

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***PROPUESTA DE PROFILÓMETRO ÓPTICO
LÁSER PARA LA CARACTERIZACIÓN DE
PANELES DE MADERA CLT UTILIZADOS
EN CONSTRUCCIÓN***

Estudiante	<i>Bargiela Mengod, Danel</i>
Director/Directora	<i>Durana Apaolaza, Gaizka</i>
Departamento	<i>Fotónica Aplicada</i>
Curso académico	<i>2019-2020</i>

Bilbao, 31 de agosto de 2020

Índice

DATOS BÁSICOS DEL PROYECTO.....	1
MEMORIA	2
Introducción:.....	2
Contexto	3
Objetivos y alcance del trabajo:	5
Beneficios que aporta el trabajo:.....	7
Análisis del Estado del Arte:.....	8
Técnicas de sensado usadas en sistemas comerciales:	9
Ensayo de Delaminación (UNE-EN 16351):	20
Análisis de riesgos:	21
Descripción de la solución propuesta. Diseño básico:	21
METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO	22
Descripción de tareas, fases, equipos y procedimiento:.....	22
Elección del sistema de medición:.....	24
Ventajas de la medición láser frente a métodos con contacto:.....	25
Diseño de la Carcasa deslizante y la Estructura de soporte para la cabeza láser:	27
Diagrama de Gantt:	29
Cálculos y algoritmos:.....	30
Hipótesis y planteamiento sobre componentes de rugosidad y ondulación:....	30
Parámetros de rugosidad:	34
Desarrollo del Algoritmo:	36
Análisis de los resultados:.....	45
ASPECTOS ECONÓMICOS:.....	54
Descripción del presupuesto:	54
Análisis de la rentabilidad:	54
CONCLUSIONES:.....	56
BIBLIOGRAFÍA	58
ANEXO I: Pliego de condiciones. Normativa aplicable. Plan de pruebas:.....	62
ANEXO II: Planos, esquemas, diseño de detalle, código:	62
ANEXO III: Manuales de usuario y/o de administrador.	62

Lista de tablas, ilustraciones, gráficas y acrónimos

Fig. 2.1.- Paneles “EGO_CLT” de Egoín S.A.....	3
Fig. 2.2.- Carril de producción de paneles CLT de la empresa Egoín S. A.....	4
Fig. 2.3.- Esquemas del funcionamiento de sensores ópticos basadas en intensidad.	9
Fig. 2.4.- Gráfica estándar “Señal Emitida-Distancia”, para sensores basados en intensidad.	10
Fig. 2.5. - Objeto plano vs. inclinado	11
Fig. 2.6. - Rugosidad variable en la superficie de un objeto.	12
Fig. 2.7. - Efecto de la traslación lateral sobre distintos objetos:	12
Fig. 2.8. - Principio de funcionamiento del sensor de triangulación óptica.	13
Fig. 2.9.- Objeto se encuentra en la intersección entre dos rectas y dos arcos.	14
Fig. 2.10.- a) Las medidas de “time-of-flight” muestran tres escenarios distintos: ..	15
Fig. 2.11.- El principio de detección de fibra óptica monocromática y policromática confocal.....	16
Fig. 2.12.- Configuración básica para la interferometría WLI y típico patrón de interferencia	18
Fig. 2.13.- Detalle de probeta de CLT delaminada.....	20
Fig. 3.1.- Comparación medición por contacto con Stylus vs medición sin contacto con haz láser.	26
Fig. 3.2.- Estructura de MungiMatik S.A., una vez finalizado su montaje.....	27
Fig. 3.3.- Perfil de MungiMatik (20x20mm), vista isométrica del mismo y sección de la guía de la propia carcasa.....	27
Fig. 3.4.- Imagen CAD de Fusion360 del montaje de la carcasa (gris) junto con la cabeza láser (naranja).	28
Fig. 3.5.- Diferentes perspectivas y detalles de la carcasa realizada en Fusion 360.	28
Fig. 3.6.- Lista de tareas del proyecto.....	29
Fig. 3.7.- Diagrama de Gantt del proyecto.	29
Fig. 3.8.- Esquema del filtrado en función de las respectivas longitudes de onda de corte: λ_s , λ_c y λ_f	31
Fig. 3.9.- Desplazamiento de fase en filtro RC. La línea media sufre un retraso respecto del perfil real.....	32
Fig. 3.10.- Segmento de Raw Data con perfil de convolución. ($z(x)$ representado en azul y $m(x)$ representado en naranja).....	33
Fig. 3.11.- Segmento de rugosidad, normalizado respecto al filtro $m(x)$	34
Fig. 3.12.- Perfiles con la misma R_a , pero con un comportamiento diferente.....	34

Fig. 3.13.- Altura total del perfil de rugosidad (Rt), profundidad de rugosidad media (Rz) y profundidad máxima de rugosidad (Rz1max).....	35
Fig. 3.14.- Configuración usada para el sistema de medición Micro-Epsilon. Incluye la cabeza, la fuente de alimentación e interfaz en el ordenador.....	37
Fig. 3.15.- Interfaz del software ILD2300-10 de Micro-Epsilon.	37
Fig. 3.16.- Perfil primario de muestra de Calibrado.	38
Fig. 3.17.- Matriz de pesos del filtro gaussiano, para una longitud de onda de corte de 0,8 mm ($\lambda_c = 0,8$ mm).	39
Fig. 3.18.- Ilustración de la longitud de corte (l_c) y longitud de evaluación (l_n)	41
Fig. 3.19.- Región del segmento donde el filtro gaussiano actúa sin provocar distorsión alguna (amarillo).	42
Fig. 3.20.- Resultado de la aplicación del filtro gaussiano a lo largo de todo el perfil.	42
Fig. 3.21.- Solución tomada para evitar la pérdida de datos entre dos filtrados en subintervalos consecutivos.....	43
Fig. 3.22.- Ejemplo de filtrado corregido sobre subintervalo del perfil calibrado....	44
Tabla. 3.23.- Tabla para dos muestras de madera distintas, mostrando valores de Ra media y su desviación estándar.	45
Tabla. 3.24.- Tabla resumen de los valores estadísticos para Ra y Rq.	45
Tabla. 3.25.- Tabla con los niveles de significación e intervalos de confianza para las muestras de 95 y 99% (Ra, Rq).....	45
Fig. 3.26.- Tabla para dos muestras de madera distintas, mostrando valores de Rt media y su desviación estándar.	46
Fig. 3.27.- Tabla resumen de los valores estadísticos para Rp, Rv y Rt.	46
Fig. 3.28.- Tabla con los niveles de significación e intervalos de confianza para las muestras de 95 y 99% (Rp, Rv y Rt).	46
Fig. 3.29.- Gráfica del perfil primario, en el primer subintervalo.	47
Fig. 3.30.- Gráfica de la rugosidad, en el primer subintervalo.....	48
Tabla. 3.31.- Tabla de Muestra 1, para un filtrado gaussiano con una longitud de onda de corte de $\lambda_c = 0,8$ mm.....	48
Tabla. 3.32.- Tabla resumen de los parámetros de rugosidad, para diferentes longitudes de onda de corte.....	49
Fig. 3.33.- Gráfica con los parámetros de rugosidad de una muestra, junto con los diferentes filtros usados.....	49
Fig. 3.34.- Curva Rt vs. λ_c , ajuste logarítmico.....	50
Fig.3.35.- Explicación gráfica de la adición de componentes de frecuencia sobre el perfil real.....	51
Fig. 3.37.- Perfil primario con filtro y perfil de rugosidad, para $\lambda_c = 3,5$ mm.....	51

*Propuesta de perfilómetro óptico láser para la caracterización de paneles de madera CLT
utilizados en construcción*

Fig. 3.38.- Optimización de la curva R_t vs. λ_c	52
Fig. 3.39.- Comparativa de las rugosidades entre las muestras Calibradas y Cepilladas.....	53
Fig. 4.1.- Presupuesto general inicial aproximado del proyecto.	54
Fig. 4.2.- Desglose de los costes totales del proyecto.....	54

DATOS BÁSICOS DEL PROYECTO

Equipo de Proyecto: Danel Bargiela Mengod, Gaizka Durana Apaolaza.

Título del Proyecto: Propuesta de profilómetro óptico láser para la caracterización de paneles de madera CLT utilizados en construcción.

Resumen: En este documento se describe el análisis y diseño detallado de un profilómetro óptico láser basado en la rugosidad superficial, modelando su uso para la categorización de muestras de madera. Se especifican los elementos, proceso de calibración y montaje, desarrollo software, presupuesto y futura implementación en la industria.

Palabras clave: *Triangulación láser, profilómetro, CLT, Python.*

Laburpena: Dokumentu honetan zimurtasunan oinarritutako profilometro optiko laser baten analisisa eta diseinua deskribatzen da, bere zurako lagin kategorizazioko erabilpena moldatuz. Haren elementuak, kalibrazio eta montaketa prozesuak, software-garapena, aurrekontua eta geroko implementazioa industrian zehazten dira.

Hitz-gakoak: *Laser triangulazioa, profilometro, CLT, Python.*

Abstract: In this document the analysis and detailed design of a roughness based laser optic profilometer is described, modelling its use for the categorization of wooden samples. Elements, calibration and assembly process, software development, budget and future implementation in the industry are described.

Keywords: *Laser triangulation, profilometer, CLT, Python.*

MEMORIA

Introducción:

Este documento contiene la propuesta de proyecto en el cual se detalla el proceso de diseño, medición, tratamiento de datos y posterior optimización de los mismos para su aplicación en la caracterización superficial de paneles de madera CLT de rugosidad diversa, para lo cual se utilizará medición láser y software desarrollado en Python.

En una primera parte, se explica el contexto en el que se lleva a cabo el proyecto, junto con los aspectos característicos más importantes a tener en cuenta. Por ello, se analizan también los objetivos que se pretenden alcanzar con la realización de este proyecto.

A continuación, se explican las características técnicas relativas al montaje y a los elementos que han formado parte del mismo, incluyendo información gráfica y clara del proceso llevado a cabo. Asimismo, se explica el funcionamiento de cada una de las partes, distinguiendo así entre los puntos de muestras, medida y adquisición de datos y tratamiento de los mismos.

Posteriormente, se hace una breve mención a la inversión necesaria que habría que realizar para la correcta finalización del proyecto y el cumplimiento de los objetivos: inversión en el equipo, software o en recursos humanos.

Finalmente, se muestra y explican detalladamente los beneficios aportados por el proyecto en el ámbito empresarial y productivo, adjuntando cálculos realizados y las explicaciones necesarias para su implementación. Además, se incluye un apartado final de conclusiones acerca del proyecto realizado.

Contexto:

El cometido de este proyecto es el de conseguir un resultado experimental aplicable en la industria a través de la tecnología fotónica, uno de los pilares sobre los que se basará la Industria 4.0 en los próximos años.

Si bien es cierto que en un primer momento se consideró la idea de incluir machine learning para llevarlo a cabo, esta opción acabó descartándose más adelante debido a la escasez de medios disponibles –número reducido de probetas y muestras, falta de automatización del proceso de medición, etc.- para desarrollar una base de datos fiable con la que trabajar.

Los paneles CLT (Cross Laminated Timber) de la empresa Egoín S.A. son paneles de madera macizos formados por capas encoladas y cruzadas en sentido transversal entre sí. Una vez establecidas todas las capas del panel, se procede con el prensado de las mismas. La característica principal de este tipo de paneles es su estabilidad dimensional, la cual se logra gracias a la acción de la fibra de madera, colocada alternando la dirección de la misma respecto a las tablas longitudinales adyacentes.



Fig. 2.1.- Paneles "EGO_CLT" de Egoín S.A.

Gracias a su gran versatilidad, los paneles CLT se utilizan en la edificación de viviendas, naves industriales y edificios de uso público. Tiene una alta capacidad de carga a pesar de su bajo peso, permitiendo así construir voladizos y muros de carga y eliminando gran parte de los pilares que acarrea la construcción convencional.

Los paneles se fabrican en líneas de control numérico, incidiendo en la disminución de los errores y tiempos muertos en obra, con la consiguiente reducción de los costos de construcción. Si estos paneles fallan frente a esfuerzos que la edificación exige, todo el proceso previo resulta inútil, provocando tanto pérdidas económicas como pérdidas medioambientales, de materia prima y de recursos naturales en la empresa y su entorno.

Propuesta de profilómetro óptico láser para la caracterización de paneles de madera CLT utilizados en construcción

Por eso, resulta crucial el poder conocer, monitorizar y manipular las características superficiales de los paneles CLT. Estas características de la rugosidad de la madera son los parámetros determinantes –como se verá más adelante en el trabajo- del desempeño que dichos paneles tendrán en los ensayos mecánicos a los que son sometidos y en la propia obra in situ.

Debido a ello, en este proyecto se han querido incidir sobre dos aspectos principales:

En primer lugar, el de obtener una solución industrial aplicable a un proceso productivo concreto, que proporcionará una información de gran valor acerca de las características y prestaciones del producto.

En segundo lugar, el mostrar la aplicación de la fotónica -en este caso, a través de la metrología láser- como instrumento de alta precisión que actúa como herramienta útil para su implementación.

Todos estos objetivos a cumplir, se llevaron a cabo mediante una serie de ensayos en el laboratorio de Fotónica Aplicada de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), gracias a diversas muestras de madera CLT facilitadas por Egoin S.A.

Egoin S.A (Ereño, Bizkaia) es una empresa líder en lo que a construcción en madera se refiere, con proyectos como La Borda (Premio Arquitectura BBConstrumat 2019) a nivel nacional o más de 30 obras realizadas, entre otros, en el Reino Unido, de entre las cuales varios proyectos receptores de numerosos premios RIBA. Por tanto, se pretende aportar una solución tecnológica que pueda ser integrada dentro del proceso productivo de paneles CLT de Egoin S.A.



Fig. 2.2.- Carril de producción de paneles CLT de la empresa Egoin S. A.

Objetivos y alcance del trabajo:

El objetivo y alcance del trabajo, como ya se ha comentado previamente, es el de, mediante la implantación en la línea productiva de un sistema de medida óptico sin contacto, determinar de forma precisa las características superficiales de la madera y conseguir optimizar la producción de estructuras y paneles CLT en la empresa. Con ello, se logrará una mejor utilización de los recursos disponibles, una mejora en el método productivo y un ahorro económico destacable, gracias a la optimización de material, recursos y tiempo productivo.

La empresa con la cual se trabajará es Egoín S.A. Ésta produce estructuras de madera de todo tipo, desde tablonés básicos hasta CLTs o construcciones modulares, con las cuales compone íntegramente viviendas, tejados o escuelas en lugares diversos como Cataluña, África e Inglaterra, entre otros.

Egoín S.A. inicia la producción de estructuras de madera a mediados de los años 70, actuando como sociedad desde 1990. Apenas unos años más tarde, en 1998, se instalan los dos primeros centros de mecanizado de control numérico –de un total de 9- para estructuras de madera.

Siguiendo la línea positiva de crecimiento, en 2002 se inicia el proceso de corte y composición de paneles estructurales como el CLT, creados en carriles de más de 50 m de longitud. En 2008, se instala una prensa para mejorar la producción de los paneles CLT, añadiendo a la misma en 2012 una unidad de tratamiento vacío-presión para paneles de hasta 12 metros. A partir de ese año, se amplía la capacidad productiva con la adquisición de la fábrica de madera laminada de Legutio (Araba).

En 2017, se implementa dentro del proceso una unidad completa de escaneado, rayos X y clasificación mecánica de las láminas. Además, entra en marcha el aserradero propio, creado para abastecer el sistema con material autóctono de bosques cercanos, obteniendo así un promedio de 200 m³ de producto acabado al día.

En lo que a certificaciones se refiere, Egoín S.A. ha sido la primera empresa del Estado en obtener los certificados Minienergie Eco –estándar energético más alto de Suiza para casas de bajo consumo energético- y Passivhaus -estándar alemán para la construcción de viviendas con gran aprovechamiento energético-.

A través de las diversas certificaciones del sistema de gestión de calidad – para varios tipos de madera laminada, paneles CLT, etc.-, seguridad y medio ambiente, desde la empresa se cumplen con todas las regulaciones y normativas aplicables hoy en día.

Propuesta de profilómetro óptico láser para la caracterización de paneles de madera CLT utilizados en construcción

Por norma general, todas las estructuras elaboradas en la empresa son creadas con listones de madera que, a su vez, tienen una anchura normalizada de 20cm. La longitud, por otra parte, dependerá siempre del tipo de estructura y de su futura aplicación. Para cumplir con los requisitos de una red de clientes cada vez más amplia, se deben cumplir todas las estrictas normas y especificaciones respecto a la rugosidad de la superficie y las propiedades físicas del material.

En el protocolo seguido por la empresa, un paso clave que aporta calidad al producto son los lijados finales. Con ellos, se consigue dar a la madera un acabado suave y plano, que mejora sus características. Sin embargo, se dan casos en los cuales dichas lijas y cuchillas no realizan su labor de manera óptima, dando lugar a un acabado pobre que posteriormente dará problemas en el pegado y en los ensayos según la normativa vigente.

El objetivo principal de este proyecto es encontrar un método rápido y fiable para el control y monitorización del método de acabado y lijado de la madera, mediante el cual pueda advertirse en tiempo real el rendimiento del proceso sobre todas las muestras fabricadas y así, obtener la calidad superficial de manera individual para cada una de ellas, analizando con ello los datos y localizando el foco del problema.

El estado del arte –como se verá más adelante- se enfoca hacia el método para llevar a cabo las medidas de la superficie de las muestras. Así, a la hora de realizar las mediciones, éstas podrían llevarse a cabo a través de un perfilador láser de superficie. El haz láser, en vez de crear un pequeño punto sobre la muestra, definirá una línea, logrando barrer la superficie analizada al moverse ésta linealmente.

Sin embargo, en el presente proyecto se ha decidido optar por la utilización de un sistema de triangulación láser puntual para evitar la pérdida de precisión que el uso de un barrido de superficie supondría. En este caso, el escaneo realizado a lo largo de una línea se considerará representativo de toda la superficie.

Además, este punto ha sido comprobado con veracidad gracias a diversas pruebas realizadas en el laboratorio, obteniéndose resultados prácticamente idénticos en todas las muestras analizadas.

Una vez establecido el método de obtención de datos –perfilado de una línea de la superficie-, se establece la tecnología para llevarlo a cabo. Existen gran variedad de tecnologías fotónicas, y varían respecto de la aplicación que se necesite, como más tarde se expondrá.

Beneficios que aporta el trabajo:

Los beneficios que dicho proyecto aporta, se van a ver tratados más en profundidad en los siguientes apartados, una vez se haya presentado el montaje final, los elementos, el método de análisis y un estudio económico riguroso.

Análisis del Estado del Arte:

Un punto previo que conviene explicar es el de las técnicas de medición. En el mundo de la industria productiva, la forma de medir cualquier material, objeto o superficie se divide en dos grandes grupos: medición por contacto y sin contacto.

En nuestro caso particular, se ha trabajado a lo largo de todo el proyecto con madera de varios acabados. En comparación con otros materiales industriales que pudieran tener otras aplicaciones distintas, como es el caso de ciertos metales donde las técnicas de medición por contacto entre la sonda y el objeto (“contact”) no causan por lo general ninguna distorsión y proporcionan una medida precisa de una característica concreta de la muestra analizada, en otros materiales relativamente más blandos, como la madera -sea del tipo que sea- la situación es diferente. Al ser una muestra sensible a la presión ejercida por el medidor, será más proclive a sufrir cambios superficiales.

Aquí se presentan varias técnicas de medición láser que son usadas hoy en día, tanto para medir distancias, desplazamientos, perfiles de superficies o vibraciones, entre otros.

A continuación, se procede a describir las distintas técnicas fotónicas existentes, poniendo la atención sobre la física de cada una de ellas, y explicando de manera clara su funcionamiento y mostrando así sus puntos fuertes y limitaciones. Además, se concretan tanto la precisión como el rango de trabajo de cada una de ellas.

Una técnica óptica de medición es usada de manera general bien cuando se necesita un método de medición sin contacto, para proveer al sensor de una medida rápida y automática, o porque es la mejor -y muchas veces- única solución.

Se presentan cinco técnicas distintas (basada en intensidad, triangulación, tiempo de vuelo, confocal y sensores interferométricos), las cuales son usadas de manera comercial en el ámbito industrial como métodos de medición precisa. Todas ellas se han querido ordenar en este trabajo de manera que el coste de su implementación y diseño aumente a medida que son presentadas.

