

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONAHCYT (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos de Autor.

CICESE © 2025 , Todos los Derechos Reservados, CICESE

# Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California



## Maestría en Ciencias en Óptica con orientación en Óptica Física

---

### Desalinización solar de agua utilizando superficies texturizadas con láser

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestra en Ciencias

Presenta:

**Leydy Johana Velasco Pardo**

Ensenada, Baja California, México

2025

Tesis defendida por

**Leydy Johana Velasco Pardo**

y aprobada por el siguiente Comité

Dra. Paulina Segovia Olvera

Codirectora de tesis

Dr. Francisco Javier Carranza Chávez

Codirector de tesis

Dr. Raúl Rangel Rojo

Dr. Jacob Licea Rodríguez

Dr. Luis Felipe Devia Cruz

Dr. Hugo Alejandro Borbón Nuñez



Dr. Daniel Jauregui Vazquez  
Coordinador del Posgrado en Óptica

Dra. Ana Denise Re Araujo  
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta Leydy Johana Velasco Pardo como requisito parcial para la obtención del grado de Maestra en Ciencias en Óptica con orientación en Óptica Física.

## **Desalinización solar de agua utilizando superficies texturizadas con láser**

Resumen aprobado por:

Dra. Paulina Segovia Olvera

Codirectora de tesis

Dr. Francisco Javier Carranza Chávez

Codirector de tesis

La escasez de agua dulce es un desafío global agravado por el cambio climático, la contaminación y la sobreexplotación de los recursos hídricos, que exige soluciones innovadoras y sostenibles a largo plazo. En este contexto, el presente estudio se enfoca en la destilación solar como una opción viable para producir agua limpia a partir de agua salada en zonas con altos niveles de irradiación solar. En específico, se investigó la factibilidad de utilizar superficies metálicas texturizadas con láser para mejorar el desempeño térmico de un destilador solar convencional de una pendiente bajo las condiciones climáticas de Ensenada, BC. Dos posiciones diferentes de las superficies fueron exploradas: en la base de la charola del destilador, y parcialmente sumergidas e inclinadas un ángulo igual a la latitud local con respecto a la horizontal. Para diseñar superficies adecuadas, con alta mojabilidad y absorbancia de luz solar, se evaluaron los efectos que distintos parámetros de irradiación láser, como la polarización del haz, la velocidad y separación de barrido, y la fluencia por pulso, ejercieron sobre las superficies. Los resultados de caracterización mostraron la existencia de estructuras multiescala sobre las superficies, como cavidades, ranuras y nanopartículas, que favorecieron el atrapamiento de la luz y mejoraron la mojabilidad. Se logró una reducción de la reflectancia del 82% en el intervalo 200 – 900 nm y se alcanzaron ángulos de contacto menores a  $10^\circ$ , exhibiendo condiciones de super hidrofiliidad. Con respecto al desempeño del destilador solar, se obtuvieron incrementos promedio de eficiencia térmica de 14.4% con las superficies inclinadas y de 4.64% con las superficies en posición horizontal, demostrando así que el texturizado láser puede ser una estrategia efectiva para mejorar la producción de agua en destiladores solares.

**Palabras clave:** Escasez de agua dulce, destilación solar, láser de femtosegundos, superficies texturizadas con láser, propiedades de mojabilidad, estructuras multiescala, eficiencia térmica, oscurecimiento de metales.

Abstract of the thesis presented by Leydy Johana Velasco Pardo as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Optics with orientation in Physical Optics.

### **Solar Water Desalination Using Laser-Textured Surfaces**

Abstract approved by:

Dra. Paulina Segovia Olvera

Thesis Co-Director

Dr. Francisco Javier Carranza Chávez

Thesis Co-Director

Water scarcity is a global challenge aggravated by climate change, pollution, and overexploitation of rivers and aquifers, that demands innovative and sustainable solutions. Within this context, the present work focuses on solar distillation as a viable option to produce clean water from saline water in regions with high solar irradiation levels. Specifically, the feasibility of using laser-textured metallic surfaces to improve the thermal performance of a single-slope solar still was investigated at the weather conditions of Ensenada, BC. Two distinct surface positions were examined: at the bottom of the still basin, and partially-immersed and tilted at an angle equal to the local latitude. To design suitable surfaces, with high wettability and absorptivity of solar light, the effects caused on the surfaces by different laser irradiation parameters, such as beam polarization, sweep velocity and separation, and fluence per pulse, were studied. The surface characterization results showed the existence of multiscale structures, such as cavities, grooves, and nanoparticles, that favored light-trapping and improved the wettability. A reflectance reduction of 82 % in the range 200 – 900 nm was observed, and contact angles lower to  $10^\circ$  were attained, exhibiting super hydrophilicity conditions. Regarding the solar still performance, average increments of the thermal efficiency of 14.4 % and 4.64 % were obtained, the first one with the tilted surfaces and the second one with the horizontal surfaces. Based on these results, it is demonstrated that laser-texturing can be an effective strategy to improve water production in solar stills.

**Keywords:** Freshwater scarcity, solar distillation, femtosecond laser, laser-textured surfaces, wettability properties, multiscale structures, thermal efficiency, metal blackening.

# Dedicatoria

## **A mi madre Cecilia y a mi hermana Diana**

Son lo que más amo en el mundo, mi apoyo, mi fuerza y mi inspiración. Gracias por llenarme de amor.

## **A Cristian**

mi persona favorita, por estar siempre a mi lado, en cada desafío y en cada logro. Tu apoyo incondicional y tu amor han sido mi fortaleza, y cada paso que doy es también gracias a ti. Gracias por ser mi compañero, mi inspiración, y por nunca soltar mi mano.

## **A mi familia**

por su cariño y apoyo constante, y a mi abuelita, por su amor infinito y enseñanzas que siempre llevo en el corazón.

## Agradecimientos

Agradezco profundamente al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, (CICESE) por darme la oportunidad de alcanzar una de mis metas. Extiendo también mi gratitud al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico otorgado para llevar a cabo mis estudios de maestría. Número de CVU 1240778.

Quisiera agradecer profundamente a mis directores de tesis, la Dra. Paulina Segovia Olvera y el Dr. Francisco Javier Carranza Chávez, por su invaluable apoyo y guía a lo largo de este proyecto. Su dedicación y disponibilidad fueron fundamentales para mi crecimiento académico y personal. Aprecio su paciencia para resolver mis innumerables dudas y la calidad humana con la que me acompañaron en cada etapa, tanto en los momentos de éxito como en los más difíciles. Gracias por compartir su vasto conocimiento y brindarme siempre palabras de aliento. Sus enseñanzas y consejos han dejado una huella significativa en mi formación.

Agradezco profundamente a los doctores Hugo Borbón Núñez, Luis Felipe Devia y Jacob Licea por el honor de formar parte de mi comité de tesis y por la ayuda y acompañamiento brindados a lo largo del desarrollo de mi trabajo. Su guía durante la revisión de este proyecto, así como sus valiosas aportaciones, han sido fundamentales para mi crecimiento profesional y desarrollo personal. Hago un agradecimiento especial al Dr. Raúl Rangel Rojo por todos los buenos momentos compartidos, por sus enseñanzas y por cada una de las historias que me ha contado, las cuales han enriquecido no solo mi aprendizaje académico, sino también mi vida.

Mi más sincero agradecimiento al equipo del Laboratorio de Pulsos Ultra-Cortos y Procesamiento de Materiales por su constante apoyo durante el desarrollo de este proyecto. En especial, agradezco al Dr. Santiago Camacho López por la cálida bienvenida que me brindó al unirme al grupo. También quiero agradecer a Yasmín Esqueda por su valiosa orientación en el laboratorio y por compartir su amplio conocimiento sobre los equipos. Mi agradecimiento se extiende al técnico Dr. Marcos Antonio Plata Sánchez por su colaboración y asistencia invaluable durante mi trabajo en el laboratorio.

Agradezco a las secretarías del posgrado, María del Carmen Ochoa Solano y Marla Angélica Monjaraz

Abarca, por toda la ayuda y el apoyo brindados a lo largo de mi estancia. Siempre estuvieron dispuestas a colaborar y facilitar los trámites necesarios, lo cual fue invaluable para el buen desarrollo de mi trabajo.

Agradezco profundamente a mis suegros, María Jiménez y Mario Barrero, por su constante apoyo, cuidado y compañía a lo largo de estos años. Su presencia ha sido fundamental en mi vida, y siempre los llevo en mi corazón con gratitud y cariño.

Quiero agradecer a mi prima María, quien ha sido como una hermana para mí; a mi gran amigo de toda la vida, Jonatan; y a mis queridos amigos en Ensenada, por su compañía, sus risas y por estar siempre a mi lado, haciendo cada momento más especial. Gracias por su apoyo incondicional, su amistad y por ser parte fundamental de este viaje.



