Lemaster, S.D. Jackson, Process Monitoring Evaluation and Implementation for the Wood Abrasive Machining Process, Sensors 10 (2010) 10401–10412. <https://doi.org/10.3390/s101110401>.
- [7] D.E. Saloni, R. Lemaster, S. Jackson, Control system evaluation and implementation for the abrasive machining process on wood, 2011.
- [8] J. Zhang, J. Ying, F. Cheng, H. Liu, B. Luo, L. Li, Investigating the sanding process of medium-density fiberboard and Korean Pine for material removal and surface creation, Coatings 8 (2018). <https://doi.org/10.3390/coatings8120416>.
- [9] J. Zhang, Y. Yang, B. Luo, H. Liu, L. Li, Research on wear characteristics of abrasive belt and the effect on material removal during sanding of medium density fiberboard (MDF), European Journal of Wood and Wood Products 79 (2021) 1563–1576. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01718-x>.
- [10] Y. Du, X. Sun, B. Luo, L. Li, H. Liu, Research on Failure Mechanism of Abrasive Belt and Effect on Sanding of Medium-Density Fiberboard (MDF), Coatings 12 (2022) 621. <https://doi.org/10.3390/coatings12050621>.

[11] Robotiq, Sanding kit, (2024).
<https://robotiq.com/products/sanding-kit> (accessed June 17, 2024).

[12] Onrobot, Onrobot sander, (2024).
<https://onrobot.com/us/products/onrobot-sander>
(accessed June 17, 2024).