Técnicas de sensado óptico:

1.- Sensores basados en intensidad:

Este tipo de sensores son uno de los primeros tipos de sistemas ópticos de medición de distancia – de los más simples, por tanto- utilizados hoy en día. El sensor consiste tan solo en una fuente de luz y un detector, en el cual la intensidad de la luz reflejada desde el objeto sobre el detector es una función de la distancia entre la fuente de luz o detector y el objeto analizado.

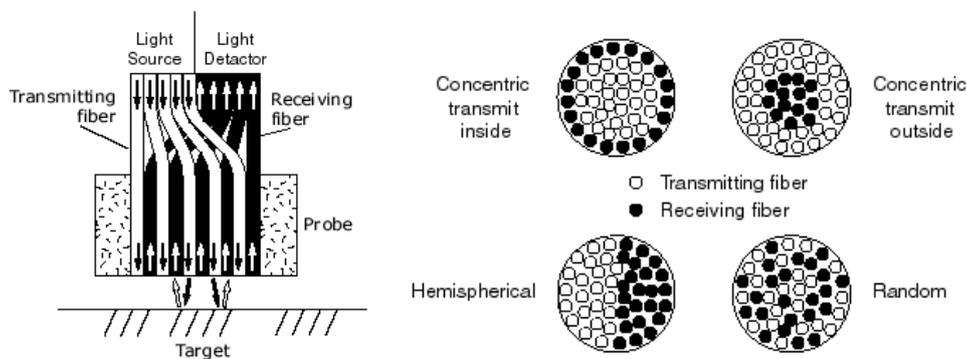


Fig. 2.3.- Esquemas del funcionamiento de sensores ópticos basadas en intensidad. a) Sensor de doble fibra. b) Diversas geometrías y configuraciones posibles. [1]

Generalmente, estos sensores cuentan con fibra óptica para transmitir la luz desde la fuente hasta el objeto, y de nuevo desde el objeto al detector. La iluminación y la detección se logra bien con fibras individuales o con un haz de fibras. [2] [3]

Este tipo de sensores siguen normalmente el comportamiento mostrado en la Fig. 2.3. La curva de respuesta puede ser entendida con modelos geométricos simples. En esta técnica, los diámetros de las fibras usadas, así como sus aperturas numéricas (NA) ¹ y la disposición de fibras emisoras-receptoras (véase Fig. 2.3) modelan la distancia para la cual se produce la intensidad máxima de la curva.

La respuesta de la señal en la Fig. 2.4 muestra las dos regiones para la detección de la misma. Como puede verse, la curva presenta dos zonas cuasi-lineales -las pendientes frontal y trasera- para la relación “distancia-signal emitida”.

¹ La apertura numérica (NA) de un sistema óptico es un parámetro que sirve para medir la aceptación de luz incidente en el mismo. Se obtiene en función de consideraciones geométricas, por lo que el diseño del sistema limitará su valor.

La pendiente frontal tiene una mayor sensibilidad que la trasera, pero en cambio la trasera ofrece al sensor un mayor rango dinámico que la pendiente frontal.

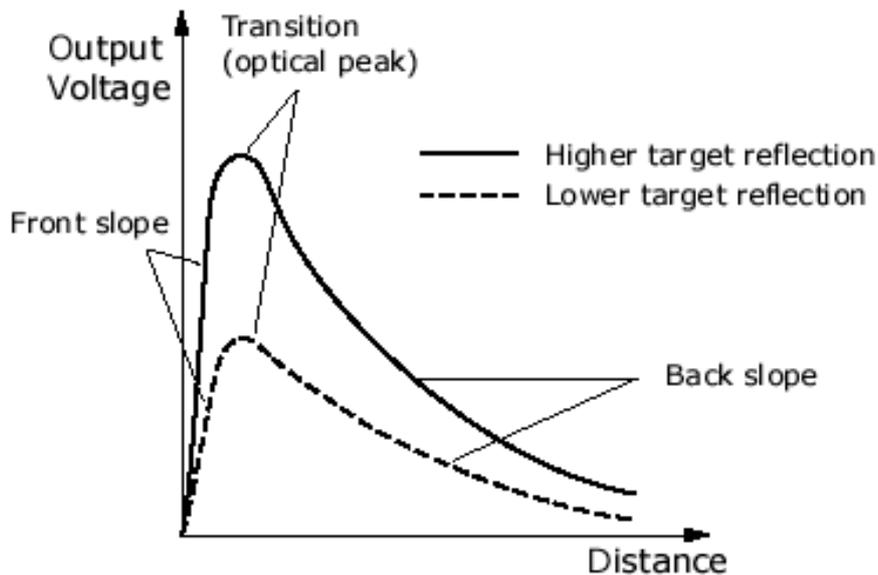


Fig. 2.4.- Gráfica estándar "Señal Emitida-Distancia", para sensores basados en intensidad. [4]

En caso de que se quiera usar este tipo de sensores para realizar una medición, el sensor deberá ser calibrado en primer lugar, obteniéndose una curva de calibración como en la Fig. 2.4 en función del objeto que se desee medir.

Aunque tras ello puede que distintos objetos muestren formas de curva de calibración muy similares, será la amplitud –y no la forma- de la señal a esa distancia concreta lo que variará en función del objeto medido, al depender ésta tanto de la reflectividad absoluta como de la difusividad del mismo.

Las mayores ventajas de esta técnica son su simplicidad y bajo precio, junto con la capacidad de medir distancias con una alta velocidad de muestreo (hasta cientos de kilohercios).

Además, la oferta de este tipo de sensores es muy variada, encontrándose rangos de medida desde unos pocos milímetros hasta más allá de medio centímetro (1~50mm), con métodos que se siguen investigando a día de hoy. [5]

Por otra parte, la resolución de la pendiente posterior de la curva puede llegar a ser de $1\mu\text{m}$ o mayor dependiendo del objeto (obteniéndose mejor resolución en objetos brillantes). Aun así, esta técnica tiene varias limitaciones, como las siguientes:

- a) Es necesaria la precalibración de la curva, independientemente del objeto que se desee medir.
- b) Debido a que la intensidad de la señal medida y la distancia están relacionadas, el sensor interpretará cualquier cambio en la intensidad recibida como un cambio proporcional en la distancia. Por ello, variaciones imprevistas de la intensidad de iluminación, variaciones en la reflectividad sobre la superficie del objeto [6], así como suciedad o polvo, serán interpretados como variaciones de distancia.
- c) La señal es sensible a la inclinación de la superficie del objeto. Como puede verse en la Fig. 2.5, un sensor con objeto inclinado “óptimamente” recogerá más luz que uno no inclinado. Además, esta inclinación será diferente a lo largo de todo el rango de medidas del sensor, variando para cada punto e inclinación del eje.

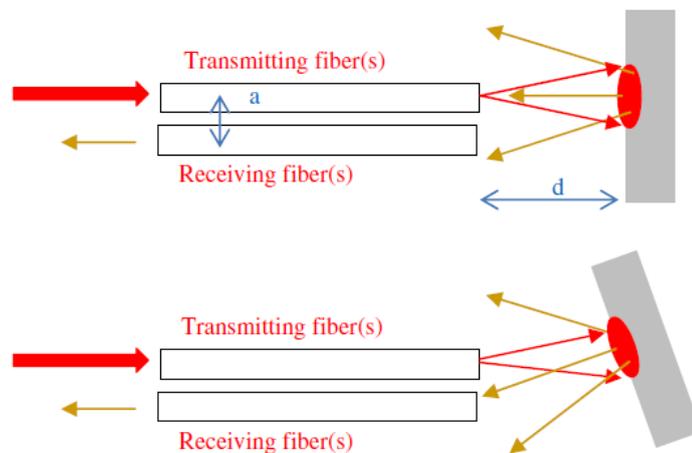


Fig. 2.5. – Objeto plano vs. inclinado. A una distancia “d” del sensor reflejará más luz hacia la fibra receptora en un ángulo de inclinación concreto ($\theta = a/d$) (figura inferior), en comparación con un objeto plano (figura superior).

Las variaciones de señal recibidas en el sensor a lo largo de toda la toma de medidas pueden explicarse al estudiar la superficie del objeto como un conjunto de segmentos inclinados orientados de manera aleatoria a lo largo de la misma [7] y teniendo en cuenta que la luz se refleja de manera especular y normal con respecto a cada una de estas inclinaciones.

Para cuantificarlo, se simula la intensidad de señal relativa mediante el trazado de rayos y se cuenta el número final de rayos reflejados en la fibra del sensor (Fig. 2.6).

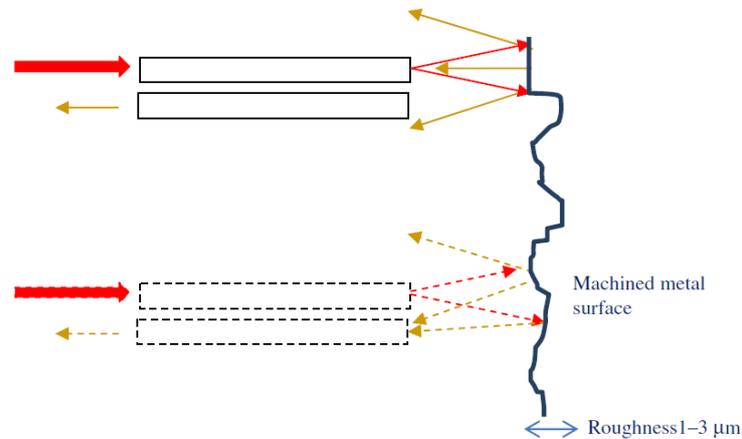


Fig. 2.6. - Rugosidad variable en la superficie de un objeto. Las fibras receptoras recogen distintas cantidades de luz dependiendo de la rugosidad superficial de la superficie.

En cambio, este efecto no se da para un objeto con superficie especular, dada su simetría translacional. Por lo tanto, el sensor central (ver Fig. 2.7) de 100 μm no exhibe ninguna irregularidad con la traslación lateral en el caso de un espejo.

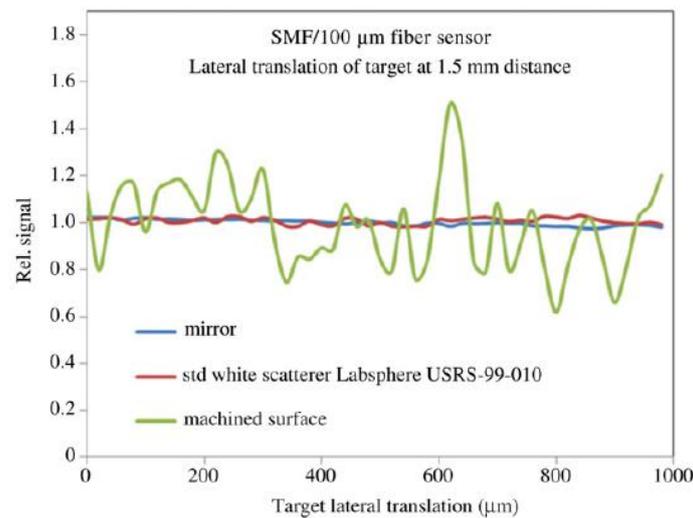


Fig. 2.7. - Efecto de la traslación lateral sobre distintos objetos: superficie especular (azul), superficie de dispersión blanca estándar (rojo) y superficie mecanizada (verde) desde un sensor con fibra transmisora monomodo² y fibra receptora con núcleo de 100 μm [8].

² En las fibras monomodo (*SMF, Single Mode Fiber*) tan sólo se propaga el modo LP_{01} , impidiendo los modos de orden superior (LP_{11} , LP_{20} , etc.) y obteniendo una excelente calidad del haz a la salida.

En el caso de que se deseen eliminar los efectos de la variación de reflectividad del objeto en cuestión, a fin de garantizar una medida más fiable, se usará la relación entre las señales de dos fibras receptoras a diferentes distancias de la superficie. [6] [9] [10] [11] Otras configuraciones de fibras que son usadas actualmente para corregir y mejorar la señal recibida incluyen disposiciones circulares de fibras receptoras. [7] [12]

2.- Sensores de Triangulación:

Las medidas por triangulación hacen referencia a un procedimiento en el cual una distancia, posición o punto queda definido por consideraciones basadas en las geometrías de similitud de triángulos (Teorema de Tales).

Los sensores ópticos basados en triangulación [13], operan de manera general usando el principio geométrico mostrado en la Fig. 2.8.

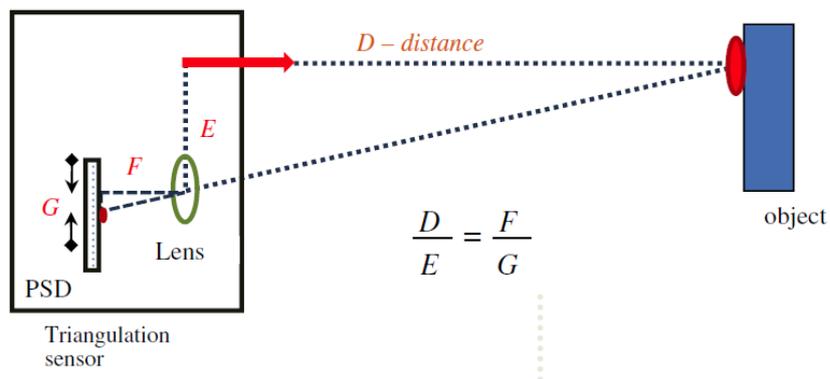


Fig. 2.8. - Principio de funcionamiento del sensor de triangulación óptica. La distancia o desplazamiento (D) queda determinado por las distancias conocidas (E y F) y la distancia obtenida en el sensor (G). Esta última se obtiene con la distancia al píxel situado en el detector sensible a la posición (PSD, Position Sensitive Detector) que registra la imagen del punto medido.

Para esta tecnología, los rangos existentes son de 10mm~1m [14]. Dentro del propio sensor PSD, serán las ubicaciones y resoluciones de los píxeles más cercanos y lejanos los que impongan los límites, junto con el aumento óptico del sistema. La resolución del sensor de triangulación dependerá del tamaño de los píxeles de detección, así como del tamaño del rayo láser incidente. [15] Así pues, la resolución más alta se encontrará en los píxeles más cercanos a la distancia mínima de detección.

Las ventajas más importantes de este tipo de sensores es que ofrecen una medición rápida (de decenas o cientos de kHz) a un precio relativamente bajo. Además, al ser capaces de escanear la posición del punto láser en el plano del objeto, son capaces de detectar la forma del mismo. [14] [16] [17]

Por otra parte, este tipo de sensores tienen varias limitaciones:

- a) Su rendimiento baja considerablemente en objetos claros y transparentes.³
- b) La propia geometría del sensor necesita de un ancho mínimo en el sensor para proporcionar la distancia transmisor-detector. Este hecho hace que sea difícil la medición de objetos a través de aberturas estrechas o en espacios limitados.

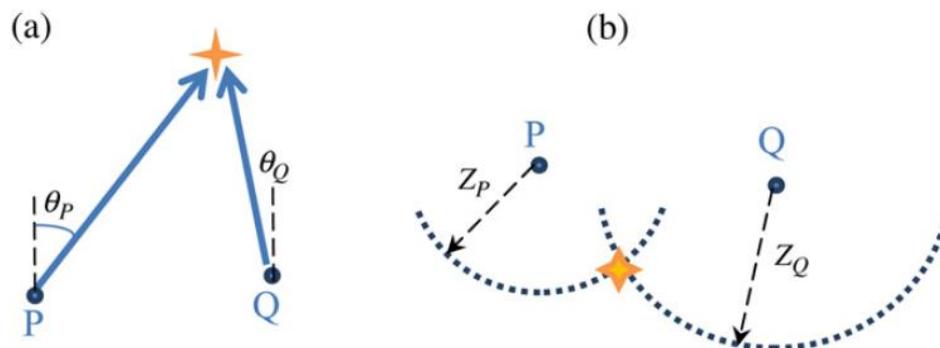


Fig. 2.9.- Objeto se encuentra en la intersección entre dos rectas y dos arcos. a) Triangulación basada en las medidas de los ángulos θ_P y θ_Q a partir de los puntos de observación P y Q, conocidos. b) Triangulación basada en las medidas de los ángulos Z_P y Z_Q a partir de los puntos de observación P y Q, conocidos.

3. Sensores de tiempo de vuelo (ToF: Time-of-Flight):

Otro de los métodos más usados para realizar las mediciones de las distancias es el denominado “time-of-flight” (tiempo de vuelo), donde la distancia se obtiene enviando ondas electromagnéticas al objeto en cuestión, y midiendo después el tiempo que tardan las ondas en viajar del sensor al objeto y viceversa. [18] Por norma general, estos sensores usan pulsos de luz – de unos nanosegundos de anchura- para medir dicha distancia. (Fig. 2.10.a.)

³ Debido a la poca visibilidad del punto láser sobre estas superficies, materiales como vidrio, agua o líquidos están desaconsejados para esta técnica de medición.

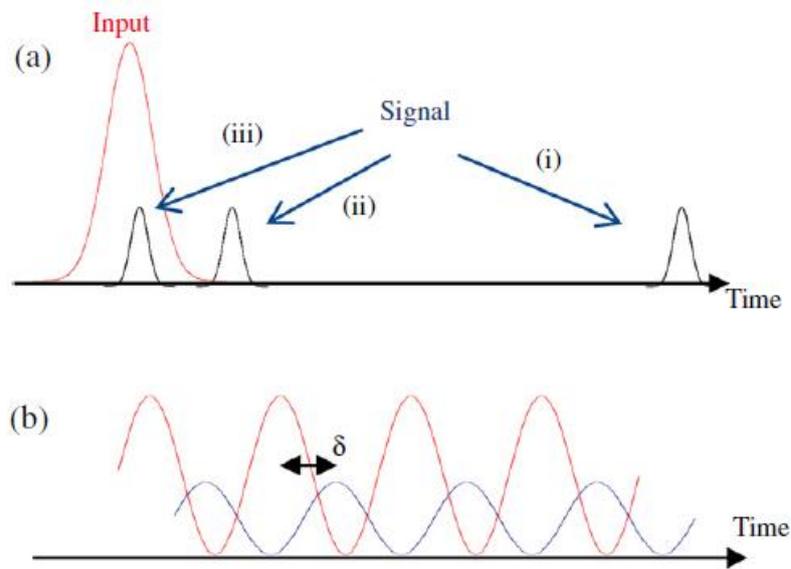


Fig. 2.10.- a) Las medidas de "time-of-flight" muestran tres escenarios distintos: (i) demasiado largo, (ii) similar y (iii) demasiado corto, en comparación con la anchura de pulso emitido. Para pulsos de nanosegundos, estos casos corresponden, respectivamente, a distancias $> 50m$, algunos metros y $< 1m$.
b) Esta técnica, modulada en intensidad, es un método alternativo óptimo para las distancias similares a la anchura del pulso. El cambio de fase se indica con la flecha de dos puntas.

Un enfoque alternativo para la iluminación de pulso es usar una luz continua modulada en amplitud (ver Fig. 2.10.b) [19] [20], aunque las distancias también se pueden medir por luz modulada en frecuencia (en vez de amplitud). Para distancias de mayor resolución que 50m, la técnica de sensado dominante es la de pulso modulado, donde la precisión de la medida dependerá de la precisión de la propia electrónica usada.

La distancia máxima de alcance dependerá a su vez de la potencia del láser, la sensibilidad del detector, la reflectividad y la visibilidad del objeto. Por su parte, la relación señal/ruido obtenida también jugará un papel importante en dicha distancia.

Otro caso particular de esta técnica de sensado es la detección de la velocidad del tráfico. Aun así, son los sensores acústicos los que se usan de manera habitual en detección robótica y en sensores para estacionamiento y marcha atrás en los vehículos, donde no es requerida una precisión tan alta y es necesario un coste relativamente bajo para su implementación.

4.- Sensores confocales:

El principio confocal se basa en utilizar la óptica para enfocar la luz que emana de una abertura sobre el objeto que se desea medir y detectar la luz dispersada desde el objeto de vuelta a la abertura original. [21] [22]

Las aplicaciones más habituales para un sensor de este tipo son las mediciones de desplazamiento y perfilados de superficie, es decir, aplicaciones en las cuales se realizan mediciones de cambio de distancia cuando el sensor se traslada lateralmente con respecto al objeto.