# Tabla de contenido

	Página
Resumen en español .....	ii
Resumen en inglés .....	iii
Dedicatoria .....	iv
Agradecimientos .....	v
Lista de figuras .....	ix
Lista de tablas .....	xii
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Justificación .....	5
1.3. Hipótesis .....	6
1.4. Objetivo general .....	6
1.5. Objetivos específicos .....	7
<b>Capítulo 2. Marco teórico</b>	
2.1. Procesamiento de materiales mediante láser de pulsos ultracortos .....	8
2.1.1. Procesos de interacción entre la energía láser y los materiales. ....	8
2.1.2. Espectroscopia de reflectancia. ....	11
2.1.3. Características y efectos de los distintos tipos de pulsos láser. ....	12
2.1.4. Modelo de dos temperaturas. ....	14
2.1.5. Ablación láser de materiales. ....	15
2.1.6. Aspectos fundamentales en el procesamiento de materiales mediante láser. .	16
2.1.6.1. Energía y potencia por pulso. ....	16
2.1.6.2. Fluencia por pulso. ....	18
2.1.6.3. Fluencia integrada. ....	19
2.2. Modificación de la superficie de materiales con estructuras multiescala. ....	20
2.2.1. Propiedades funcionales de estructuras multiescala. ....	20
2.2.2. Estructuras jerárquicas. ....	21
2.3. Oscurecimiento de metales mediante texturizado láser. ....	23
2.3.1. Mecanismos de Oscurecimiento. ....	23
2.3.2. Aplicaciones del Oscurecimiento de Metales. ....	26
2.4. Propiedades de mojabilidad de las superficies y la técnica de ángulo de contacto. .	27
2.5. Destilación solar. ....	29
2.5.1. Análisis térmico de un destilador solar. ....	29
<b>Capítulo 3. Metodología</b>	
3.1. Muestra de Aluminio (Al) .....	33
3.2. Arreglo experimental para el procesamiento de materiales .....	34
3.2.1. Diagrama del arreglo óptico experimental .....	34
3.2.2. Sistema de plano equivalente de blanco (PEB) .....	35
3.2.3. Control de polarización .....	36
3.2.4. Amplificador láser .....	37

3.3.	Diseño experimental y parámetros de irradiación . . . . .	38
3.4.	Técnicas de caracterización . . . . .	40
3.5.	Diseño del destilador solar . . . . .	46
3.6.	Instalación experimental e instrumentación . . . . .	49
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Resultados y discusión</b>	
4.1.	Caracterización de la muestra de aluminio (Al) . . . . .	52
4.2.	Texturizado de aluminio con pulsos láser y análisis de reflectancia y mojabilidad. . .	54
4.2.1.	Determinación de la fluencia umbral de oscurecimiento del Al. . . . .	54
4.2.2.	Fabricación de áreas texturizadas extendidas. . . . .	55
4.2.3.	Optimización de los parámetros de irradiación para incrementar la hidrofili- cidad. . . . .	61
4.2.4.	Evaluación del desempeño térmico de las superficies texturizadas en el des- tilador solar . . . . .	66
4.3.	Desempeño del destilador solar . . . . .	68
<b>Capítulo 5.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones para trabajo futuro</b>	
5.1.	Conclusiones . . . . .	73
5.2.	Recomendaciones para trabajo futuro . . . . .	74
<b>Literatura citada</b>	. . . . .	75
<b>Anexos</b>	. . . . .	79

# Lista de figuras

Figura	Página
1. Diagrama de un destilador solar de doble pendiente. . . . .	3
2. Representación esquemática de la reflexión difusa y especular. . . . .	12
3. Diferencias entre los efectos causados por pulsos láser largos (a) y pulsos láser cortos (b). Adaptado de "Ultrafast laser processing of materials: a review" Phillips et al. (2015). Modificado por el autor. . . . .	13
4. Superficies funcionales inspiradas en la naturaleza, generadas mediante texturizado de superficies con láser. Adaptado de "Bio-Inspired Functional Surfaces Based on Laser-Induced Periodic Surface Structures" Müller et al. (2016). Modificado por el autor. . . . .	21
5. Diagrama de clasificación de las LIPSS. (a) Micrografía SEM de LIPSS del tipo LSFL. (b) Micrografía SEM de LIPSS del tipo HSFL. Tanto las micrografías (a) como (b) muestran estructuras generadas sobre una superficie de aleación de titanio ( <i>Ti6Al4V</i> ). Adaptado de "Laser-Induced Periodic Surface Structures - A Scientific Evergreen" Bonse et al. (2017a). Modificado por el autor. . . . .	22
6. Diagrama que muestra cómo la luz incidente se dispersa y refleja múltiples veces dentro de diversas estructuras, como ranuras y cavidades profundas. Estas reflexiones incrementan la absorción de luz dentro del material irradiado por láser. Adaptado de "Femtosecond fiber laser based metal blackening" Huang et al. (2013a). Modificado por el autor. . . . .	24
7. Diagrama de la excitación de plasmones superficiales localizados (LSP) en presencia de un campo eléctrico oscilante. Adaptado de "Nanostructured surfaces as plasmonic biosensors: A review" Minopoli et al. (2022). Modificado por el autor. . . . .	25
8. Diagrama de los plasmones superficiales (SPs) en la interfaz entre un metal y un material dieléctrico. Adaptado de "Surface Plasmon Excitation: Theory, Configurations, and Applications" Aftab et al. (2024). Modificado por el autor. . . . .	26
9. Diagrama que muestra el ángulo de contacto como indicador de la mojabilidad de una superficie y cómo la incorporación de estructuras jerárquicas permite modificar y ajustar dicha propiedad. Adaptado de "Superhydrophilic-superhydrophobic patterned surfaces: From simplified fabrication to emerging applications" Chen et al. (2022a). Modificado por el autor. . . . .	27
10. (a) Diagrama de la perspectiva frontal de un destilador solar de doble pendiente ilustrando los mecanismos de transferencia de calor. (b) Diagrama de resistencias térmicas. . . . .	30
11. Diagrama del arreglo óptico experimental utilizado para el procesamiento de materiales. . . . .	35
12. Transformación de polarización lineal a circular . . . . .	36
13. Proceso de amplificación de pulsos ultracortos. Basado en una imagen modificada de Mori 2010. . . . .	38
14. Esquema de barridos lineales en áreas extendidas . . . . .	39

Figura	Página
15. Esquema de barridos para el experimento de irradiación mediante un proceso de dos pasos. (a) Representación de la irradiación inicial, en la que se realiza un barrido lineal cubriendo un área total de 38.1 mm de ancho por 33 mm de alto. (b) Esquema de la segunda etapa de irradiación, con áreas de 1 mm de ancho y 33 mm de alto, realizadas cada 10 mm de separación. (c) Ilustración del área total irradiada en el segundo experimento. . . . .	39
16. Microscopio Olympus BX41. Fuente: Spectra Services Inc. (n.d.). . . . .	41
17. Microscopio electrónico de barrido Hitachi SU3500. Fuente: Hitachi High-Tech. (n.d.). . . . .	42
18. Perfilómetro óptico de KEYENCE. Fuente: KEYENCE Corporation. (n.d.). . . . .	43
19. Goniómetro de ángulo de contacto de Ossila. Fuente: Ossila. (n.d.). . . . .	44
20. Esquema simplificado de una esfera integradora utilizada en la medición de propiedades ópticas . . . . .	45
21. Espectrofotómetro UV-Vis AvaSpec-ULS2048CL-EVO de Avantes. Fuente: Avantes. (n.d.).	45
22. Diseño del destilador solar vista 3D (configuración #1). . . . .	46
23. Diagrama esquemático con las medidas correspondientes a cada una de las paredes y el techo del destilador. . . . .	47
24. Diagrama 3D de la configuración experimental #2. . . . .	48
25. Diagrama 3D de la configuración experimental #3. . . . .	49
26. (a) Sensor de temperatura impermeable DS18B20. (b) Mini bomba de agua sumergible. (c) Sensor de nivel de agua para Arduino. (d) Medidor de sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica. . . . .	50
27. Fotografía del destilador solar ensamblado sin superficies texturizadas. . . . .	50
28. Procedimiento seguido durante las pruebas con el destilador solar. . . . .	51
29. . . . .	53
30. Espectro de reflectancia especular de la muestra de aluminio sin irradiar medido a incidencia normal. . . . .	53
31. Imagen de una gota de agua sobre la superficie de la lámina de aluminio sin texturizar. El ángulo de contacto medido está indicado en rojo. . . . .	54
32. Micrografías ópticas de los barridos realizados con polarización lineal (a) y circular (b). . . . .	55
33. (a) Esquema y (b) fotografía de las áreas irradiadas (etiquetas de la 1 a la 10) en la lámina de aluminio. . . . .	56
34. (a) Espectro de reflectancia para las irradiaciones realizadas con polarización lineal. (b) Espectro de reflectancia para las irradiaciones realizadas con polarización circular. (c) Espectro de la radiación solar. . . . .	57
35. Micrografías SEM de las estructuras generadas con (a) Polarización lineal (etiqueta 5) y (b) Polarización circular (etiqueta 10). . . . .	58

Figura	Página
36. Mediciones del ángulo de contacto realizadas en las irradiaciones con las etiquetas de 1 a 10. . . . .	59
37. Micrografías SEM de las estructuras generadas con: (a) Polarización lineal (etiqueta 5) y (b) Polarización circular (etiqueta 10), utilizadas para el análisis de la mojabilidad de la superficie. . . . .	60
38. a) Esquema y fotografía de las áreas irradiadas (etiquetas 11 y 12) en la lámina de aluminio. b) Mediciones del ángulo de contacto realizadas en las irradiaciones con las etiquetas 11 y 12. . . . .	61
39. (a) Esquema del área extendida irradiada correspondiente a la etiqueta 13 en la lámina de aluminio. (b) Micrografía de la superficie texturizada. . . . .	62
40. (a) Mediciones del ángulo de contacto para el área extendida total tras un segundo paso de irradiación. (b) Espectro de reflectancia de la muestra correspondiente al área extendida total con un segundo paso de irradiación. . . . .	63
41. (a) Topografía de la superficie medida mediante perfilómetro óptico antes de la segunda irradiación. (b) Topografía de la superficie medida mediante perfilómetro óptico después de la segunda irradiación. . . . .	64
42. Mediciones del ángulo de contacto y espectro de reflectancia para las muestras finales. . . . .	65
43. Fotografía del montaje experimental para determinar la temperatura alcanzada por la lámina texturizada en comparación con la temperatura alcanzada por la charola. . . . .	67
44. Comparación de la temperatura entre la charola y la lámina texturizada durante 1 hora. Se presentan las mediciones de temperatura de la charola (línea azul) y de la lámina texturizada (línea naranja). . . . .	67
45. Radiación solar horaria durante los días en los que se realizaron los experimentos con la configuración #1: sin láminas. . . . .	68
46. Radiación solar horaria durante los días en los que se realizaron los experimentos con la configuración #2: láminas texturizadas inclinadas 32 grados respecto a la horizontal. . . . .	69
47. Radiación solar horaria durante los días en los que se realizaron los experimentos con la configuración #3: láminas texturizadas en posición horizontal sobre el fondo de la charola. . . . .	69
48. Eficiencias térmicas para cada configuración del destilador solar. . . . .	71

## Lista de tablas

Tabla		Página
1.	Métodos de desalación disponibles en el mercado. Tabla adaptada de Valero et al. (2001). . . . .	2
2.	Métodos para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor, presiones de vapor y otros símbolos implicados. . . . .	31
3.	(a) Composición química , (b) Propiedades del material . . . . .	33
4.	Matriz experimental de las tres configuraciones utilizadas para la evaluación de la eficiencia del destilador solar. . . . .	48
5.	Especificaciones de los sensores. . . . .	50
6.	Parámetros utilizados en las irradiaciones realizadas con las etiquetas de 1 a 10. . . . .	56
7.	Parámetros utilizados en las irradiaciones realizadas con las etiquetas de 11 y 12. . . . .	62
8.	Parámetros utilizados en las irradiaciones realizadas para la etiqueta 13. . . . .	62
9.	Condiciones ambientales de las tres configuraciones durante cada día del experimento. . . . .	70
10.	Volumen destilado obtenido durante cada día de prueba para las tres configuraciones. . . . .	70
11.	Destilado promedio y eficiencia térmica promedio para las tres configuraciones. . . . .	72

# Capítulo 1. Introducción

---

En este capítulo, se explora un dilema cada vez más palpable a nivel global: la creciente escasez de agua dulce y su impacto en el desarrollo sostenible. Este recurso, esencial para la vida y el desarrollo humano, se encuentra amenazado por diversos factores, tales como el cambio climático, la contaminación ambiental y la sobreexplotación de los recursos hídricos. Frente a este desafío, la búsqueda de soluciones innovadoras y sostenibles se convierte en una prioridad urgente. En particular, el estudio se enfoca en las regiones áridas, donde la escasez de agua es una realidad cotidiana, pero donde también se presenta una oportunidad única gracias a la abundancia de energía solar.

La destilación solar emerge como una técnica prometedora para abordar la escasez de agua, aprovechando la energía solar, un recurso natural y sostenible, para generar agua potable. Sin embargo, la eficiencia energética y la viabilidad económica de esta tecnología son todavía objeto de estudio y optimización. En este contexto, la técnica de texturizado de superficies mediante láser de pulsos ultracortos, se presenta como una innovación revolucionaria que podría superar las limitaciones de las tecnologías convencionales de destilación solar. A través de una revisión exhaustiva de la literatura científica y tecnológica, este capítulo busca establecer un marco teórico que sustente la investigación sobre el potencial de las estructuras multiescala para mejorar la eficiencia de los procesos de destilación solar.

## 1.1. Antecedentes

A lo largo de la historia, la disponibilidad de agua dulce ha sido un recurso esencial para el desarrollo y la supervivencia de las civilizaciones humanas. Sin embargo, con el aumento de la población mundial, la industrialización y el cambio climático, la demanda de agua dulce ha aumentado significativamente, al mismo tiempo que las fuentes de agua tradicionales se han visto amenazadas por la escasez y la contaminación. El cambio climático, impulsado principalmente por la emisión excesiva de gases de efecto invernadero, ha alterado los patrones climáticos, aumentando la frecuencia de sequías y afectando la disponibilidad de recursos hídricos en diferentes regiones del planeta (IPPC (International Plant Protection Convention), 2014).

La creciente demanda de agua dulce y la disminución de los recursos hídricos disponibles han llevado a muchas regiones del mundo a enfrentar una crisis hídrica que amenaza la seguridad alimentaria, la salud pública y la estabilidad socioeconómica. La escasez de agua puede tener diversas causas, como factores geográficos y climáticos, así como razones económicas. Además, el 97.41 % del agua presente

en la Tierra es salada, del 2.59 % restante, el 1.984 % se encuentra en los glaciales y solo el 0.606 % se considera agua dulce (Von Medeazza, 2008). Debido a la escasez de agua dulce y la abundancia de agua salada, se ha prestado especial atención a las técnicas de desalinización para obtener agua potable a partir del agua salina, lo que ayuda a satisfacer la creciente demanda de agua en áreas con recursos hídricos limitados.

Las tecnologías de desalinización abarcan diferentes procesos que dependen de la forma de separación de sales y agua, del tipo de energía utilizada y el proceso físico de desalación. Estos procesos se enlistan más detalladamente en la Tabla 1. Afortunadamente, la mayoría de las regiones con alta escasez de agua tienen una ventaja natural de abundantes recursos de energía solar. México se encuentra entre las regiones con mayor irradiación solar (Boriskina et al., 2019), lo que abre el potencial para implementar tecnologías de desalinización solar y abordar la problemática hídrica.

**Tabla 1.** Métodos de desalación disponibles en el mercado. Tabla adaptada de Valero et al. (2001).

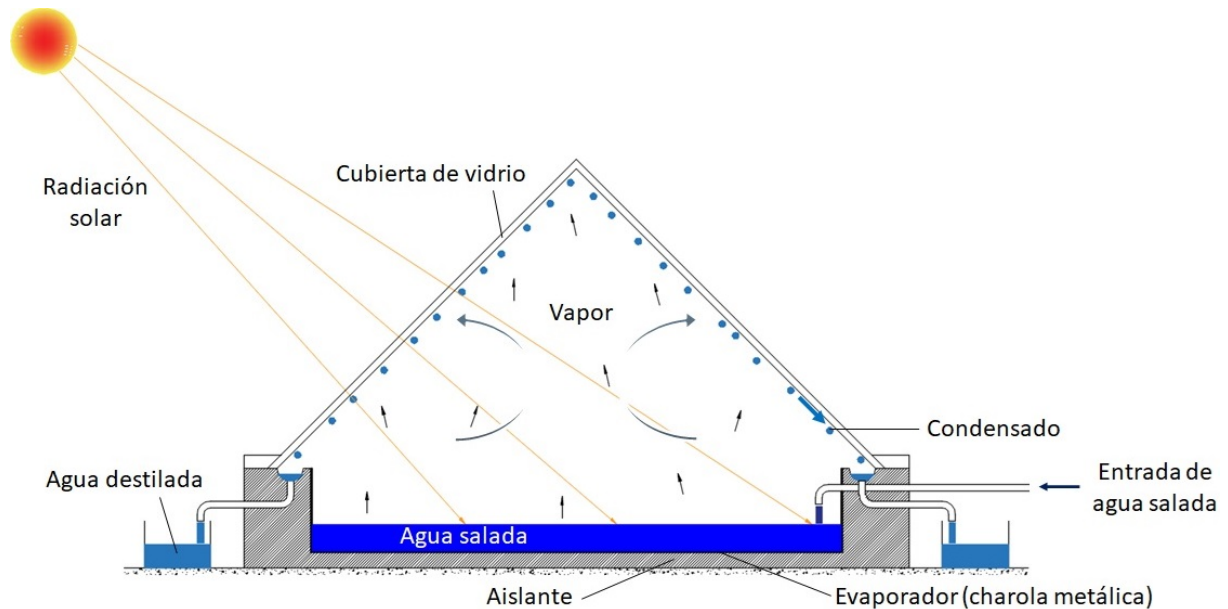
Separación	Energía	Proceso	Método
El agua de la sal	Térmica	Evaporación	Destilación súbita (flash)
			Destilación multiefectos
			Termo compresión de vapor
			Destilación solar
	Cristalización	Congelación	
		Formación de hidratos	
Filtración y evaporación	Destilación con membranas		
Mecánica	Evaporación	Compresión mecánica de vapor	
	Filtración	Ósmosis inversa	
La sal del agua	Eléctrica	Filtración selectiva	Electrodialisis
	Química	Intercambio	Intercambio iónico