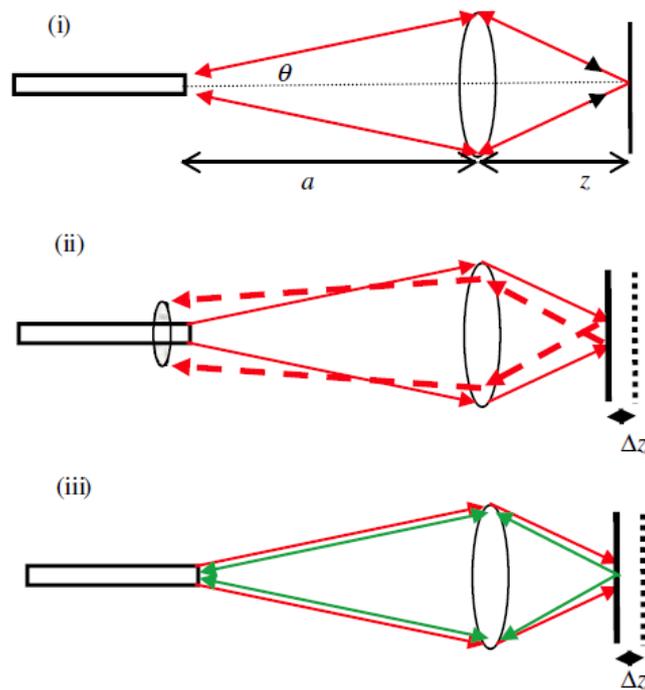


Fig. 2.11.- El principio de detección de fibra óptica monocromática y policromática confocal: (i) Sensor confocal monocromático con un objeto en el plano de la imagen (caso para el cual la señal obtenible es máxima).

(ii) Sensor confocal monocromático con un objeto desplazado del plano de la imagen. [23]

(iii) Sensor policromático donde la posición del plano de imagen varía con la longitud de onda y una longitud de onda diferente satisfará la geometría confocal para cada posición del objeto.

La señal obtenida en la apertura tras la interacción con el objeto varía de una manera notable con el desplazamiento de éste. Por ello, estos sensores permiten realizar medidas muy precisas –con resolución de varios micrómetros– cerca del plano del objeto. [24] [25] [26] [27]

E incluso, con un sistema de lentes adecuado, esa resolución puede mantenerse en rangos de varios milímetros de distancia.

Por el contrario, en muestras o materiales con baja reflectividad se obtendrá una relación más baja entre señal y ruido (*SNR, Signal to Noise Ratio*), que en materiales altamente reflectantes. Esto dificultará la obtención de medidas fiables, aunque puede corregirse con tiempos de medición más largos y/o promedios de señal.

5.- Sensores Interferométricos:

En la configuración típica del interferómetro de Michelson se utiliza un láser altamente coherente para medir los desplazamientos de un objeto por debajo de la propia longitud de onda (en el rango nanométrico, del orden de 1/100 de la longitud de onda). [28]

Además, la interferometría es más apropiada para la monitorización de desplazamientos que para la medición de distancia absoluta, aunque la longitud de onda múltiple y la interferometría de exploración también permiten la medición de distancia absoluta. Las técnicas para este tipo de sensores generalmente requieren una configuración óptica altamente estable. A pesar de ello, los sensores de distancia interferométricos comercializados con éxito han sido basados principalmente en fuentes de baja coherencia ⁴ (Fig. 2.12).

En un primer momento [29] [30] para esta técnica se acuñó el término “interferometría de luz blanca” (WLI, White-Light Interferometry). Aun así, más recientemente y desde el sector biosanitario, se ha extendido el término “tomografía de coherencia óptica” (Optical Coherence Tomography, OCT). [31] [32] [33] Por norma general, hoy en día se usa el término WLI para definir la interferometría en el dominio del tiempo y el término OCT para definirla en el dominio de la frecuencia.

La técnica WLI combina las salidas de los dos brazos del interferómetro. Si la diferencia de trayectoria de los dos brazos es mayor que la longitud de coherencia de la fuente de baja coherencia, entonces no se registrará variación alguna en la salida total a medida que varíe la longitud del brazo de referencia.

⁴ Las aplicaciones comercializadas usan una baja coherencia temporal (combinada con una alta coherencia espacial) para obtener una alta resolución espacial, al reducir el moteado láser (laser speckle) en superficies rugosas o fenómenos de interferencia similares.

Sin embargo, si la diferencia entre trayectorias es menor que la longitud de coherencia, se medirán las variaciones sinusoidales típicas en la salida a medida que se varíe la distancia del brazo de referencia, registrándose el contraste máximo cuando las longitudes de ambas trayectorias estén completamente equilibradas (fase constructiva) (ver Fig. 2.12)

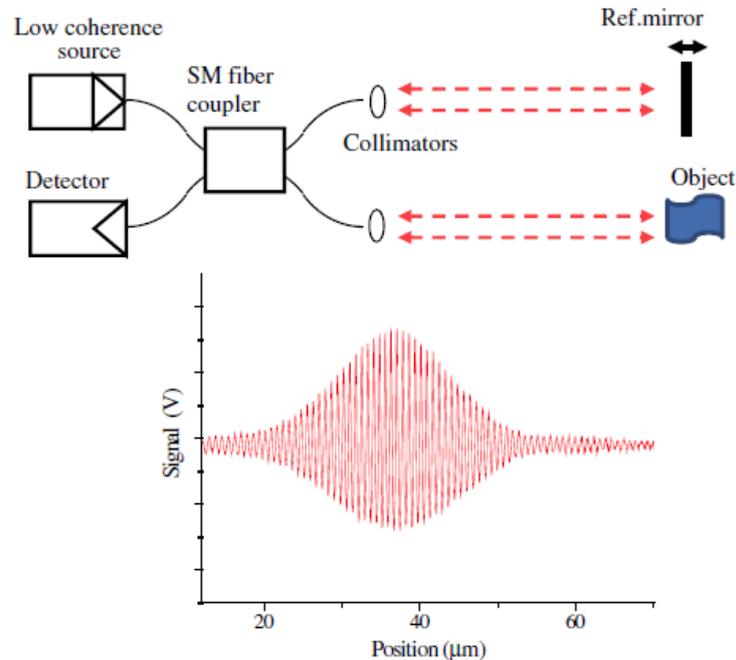


Fig. 2.12.- Configuración básica para la interferometría WLI y típico patrón de interferencia en función de la referencia del movimiento del brazo (Fuente de baja coherencia).

La fuente de luz puede ser un diodo cercano al espectro IR o bien una fuente incandescente, aunque cabe decir que los diodos superluminiscentes (SLED) acoplados a la fibra óptica recientemente desarrollados han ofrecido muy buenos resultados para esta aplicación.

Dado que los sistemas WLI requieren un escaneo completo del reflector de referencia para determinar la distancia de un solo objeto, es una técnica lenta, que la hace por tanto adecuada solo para medir distancias o desplazamientos de objetos estáticos.

Además, aunque estos sistemas pueden llegar a determinar los desplazamientos con una precisión de una fracción de una longitud de onda [29] [34] en la práctica otras cuestiones como la relación señal/ruido y la precisión del escaneo de referencia a menudo limitan la precisión a alrededor de 1μm.

Propuesta de profilómetro óptico láser para la caracterización de paneles de madera CLT utilizados en construcción

Para que esta técnica funcione de manera precisa, será necesario asegurar que los dos brazos del interferómetro estén siempre a temperaturas idénticas. En caso de que este término no pudiera asegurarse, deberían buscarse otros métodos para implementar el diseño WLI. [35]

Una alternativa para escanear la posición del reflector de referencia es escanear en el dominio de la frecuencia (longitud de onda) – el OCT, para el cual habrá que:

- i) Usar una fuente de banda ancha como en WLI y analizar el contenido espectral con filtros o monocromadores.
- ii) Usar una fuente de banda estrecha que se pueda ajustar en un rango amplio [36]

En la práctica, la precisión en la distancia del escaneo con OCT estará limitada por el rango de frecuencia y, por lo tanto, los sistemas OCT rara vez ofrecen mejores precisiones de 5 μ m. Aun así, su principal ventaja sobre los sistemas WLI es su mayor velocidad de escaneo, lo que ha logrado que, por ejemplo, se haya generalizado el uso de los sistemas OCT en oftalmología para exámenes oculares. [37] [38]

El sistema OCT también es utilizado en cardiología para obtener imágenes de las arterias bloqueadoras de la placa [39] y en oncología, ya que la OCT basada en luz infrarroja puede penetrar en la piel, atravesando tejidos hasta localizar ciertos tipos de cáncer. [40].

Ensayo de Delaminación (UNE-EN 16351):

Este ensayo, que sirve para evaluar la calidad de encolado entre las capas y consiste en la generación de tensiones internas en la madera mediante la inducción de un fuerte gradiente en el contenido de humedad, está presente en todas las normas de productos estructurales, tanto de los laminados como de los encolados.

Debido a este cambio de volumen a causa de la humedad, en el panel se crean tensiones de tracción perpendiculares al plano de encolado. En caso de darse un encolado defectuoso en la pieza, aparecerán las delaminaciones –separaciones de los planos de encolado- entre las capas del panel CLT (Fig. 2.13).



Fig. 2.13.- Detalle de probeta de CLT delaminada. Se observa la separación entre capas tras un ensayo de delaminación UNE-EN 16351 (imagen, cortesía de Egoín S.A.).

Este fenómeno indeseado es categorizado normalmente según lo siguiente [41]:

- La medición de las longitudes en relación a la longitud total de líneas de cola evaluadas (% de delaminación total y % de delaminación media).
- La medición del % de arranque por madera (% de superficie separada, en la que la rotura se ha producido por la madera y no por el adhesivo).

Análisis de riesgos:

Analizados los posibles riesgos que pudiera acarrear la decisión de implantar esta metodología en la línea productiva, podría considerarse el coste económico que supondría rechazar muestras o piezas de madera acabada óptimas que tras pasar por el sistema óptico fueran mal categorizadas por algún error no considerado en el algoritmo, por la aparición de ruido inesperado en la medición o debido a un mal ajuste en la unidad de clasificación mecánica.

Aun así, existen pocos riesgos que tengan una influencia sobre el proyecto realmente. Entre los ya mencionados, el error en la caracterización de los parámetros de madera, que acabaría produciendo piezas y paneles que finalmente y una vez establecidas en la instalación, generarían problemas estructurales como ocurría previamente, acarreando un coste económico significativo debido a la política de mantenimiento e indemnización para con el cliente.

Descripción de la solución propuesta. Diseño básico:

La solución propuesta y su diseño van a ser explicados con más detalle en los apartados siguientes, razonando cada una de las consideraciones tomadas. Aun así, a modo de resumen general:

- Se usará la medición por triangulación láser, debido a su buena relación precisión/coste y ser una técnica de medición sin contacto, ideal para incluir dentro del proceso productivo.
- Se medirán, tras crear una estructura adecuada para ello en el laboratorio, todas las muestras de madera CLT facilitadas por la empresa Egoín S.A., etiquetadas como “Calibrado” o como “Cepillado”.
- Se diseñará un código en lenguaje Python (software libre) que permita extraer toda la información posible en relación a los parámetros de rugosidad superficial de la madera.
- Se implementarán elementos estadísticos para corroborar y acotar los resultados obtenidos tras la medición, pudiendo distinguir entre comportamientos esperables, imprevistos o “outliers”.

METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

Descripción de tareas, fases, equipos y procedimiento:

Para llevar a cabo este proyecto, se ha dividido y estructurado en varias fases la metodología de trabajo. Se ha planificado cada una de las tareas, así como el orden de las mismas. Como se verá en el siguiente apartado con el diagrama de Gantt, se estableció un orden y una prioridad para todas las fases, subdividiendo algunas de ellas en otras tareas menores y más básicas.

Una vez organizado el proyecto al completo, se definieron los objetivos a cumplir dentro de cada una de las fases, estimando unos plazos concretos para una consecución adecuada del mismo. Las tareas principales se describen a continuación:

- Diseño de la solución técnica.
 - Discusión general acerca del acercamiento más conveniente a la solución planteada para la empresa Egoín S.A. Tras visitar las instalaciones de la empresa, se procedió a establecer un contexto en el cual fuera posible aplicar el proyecto y la futura solución para la misma.

Después, se realizaron los primeros bocetos de la solución aportada, junto con los elementos que deberían considerarse para llevarla a cabo. Finalmente, se determinó el hardware a utilizar para obtener las medidas, así como el software y demás elementos que han sido necesarios a lo largo de todo el trabajo.

- Gestión de compras.
 - Una vez establecida la infraestructura a utilizar, se procedió con el diseño (con programa de CAD, Autodesk Fusion 360) y la fabricación de la misma (estructura con perfilera de aluminio, sistema de triangulación láser µε ILD2300).
- Instalación y montaje de elementos.
 - Después, a medida que fueron llegando los elementos, se procedió con el montaje y la calibración de los mismos, junto con la instalación de los drivers y software preciso para su uso.

Propuesta de profilómetro óptico láser para la caracterización de paneles de madera CLT utilizados en construcción

- Realización de pruebas en el laboratorio.
 - o Más tarde, se siguió con la primera adquisición secuencial de datos. Estableciéndose tramos de medida en las muestras de madera facilitadas por la empresa Egoin S.A. –de calibrado y cepillado-, tanto transversales como longitudinales.

Lograda una primera base de datos aceptable con la que trabajar, se comenzó desarrollando un programa software a medida (mediante lenguaje Python) con el que tratar los datos obtenidos. Así, se ha hecho posible el analizar y filtrar perfiles, graficando tramos, rugosidades y demás características de la superficie de la madera.

- Evaluación de los resultados.
 - o Tras un análisis preliminar de las medidas realizadas y posibles puntos de mejora, se procede con la repetición de la toma de medidas, esta vez buscando expresamente evitar los errores surgidos durante la primera toma de medidas.

Por su parte, se optimiza el código desarrollado, haciéndolo más ágil y legible. Por último, se corrigen por última vez ciertas medidas que siguen sin mostrar el comportamiento esperado en ciertos puntos concretos.

- Conclusiones.
 - o Se establece un resumen general de los beneficios aportados con la realización de este proyecto, comparándolo con el estado del arte de los métodos existentes hoy en día para el tratamiento y clasificación de madera.

Por otra parte, a la hora de elegir el equipo y el procedimiento de medición se hicieron consideraciones importantes.

Los sistemas de medición de rugosidad, como se ha explicado previamente, se dividen en dos grupos: los denominados “contact” (contacto directo entre medidor y superficie) y los “non-contact” (sin contacto directo). Ambos métodos tienen sus pros y contras, por lo que la elección del método depende de su aplicación. Por ello, se analizaron las ventajas e inconvenientes de cada uno de los sistemas en relación al proyecto:

Elección del sistema de medición:

Medición mediante Stylus (Aguja/Puntero) (Contact):

Ventajas y Desventajas:

El uso de la aguja de medición da una medición fiable, ya que el “stylus” repasa físicamente la superficie de la muestra. Además, se ha usado como un elemento fiable de medición a lo largo de mucho tiempo.

Aun así, debido a su corto recorrido, este método resulta limitado para realizar medidas en varias secciones, ya que obtiene una cantidad reducida de información. Además, ofrece una mala precisión sobre muestras adhesivas o blandas. También, salvo ensayos puntuales en un entorno controlado, resulta difícil una colocación inicial precisa de la probeta de medición.

Por último, cabe señalar que, debido al diámetro físico del propio stylus, ciertos detalles menores de la superficie se perderán, pudiendo llegar a ofrecer éstos últimos información relevante para la rugosidad del perfil.

Interferómetros de escaneo por coherencia (Non-contact):

Ventajas y Desventajas:

La mayor ventaja de este tipo de medidores es la realización de medidas rápidas sobre las muestras, permitiendo medidas sub-nanométricas en superficies suaves, con bajo aumento.

Por el contrario, presentan problemas sobre superficies rugosas y con muestras con cambios sustanciales en el brillo. Por ello, un bajo contraste hace difícil localizar las áreas de medida, obteniéndose una baja resolución.

Microscopio láser (Non-contact):

Ventajas y Desventajas:

Estos dispositivos muestran un amplio grado de sensibilidad, permitiendo un análisis óptico incluso para superficies inclinadas. Además, muestra una alta resolución en el plano XY, proporcionada para imágenes claras y de alto contraste. Aun así, es incapaz de obtener medidas sub-nanométricas.

Microscopio digital (Non-contact):

Ventajas y Desventajas:

Permite muchos tipos de observaciones (en distintos materiales y condiciones), pero a un nivel simplificado de medida. Debido a esto, es incapaz de medir irregularidades sub-nanométricas, obteniéndose una resolución muy baja.

Por ello, no es aconsejable su uso para medir la rugosidad (roughness) de un perfil de muestra, tan solo para medir su ondulación (waviness).

Microscopios de proximidad o barrido (Non-contact):

Ventajas y Desventajas:

Este sistema es usado para obtener medidas sub-nanométricas en las superficies. Aun así, suelen mostrar dificultades a la hora de colocar correctamente el puntero sobre el perfil, con un proceso de obtención de medida lento. Resulta poco adecuado para medir escalas e irregularidades mayores, como las micrométricas.

Ventajas de la medición láser frente a métodos con contacto:

En cualquier método de medición por contacto, a punta del Stylus tiene un cierto diámetro, lo que hace difícil la medición de pequeños cambios en la rugosidad superficial de la muestra.

Es decir, el tamaño del propio puntero dificulta su utilización en lugares más pequeños que el diámetro del mismo, obviando por tanto ranuras, rugosidades y detalles pequeños en la superficie del material que pudieran llegar a ser importantes en el resultado final del perfil medido (Fig. 3.1).

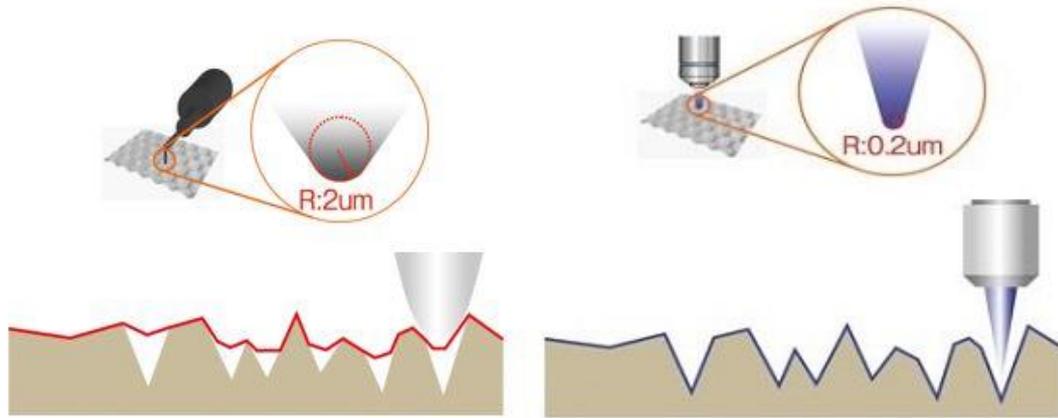


Fig. 3.1.- Comparación medición por contacto con Stylus vs medición sin contacto con haz láser. [42]

Al usar un puntero láser, por el contrario, se actúa con un diámetro de haz de luz mucho más reducido que en el caso anterior. De esta forma, el medidor es capaz de obtener un perfilado mucho más detallado, en el cual se podrán observar muchos más detalles que con las técnicas por contacto.

Además, en caso de que fuese necesario medir una muestra categorizada como “blanda” esta podría verse alterada por la acción de contacto con la aguja del puntero, que modificaría por ello el perfil medido a su paso.

Por todo ello, una vez la medición por contacto quedó descartada, en este proyecto se consideró que la opción óptima debía ser una medición láser del perfil de las muestras de madera, ya que así no se dañaría la superficie y se obtendría una mayor cantidad de detalles tras realizar el perfilado.

De hecho, dado que el proyecto está enfocado en la mejora del proceso productivo en línea de fabricación de la empresa, otro tipo de medidores sin contacto quedaron descartados como una posible solución del sistema.

La medición por triangulación permite, en un espacio reducido, la obtención de una alta cantidad de datos con una alta frecuencia de muestreo. Dado además que el sistema aquí diseñado va a ser implantado en una cadena de producción, sistemas con una lenta adquisición de datos o especialmente sensibles a vibraciones o ruido ambiental también fueron descartados.

Diseño de la Carcasa deslizante y la Estructura de soporte para la cabeza láser:

Para llevar a cabo la toma de medidas dentro del laboratorio, se llevaron a cabo dos procesos en paralelo, como más tarde se verá en el diagrama de Gantt, encuadrados dentro de la “gestión de compras” del material.

Por un lado, se ha contactado con MungiMatik S.A. para la fabricación de una pequeña estructura metálica sobre la cual fijar el equipo de medida. Formada por perfiles de aluminio extrudidos, una vez fijada sobre la mesa óptica, ha dotado de estabilidad al equipo de medida.