La explotación responsable de estas tecnologías podría proporcionar una solución viable y sostenible para mitigar los efectos de la crisis hídrica, al mismo tiempo que se aprovechan los abundantes recursos de energía solar en estas regiones. Sin embargo, también es importante considerar el equilibrio entre la desalinización y la conservación de los recursos hídricos existentes y fomentar prácticas sostenibles en el uso del agua. Como se mencionó previamente, debido a las condiciones geográficas y climáticas del territorio mexicano, es de interés abordar especialmente las tecnologías de destilación solar. Esta técnica utiliza la energía solar para generar la evaporación y posterior condensación del agua, obteniendo así agua destilada. Aunque en la literatura se encuentra una gran variedad de configuraciones para destiladores solares, una de las más simples y que nos puede dar una idea general de su funcionamiento es el destilador solar de doble pendiente, que se muestra en la Figura 1.

Esta configuración consiste en una estructura cerrada tipo invernadero. El interior de la estructura



está conformado por una superficie absorbente oscura, denominada evaporador, generalmente hecha de metal, que tiene la capacidad de absorber la radiación solar y convertirla en calor. El evaporador se encuentra aislado térmicamente en la parte inferior, evitando pérdidas de calor (Hermosillo-Villalobos, 1989). Dentro del evaporador, se deposita el agua a destilar (ya sea agua salina o agua residual), que al ser expuesta a la radiación solar, provoca que el evaporador absorba la energía solar y transfiera el calor al agua, lo que resulta en un incremento en su presión de vapor, facilitando la evaporación. Este proceso logra una separación entre las sales minerales y el agua.



**Figura 1.** Diagrama de un destilador solar de doble pendiente.

El vapor de agua generado durante el proceso de evaporación se eleva hacia la parte superior de la cubierta, donde entra en contacto con una superficie fría y limpia, generalmente una placa de vidrio o plástico transparente, denominada condensador. Esta superficie enfría el vapor de agua, lo que provoca su condensación y su transformación nuevamente en agua líquida. El agua condensada escurre y se recoge en un canal o contenedor situado en la parte inferior del destilador.

Los destiladores solares presentan tanto ventajas como desventajas. Dentro de las ventajas se encuentra su construcción, operación y mantenimiento, que son sencillos y económicos; el agua salada de alimentación no requiere pretratamiento; son fácilmente escalables; son recomendables para comunidades aisladas; y producen agua destilada de buena calidad. Por otra parte, las desventajas incluyen una productividad baja y la necesidad de grandes extensiones de terreno plano. Existen algunas recomendaciones para aumentar la producción, como incrementar la superficie de condensación, reutilizar el calor latente de condensación, precalentar el agua de alimentación o añadir calor externo, aumentar el área de captación

de radiación solar y extender el período de funcionamiento.

Con el objetivo de incrementar el área de captación de radiación solar, se considera crucial mejorar la eficiencia de absorción de dicha radiación. Una técnica prometedora en este ámbito es el texturizado de superficies con láser de pulsos ultracortos, la cual ha ganado relevancia en la investigación debido a su capacidad para modificar las propiedades ópticas y mecánicas de las superficies. Esta técnica ha cobrado notoriedad, como se evidencia en el aumento significativo de publicaciones, según destacan Bonse et al. (2017a).

A partir de estos avances, surgieron teorías para explicar los patrones periódicos producidos, como las de Keilmann & Bai (1982), Sipe et al. (1983) y Guosheng et al. (1982) quienes acuñaron el término “Laser-Induced Periodic Surface Structures” (LIPSS) en la literatura. Desde principios de la década de 1990, la técnica de texturizado micro/nano en superficies mediante láseres de femtosegundos ( $10^{-15}$  s) ha aumentado significativamente. Esto se debe a que puede aplicarse a una amplia gama de materiales como metales, dieléctricos, cerámicos y polímeros, permitiendo modificar sus propiedades eléctricas, mecánicas, químicas, tribológicas, de mojabilidad y ópticas (Ahmmed et al., 2014). Esta técnica se ha convertido en una herramienta valiosa para la investigación y el desarrollo de nuevos materiales con propiedades optimizadas.

En diversos estudios se han investigado las ventajas potenciales de utilizar esta técnica. Por ejemplo, en el trabajo de Li et al. (2022), al irradiar con un láser de femtosegundos en dos etapas, se generó un texturizado tipo “ojo de polilla” durante un proceso de escaneo rápido múltiple en el aire. Asimismo, durante el escaneo lento e individual, se logró la introducción de abundantes nanopartículas en la superficie del material. Este estudio permitió investigar la mitigación de la reflexión óptica de una aleación de aluminio. De manera similar Chen et al. (2023) desarrollaron micro-bosques porosos y jerárquicos en una placa de aleación de aluminio, logrando reflectancias mínimas de 1.47 % y 2.41 %, respectivamente, aportando un valor significativo al oscurecimiento del aluminio.

Por otro lado, se han llevado a cabo estudios sobre la aplicación de superficies texturizadas en destiladores solares. En el trabajo de Chen et al. (2022b) se utilizó aluminio texturizado con láser para desarrollar un evaporador solar superhidrofílico basado en estructuras capilares. De manera similar Singh et al. (2020) diseñaron una superficie de aluminio superhidrofílica y superabsorbente de luz, alcanzando una tasa de evaporación media cercana al 100 % de eficiencia. Además, al utilizar esta superficie con agua contaminada, demostraron una reducción en los niveles de contaminantes por debajo de los estándares de la OMS y la EPA para agua potable.

Estos temas no sólo se han estudiado a nivel global, sino también en el grupo de investigación de pulsos ultracortos del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE). En dicho grupo se han llevado a cabo estudios sobre LIPSS en superficies. Por ejemplo (Segovia et al., 2021) estudiaron LIPSS en películas delgadas de titanio (Ti), demostrando la formación de estructuras periódicas de baja frecuencia espacial (LSFL) compuestas por una fase. En este mismo trabajo se observa, en un rango de baja fluencia integrada, la formación de HSFL (estructuras periódicas de alta frecuencia espacial). Además, en otro trabajo Segovia-Olvera et al. (2022) fabricaron áreas extendidas texturizadas con LIPSS en películas de titanio, obteniendo LSFL de fase  $\text{TiO}_2$ . Asimismo, el laboratorio de energías renovables de CICESE cuenta con experiencia en la construcción de destiladores solares. Por ello, en este trabajo se combinan las fortalezas de ambos grupos de investigación para desalinizar agua salada con energía solar térmica.

Los metales presentan características favorables, como alta conductividad térmica, resistencia mecánica, durabilidad y resistencia a la corrosión, además de ser eficientes en la absorción de radiación solar. Estas propiedades los convierten en materiales ideales para ser utilizados como evaporadores en destiladores solares. Dentro de una amplia variedad de metales, el aluminio destaca por cumplir con estos factores, además de ser relativamente económico en comparación con otros metales. Mejorar las propiedades del aluminio puede llevar a una optimización significativa en el funcionamiento de los destiladores solares convencionales. Diversos estudios, como los realizados por Singh et al. (2020), Luo et al. (2019) y Chen et al. (2022b) han demostrado estas mejoras mediante técnicas avanzadas de texturizado.

## 1.2. Justificación

Dado que el agua dulce es un recurso esencial para el desarrollo sostenible, se ha observado una preocupante tendencia a su disminución debido a factores como el cambio climático, la contaminación y la sobreexplotación de los recursos hídricos, entre otros. Esta situación ha generado una creciente demanda de agua en diversas regiones del mundo, lo que constituye un desafío crítico que requiere soluciones innovadoras y sostenibles. En muchas zonas áridas del planeta, incluidas algunas áreas de México, la escasez de agua es una realidad alarmante. No obstante, estas regiones también poseen una ventaja considerable: la abundancia de un recurso natural, la energía solar. Esta fuente de energía puede aprovecharse para implementar tecnologías para generar agua para uso humano, como la destilación solar.

Se sabe que la destilación solar es un proceso que consume mucha energía solar térmica, lo que lo

convierte en un método costoso para producir agua desalinizada. Además, su tasa de producción es limitada. Por ello, es crucial desarrollar estrategias de destilación más eficientes que aprovechen de manera más efectiva la energía solar, permitiendo una producción sostenible de agua. En este contexto, la técnica de texturizado de superficies mediante láser de pulsos ultracortos para generar estructuras a nano y micro escala ha sido objeto de estudios recientes que demuestran un alto potencial para modificar propiedades ópticas y de mojabilidad de los materiales.

Esta técnica se perfila como una opción económica y eficiente en comparación con métodos convencionales de micro/nano estructurado superficial, como la litografía, la deposición de películas delgadas o el grabado químico. Estas técnicas tradicionales suelen involucrar procesos costosos y laboriosos que demandan equipos especializados, el empleo de reactivos, condiciones atmosféricas controladas, y, en general, resultan poco eficientes en términos de energía y recursos. En contraste, la técnica de texturizado con láser de superficies es eficiente y no requiere reactivos adicionales, ya que permite alcanzar modificaciones superficiales precisas y controladas mediante el uso exclusivo de láseres y equipos de laboratorio convencionales, lo que reduce los costos y la complejidad de fabricación.

### **1.3. Hipótesis**

La técnica de texturizado láser de superficies puede utilizarse para fabricar superficies altamente absorbentes de luz e hidrofílicas para su aplicación en destiladores solares.

### **1.4. Objetivo general**

El objetivo general de este proyecto es fabricar superficies metálicas texturizadas, superabsorbentes y superhidrofílicas mediante irradiación láser y evaluar su viabilidad para generar agua desalinizada en un destilador solar.

## 1.5. Objetivos específicos

- Estudiar la influencia de distintos parámetros de irradiación en la morfología de micro/nano estructuras.
- Correlacionar la morfología de las estructuras con su hidrofiliidad y su absorción.
- Optimizar los parámetros de irradiación para fabricar superficies superhidrofílicas y superabsorbentes.
- Construir un destilador solar y evaluar su desempeño utilizando las superficies fabricadas.

## Capítulo 2. Marco teórico

---

### 2.1. Procesamiento de materiales mediante láser de pulsos ultracortos

#### 2.1.1. Procesos de interacción entre la energía láser y los materiales.

El procesamiento de materiales mediante láseres de pulsos ultracortos es una tecnología relativamente reciente que ha transformado profundamente el campo de la fabricación y el procesamiento de materiales. Sus orígenes se remontan a la invención del primer láser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) en 1960, un logro pionero del ingeniero y físico Theodore Maiman. Maiman utilizó un cristal de rubí como medio de ganancia para conseguir la primera emisión láser, un avance que es ampliamente reconocido como uno de los hitos tecnológicos más importantes del siglo XX. Este descubrimiento dio paso a una nueva era en la óptica y la fotónica, permitiendo la generación de haces de luz coherente y de alta intensidad. Los láseres de pulsos ultracortos, capaces de emitir pulsos de luz con duraciones en el rango de los femtosegundos ( $10^{-15}$  segundos) a los picosegundos ( $10^{-12}$  segundos), comenzaron a desarrollarse a finales de los años 1980 y principios de los 1990. Estos láseres han abierto nuevas posibilidades en el procesamiento preciso y controlado de materiales.

Desde la perspectiva de la óptica clásica, la luz se describe como una onda electromagnética compuesta por campos eléctricos y magnéticos oscilantes que se propagan a través del espacio. Cuando esta onda interactúa con la materia, se manifiestan diversos fenómenos ópticos, como la refracción, reflexión, absorción, dispersión y efectos ópticos no lineales. La respuesta de un material expuesto a radiación electromagnética, como la luz, está intrínsecamente relacionada con su índice de refracción complejo  $n$ , el cual se expresa como:

$$n = \eta + i\kappa. \quad (1)$$

Aquí,  $\eta$  representa la parte real del índice de refracción, la cual está relacionada con la velocidad de propagación de la onda electromagnética en el material. Por otro lado,  $\kappa$  es la parte imaginaria, que corresponde al coeficiente de extinción, donde a medida que la luz viaja a través del material, la amplitud de la onda electromagnética disminuye debido a la absorción de energía por el material, lo que se manifiesta como una atenuación de la intensidad de la luz. Para describir la propagación de una onda

electromagnética en un material con un índice de refracción complejo  $n$  es útil modelar la onda como una onda plana, representada por la siguiente ecuación:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})}, \quad (2)$$

donde  $\mathbf{E}_0$  es la amplitud del campo eléctrico,  $\omega$  es la frecuencia angular de la onda,  $\mathbf{k}$  es el vector de onda, que contiene información sobre la dirección de propagación y el número de onda,  $\mathbf{r}$  es el vector de posición, y  $t$  es el tiempo. Para un material con índice de refracción complejo  $n$  (Ecuación (1)), el vector de onda está dado como:

$$\mathbf{k} = \frac{\omega}{c} n \hat{\mathbf{s}} = \frac{\omega}{c} (\eta + i\kappa) \hat{\mathbf{s}}, \quad (3)$$

donde  $\hat{\mathbf{s}}$  es un vector unitario en la dirección de propagación. El término complejo en el índice de refracción ( $\kappa$ ) introduce un decaimiento exponencial en la amplitud de la onda a medida que se propaga. Asumiendo que la onda se propaga a lo largo del eje  $Z$ , se puede escribir:

$$\mathbf{E}(z, t) = \mathbf{E}_0 e^{i(\omega t - \frac{\omega}{c} \eta z)} e^{-\frac{\omega \kappa}{c} z}. \quad (4)$$

El término  $e^{-\frac{\omega \kappa}{c} z}$  representa la disminución de la amplitud de la onda debido a la absorción del material. La intensidad de una onda electromagnética está relacionada con el cuadrado de la amplitud del campo eléctrico. Específicamente, la intensidad  $I(z)$  es proporcional a  $|E(z)|^2$ . Al tomar el cuadrado del campo eléctrico en la Ecuación (4) para calcular la intensidad, se obtiene:

$$I(z) \propto |E(z)|^2 = |E_0|^2 e^{-2\frac{\omega \kappa}{c} z},$$

$$I(z) = I_0 e^{-\left(\frac{2\omega}{c} \kappa\right) z}. \quad (5)$$

Por lo tanto, la intensidad de la luz a una distancia  $z$  se reduce exponencialmente con la distancia recorrida en el medio. La expresión dada en la Ecuación (5) corresponde a la conocida ley de Beer-Lambert, la cual explica cómo la luz se atenúa al interactuar con las características del material. A partir

de dicha ecuación, es posible establecer el coeficiente de absorción  $\alpha$  de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{2\omega\kappa}{c} = \frac{2\left(\frac{2\pi c}{\lambda}\right)\kappa}{c} = \frac{4\pi\kappa}{\lambda}, \quad (6)$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de absorción macroscópico del material, que mide cuánta luz es absorbida por un material al atravesarlo. Este coeficiente está relacionado con la cantidad de luz que se atenúa (pierde intensidad) a medida que pasa por el material. (Hecht, 2000).

Además de la absorción de la luz en un material, cuando la energía electromagnética interactúa con él, las ondas electromagnéticas generalmente se reflejan y transmiten en la interfaz entre dos medios con diferentes índices de refracción, como el aire y el material. En el caso de los metales, una de sus características distintivas es la alta densidad de electrones libres. En un metal, los electrones de valencia no están fuertemente ligados a los átomos, sino que se mueven libremente a través del material. Cuando la radiación electromagnética (como la luz) incide sobre la superficie de un metal, los campos eléctricos y magnéticos de las ondas interactúan con los electrones libres del metal. Debido a su libertad de movimiento, los electrones responden rápidamente al campo eléctrico oscilante de la onda electromagnética.

El comportamiento reflectante de los metales también puede describirse matemáticamente mediante las ecuaciones de Fresnel. El coeficiente de reflexión, que indica cuánta energía se refleja en una interfaz entre dos medios (como el aire y un metal), depende del índice de refracción complejo del material. Para determinar la reflectancia, se usan los coeficientes de Fresnel. Retomando la Ecuación (1), y en particular para el caso de incidencia normal (cuando la luz incide perpendicularmente a la superficie), el coeficiente de reflexión para la componente del campo eléctrico perpendicular a la superficie (campo  $\mathbf{E}$ ) se puede expresar como:

$$r = \frac{n - n_0}{n + n_0}, \quad (7)$$

donde  $r$  es el coeficiente de reflexión,  $n_0$  es el índice de refracción del medio incidente, y  $n$  es el índice de refracción complejo del metal. La reflectancia  $R$ , que representa la fracción de la intensidad de la luz que se refleja en la interfaz, se obtiene tomando el valor absoluto del cuadrado del coeficiente de reflexión  $r$ , resultando en:



$$R = |r|^2 = \frac{(\eta - 1)^2 + \kappa}{(\eta + 1)^2 + \kappa}. \quad (8)$$

Para los metales, las propiedades ópticas  $\eta$  y  $\kappa$  varían significativamente con la longitud de onda. Sin embargo, en general, los metales tienden a tener valores altos de  $\kappa$ , lo que significa que la mayor parte de la luz incidente es reflejada.