Fig. 3.2.- Estructura de MungiMatik S.A., una vez finalizado su montaje.

Por otro lado, se ha diseñado mediante el programa de CAD Autodesk Fusion360 un modelo de carcasa para la sujeción de la cabeza láser optoNCDT-2300 sobre la estructura de aluminio. En primer lugar, el diseño ha tenido en cuenta que la carcasa debe deslizarse sobre un perfil de 20x20mm. Tal y como se aprecia en la imagen inferior, aprovechando la geometría del perfil, se ha conseguido un guiado fiable de la carcasa (representado en color naranja), lo que permitió posicionar con precisión el sistema respecto de la muestra.



Fig. 3.3.- Perfil de MungiMatik (20x20mm), vista isométrica del mismo y sección de la guía de la propia carcasa.

Propuesta de profilómetro óptico láser para la caracterización de paneles de madera CLT utilizados en construcción

En la imagen inferior se muestra la carcasa final, primero sin la tapa superior, una vez acabado el proceso de diseño. Se observa también en la imagen de la derecha la cabeza láser (en color naranja), además de los tres pasadores específicos de métrica M4.

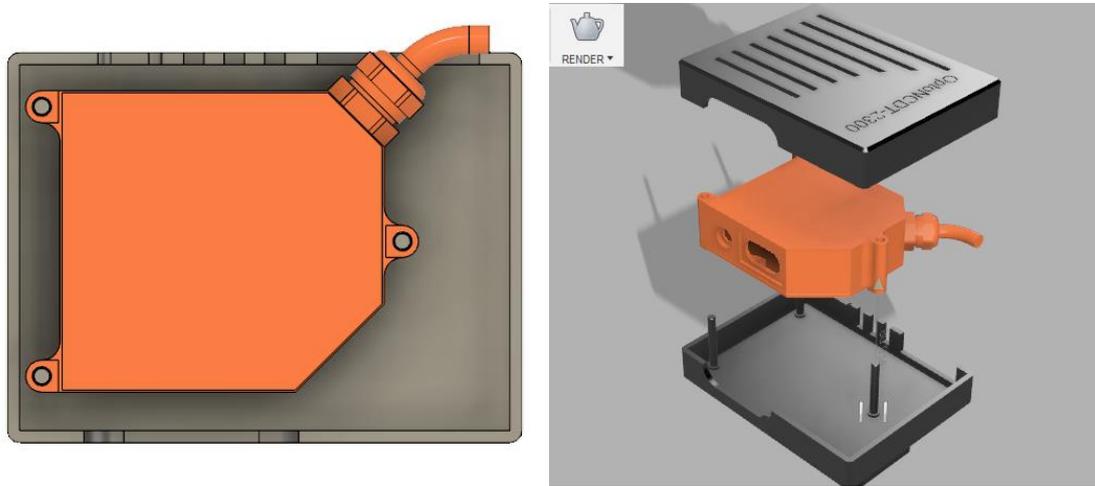


Fig. 3.4.- Imagen CAD de Fusion360 del montaje de la carcasa (gris) junto con la cabeza láser (naranja).

Además de las correspondientes sujeciones -guía en el lateral para colocarla sobre el perfil- y agujeros para cables, indicadores LED y la ventana de medición, se añadieron ranuras de ventilación ya que, tras un uso prolongado durante las pruebas en el laboratorio, la cabeza láser alcanzaba temperaturas relativamente altas.

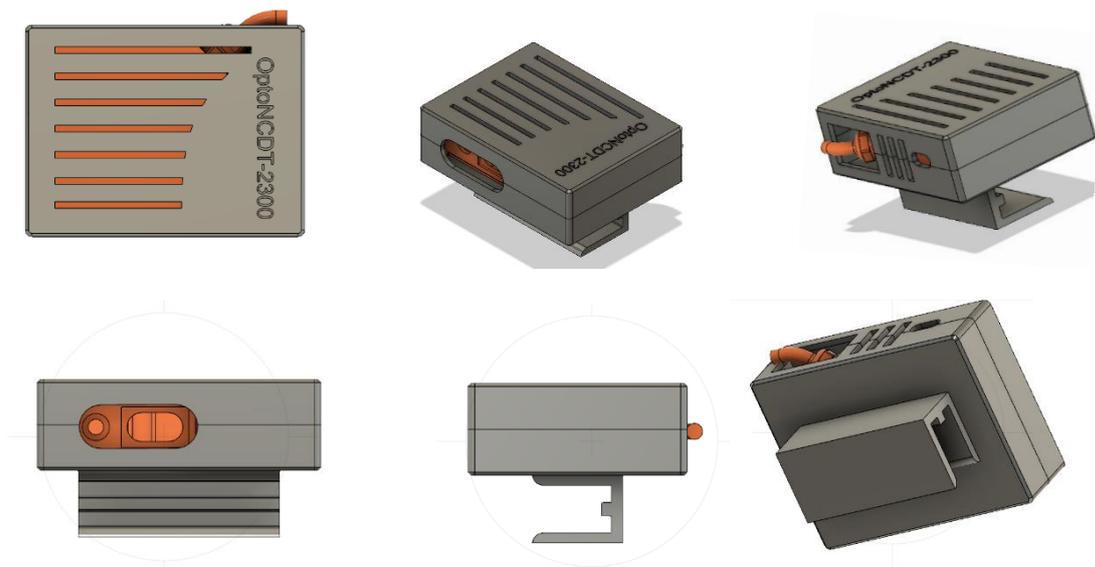


Fig. 3.5.- Diferentes perspectivas y detalles de la carcasa realizada en Fusion 360.

Diagrama de Gantt:

A continuación, se muestra el diagrama de Gantt del proyecto, donde las tareas realizadas a lo largo del mismo se muestran de manera clara y en orden cronológico. El protocolo seguido para la consecución de los objetivos queda esquematizado en la siguiente tabla y gráfica, detallando así las fases principales descritas en el apartado anterior, como son el diseño, la instalación de elementos, la realización de pruebas o la evaluación de los resultados:

Actividad	Nombre	Fecha de Inicio	Duración	Fecha de Terminación
1	Diseño de la solución técnica	11/02/2020	35	17/03/2020
2	Contextualización	11/02/2020	7	18/02/2020
3	Primeros bocetos	18/02/2020	11	29/02/2020
4	Elección del hardware y elementos	29/02/2020	17	17/03/2020
5	Gestión de compras	17/03/2020	12	29/03/2020
6	Instalación y montaje de elementos	29/03/2020	14	12/04/2020
7	Realización pruebas laboratorio	12/04/2020	42	24/05/2020
8	Toma de medidas	12/04/2020	25	07/05/2020
9	Programación del algoritmo software	07/05/2020	17	24/05/2020
10	Evaluación de resultados	24/05/2020	53	16/07/2020
11	Nueva toma de medidas	24/05/2020	17	10/06/2020
12	Optimización del algoritmo	10/06/2020	21	01/07/2020
13	Corrección de medidas	01/07/2020	15	16/07/2020
14	Conclusiones	16/07/2020	21	06/08/2020
15	Redacción del Documento	06/08/2020	21	27/08/2020

Fig. 3.6.- Lista de tareas del proyecto.

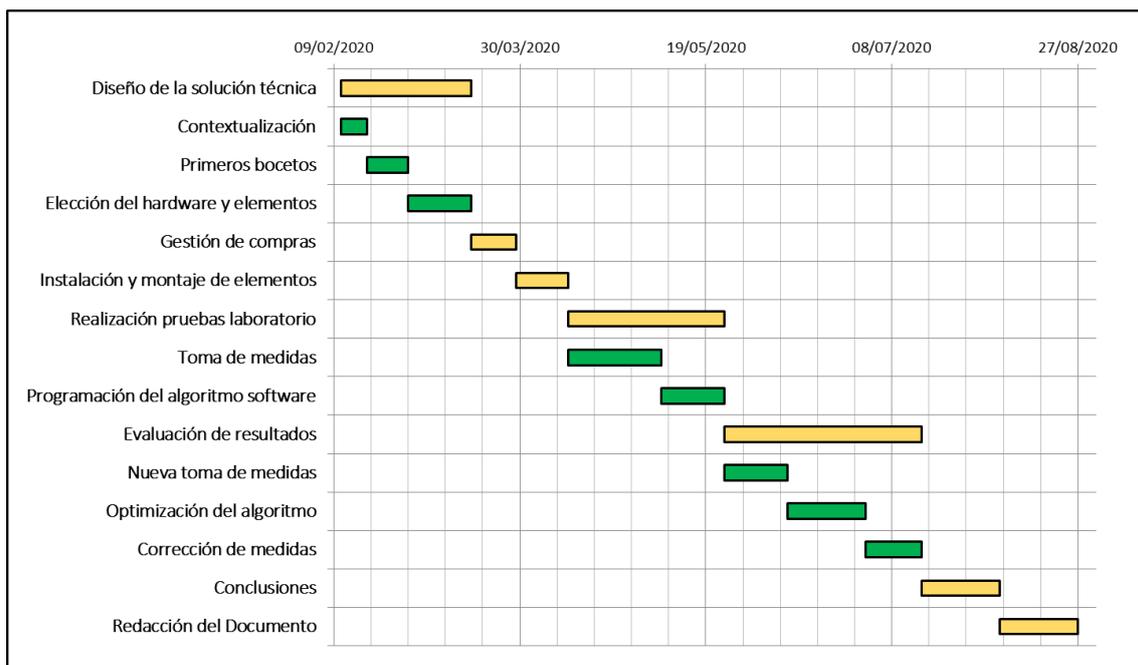


Fig. 3.7.- Diagrama de Gantt del proyecto.

Cálculos y algoritmos:

Hipótesis y planteamiento sobre componentes de rugosidad y ondulación:

Filtrado de la medida:

El acabado superficial influye en diferentes características, como son el desgaste, la estanqueidad, el comportamiento a fatiga, adherencia de recubrimientos, aspecto estético, etc. [43]

A la hora de evaluar el acabado superficial de una pieza, se distingue entre rugosidad y defectos de forma. Éstos se diferencian en el espaciado de la desviación en la superficie real, es decir, en la frecuencia de dicha perturbación. A medida que la frecuencia aumenta, se va desde defecto de forma hasta rugosidad pura.

Entre los defectos de forma más comunes en piezas se encuentran la inclinación o la falta de planitud, lo que a la postre supondrán una falta de ajuste y holguras, entre otros. En cambio, la rugosidad afecta a la superficie en parámetros como el rozamiento y el desgaste.

El perfil real de la muestra es el resultado de la intersección de la superficie de la pieza de mecanizado y un plano perpendicular a dicha superficie. En cambio, el perfil medido será el resultado del escaneo de este mismo perfil real con un puntero, sonda o medidor genérico que filtrará en cierto grado las rugosidades mínimas debido al diámetro de la punta de dicho medidor. [44]

Es decir, el perfil medido no será en ningún caso el perfil real, ya que éste se obtendrá como una señal envolvente aproximada y suavizada del original.

A la hora de medir los perfiles, deberán evitarse abolladuras, muescas o grietas en la medida de lo posible, ya que desvirtuarían la medición de la superficie real de la muestra. Si fuese necesario, podrían establecerse tolerancias según DIN-EN-ISO 8785, o bien UNE-EN-ISO 4287 (Fig.3.8).

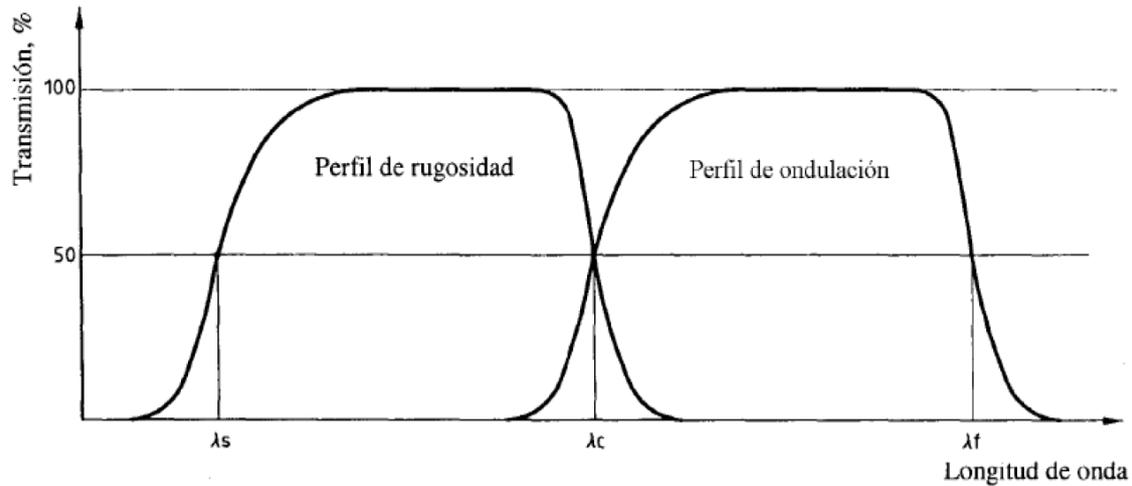


Fig. 3.8.- Esquema del filtrado en función de las respectivas longitudes de onda de corte: λ_s , λ_c y λ_f . (Se filtran los componentes frecuenciales menores que λ_s y mayores que λ_f , no requeridos). [45]

Por tanto, se distinguen tres tipos de perfiles: perfil primario, de ondulación y de rugosidad [44], siendo las desviaciones de ondulación las intermedias entre los defectos de forma y la rugosidad. La longitud de corte (L_c , o bien, caracterizada mediante λ_c como se verá más adelante) servirá para separar la ondulación y la rugosidad [43].

El perfil primario es el resultado obtenido tras un filtrado paso-bajo del perfil medido, en el que se filtrarán todas las frecuencias con una longitud de onda menor a λ_s . [44] Con ello, se consigue eliminar ciertos componentes considerados no relevantes, además del posible ruido que pudiera haberse obtenido en la medición de la superficie.

Los parámetros del perfil primario se designan como P y se evaluarán dentro de la propia longitud de muestreo, es decir, la longitud total del perfil de la superficie.

El perfil de rugosidad, por otra parte, es el resultado obtenido tras un filtrado paso-alto del perfil primario, una vez filtradas todas las frecuencias con una longitud de onda mayor a λ_c . [44] Es decir, se trata de un perfil compuesto por frecuencias cuya longitud de onda se encuentra comprendida entre λ_s (ya realizado en la obtención del perfil primario) y λ_c .

En este caso, los parámetros se designan como R y se evalúan dentro de la longitud de evaluación L_n , constando normalmente de 5 longitudes de muestreo L_r (según norma general), explicado en profundidad en los siguientes apartados. Ésta última (L_r) corresponderá a la longitud de onda de corte λ_c del filtro usado sobre el perfil de la superficie.

El perfil de ondulación, por último, es el resultado obtenido tras un filtrado paso-bajo y otro paso-alto en el perfil primario, con longitudes de onda de corte de λc y λf , respectivamente [44] (ver Fig. 3.8).

Los correspondientes parámetros se designan como W y se evalúan a lo largo de la longitud de evaluación L_n , de la misma manera en la que se procederá para el caso del perfil de rugosidad.

La longitud de onda de corte que permitirá distinguir entre ondulación o rugosidad se trata de manera general mediante filtros. La aplicación del filtro sirve para filtrar tanto las componentes frecuenciales de ondulación como las de errores de forma, permitiendo la obtención de perfiles de rugosidad a partir del perfil primario. Para eliminar las ondulaciones de éste, se aplica un filtro gaussiano (ISO 16610-21), cuya campana de probabilidad queda definida por $S(x)$:

$$S(x) = \frac{1}{\alpha * \lambda c} * e^{-\pi * \left(\frac{x}{\alpha * \lambda c}\right)^2}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} = 0,4697$$

La función $S(x)$ recorre los puntos obtenidos del perfil, aplicando el peso correspondiente al vector de datos medidos para obtener el nuevo perfil filtrado. En este caso, el filtro variará únicamente en función de λc , ya que el resto de parámetros están predefinidos. [46]

El filtro gaussiano ha reemplazado al filtro 2RC (electrónico) desde hace más de 10 años. Se trata de un filtro sin corrimiento de fase debido a su función de peso simétrica. [47] De hecho, dicha distorsión de fase es el mayor inconveniente que históricamente presenta este tipo de filtro, ya que genera problemas críticos alrededor de pequeñas muescas (por ejemplo, en betas de la madera).

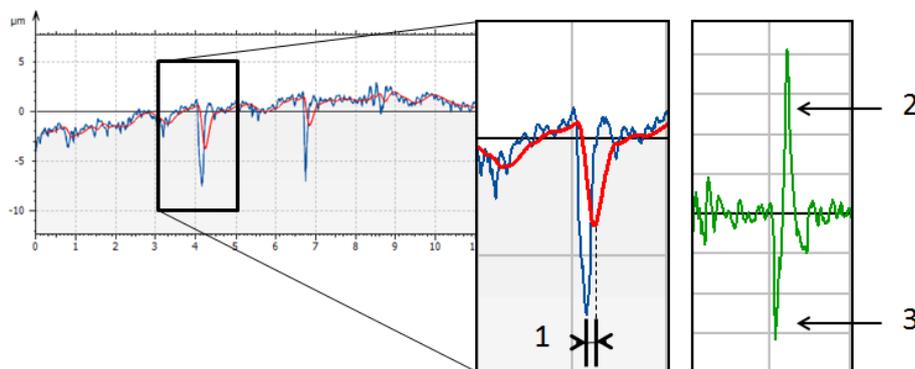


Fig. 3.9.- Desplazamiento de fase en filtro RC. La línea media sufre un retraso respecto del perfil real. En el perfil de rugosidad, este error produce picos (2 y 3) amplificados. [48]

De acuerdo con la norma, el filtro Gaussiano es el único filtro aplicable al estudio de acabados superficiales de forma estandarizada, siendo recomendado para determinar la línea media en estudios metrológicos. Éste no suprime de forma abrupta aquellas longitudes de onda menores a la de corte, sino que las atenúa de forma gradual.

Además, se trata de una función puramente matemática aplicada al perfil obtenido, evitándose así la distorsión de fase y corrigiendo los errores que otro tipo de filtros pudieran tener. [49] Aun así, debido a esta misma simetría de la función de peso, el filtro presenta problemas (distorsiones de borde) en los extremos de la señal [47] y frente a “outliers” que se den en el perfil.

Existen otros filtros, que no van a ser descritos en este trabajo, denominados como “filtros robustos”. Con ellos se corrigen los problemas previos, como filtros de Splines Cúbicos (que usan una constante para controlar el comportamiento del filtro y calcular así el perfil primario respecto del perfil real mediante curvas geométricas), filtros de Wavelets (reescalando y reconstruyendo la señal), filtros morfológicos (disco virtual que desliza sobre el perfil real) o filtros FFT (transformada y transformada inversa de Fourier).

Por otro lado, existen dos métodos al aplicar el método de filtrado gaussiano:

- Convolución discreta, en el dominio del tiempo.
- Transformada de Fourier, en el dominio de la frecuencia.

En este proyecto, se ha usado el proceso de convolución discreta (dominio del tiempo), consistente en el proceso de obtención de un perfil de ondulación $m(x)$ una vez hecha la convolución a todos los puntos del perfil obtenido [49]:

$$m(x) = z(x) * S(x)$$

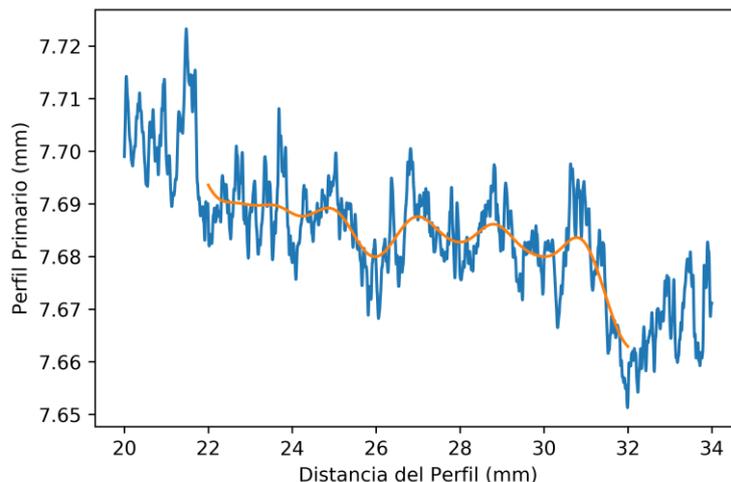


Fig. 3.10.- Segmento de Raw Data con perfil de convolución. (z(x) representado en azul y m(x) representado en naranja).

Una vez hecho eso, se obtendrá el perfil de rugosidad $r(x)$ para trabajar con él:

$$r(x) = z(x) - m(x)$$

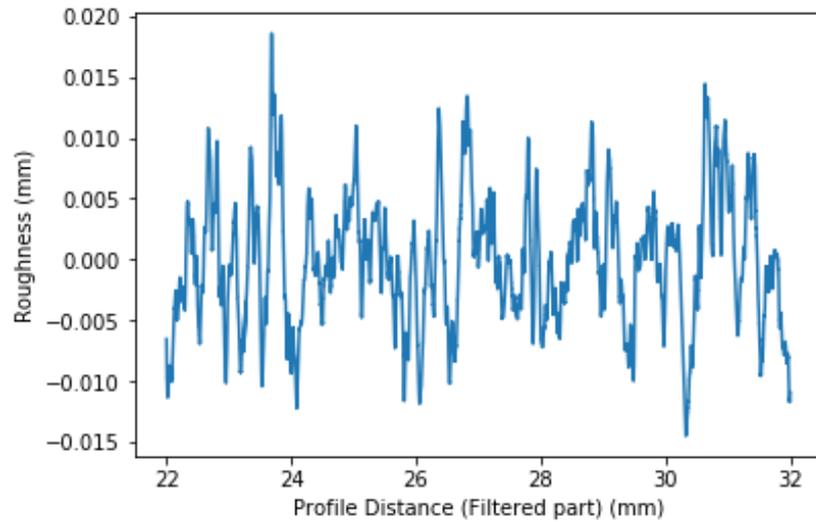


Fig. 3.11.- Segmento de rugosidad, normalizado respecto al filtro $m(x)$.

Dado además que dichos picos y valles surgen de manera aleatoria sobre la superficie del material, se hace necesario establecer unos parámetros estadísticos por los cuales cuantificar la rugosidad de la muestra analizada [43].

Parámetros de rugosidad:

Ra: La media aritmética de los valores absolutos de rugosidad. Es el valor más utilizado. Se miden las desviaciones del perfil respecto de la línea media de la rugosidad (Fig. 3.12). El valor de Ra apenas se ve afectado por la cantidad de picos o valles porque es un valor medio de todo el perfil.

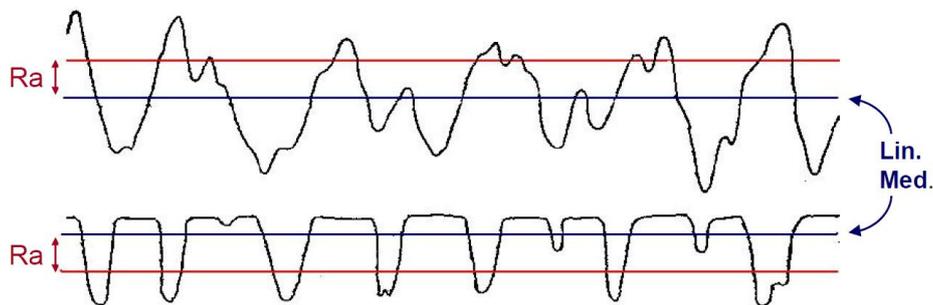


Fig. 3.12.- Perfiles con la misma Ra, pero con un comportamiento diferente [43].

De hecho, puede darse que perfiles con un mismo R_a muestren un comportamiento al rozamiento completamente distinto (Fig. 3.12). Es por ello que se trata de un valor con una importancia relativa y que precisa de un análisis más profundo con otro tipo de valores para caracterizar la rugosidad de la superficie.

Rmr: La componente material del perfil. Se tratará como la fracción de una línea imaginaria trazada a lo largo del perfil y a una altura (en μm) por encima de la línea media. Normalmente, se mide en porcentaje y se usa para superficies de guía y superficies que se mueven y deslizan unas contra otras [44].

RSm: La anchura media de pico. Se cuantifica el valor medio del ancho de los elementos del perfil obtenido, estipulando umbrales, tanto vertical como horizontalmente [44].

Rp: La altura máxima de pico. Altura del mayor pico localizado a lo largo de cada longitud de corte.

Rv: La profundidad máxima de valle. Profundidad del mayor valle localizado a lo largo de cada longitud de corte.

Rt: La altura total del perfil de rugosidad. Ésta muestra la diferencia entre la altura del pico más alto y la profundidad del valle más profundo a lo largo de cada longitud de corte. (*Denominado como R_{zi} , en Fig. 3.13.*)

Rz1max: La profundidad máxima de rugosidad. El mayor R_t de las longitudes de muestreo evaluadas. Este parámetro es usado normalmente para superficies en las que las desviaciones individuales tienen una influencia significativa en función de la superficie [44].

Rz: La profundidad de rugosidad media. El valor medio de los valores R_{zi} de las longitudes de muestreo evaluadas. Usada como la regla general para todas las demás superficies [44].

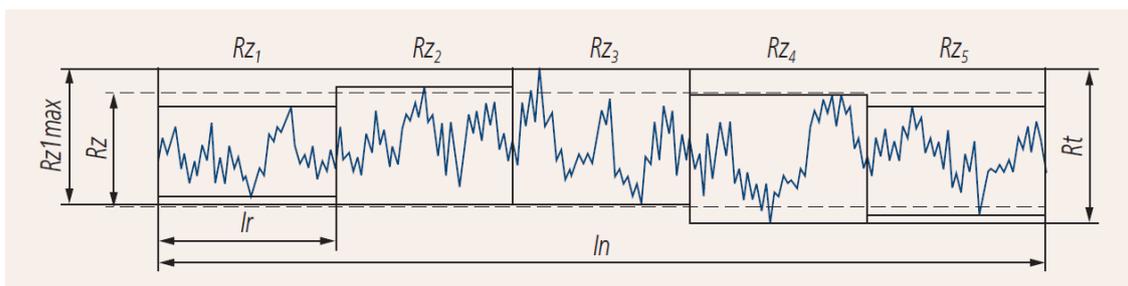


Fig. 3.13.- Altura total del perfil de rugosidad (R_t), profundidad de rugosidad media (R_z) y profundidad máxima de rugosidad (R_{z1max}). [44]

Como dato a tener en cuenta, los valores de medición de rugosidad varían –por norma general- en el rango de $\pm 20\%$. Es por ello que una sola medición podría no proporcionar toda la precisión de los parámetros tolerados.

Por tanto, en este proyecto se han tomado varias muestras de perfil en distintas zonas, así como diversas mediciones temporales en la misma zona [44], al fin de obtener la información suficiente que nos garantice unos valores de los parámetros de rugosidad del material lo más precisos posibles.

Desarrollo del Algoritmo:

Una vez establecidos de manera teórica todos los parámetros de rugosidad que se debían usar en la aplicación del proyecto, se desarrolló el código con el cual obtener los mismos. Usando la plataforma de software libre Anaconda (lenguaje Python), con todas sus herramientas de programación, especialmente Jupyter y Spyder, se escribió el código completo, mostrado íntegramente en el Anexo II.

En primer lugar, se procedió con el análisis de una muestra de madera CLT concreta. Es decir, se delimitó un tramo sin vetas ni cuerpos extraños en la superficie de la muestra de madera (cara B de la muestra “Calibrado”). Tras ello, se procedió midiendo la misma superficie en 5 momentos temporales distintos: momento cualquiera, un minuto más tarde, al día siguiente, al próximo en un momento cualquiera y al próximo un minuto después del anterior.

Gracias a ello pudo constatararse la estabilidad del método de obtención de datos, lográndose parámetros muy similares para todas las muestras, dentro del umbral de variación esperado.

Para llevar a cabo la toma de medidas sobre la superficie, se ha usado conexión Ethernet entre el equipo de medición y la terminal de control (ver Fig. 3.14). El cabezal láser, dentro de su rango hábil de actuación –en este caso, comprendido en una distancia de entre 30 y 40mm- mide mediante reflexión difusa la distancia al perfil de la muestra, devolviendo éste como una variación de altura del haz láser (ver Fig. 3.14).

Propuesta de profilómetro óptico láser para la caracterización de paneles de madera CLT utilizados en construcción

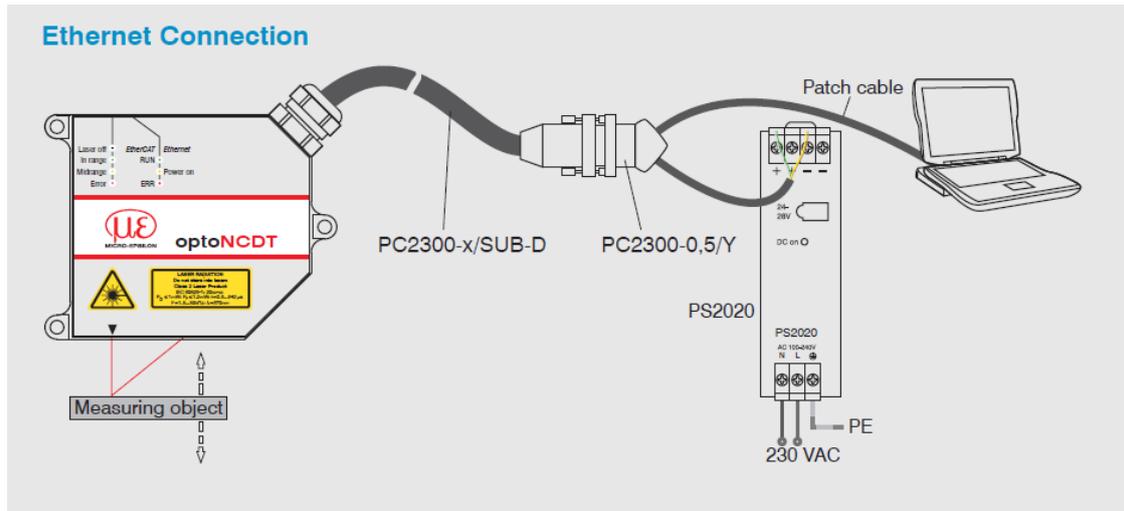


Fig. 3.14.- Configuración usada para el sistema de medición Micro-Epsilon. Incluye la cabeza, la fuente de alimentación e interfaz en el ordenador.

Una vez enfocado el láser sobre la superficie a medir, deben configurarse varios parámetros, como la frecuencia de medición (entre 20 y 40 kHz), el tratamiento previo de datos que hará el propio software del sensor antes de mostrarlos y/o guardarlos, etc. Tras ello, se procede con el desplazamiento de la plataforma sobre la que está el panel CLT, midiendo así su perfil.

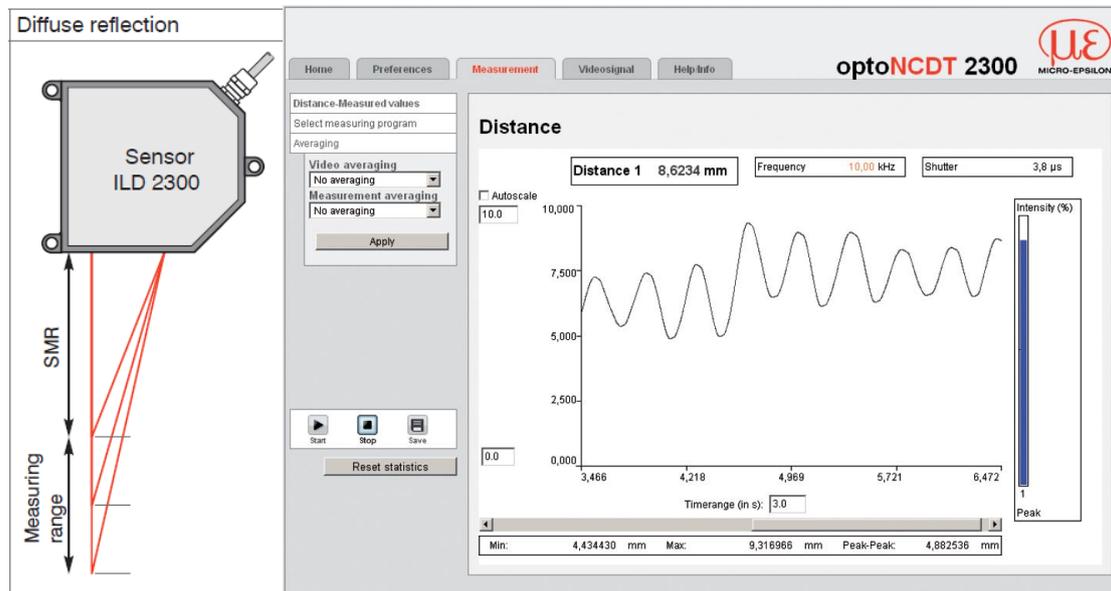


Fig. 3.15.- Interfaz del software ILD2300-10 de Micro-Epsilon.

Asegurado el método, se empezó a tratar los datos obtenidos, devueltos por el software desarrollado por el fabricante Micro-Epsilon en forma de archivo “.csv”. De todos los datos aportados por el archivo obtenido en cada uno de los barridos realizados sobre el perfil de la probeta, tan solo las dos primeras columnas resultaron relevantes: las columnas del tiempo de adquisición y la de distancia.

Finalmente, se logra una gráfica similar a la siguiente (Fig. 3.16), donde se muestra el perfil primario obtenido tras el paso del láser a lo largo de la muestra:

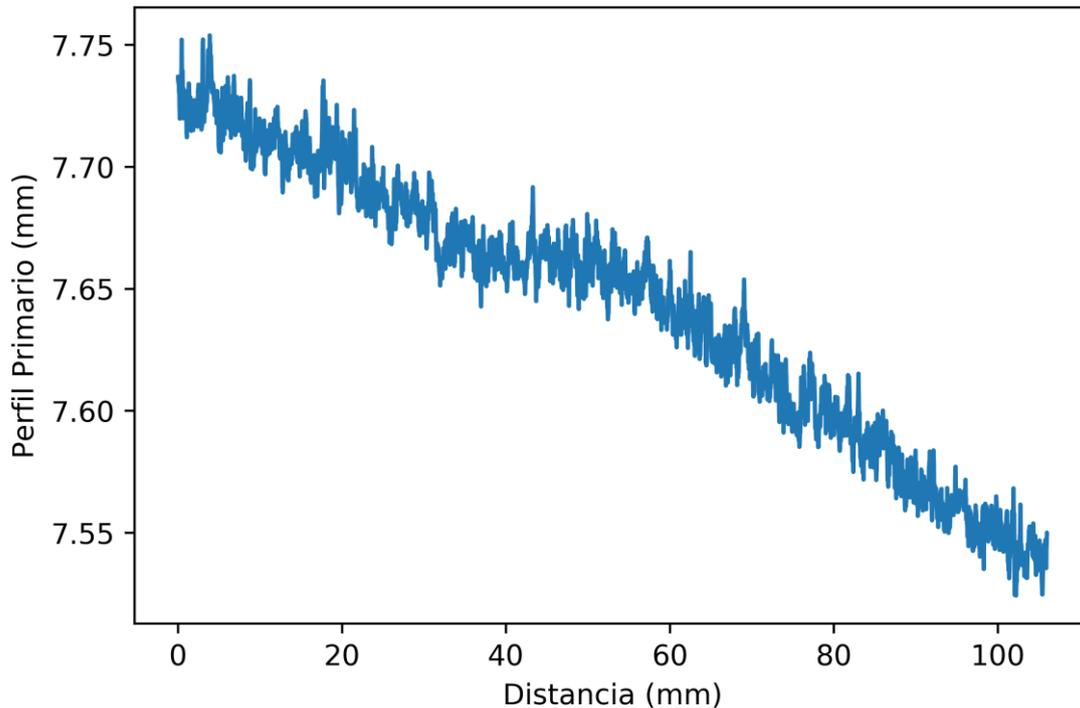


Fig. 3.16.- Perfil primario de muestra de Calibrado.

El siguiente paso ha consistido en aplicar el filtrado gaussiano para eliminar la ondulación de la muestra medida. Lo interesante de la aplicación de este filtro es el encontrar aquella longitud de onda de corte (λ_c) que permita separar la rugosidad y la ondulación de manera óptima, obteniéndose una rugosidad prácticamente “pura” con apenas componentes de ondulación.

Por ello, una de las variables del código es la propia longitud de onda de corte λ_c (denominada como *lambda_cut*), que permitirá optimizar el funcionamiento del código en función del tipo de madera, su método de fabricación, su tratamiento posterior y la aplicación que se quisiera dar al filtro gaussiano.

Éste, por su parte, trabajará en el rango $[-\lambda_c < x < \lambda_c]$, aplicando una matriz de pesos (Fig. 3.17) a cada uno de los puntos del perfil, proporcional a su distancia respecto del punto central. Este proceso iterativo es el que permitirá obtener un nuevo perfil equivalente, una vez “suavizado” el primario tras haber eliminado la rugosidad.

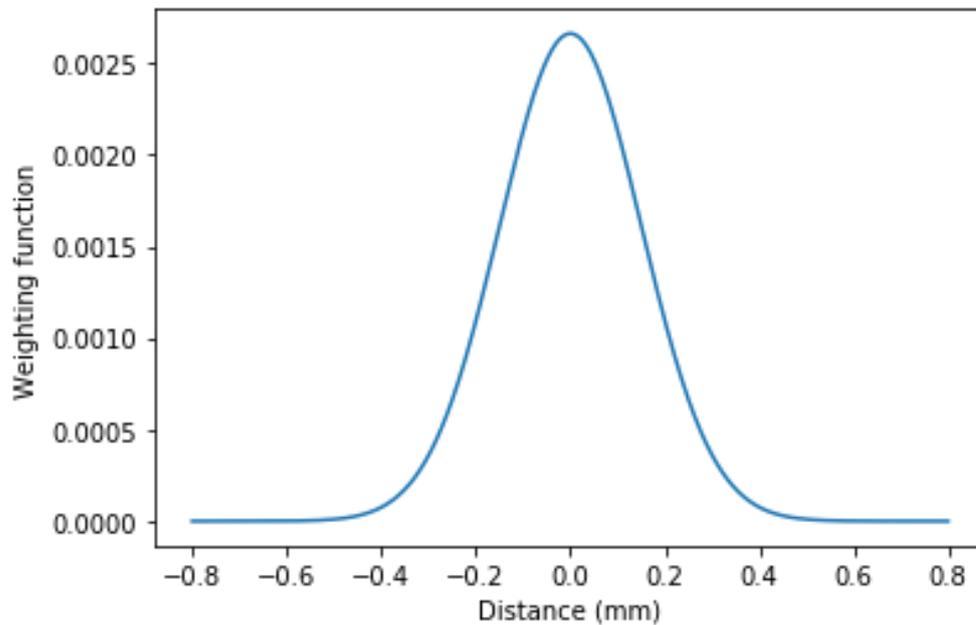


Fig. 3.17.- Matriz de pesos del filtro gaussiano, para una longitud de onda de corte de 0,8 mm ($\lambda_c = 0,8$ mm).

De la misma manera, la longitud de corte y de evaluación (ver Fig. 3.18) estarán relacionadas por norma mediante un número entero. En este proyecto se ha decidido que la longitud de evaluación equivaldrá a 5 veces la longitud de corte. Además, como se ha explicado en el apartado previo, no todos los parámetros de rugosidad se definen en el mismo tipo de intervalo, por lo que se han tenido que dividir los datos del perfil de la muestra en distintos subintervalos, todos ellos del mismo tamaño, en función de si se ha buscado analizar R_a y R_q (en la longitud de evaluación) o R_p , R_v y R_t (en la longitud de corte).

Además, como se verá más adelante, ha tenido que corregirse parte del código para solventar el inconveniente principal del filtro gaussiano: las distorsiones que se producen en los bordes por la propia operación de convolución.

Una vez dividido el perfil completo en varios subintervalos de la longitud adecuada, se han calculado los parámetros de rugosidad. Tramo a tramo, se ha aplicado el filtro gaussiano para separar los distintos componentes de onda, obteniendo tras ello tres vectores de datos diferentes: x_{subset} (nueva longitud del subintervalo, específica para evitar los efectos de borde), z_{low} (nuevo perfil de la muestra, una vez eliminada la mayor parte de rugosidad) y $z_{\text{roughness}}$ (el perfil de rugosidad del subintervalo).

Propuesta de profilómetro óptico láser para la caracterización de paneles de madera CLT utilizados en construcción

Gracias al vector “z_low” se puede cuantificar la falta de planitud, mientras que gracias al vector “z_roughness” se pueden cuantificar aspectos más detallados de la superficie, como la textura superficial.