### 2.1.2. Espectroscopia de reflectancia.

Los materiales sometidos a radiación luminosa presentan determinadas propiedades de reflexión, absorción y transmisión de luz. La reflectancia ( $R$ ) representa la potencia reflejada por el material. Es un parámetro porcentual adimensional. La suma de los parámetros de reflectancia ( $r$ ), transmitancia ( $T$ ) y absorbancia ( $A$ ) siempre da un valor de 1. Considerando la ley de conservación de energía, parte de la luz es reflejada, otra parte es transmitida y otra absorbida. La reflectancia puede calcularse por medio de la razón  $I_r/I_0$ , donde  $I_r$  es la intensidad de la luz reflejada e  $I_0$  es la intensidad de la luz incidente.

Existen dos modelos para calcular  $I_r$ : el modelo de reflexión perfectamente difusa o lambertiano y el modelo de reflexión perfectamente especular (Lab, 2024). Estos representan los dos casos límite y, por lo tanto, pueden aproximarse bien al comportamiento de solo unos pocos objetos, mientras que, para la mayoría de los casos reales, la reflexión puede considerarse un camino intermedio entre los dos casos límite. El modelo de reflexión perfectamente difusa predice que la luz, después de incidir en la superficie, se propaga en todas las direcciones del espacio (Figura 2). Por lo tanto, la superficie puede considerarse como una fuente de luz secundaria esférica. Este comportamiento es típico de los materiales rugosos y opacos. El modelo de reflexión perfectamente especular (Figura 2), por otro lado, prevé que el haz de luz incide en la superficie de un cuerpo y se refleja simétricamente con respecto a la normal a la superficie. Con este modelo, se puede aproximar bien el comportamiento las superficies brillantes de los metales.

Un gráfico de la reflectancia en función de la longitud de onda se denomina espectro de reflectancia. En esta tesis, los espectros de reflectancia UV-vis de la lámina de aluminio y de las distintas superficies texturizadas con láser fueron obtenidos por reflectancia especular, para la lámina sin irradiar, y difusa, para las superficies texturizadas, en el rango de 200 nm – 1000 nm a temperatura ambiente, en un espectrofotómetro Varian Cary-300, equipado con una esfera integradora.

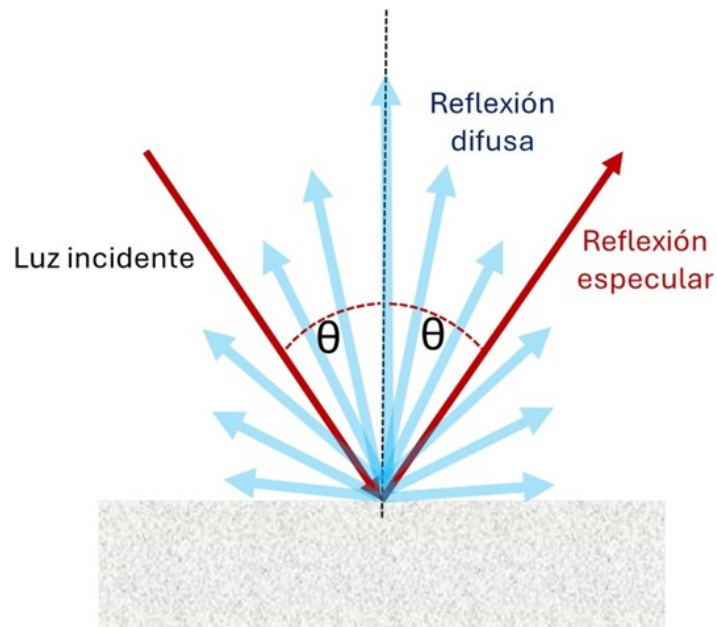


Figura 2. Representación esquemática de la reflexión difusa y especular.

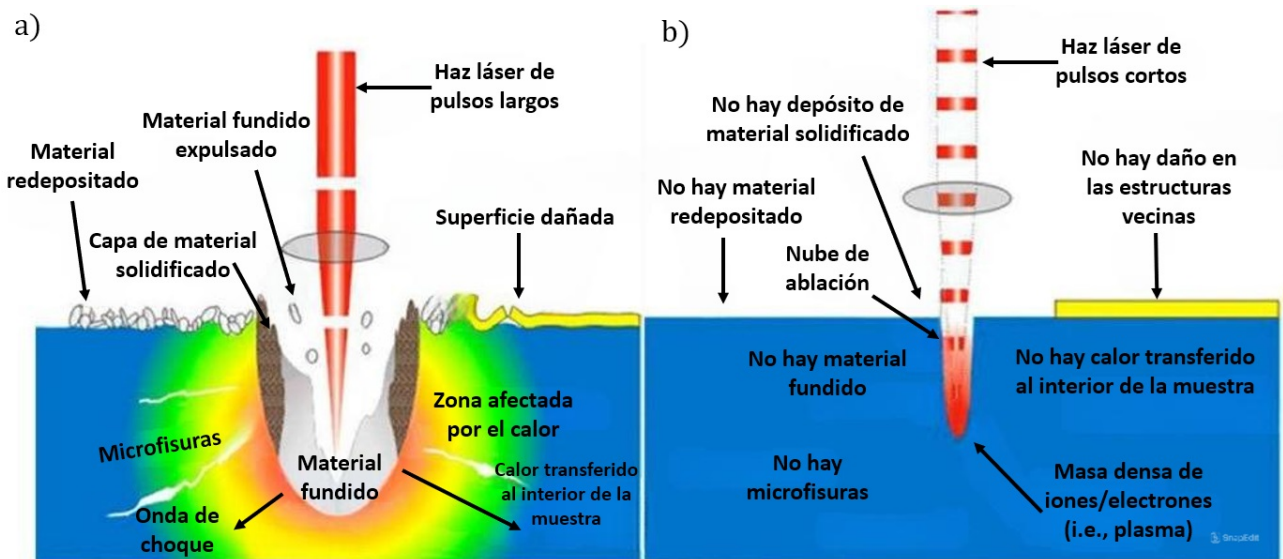
### 2.1.3. Características y efectos de los distintos tipos de pulsos láser.

Cuando un haz láser interactúa con un material, pueden producirse fenómenos como ablación, fusión térmica o fusión no térmica. Estos efectos están directamente relacionados con uno de los parámetros más críticos en la irradiación láser, especialmente en láseres pulsados: la duración temporal del pulso. En escalas de tiempo tan cortas como nanosegundos, los procesos de absorción, fusión y conducción de calor dominan la interacción láser-materia. En este régimen, la interacción láser provoca un cambio de temperatura asociado a la difusión de calor en el material. A medida que el tiempo de relajación electrónica entre la superficie y la red disminuye lo suficiente, se alcanza un equilibrio térmico en el que la energía se transfiere eficientemente a la red cristalina, lo que puede provocar daños en el material.

Dado que el tiempo de relajación electrónica en sólidos ionizados varía entre picosegundos y nanosegundos, se pueden distinguir dos regímenes de interacción: uno dominado por la duración del pulso láser y otro por el tiempo de relajación térmica. Esta distinción influye en la forma en que la energía se transfiere al material y en los efectos inducidos, que dependen tanto del tipo de pulso como de la rapidez de la respuesta térmica del material. (Chaleard et al., 1998). Los pulsos de nanosegundos (ns) generan un pico de potencia más bajo en comparación con los pulsos ultracortos, pero su duración más prolongada provoca efectos térmicos significativos en el material. En este tipo de pulsos, la energía se distribuye en

una mayor área del material y, debido a la mayor duración, el calor tiene tiempo de difundirse hacia las zonas adyacentes, estos efectos se ilustran en la Figura 3.

Cuando un pulso láser largo (de nanosegundos) interactúa con el material, se produce una zona de material fundido debido a la alta transferencia de calor. La energía que se transfiere genera una zona afectada por el calor (Heat-Affected Zone, HAZ), lo que puede causar microfisuras, una onda de choque, y el desprendimiento de material fundido, que es re-depositado alrededor del área afectada. Este tipo de interacción genera defectos térmicos, como grietas y daños en la superficie del material.



**Figura 3.** Diferencias entre los efectos causados por pulsos láser largos (a) y pulsos láser cortos (b). Adaptado de "Ultrafast laser processing of materials: a review" Phillips et al. (2015). Modificado por el autor.

El calor residual durante la interacción con un pulso de nanosegundos es el principal responsable de los efectos térmicos observados. Los pulsos largos permiten una mayor distribución de la energía térmica hacia las estructuras cercanas, lo que incrementa el riesgo de daños en el material. Esto se puede apreciar en la Figura 3, donde se muestra la formación de una capa de recubrimiento sólido y una superficie visiblemente dañada. El proceso de fusión es una de las características clave en los pulsos largos. En la Figura 3 (a), el material se funde y luego se solidifica formando una capa de recubrimiento. Este fenómeno se acompaña de la expulsión de material fundido, lo que aumenta la posibilidad de generar irregularidades en la superficie del material trabajado.

Por otra parte, los pulsos cortos y ultracortos, como los que se muestran en la Figura 3 (b), tienen una duración mucho menor que los pulsos de nanosegundos, típicamente en el rango de picosegundos o femtosegundos. Debido a esta duración extremadamente corta, la energía del láser se concentra en una fracción muy pequeña de tiempo, lo que genera un pico de potencia muy alto. Esto provoca una

interacción significativamente diferente con el material en comparación con los pulsos largos. En la Figura 3 (b), se puede observar que, al interactuar un pulso láser corto con el material, no se produce una zona de material fundido ni se observa una propagación del calor hacia las áreas circundantes. Esto se debe a que el pulso de alta energía se entrega tan rápido que no hay tiempo suficiente para que el calor se difunda hacia las estructuras vecinas. En consecuencia, no se forma una zona afectada por el calor (HAZ), y el material no sufre daños térmicos ni microfisuras, como ocurre con los pulsos largos.

Uno de los efectos clave de los pulsos ultracortos es la generación de un plasma denso, compuesto por electrones e iones, como se puede ver en la Figura 3 (b). Este fenómeno se produce porque la energía del láser ioniza rápidamente los átomos del material sin causar fusión, lo que evita la creación de ondas de choque y el daño estructural. Además, la nube de ablación que se forma es el resultado de la expulsión de material sin que este pase por un estado de fusión. Esto permite una ablación más precisa y limpia, sin la generación de residuos o recubrimientos en la superficie. En contraste con los pulsos largos, los pulsos cortos no transfieren calor al material que rodea el área de impacto, lo que permite trabajar con alta precisión sin afectar las estructuras cercanas. Esto hace que los pulsos ultracortos sean ideales para aplicaciones que requieren gran exactitud y la preservación de las propiedades del material, como en el procesamiento de materiales o en la microfabricación.

#### 2.1.4. Modelo de dos temperaturas.

En el modelo de dos temperaturas, se asume que los electrones y la red cristalina del material tienen temperaturas diferentes y evolucionan de manera distinta cuando interactúan con un pulso láser. Los electrones responden mucho más rápido que los átomos a la energía del láser, lo que genera una diferencia de temperatura entre el sistema electrónico y la red cristalina. El modelo se describe mediante dos ecuaciones acopladas, la Ecuación 9 y la Ecuación 10, que representan el intercambio de energía entre los electrones y la red. La dinámica de este proceso es explicada por el modelo de dos temperaturas (TTM, por sus siglas en inglés)(Anisimov et al., 1974).

$$C_e(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial t} = \nabla \cdot (k_e \nabla T_e) - \gamma(T_e - T_l) + S(z, t), \quad (9)$$

$$C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = \nabla \cdot (k_l \nabla T_l) + \gamma(T_e - T_l), \quad (10)$$

donde  $C_e$  y  $C_l$  son, respectivamente, las capacidades caloríficas de los electrones y de la red cristalina, y  $k_e$  es la conductividad térmica de los electrones. El término  $S(z, t)$  representa la energía absorbida por los electrones del láser, que depende tanto de la profundidad  $z$  como del tiempo  $t$ . El proceso de interacción láser-materia en el modelo de dos temperaturas ocurre en varias etapas. Cuando el pulso láser incide sobre el material, los electrones libres absorben la energía del láser en tiempos extremadamente cortos (femtosegundos o picosegundos). Debido a su alta capacidad de respuesta, la temperatura de los electrones aumenta rápidamente, mientras que la temperatura de la red cristalina permanece casi inalterada en los primeros instantes.

Después de la absorción inicial, los electrones calientes comienzan a redistribuir la energía a lo largo del material mediante la difusión térmica electrónica, descrita por el término  $\nabla(k_e \nabla T_e)$ . Este proceso de redistribución ocurre rápidamente. Posteriormente, los electrones transfieren su energía a los átomos de la red a través del coeficiente de acoplamiento  $\gamma(T_e - T_l)$ . Este intercambio de energía ocurre en una escala de tiempo más lenta (picosegundos a nanosegundos), y es en esta fase cuando la red cristalina comienza a calentarse. Durante este proceso, la diferencia de temperatura entre los electrones y la red disminuye hasta que ambos sistemas alcanzan el equilibrio térmico.

### 2.1.5. Ablación láser de materiales.

La ablación láser es un proceso mediante el cual un material se elimina o se evapora de la superficie de un sólido mediante la interacción de pulsos láser de alta energía. En este proceso, se utiliza un haz láser enfocado que irradia la superficie del material, transfiriendo energía suficiente como para superar el umbral de ablación. Cuando la energía del láser supera este umbral, se produce la evaporación o remoción del material de la superficie en forma de vapores o partículas. Este fenómeno puede desencadenar diferentes mecanismos de ablación, dependiendo de las propiedades del material y de los parámetros del láser.

La ablación láser puede clasificarse principalmente en ablación térmica y ablación mecánica. En la ablación térmica, la energía del láser provoca el calentamiento del material hasta su punto de fusión y posteriormente a la evaporación. En este caso, una parte del calor generado se difunde hacia las áreas circundantes, lo que puede causar efectos secundarios como la recristalización de la superficie y la generación de residuos térmicos. Por otro lado, en la ablación mecánica, la energía del pulso láser genera ondas de choque que expulsan material de la superficie, creando cavidades o surcos sin que haya necesariamente una fusión del material. Este tipo de ablación permite una remoción precisa del material sin

la necesidad de transferencia significativa de calor a las áreas adyacentes.

Dependiendo de la duración y la energía del pulso láser, la ablación puede tener características muy distintas, lo que la hace ideal para diversas aplicaciones en microfabricación. La ablación láser se realiza utilizando diferentes tipos de láseres, cada uno con características particulares que los hacen adecuados para aplicaciones específicas:

- Láser de femtosegundo: Estos láseres tienen pulsos de duración ultra corta (del orden de  $10^{-15}$  segundos). Debido a esta duración tan breve, la interacción entre el láser y el material se realiza de manera ultrarrápida, lo cual minimiza significativamente la transferencia de calor a las áreas circundantes. Esta característica hace que la ablación sea altamente localizada, lo que resulta en un corte o grabado muy preciso sin daños térmicos. Es particularmente común en aplicaciones de microfabricación, donde se requiere una alta precisión.
- Láser de nanosegundo: Los láseres de nanosegundo emiten pulsos más largos (del orden de  $10^{-9}$  segundos) en comparación con los láseres de femtosegundo. Debido a la mayor duración del pulso, hay más tiempo para la transferencia de calor, lo que permite un mayor calentamiento de las áreas circundantes al punto de ablación. Esto hace que los láseres de nanosegundo sean más adecuados para la ablación de materiales que requieren una mayor difusión térmica y donde el efecto térmico no es perjudicial. Sin embargo, la ablación con láseres de nanosegundo puede causar daños térmicos en materiales delicados o generar zonas afectadas por el calor (HAZ, por sus siglas en inglés), que pueden ser un problema en aplicaciones que requieren precisión a nivel micro.

## 2.1.6. Aspectos fundamentales en el procesamiento de materiales mediante láser.

### 2.1.6.1. Energía y potencia por pulso.

La energía y la potencia por pulso de un láser pulsado se describen considerando el perfil espacial y temporal del pulso. Considerando un pulso gaussiano, el campo eléctrico  $E(r, t)$  se puede modelar como:

$$E(r, t) = Ae^{-\left(\frac{r}{\omega}\right)^2} e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2}, \quad (11)$$

donde  $A$  es la amplitud del campo eléctrico,  $r$  es la coordenada radial y  $t$  representa la variable temporal del pulso. Por otro lado,  $\omega$  y  $\tau$  son, respectivamente, el radio del haz y la duración temporal del pulso, definidos como los valores en los cuales el campo eléctrico  $E(t)$  o la intensidad  $I(t)$  decaen a  $1/e$  de su valor máximo (Liu, 1982). La Ecuación 11 muestra cómo el campo eléctrico varía con el tiempo y el espacio, indicando que las propiedades físicas del láser dependen de ambas variables: espaciales y temporales. Para obtener la intensidad o irradiancia  $I(r, t)$ , la cual se define como la energía óptica por unidad de tiempo y área, es necesario calcular la relación entre la intensidad y el campo eléctrico  $E(r, t)$ . Esta relación está dada por la siguiente expresión:

$$I(r, t) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\mu_0^2}} |E(r, t)|^2. \quad (12)$$