Con ello, se logran varios conjuntos de datos, los cuales contienen los parámetros de rugosidad analizados a lo largo de cada uno de los subintervalos del perfil. Al dividir éste en diferentes longitudes, el algoritmo encuentra diferentes valores para los distintos parámetros de rugosidad.

Es a partir de entonces cuando obtenidos todos ellos, a lo largo de los distintos segmentos del perfil, se han aplicado herramientas estadísticas para analizar el comportamiento de la superficie de la muestra en términos de los diferentes parámetros de rugosidad anteriormente citados.

Descripción general de la herramienta software:

El algoritmo usado, como se ha comentado en apartados previos, se ha llevado a cabo mediante software Python. El archivo “Utils” contiene las funciones necesarias para realizar todas las tareas que exige el algoritmo principal definido en el archivo “Main Program”; por otro lado, en este último archivo (“Main Program”) se realiza la tarea principal de filtrado y cálculo de los parámetros de interés para la caracterización superficial de las muestras de madera CLT analizadas.

Descripción de Utils:

Dentro del archivo denominado como “Utils” se encuentran una serie de funciones básicas empleadas dentro del archivo principal. Ahí se localizan desde pequeñas funciones con cálculos para las longitudes de corte y evaluación, pasando por distintas características de filtros, hasta procesos de convolución completa de los mismos y procesos para obtener gráficas y elementos estadísticos de los datos adquiridos.

Descripción de Main Program:

A la hora de optimizar el algoritmo que calculará los parámetros de rugosidad del perfil, surgen varias cuestiones. El filtro, al ser simétrico, tiene varios puntos conflictivos cuando trata los datos del perfil.

Tanto al principio como al final del mismo, habrá varios puntos en los que el filtro, que actuará dentro de una longitud concreta $[-\lambda c < x < \lambda c]$, no lo hará de manera correcta. Esto creará problemas dentro del filtrado (las ya mencionadas distorsiones de borde), alterando los resultados en los extremos del perfil, y obteniendo por ello resultados inaceptables en esas zonas.

Para corregirlo, se ha hecho uso de la teoría existente respecto al tratamiento de rugosidad superficial. A la hora de analizar las longitudes de corte y de evaluación, se ha tomado como longitud de evaluación 5 veces la longitud de corte:

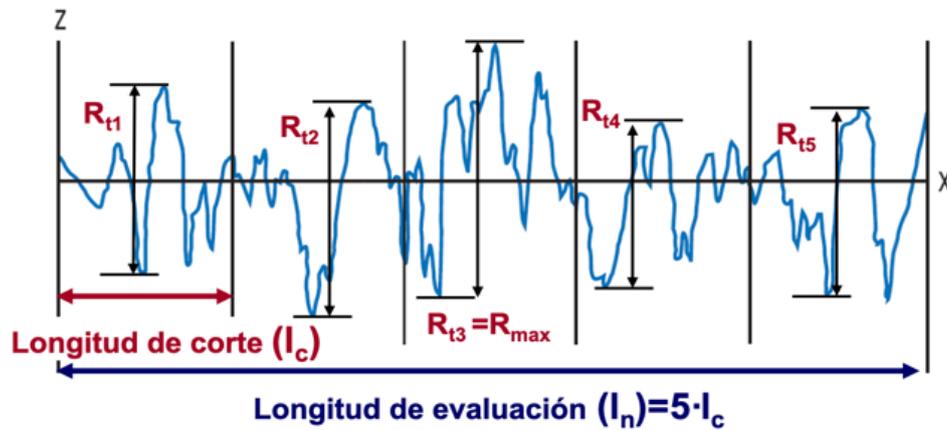


Fig. 3.18.- Ilustración de la longitud de corte (l_c) y longitud de evaluación (l_n). [43]

Por norma general, se estipula siempre la siguiente relación:

$$L_{eval} = 5 * L_{corte}$$

Ésta es la que se ha considerado para los cálculos a lo largo del proyecto. Del perfil original, definido en un principio entre 0 y 106 mm, se ha calculado cuántos subconjuntos deberían considerarse para evaluar correctamente los diferentes parámetros en las longitudes que les corresponden. Es decir, cuantas longitudes de corte y cuantas longitudes de evaluación serán necesarias para asegurar unos valores de rugosidad óptimos y realistas.

En lo que al cálculo de estas mismas longitudes se refiere, se consideró la dimensión de cada uno de los vectores obtenidos tras la convolución del filtro sobre el perfil: la longitud del segmento del perfil (x), longitud de actuación del filtro $m(x)$ (w) y longitud del perfil de rugosidad ($z_{roughness}$).

$$q = \text{int} \left(\frac{\lambda c}{dx} \right); \quad L_{eval} = 5 * \lambda c;$$

($q \rightarrow$ Longitud del filtro (n° muestras), $dx \rightarrow$ Intervalo de muestreo (mm))

Así, para los parámetros de rugosidad [Ra, Rq]:

$$[(\text{len}(x) - q) - q] * dx = L_{eval}$$

$$\text{len}(x) = \frac{L_{eval}}{dx} + 2q;$$

($\text{len}(x) \rightarrow$ Longitud final de actuación del filtro (n° muestras))

Y para los parámetros de rugosidad [Rp, Rv, Rt]:

$$[(len(x) - q) - q] * dx = \lambda c$$

$$len(x) = \frac{\lambda c}{dx} + 2q$$

Una vez solucionado el problema de las distorsiones de borde en los segmentos del perfil obtenido, se observó que esto también presentaba otro problema. Como se observa en el ejemplo de la imagen siguiente, al analizar un segmento –en este caso, el [0, 200]- hay dos conjuntos de datos que se pierden (Fig. 3.14). Es decir, los conjuntos de datos en los intervalos [0, q] y [200-q, q] quedan fuera del alcance del filtro.

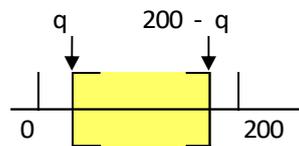


Fig. 3.19.- Región del segmento donde el filtro gaussiano actúa sin provocar distorsión alguna (amarillo). Fuera de dicha región aparecen los efectos de borde que no se considerarán por generar distorsión en la señal filtrada.

Debido a este hecho, en caso de querer analizar un perfil de una serie de datos de [0, 1000] puede deducirse que gran cantidad de ellos se perderían (Fig. 3.20), obteniendo un conjunto de datos que podría llegar a diferir mucho del valor real de los mismos, distando en cierta medida de ser aceptables al no considerar los puntos no filtrados, delimitados entre cada uno de los segmentos y la actuación del filtro gaussiano.

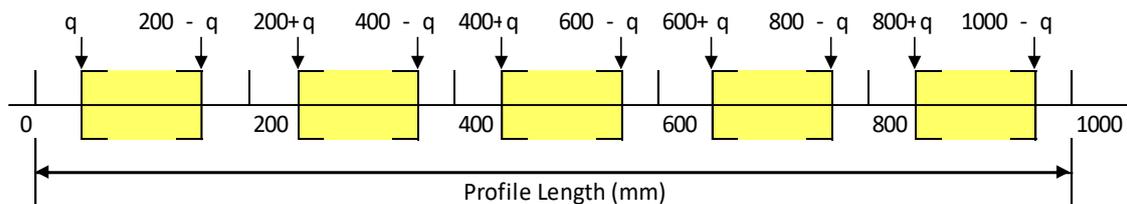


Fig. 3.20.- Resultado de la aplicación del filtro gaussiano a lo largo de todo el perfil.

En vista de lo anterior, se ha decidido solapar subintervalos contiguos, para lo que ha sido necesario determinar el número de puntos exactos que estos debían superponerse entre sí, es decir, el número de puntos “q” a desplazar el segmento siguiente para lograr la continuidad del filtro a lo largo de todo el perfil. Como se ve en la Fig. 3.21, esta vez el proceso de filtrado no perderá información entre subintervalos consecutivos, ya que se forzará a que el filtro actúe de forma continua a lo largo del perfil.

Así, ha sido posible conseguir un número mayor de subintervalos en cada muestra y, por tanto, una mayor fiabilidad en los datos obtenidos debido a dicho proceso de superposición.

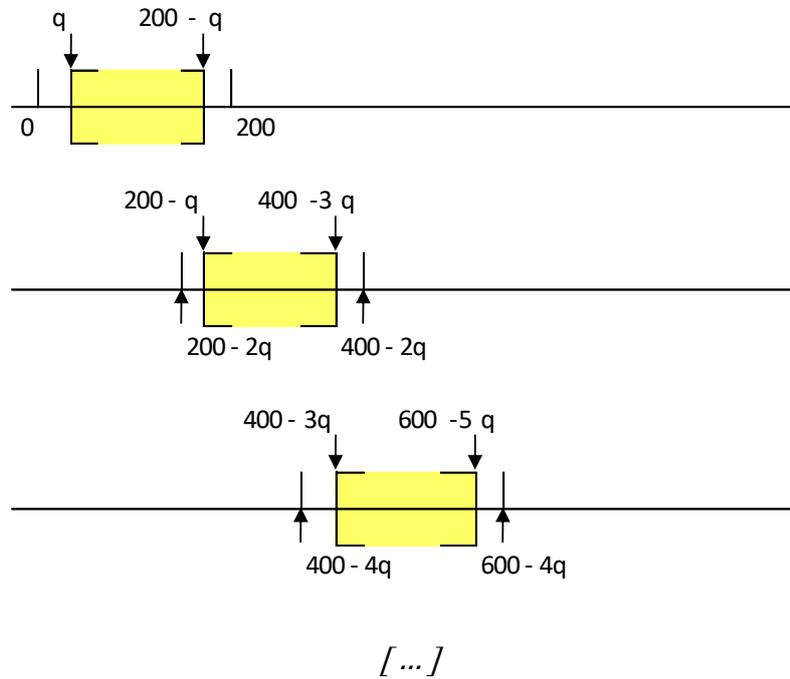


Fig. 3.21.- Solución tomada para evitar la pérdida de datos entre dos filtrados en subintervalos consecutivos.

Por tanto, la secuencia de subintervalos a considerar para conseguir que las señales filtradas estén definidas en todo el perfil medido es la siguiente:

$$\{ [0, 200], [200 - 2q, 2 \times 200 - 2q], [2 \times 200 - 4q, 3 \times 200 - 4q], [3 \times 200 - 6q, 4 \times 200 - 6q], [4 \times 200 - 8q, 5 \times 200 - 8q], \dots \}$$

De forma genérica podemos representar dicha secuencia de la siguiente forma:

$$[nx200 - nx2q, (n + 1)200 - nx2q], \text{ para } n = 0,1,2, \dots$$

De forma compacta:

$$[n(200 - 2q), 200 + n(200 - 2q)], \text{ para } n = 0,1,2, \dots$$

Sabiendo que “ $len(x_{sub})$ ” se refiere al número de puntos en cada subintervalo “x”, en este caso concreto, su valor sería $len(x_{sub}) = 200$.

Finalmente, se han usado las ecuaciones y relaciones previas para calcular el valor máximo de “n” para caso concreto, definiendo así el número total de subintervalos consecutivos que pueden llegar a ser analizados dentro del perfil sin llegar a solaparse:

$$\text{len}(x_{sub}) + n(\text{len}(x_{sub}) - 2q) + 1 \leq \text{len}(x_{total})$$

$$n \leq \frac{\text{len}(x_{full}) - \text{len}(x_{sub}) - 1}{\text{len}(x_{sub}) - 2q}$$

Se ilustra a modo de ejemplo la gráfica siguiente, donde se muestra el perfil filtrado (componentes de ondulación, en naranja) sobre el perfil primario (componentes de rugosidad + ondulación, en azul), para dos subintervalos consecutivos.

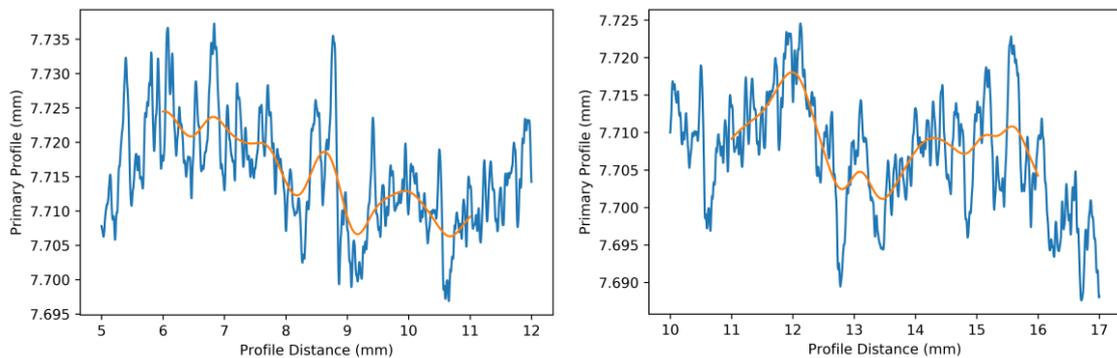


Fig. 3.22.- Ejemplo de filtrado corregido sobre subintervalo del perfil calibrado. Se aprecia la continuidad del filtrado (en distancia del perfil, 11mm) entre subintervalos consecutivos.

Análisis de los resultados:

La bondad de los datos obtenidos tras la medición del perfil se ha confirmado estadísticamente. Se ha certificado por medio de la desviación estándar que todos los datos obtenidos para los valores medios en los subintervalos eran congruentes entre sí independientemente de su valor, quedando acotados dentro de un rango en función de la desviación estándar experimental y la longitud de onda de corte.

En este ejemplo concreto, realizado sobre las muestras de perfil calibrado y con una longitud de onda de corte de 0,8mm –valor típico utilizado para separar la rugosidad de la ondulación-, se tiene que:

Ra, Rq → 25. Rp, Rv, Rt → 129	Ra (Mean)	Ra (Std)
tabla2020-06-17 21.16.13.608	3,626	0,532
tabla2020-06-19 15.41.00.304	3,715	0,539

Tabla. 3.23.- Tabla para dos muestras de madera distintas, mostrando valores de Ra media y su desviación estándar.

En la Tabla. 3.23. se incluye el número de subintervalos en los que se ha dividido el perfil original completo. Por ello, para el análisis tanto de Ra como Rq, se utilizará el valor de N (tamaño de población) igual a 25. La media y desviación, por su parte, se muestran en micras.

N (Poblac.)	25
Media	3,72
StandDev	0,54

Tabla. 3.24.- Tabla resumen de los valores estadísticos para Ra y Rq.

Según el análisis estadístico, no se observaron diferencias significativas entre las distintas medidas de los valores de rugosidad de la superficie, tanto para calibrado como cepillado, a un nivel de confianza del 95%. Con ello, se ha comprobado tanto la reproducibilidad temporal como espacial de las medidas a lo largo de los perfiles medidos.

	Alpha (α)	
Nivel significación para 95%	0,05	95%
Nivel significación para 99%	0,01	99%
Intervalo de confianza 95%	3,49	3,94
Intervalo de confianza 99%	3,41	4,02

Tabla. 3.25.- Tabla con los niveles de significación e intervalos de confianza para las muestras de 95 y 99% (Ra, Rq).

Propuesta de profilómetro óptico láser para la caracterización de paneles de madera CLT utilizados en construcción

Es decir, siguiendo el criterio de la tabla anterior, nuestro intervalo de confianza para el valor de las medias –usando una media de 3,715 μm y una desviación de 0,539- debería encontrarse entre [3'49~ 3'93] μm . Efectivamente, todas las medidas de rugosidad cumplen la condición. Repitiendo este proceso de verificación para todos los valores, se han ratificado las condiciones de una buena repetitividad del método y de la calidad los resultados.

Del mismo modo, se ha procedido para el caso de Rp, Rv y Rt, donde se tienen las siguientes medidas, en la misma forma que en el caso anterior para Ra y Rq:

Ra, Rq → 25. Rp, Rv, Rt → 129	Rt (Mean)	Rt (Std)
tabla2020-06-17 21.16.13.608	19,038	5,260
tabla2020-06-19 15.41.00.304	19,282	4,980

Fig. 3.26.- Tabla para dos muestras de madera distintas, mostrando valores de Rt media y su desviación estándar.

De nuevo, para una N (tamaño de población) esta vez de 129 subintervalos, se enmarcan los valores obtenidos como se muestra a continuación:

N (Poblac.)	129
Media	19,04
StandDev	5,26

Fig. 3.27.- Tabla resumen de los valores estadísticos para Rp, Rv y Rt.

De la misma manera que antes, se ha comprobado como para Rp, Rv y Rt se sigue cumpliendo con las consideraciones previas, a un nivel de confianza del 95%:

	Alpha (α)	
Nivel significación para 95%	0,05	95%
Nivel significación para 99%	0,01	99%
Intervalo de confianza 95%	18,12	19,95
Intervalo de confianza 99%	17,83	20,25

Fig. 3.28.- Tabla con los niveles de significación e intervalos de confianza para las muestras de 95 y 99% (Rp, Rv y Rt).

En este ejemplo, la tabla muestra un intervalo de confianza con unos valores en [18'12 ~ 19,95] μm . De nuevo, los intervalos logrados ratifican para estos parámetros de rugosidad la buena repetitividad y los buenos resultados.

Estos cálculos, extrapolados al resto de medidas obtenidas, han constatado la hipótesis inicial, en la cual el proceso experimental, las muestras y el montaje final eran fiables para llevar a cabo el proyecto.

Asegurada la bondad de los resultados del proceso y sus correcciones posteriores, se observarán dos gráficas distintas durante la sucesión de iteraciones a lo largo de toda la longitud del perfil medido:

- La gráfica del perfil primario: *Primary Profile vs. Profile Distance, (mm)*.
- La gráfica de la rugosidad: *Roughness vs. Profile Distance (mm)*.

La gráfica del perfil primario (Fig. 3.29) muestra la longitud del subintervalo analizado, 14mm. Se puede ver, en color naranja como en ejemplos anteriores, el nuevo perfil de la muestra una vez las componentes de rugosidad han sido eliminadas del mismo dentro del intervalo de actuación del filtro $[2 < x < 12]$ (mm).

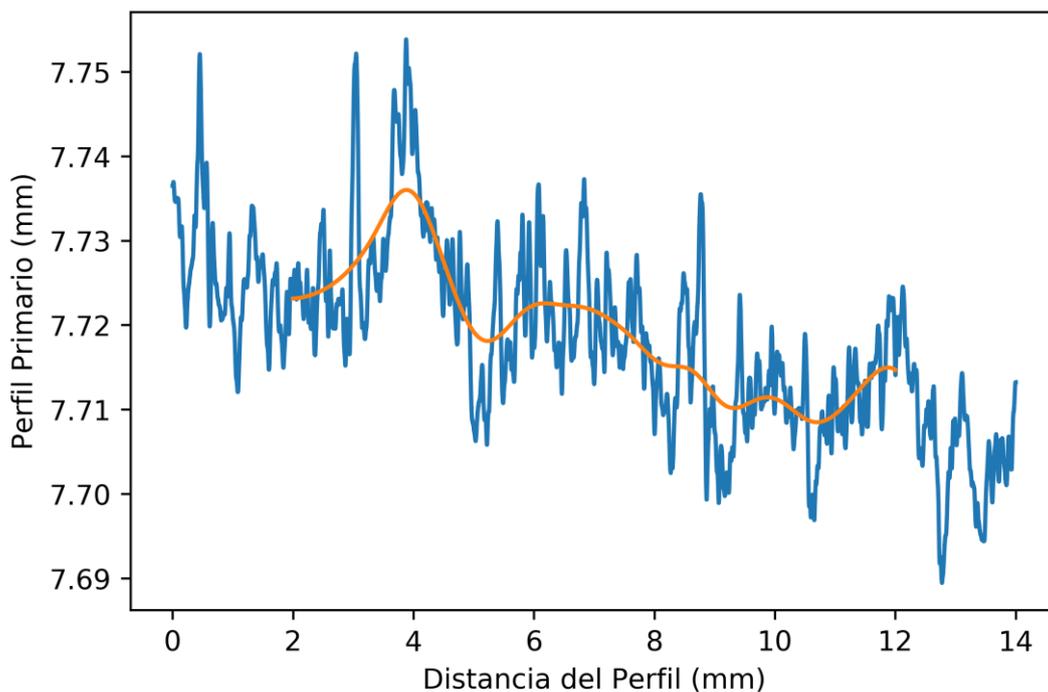


Fig. 3.29.- Gráfica del perfil primario, en el primer subintervalo.

La gráfica de la rugosidad (Fig. 3.30), muestra el perfil eliminado tras la acción del filtro. Desde estos conjuntos de datos “Roughness” es desde donde se han obtenido los parámetros de rugosidad de superficie para el resto de subintervalos del perfil.

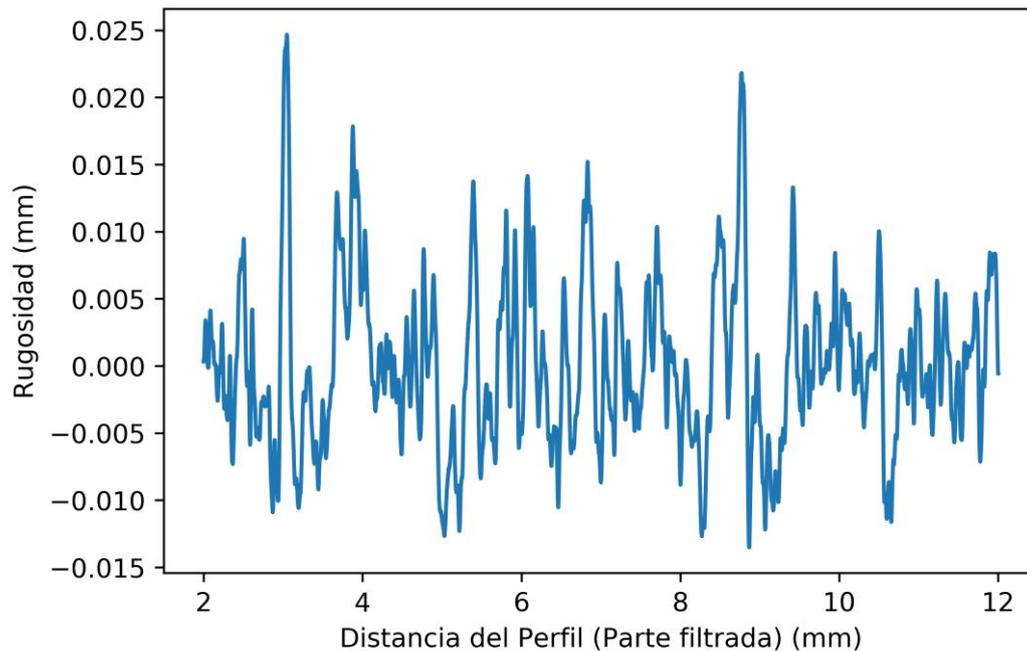


Fig. 3.30.- Gráfica de la rugosidad, en el primer subintervalo.

Los datos estadísticos obtenidos mediante el algoritmo se han tabulado, a fin de poder trabajar con ellos más fácilmente. En la tabla inferior (Tabla. 3.31), se muestra una de las tablas, a modo de ejemplo.

En ella, aparece el mismo tramo de la muestra, medido en 5 momentos diferentes, como se ha explicado previamente. Después, aparecen los valores medios y la desviación estándar de los distintos parámetros de rugosidad –Ra, Rq, etc.- en cada uno de esos instantes.

Dependiendo del valor considerado para la longitud de onda de corte del filtro gaussiano –en este caso $\lambda_c = 0,8$ mm- se obtendrá una tabla diferente, además de un número distinto de segmentos del perfil para analizar los parámetros.

En este caso, como se observa en la esquina superior izquierda, para calcular Ra y Rq se dividió el perfil de 106 mm en 25 tramos de igual medida, y para el caso de Rp, Rv y Rt, en 129 tramos.

Ra, Rq = 25. // Rp, Rv, Rt = 129	Ra (Mean)	Ra (Std)	Rq (Mean)	Rq (Std)	Rp (Mean)	Rp (Std)	Rv (Mean)	Rv (Std)	Rt (Mean)	Rt (Std)
tabla2020-06-17 21.16.13.608	0,00363	0,00053	0,00459	0,00067	0,01000	0,00331	0,00903	0,00279	0,01904	0,00526
tabla2020-06-17 21.18.26.219	0,00363	0,00057	0,00460	0,00076	0,01005	0,00330	0,00889	0,00270	0,01894	0,00516
tabla2020-06-18 10.11.35.249	0,00373	0,00058	0,00471	0,00077	0,01023	0,00366	0,00925	0,00261	0,01948	0,00525
tabla2020-06-19 15.38.53.047	0,00371	0,00053	0,00469	0,00067	0,01028	0,00318	0,00927	0,00242	0,01955	0,00477
tabla2020-06-19 15.41.00.304	0,00372	0,00054	0,00469	0,00065	0,01000	0,00285	0,00924	0,00314	0,01928	0,00498

Tabla. 3.31.- Tabla de Muestra 1, para un filtrado gaussiano con una longitud de onda de corte de $\lambda_c = 0,8$ mm.

Propuesta de profilómetro óptico láser para la caracterización de paneles de madera CLT utilizados en construcción

Del mismo modo, se han calculado los parámetros de rugosidad de la muestra para el filtro con distintas longitudes de onda de corte. Como se observa en la tabla siguiente, estos valores cambian con cada tipo de filtrado, ya que a medida que crece la longitud de onda de corte, se deja pasar mayor componente de ondulación junto a la rugosidad, lo que resulta en un aumento del tamaño de picos y valles dentro del perfil filtrado.

Rugosidad (μm)	Ra (Mean)	Ra (Std)	Rq (Mean)	Rq (Std)	Rp (Mean)	Rp (Std)	Rv (Mean)	Rv (Std)	Rt (Mean)	Rt (Std)
$\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$	3,683	0,550	4,654	0,703	10,112	3,261	9,136	2,733	19,258	5,085
$\lambda_c = 1 \text{ mm}$	4,004	0,530	5,067	0,696	11,429	3,541	10,211	2,861	21,640	5,417
$\lambda_c = 1,5 \text{ mm}$	4,524	0,617	5,727	0,782	13,963	4,083	12,295	3,030	26,258	5,934
$\lambda_c = 2 \text{ mm}$	4,888	0,500	6,203	0,638	15,767	4,366	13,705	3,061	29,472	6,155
$\lambda_c = 2,5 \text{ mm}$	5,123	0,503	6,500	0,641	17,006	4,435	14,565	3,109	31,571	6,301
$\lambda_c = 3 \text{ mm}$	5,348	0,470	6,776	0,569	18,010	4,631	15,353	3,060	33,364	6,448

Tabla. 3.32.- Tabla resumen de los parámetros de rugosidad, para diferentes longitudes de onda de corte.

A continuación, se muestra de manera visual los resultados de la tabla previa (Fig. 3.33). Se observa la tendencia explicada anteriormente, donde a medida que el filtro crece sus componentes lo hacen también de manera proporcional.

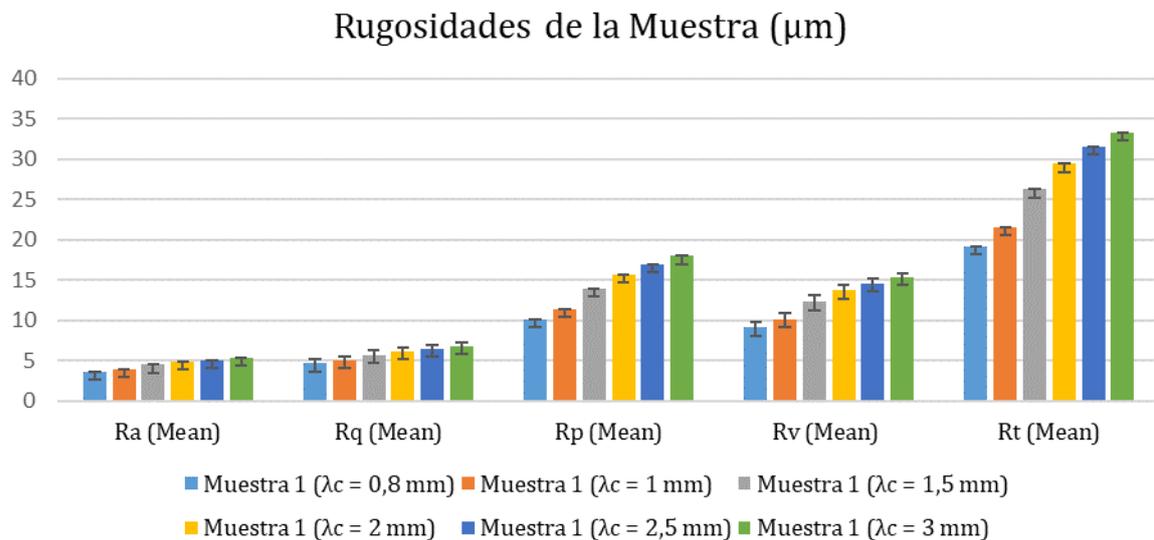


Fig. 3.33.- Gráfica con los parámetros de rugosidad de una muestra, junto con los diferentes filtros usados, donde se observa la tendencia comentada previamente.

Analizando los datos, se procedió analizando la rugosidad, viendo si el incremento en el valor de los mismos seguía alguna tendencia concreta. En la Fig. 3.34 puede observarse como el incremento en la longitud de onda de corte (λ_c) y el incremento del valor de R_t (el parámetro que más significativamente varía) se ajustan a una tendencia logarítmica con un índice de correlación R del 99'35%.

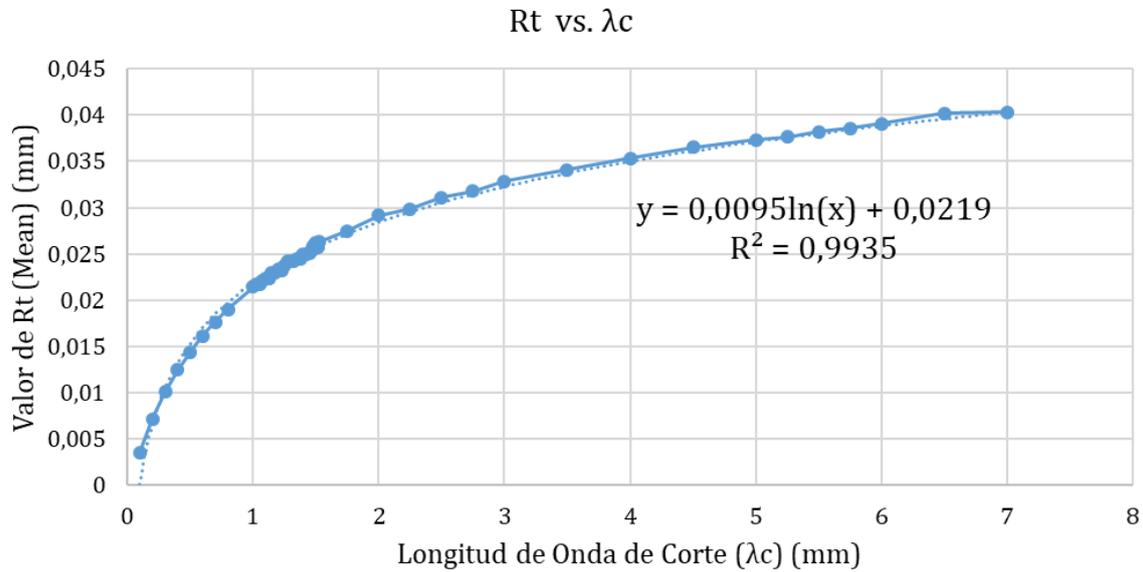


Fig. 3.34.- Curva R_t vs. λ_c , ajuste logarítmico.

Pese a que podría esperarse una tendencia lineal de crecimiento en los parámetros de rugosidad - R_t , en este caso- en la gráfica se observa un leve punto de inflexión en el intervalo de $[1,25 < \lambda_c < 2,25]$ (mm) el cual cambia la tendencia de crecimiento rápido que mostraban los valores iniciales de R_t respecto de λ_c , aplanándose su crecimiento en longitudes de onda de corte mayores.

Con ello, se refuerza la hipótesis de la existencia de un λ_c capaz de separar de manera óptima el conjunto de las componentes de onda de rugosidad y de ondulación. Debido a la tendencia de los datos obtenidos para los parámetros de rugosidad (en el ejemplo de la Fig. 3.34, se usa R_t) se aprecia como estos siguen una tendencia clara logarítmica, lo que a su vez muestra la posibilidad de descomponer la señal en armónicos de distintas frecuencias, que contribuirán en mayor o menor medida al tamaño final de los picos y valles del perfil de la superficie analizada.

Propuesta de profilómetro óptico láser para la caracterización de paneles de madera CLT utilizados en construcción

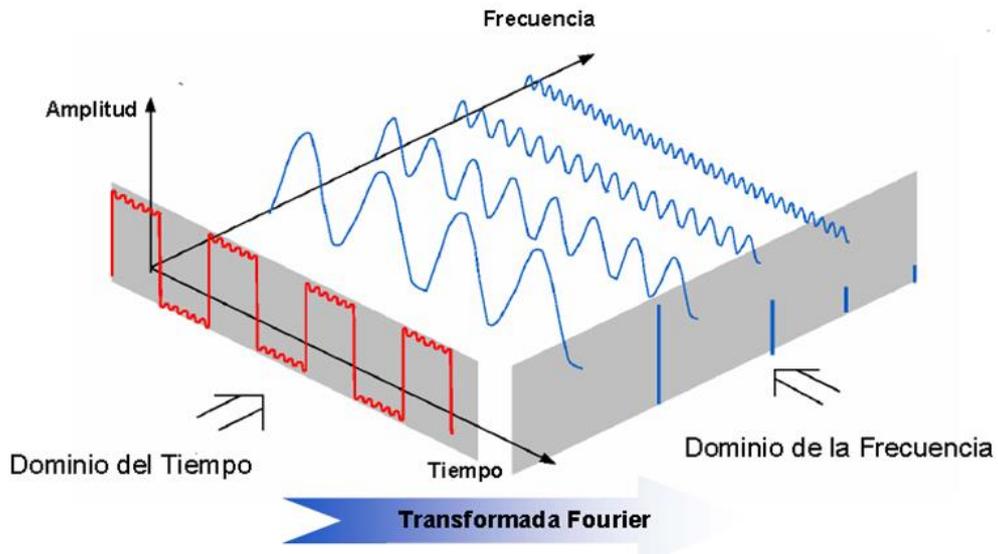


Fig.3.35.- Explicación gráfica de la adición de componentes de frecuencia sobre el perfil real. [49]

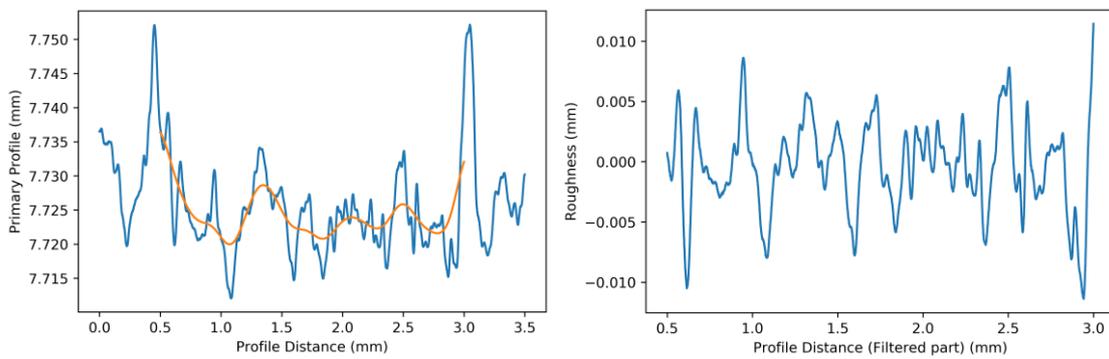


Fig. 3.36.- Perfil primario con filtro y perfil de rugosidad, para $\lambda c = 0,5$ mm.

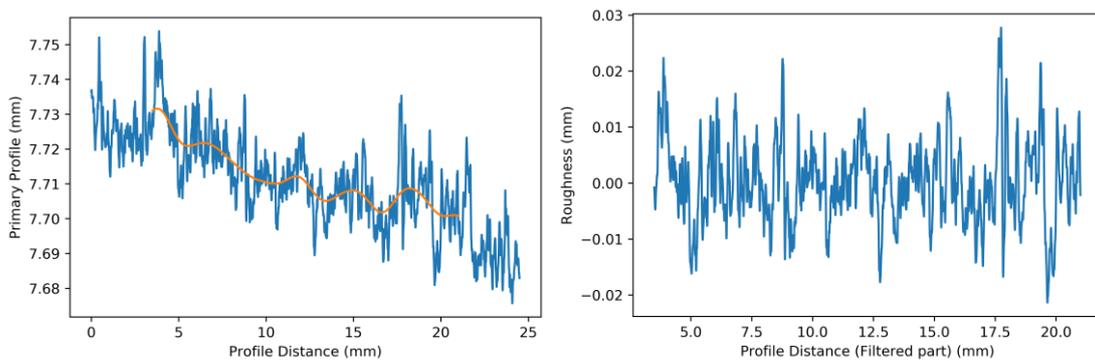


Fig. 3.37.- Perfil primario con filtro y perfil de rugosidad, para $\lambda c = 3,5$ mm.

A medida que las frecuencias menores (componentes de ondulación) vayan siendo aceptadas debido al incremento de la longitud de onda de corte del filtro (λ_c), los picos y valles aumentarán su tamaño, pasando de un valor máximo aproximado de $10\mu\text{m}$ para $\lambda_c = 0,5\text{ mm}$ (Fig. 3.36) a un valor máximo aproximado de $25\mu\text{m}$ para $\lambda_c = 3,5\text{ mm}$ (Fig. 3.37).

Además, se observa como el perfil de rugosidad pasa de no tener una tendencia clara de oscilación (Fig. 3.36) a mostrar ciertas subidas y bajadas periódicas (Fig. 3.37), lo que advierte de la admisión de ciertos componentes- aunque pequeños- de ondulación.

Por otro lado, visto el comportamiento de los datos frente a la variación del filtro, se ha procedido con la búsqueda del punto máximo de la tendencia, el cual marcará la zona cerca de la cual la distinción entre componentes de rugosidad y de ondulación será óptima.

Se observa en la gráfica inferior como a partir de $\lambda_c = 1,5\text{mm}$, la tendencia de la curva comienza a invertirse, llegando al punto máximo en torno a $\lambda_c = 2\text{mm}$ y descendiendo a partir de entonces. Con ello, se obtiene que ese rango, de entre $[1,5 < \lambda_c < 2]$ (mm) podría ser el más adecuado para separar ambos componentes.

Es decir, para λ_c menores de $1,5\text{mm}$, podría llegar a asegurarse el análisis de rugosidad con componentes “puros” de la misma, al descartar casi por completo los componentes de la ondulación.

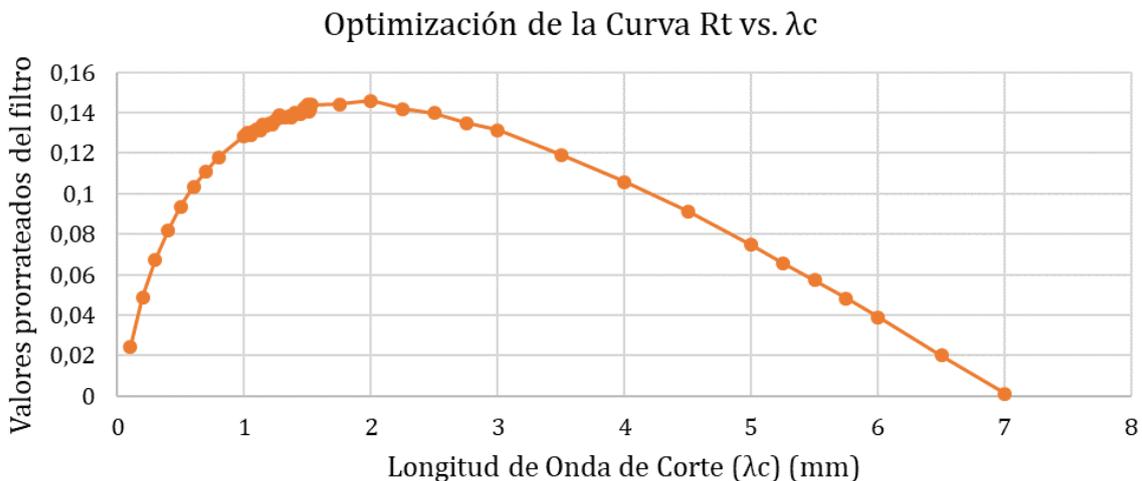


Fig. 3.38.- Optimización de la curva R_t vs. λ_c .

Por ello, una vez lograda la optimización de la curva y obtenido el valor óptimo para λ_c , convendría aplicar un filtro de dicha longitud de onda o menor ya que, como se ha explicado, a pesar de tratarse de la λ_c óptima teórica, se estarán dejando pasar a través del filtro ciertas componentes de ondulación que distorsionarán los valores de rugosidad.

En este caso, se ha considerado que un valor de λ_c adecuado oscilará en el intervalo $[1,25 < \lambda_c < 1,5]$ (mm), lo que conseguiría dos cosas: descartar las componentes de ondulación como ya se ha explicado anteriormente y garantizar un análisis eficiente de la gran mayoría de las componentes de rugosidad existentes.

Por último, en la Fig. 3.39 se muestra la comparativa entre los parámetros de rugosidad superficial de ambos tipos de muestras analizadas: calibrado y cepillado.

El calibrado y el cepillado son dos tipos distintos de tratamiento de maderas. Mientras que el primero se lleva a cabo con cilindros de cuchillas calibradas en máquinas de gran volumen a lo largo del proceso productivo, el segundo se lleva a cabo con papeles de lija, buscando la mayoría de las veces un acabado óptimo a mano.

Tras el proceso llevado a cabo en este proyecto, ha sido posible diferenciar los distintos acabados realizados sobre los paneles CLT de madera en el sistema de fabricación de Egoín S.A., en base a sus características superficiales.

Con ello se demuestra que los parámetros de rugosidad en ambos tipos de muestras son lo suficientemente distintos como para permitir una diferenciación y posible clasificación futura, a pesar de haberse tratado del mismo tipo de madera en un principio, sin diferenciación alguna entre unos paneles y otros.

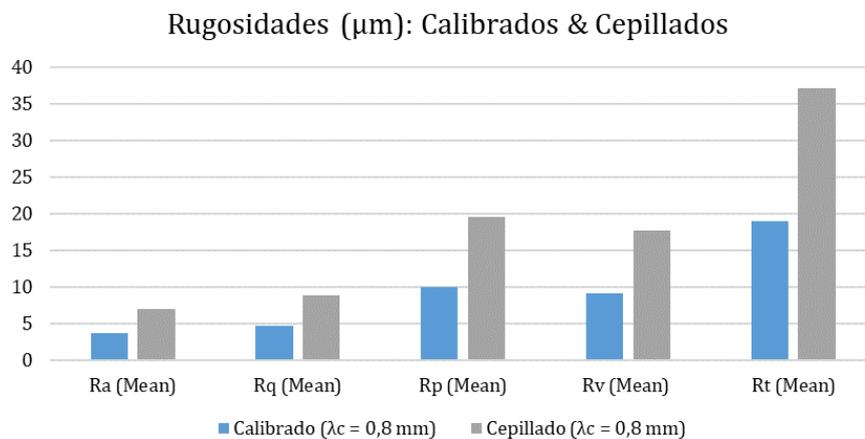


Fig. 3.39.- Comparativa de las rugosidades entre las muestras Calibradas y Cepilladas.

ASPECTOS ECONÓMICOS:

Descripción del presupuesto:

En este primer apartado, se ha realizado una valoración económica general del proyecto. Para ello, se ha establecido un presupuesto inicial con el que cuantificar el gasto necesario para llevarlo a cabo, junto a otra partida para diversos gastos. En esta última se encuentran costes tales como los indirectos e imprevistos. Con todo ello, se calcula el coste real de la instalación completa, con todos sus elementos, que tendría el proyecto dentro del proceso productivo de la empresa.

Presupuesto Inicial del Proyecto	
<i>Cabezal Láser ILD-2300</i>	4.500,00 €
<i>Estructura Mungimatik</i>	155,00 €
Subtotal General	4.655,00 €

Fig. 4.1.- Presupuesto general inicial aproximado del proyecto.

Costes Directos		4.655,00 €
Indirectos	7%	325,85 €
Subtotal 1		4.980,85 €
Imprevistos	10%	498,09 €
Subtotal 2		5.478,94 €
Financieros	4%	219,16 €
Coste Total Proyecto		5.698,09 €

Fig. 4.2.- Desglose de los costes totales del proyecto.

Análisis de la rentabilidad:

Después de haber realizado la descripción del presupuesto de la instalación, en este apartado se prosigue con el análisis de la rentabilidad del mismo. Para ello, se han tomado en consideración varios factores que se explican a continuación, los cuales han permitido obtener el resultado económico de la implantación del proyecto en el escenario real.

Por un lado, se tienen los costes, que como se ha visto en el apartado anterior, ascienden hasta un total de 5.698€. Estos son el resultado de varias partidas en el presupuesto inicial, con el cual se ha adquirido todo el material necesario para la implementación del proyecto.

Propuesta de profilómetro óptico láser para la caracterización de paneles de madera CLT utilizados en construcción

Este, por su parte, contará con ciertos beneficios en el futuro, objetivo principal de este proyecto. Gracias a la optimización del proceso de fabricación de paneles de madera estructural CLT, serán varios aspectos los que se verán beneficiados, al ahorrar tiempo y materia prima a la empresa. Entre otros, se encuentran:

- Ensayos de delaminación.
- Material de madera (Listones, tablas, escuadras, probetas, etc).
- Adhesivos industriales (EGO de Egoín: 0'63% de cola PUR⁵).

La rentabilidad, por tanto, se establece a partir de la diferencia entre el coste del proyecto para la empresa y el ahorro general que éste supondrá en su línea de producción. Dichos costes se amortizarán a medida que se cumplan ciertos plazos, normalmente, con el objetivo situado en la rentabilidad a medio o, incluso, largo plazo. Todo ello dependerá del plan de amortización diseñado o de la cultura empresarial de la empresa Egoín. S.A.

⁵ Poliuretano (PUR): Es un adhesivo incoloro, curado en frío, duradero y resistente al agua. Está libre de formaldehídos y produce muy bajas emisiones de isocianato. Relativamente caro.

CONCLUSIONES:

Las conclusiones principales de este proyecto ya se han ido catalogando a medida que se obtenían resultados en los apartados anteriores. En un principio, se ha partido de un escenario particular, donde han sido diversas pruebas sobre varias superficies las que se han usado para corroborar las hipótesis iniciales.

De manera general, cabe decir que la aplicación del proyecto sobre este escenario concreto, con este método de medida y de tratamiento de datos se antoja rentable. Es cierto que se darán varios factores en la implantación real que harán que la amortización del sistema no sea tan rápida como podría esperarse en un nivel teórico, pero los resultados finales son óptimos.

Principalmente, este proyecto trata de hacer más rentable el proceso productivo de la empresa Egoín.S.A., no incrementando sus beneficios, sino reduciendo sus costes. Por ello, es en la diferencia entre ellos donde se ha obtenido la mejora productiva de la empresa, optimizando los procesos y tareas mencionados a lo largo del documento.

Por otro lado, el mantenimiento de dicha instalación es bastante sencilla, ya que el equipamiento necesario no trata de demasiados elementos y estos no tienen un coste particularmente alto, estimándose un coste de mantenimiento en torno al 5% del coste de implantación. Todo ello, hace que su implementación dentro de la línea productiva de la empresa sea óptima y funcional desde un primer momento.

Y, por último, en relación con el cliente, que hace uso de los productos de la empresa, así como para los propios trabajadores, el pertenecer a un grupo de trabajo o empresa preocupada por la optimización tanto de los recursos naturales (p.e. madera desechada) como recursos humanos (p.e. horas productivas en la línea) o componentes químicos (p.e. adhesivos), conseguirá desarrollar un sentimiento de satisfacción y bienestar entre los mismos.

Sabedores de una política de empresa justa, sostenible y responsable con el medio ambiente, resulta probable que con dicha implantación los clientes se interesen por trabajar con Egoín S.A., incrementando así las ganancias iniciales supuestas en este proyecto.

Además, el camino propuesto inicialmente del machine learning no quedaría completamente descartado, ya que, de disponer de un número mucho mayor de muestras, la idea de su aplicación podría llegar a retomarse en un futuro.

Por otro lado, cabe señalar que el mejor rendimiento del adhesivo se encontrará sobre superficies lijadas (lijado calibrado). Este proceso resulta en una superficie perfecta para los revestimientos porque nivela las diferencias inherentes en las propiedades de la superficie, lo que debería dar como resultado una extensión de acabado uniforme y homogénea.

El lijado de superficies ha demostrado [50] ser un paso de procesamiento ventajoso antes de la aplicación de adhesivos, pinturas o revestimientos. Las superficies lijadas necesitan una cantidad relativamente baja de adhesivo para cubrirse -en comparación con superficies tratadas mediante otros procesos, como aserradas o cepilladas- y mostrarán el mejor rendimiento en los ensayos de delaminación incluso en madera de baja calidad, lo que podría mejorar la competitividad futura de los adhesivos, pinturas y revestimientos en la madera.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] e. Inc, «Introduction to Fiber Optic Sensors,» 26 Marzo 2006. [En línea]. Available: https://www.efunda.com/DesignStandards/sensors/fotonic/fotonic_intro.cfm. [Último acceso: 8 Agosto 2020].
- [2] R. Cook y C. W. Hamm, «Fiber optic lever displacement transducer,» *Applied Optics*, vol. 18, nº 19, p. 12, 1979.
- [3] A. Shimamoto y K. Tanaka, «Geometrical analysis of an optical fiber bundle displacement sensor,» *Applied Optics*, vol. 35, nº 34, p. 8, 1996.
- [4] e. Inc., «Theory of Fiber Optic Sensors,» 26 Marzo 2006. [En línea]. Available: https://www.efunda.com/designstandards/sensors/fotonic/fotonic_theory.cfm. [Último acceso: 8 Agosto 2020].
- [5] W. Shen, X. Wu, H. Meng, G. Zhang y X. Huang, «Long distance fiber-optic displacement sensor based on fiber collimator,» *Review of Scientific Instruments*, vol. 81, nº 123104, p. 5, 2010.
- [6] P. Li, H. Zhang, Y. Zhao y L.-Z. Yang, «New compensation method of an optical fiber reflective displacement sensor,» SPIE, 14 Noviembre 1997. [En línea]. Available: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/3241/0000/New-compensation-method-of-an-optical-fiber-reflective-displacement-sensor/10.1117/12.293521.short>. [Último acceso: 8 Agosto 2020].
- [7] J. Liu, K. Yamazaki y Y. Zhou, «A reflective fiber optic sensor for surface roughness in-process measurement,» *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 124, nº 3, p. 8, 2002.
- [8] G. Berkovic y E. Shafir, «Optical methods for distance and displacement measurements,» *Advances in Optics and Photonics*, vol. 4, nº 4, pp. 441-471, 2012.
- [9] J. Zheng y S. Albin, «Self-referenced reflective intensity modulated fiber optic displacement sensor,» SPIE, 1 Febrero 1999. [En línea]. Available: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/Optical-Engineering/volume-38/issue-2/0000/Self-referenced-reflective-intensity-modulated-fiber-optic-displacement-sensor/10.1117/1.602260.short>. [Último acceso: 8 Agosto 2020].
- [10] C. Cockshott y S. Pacaud, «Compensation of an optical fibre reflective sensor,» *Sensors and Actuators*, vol. 17, nº 1, p. 5, 1989.
- [11] Y. Libo y Q. Anping, «Fiber-optic diaphragm pressure sensor with automatic intensity compensation,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 28, nº 1, p. 5, 1991.
- [12] A. Rostami, M. Noshad, A. G. H. Hedayati y F. Janabi-Sharifi, «A Novel and High-Precision Optical Displacement Sensor,» *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 7, nº 4, pp. 311-314, 2007.

Propuesta de profilómetro óptico láser para la caracterización de paneles de madera CLT utilizados en construcción

- [13] Z. Ji y M. Leu, «Design of optical triangulation devices,» *Optics & Laser Technology*, vol. 21, nº 5, pp. 339-341, 1989.
- [14] F. Chen, G. M. Brown y M. Song, «Overview of 3-D shape measurement using optical methods,» SPIE, 1 Enero 2000. [En línea]. Available: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/Optical-Engineering/volume-39/issue-1/0000/Overview-of-3-D-shape-measurement-using-optical-methods/10.1117/1.602438.short?SSO=1>. [Último acceso: 8 Agosto 2020].
- [15] R. G. Dorsch, G. Häusler y J. M. Herrmann, «Laser Triangulation: Fundamental uncertainty in distance measurement,» *Applied Optics*, vol. 33, nº 7, pp. 1306-1314, 1994.
- [16] M. Rioux, «Laser range finder based on synchronized scanners,» *Applied Optics*, vol. 23, nº 21, pp. 3837-3844, 1984.
- [17] K.-C. Fan, «A non-contact automatic measurement for free-form surface profiles,» *Computer Integrated Manufacturing Systems*, vol. 10, nº 4, pp. 277-285, 1997.
- [18] M.-C. Amann, T. Bosch, M. Lescure, R. Myllyl y M. Rioux, «Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement,» *Optical Engineering*, vol. 40, pp. 10-19, 2001.
- [19] D. Nitzan, A. E. Brain y R. O. Duda, «The measurement and use of registered reflectance and range data in scene analysis,» *IEEE*, vol. 65, nº 2, pp. 206-220, 1977.
- [20] P. J. Besl, «Active, optical range imaging sensors,» de *Machine Vision and Applications*, Michigan, Springer-Verlag New York Inc, 1988, pp. 127-152.
- [21] T. Dabbs y M. Glass, «Fiber-optic confocal microscope: FOCON,» *Applied Optics*, vol. 31, nº 16, pp. 3030-3035, 1992.
- [22] R. Juškaitis y T. Wilson, «Imaging in reciprocal fibre-optic based confocal scanning microscopes,» *Optics Communications*, vol. 92, nº 4-6, pp. 315-325, 1992.
- [23] E. Shafir y G. Berkovic, «Expanding the realm of fiber optic confocal sensing for probing position, displacement and velocity,» *Applied Optics*, vol. 45, nº 30, pp. 7772-7777, 2006.
- [24] H.-J. Jordan, M. Wegner y H. Tiziani, «Highly accurate non-contact characterization of engineering surfaces using confocal microscopy,» *Measurement Science and Technology*, vol. 9, nº 7, pp. 1142-1151, 1998.
- [25] L. Yang, G. Wang, J. Wang y Z. Xu, «Surface profilometry with a fibre optical confocal scanning microscope,» *Measurement Science and Technology*, vol. 11, nº 12, pp. 1786-1791, 2000.
- [26] H. J. Tiziani y H. M. Uhde, «Three-dimensional image sensing by chromatic confocal microscopy,» *Applied Optics*, vol. 33, nº 10, pp. 1838-1843, 1994.

- [27] J. Garzón R., J. Meneses, G. Tribillon, T. Gharbi y A. Plata, «Chromatic confocal microscopy by means of continuum light generated through a standard single mode fiber,» *Pure and Applied Optics*, vol. 6, nº 6, pp. 544-548, 2004.
- [28] R. Paschotta, «RP Photonics Encyclopedia - Michelson Interferometers,» RP Photonics Consulting GmbH, 18 Abril 2019. [En línea]. Available: https://www.rp-photonics.com/michelson_interferometers.html. [Último acceso: 16 Agosto 2020].
- [29] A. Koch y R. Ulrich, «Fiber-optic Displacement Sensor with 0.02 pm Resolution by White-light Interferometry,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 25, nº 1-3, pp. 201-207, 1991.
- [30] Y.-J. Rao y D. A. Jackson, «Recent progress in fibre optic low-coherence interferometry,» *Measurement Science and Technology*, vol. 7, nº 77, pp. 981-999, 1996.
- [31] J. M. Schmitt, «Optical Coherence Tomography (OCT): A Review,» *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 5, nº 4, pp. 1205-1215, 1999.
- [32] W. Drexler, «Ultrahigh-resolution optical coherence tomography,» *Journal of Biomedical Optics*, vol. 9, nº 1, pp. 47-74, 2004.
- [33] C. Pitris, M. E. Brezinski, B. E. Bouma, G. J. Tearney y J. F. Southern, «High Resolution Imaging of the Upper Respiratory Tract with Optical COherence Tomography,» *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, vol. 157, nº 5, pp. 1640-1644, 1998.
- [34] B. L. Danielson y C. Y. Boisrobert, «Absolute optical ranging using low coherence interferometry,» *Applied Optics*, vol. 30, nº 21, pp. 2975-2979, 1991.
- [35] E. Shafir, M. I. Shtilman, E. Naor y G. Berkovic, «Thermally independent fibre optic absolute distance measurement system based on white light interferometry,» *IET Optoelectronics*, vol. 5, nº 2, pp. 68-71, 2011.
- [36] M. A. Choma, K. Hsu y J. A. Izatt, «Swept source optical coherence tomography using an all-fiber 1300-nm ring laser source,» *Journal of Biomedical Optics*, vol. 10, nº 4, p. 6, 2005.
- [37] A. F. Fercher, C. K. Hitzenberger, G. Kamp y S. Y. El-Zaiat, «Measurement of intraocular distances by backscattering spectral interferometry,» *Optical Communications*, vol. 117, nº 1-2, pp. 43-48, 1995.
- [38] C. K. Hitzenberger, P. Trost, P.-W. Lo y Q. Zhou, «Three-dimensional imaging of the human retina by high-speed optical coherence tomography,» *Optics Express*, vol. 11, nº 21, pp. 2753-2761, 2003.
- [39] P. Patwari, N. J. Weissman, S. A. Boppart, C. Jesser, D. Stamper, J. G. Fujimoto y M. E. Brezinski, «Assessment of coronary plaque with optical coherence tomography and high-frequency ultrasound,» *The American Journal of Cardiology*, vol. 85, nº 5, pp. 641-644, 2000.
- [40] J. G. Fujimoto, C. Pitris, S. A. Boppart y M. E. Brezinski, «Optical coherence tomography: an emerging technology for biomedical imaging and optical biopsy,» *Neoplasia*, vol. 2, nº 1, pp. 9-25, 2000.

Propuesta de profilómetro óptico láser para la caracterización de paneles de madera CLT utilizados en construcción

- [41] G. Medina, «Norma Europea de la Madera Contralaminada: UNE-EN 16351,» Aitim, 2016.
- [42] D. Sevcik, «Surface Roughness Measurement—Terms and Standards,» Olympus Corporation, 28 Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.olympus-ims.com/es/metrology/surface-roughness-measurement-portal/terms-and-standards/>. [Último acceso: 17 Agosto 2020].
- [43] D. d. I. M. ETSIB, «Tema 17: Metrología del acabado superficial,» de *Módulo IV: Metrología Dimensional*, Bilbao, 2017, p. 16.
- [44] M. Literature, «Surface Roughness Measurement,» Mitutoyo America Corporation, Aurora, IL, 2009.
- [45] M. Pérez Jiménez, «TFG - Análisis comparativo de la calidad superficial de piezas fabricadas mediante mecanizado y fabricación aditiva,» Escuela Politécnica Superior de Jaén, Jaén, 2018.
- [46] F. Vera Pérez, «Desarrollo de un software para el cálculo y el análisis de parámetros de rugosidad,» Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Barcelona, 2018.
- [47] C. Galván, «Nuevo Software para Análisis de Datos de Rugosidad en 2D y 3D,» Simposio de Metrología, Querétaro, 2008.
- [48] I. Paricio Alcalá y A. Sanz Lobera, «Caracterización del acabado superficial en la industria aeronautica y aeroespacial: desarrollo de software patrón de referencia de acuerdo a la norma ISO-5436: VisualSR2D,» Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio, Madrid, 2014.
- [49] L. Pelaz, «Equipos analizadores de señal,» Universidad de Valladolid, Valladolid, 2012.
- [50] K. Richter, W. C. Feist y M. T. Knaebe, «The Effect of Surface Roughness on the Performance of Finishes. Part 1.- Roughness Characterization and Stain Performance,» *Forest Products Journal*, vol. 45, nº 7, pp. 91-97, 1995.

ANEXO I: Pliego de condiciones. Normativa aplicable. Plan de pruebas:

Geometrical Product Specifications (GPS) – Filtration – Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters. [ISO 16610 - 21:2011]

<https://www.iso.org/standard/50176.html>

Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay) – The American Society of Mechanical Engineers. [ASME – B46.1 – 2002]

<https://files.asme.org/Catalog/Codes/PrintBook/17866.pdf>

ANEXO II: Planos, esquemas, diseño de detalle, código:

“Rugosidades y Presupuesto”. Excel. Archivo adjunto. *Septiembre 2020*.

“Utils” (Python File). Archivo adjunto. *Septiembre 2020*.

“Main Program” (Python File). Archivo adjunto. *Septiembre 2020*.

ANEXO III: Manuales de usuario:

Micro-Epsilon: Instruction Manual – optoNCDT 2300. [PDF]

Micro-Epsilon: Assembly Instructions – optoNCDT 2300. [PDF]