La relación muestra cómo la intensidad depende directamente del cuadrado de la magnitud del campo eléctrico, lo cual implica que, a medida que la amplitud del campo eléctrico varía en el tiempo y el espacio, la intensidad del pulso láser también varía en consecuencia. La Ecuación 12 considera el cuadrado de la magnitud del campo eléctrico, multiplicado por factores que incluyen las constantes del medio, tales como  $\mu_0$ , que representa la permeabilidad magnética en el vacío;  $\mu$ , que es la permeabilidad magnética del medio; y  $\epsilon$ , que es la permitividad eléctrica del medio (Fowles, 2011). Por otra parte, la energía por pulso  $E_p$  está relacionada con la integral de la intensidad  $I(r, t)$  sobre el área transversal del haz y a lo largo de todo el tiempo del pulso, como se muestra en la siguiente expresión:

$$E_p = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} I(r, t) 2\pi r dr dt. \quad (13)$$

Por un lado, dado que la intensidad tiene una dependencia gaussiana con respecto al tiempo  $t$ , se integra sobre el tiempo, y por otro lado, se integra sobre el área transversal del haz. Las expresiones para estas integrales se presentan en la Ecuación 14:

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-2(\frac{t}{\tau})^2} dt = \tau \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad \int_0^{\infty} 2\pi r e^{-2(\frac{r}{\omega})^2} dr = \frac{w^2}{4} \quad (14)$$

Ahora, al multiplicar las contribuciones temporales y espaciales, se obtiene que la energía por pulso está dada por:

$$E_p = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\pi \omega^2}{2} \tau I_0, \quad (15)$$

donde  $I_0 = (A^2/2) \sqrt{(\epsilon\mu/\mu_0^2)}$  es la intensidad máxima del pulso. Asimismo, para calcular la potencia promedio  $P_{prom}$ , se toma en cuenta que el láser emite pulsos repetidos con una frecuencia de repetición  $f_{rep}$ . La potencia promedio es la energía por pulso multiplicada por la frecuencia de repetición:

$$P_{prom} = E_p \cdot f_{rep}. \quad (16)$$

Por otra parte la potencia pico  $P_{pico}$  se refiere a la potencia máxima que el pulso alcanza durante su duración. Esta potencia se puede calcular dividiendo la energía por pulso  $E_p$  por la duración efectiva del pulso  $\tau_p$ :

$$P_{pico} = \frac{E_p}{\tau_p}. \quad (17)$$

### 2.1.6.2. Fluencia por pulso.

En el procesamiento de materiales por medio de láser, además de los parámetros mencionados en secciones anteriores, existe un parámetro fundamental conocido como fluencia por pulso. La fluencia por pulso  $F_p$  se define como la energía total del pulso láser  $E_p$  (Ecuación 15) distribuida sobre el área efectiva del haz  $A_{ef}$ , y sus unidades son julios por centímetro cuadrado  $[\frac{J}{cm^2}]$ . Matemáticamente, la fluencia por pulso se expresa como:

$$F_p = \frac{E_p}{A_{ef}}. \quad (18)$$

Para un haz láser con un perfil gaussiano, el área efectiva se puede aproximar como el área de un círculo en el que el 86 % de la energía está contenida dentro de un radio  $w_0$ , que corresponde al punto donde la intensidad cae al  $1/e^2$  de su valor máximo (Svelto, 2010). Sin embargo, cuando la calidad del haz no es perfecta (es decir, cuando  $M_x^2$  y  $M_y^2$  que son los factores de calidad del haz en las direcciones  $x$  y  $y$



no son iguales a 1), el área efectiva del haz se modifica y se determina como:

$$A_{ef} = \pi r_x r_y. \quad (19)$$

Los radios  $r_x$  y  $r_y$  representan las dimensiones del perfil del haz láser en los ejes  $x$  y  $y$  en el plano de medición, respectivamente. Para un haz con perfil gaussiano, estos radios se determinan comúnmente utilizando el criterio de ancho a  $1/e^2$  de la intensidad máxima, conocido en inglés como HWe<sup>2</sup>M (Half Width at  $1/e^2$  Maximum). En el procesamiento de materiales, la fluencia debe ajustarse cuidadosamente para asegurar que el material reciba la cantidad correcta de energía por pulso. Si la fluencia es demasiado baja, el material podría no experimentar cambios significativos; si es demasiado alta, puede ocurrir daño térmico o ablación excesiva.

### 2.1.6.3. Fluencia integrada.

Durante la interacción del láser con el material, la energía del pulso láser se distribuye sobre un área efectiva, lo que se ha denominado en secciones anteriores como fluencia por pulso  $F_p$ . Sin embargo, cuando múltiples pulsos inciden sobre la misma área efectiva, la cantidad total de energía entregada se calcula como la fluencia integrada  $F_{int}$ , la cual tiene en cuenta la acumulación de energía proveniente de varios pulsos consecutivos y está dada por la siguiente expresión:

$$F_{int} = F_p \cdot N, \quad (20)$$

donde  $N$  se determina como, si se considera un láser pulsado que emite pulsos a una frecuencia de repetición  $f_{rep}$ , y que opera durante un tiempo  $t_b$ , la fluencia integrada se puede calcular como:

$$F_{int} = F_p \cdot f_{rep} \cdot t_b. \quad (21)$$

En este contexto,  $t_b = \frac{D}{v_b}$  o tiempo de barrido, representa el tiempo que tarda el haz en moverse a lo largo de una distancia equivalente a su propio diámetro, donde  $D$  es el diámetro del haz que corresponde a  $2\omega$  y  $v_b$  es la velocidad de barrido del haz.

## **2.2. Modificación de la superficie de materiales con estructuras multi-escala.**

### **2.2.1. Propiedades funcionales de estructuras multiescala.**

En la naturaleza, existen múltiples ejemplos de micro y nanoestructuras que presentan una organización compleja en varias escalas. Estas estructuras, como las microestructuras en las alas de mariposas, las hojas de loto o las escamas de reptiles y peces, otorgan a los organismos propiedades funcionales clave para su supervivencia. Por ejemplo, las alas de las mariposas presentan colores estructurales que no dependen de pigmentos, sino de la interferencia de la luz en las nanoestructuras de sus superficies, lo que les proporciona colores vivos y cambiantes que sirven para atraer parejas o confundir a los depredadores. Este fenómeno es conocido como extitcoloración estructural, y es un ejemplo notable de cómo las estructuras a escala nanométrica pueden manipular la luz de formas que no son posibles utilizando pigmentos químicos tradicionales (Müller et al., 2016).

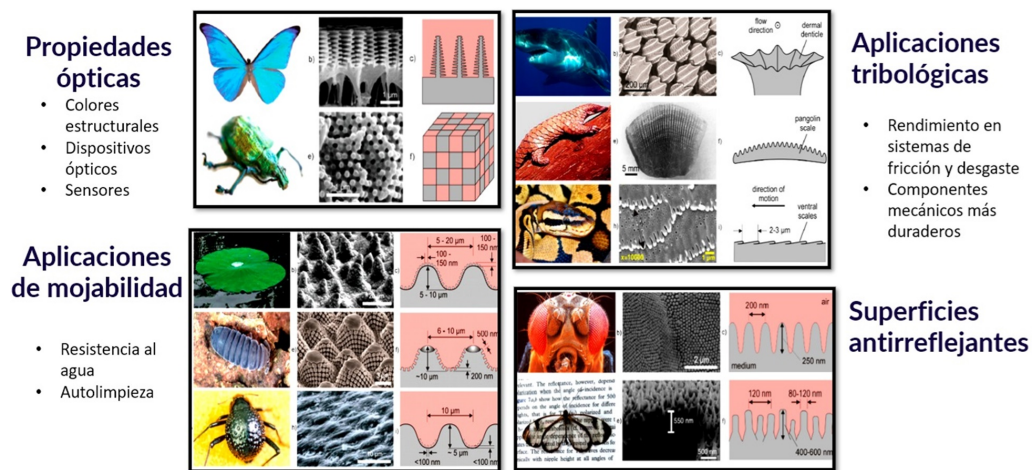
Por otro lado, las hojas de loto y ciertos insectos acuáticos, como los escarabajos, exhiben propiedades superhidrofóbicas. Estas propiedades se deben a la presencia de micro y nanoestructuras en sus superficies, que generan una alta repelencia al agua, manteniendo la superficie seca y limpia de contaminantes. Este efecto, conocido como el “efecto loto”, es altamente eficiente y ha inspirado numerosas aplicaciones tecnológicas, tales como recubrimientos para evitar la acumulación de suciedad y mejorar la eficiencia de dispositivos como los paneles solares.

Las escamas de reptiles, como el lagarto o el pangolín, presentan otro ejemplo de la funcionalidad de las estructuras multiescala. Estas escamas están diseñadas de manera que optimizan la reducción de la fricción y mejoran la durabilidad en entornos abrasivos. Esta optimización se logra mediante la organización jerárquica de micro y nanoestructuras que proporcionan propiedades tribológicas, es decir, propiedades que minimizan el desgaste y facilitan el movimiento sobre superficies irregulares o rugosas. Estas propiedades son particularmente importantes para la supervivencia de estos animales, ya que les permiten desplazarse con eficiencia y protección en su entorno natural.

De manera similar, estas micro y nanoestructuras pueden replicarse y generarse artificialmente en la superficie de materiales mediante técnicas avanzadas, como la irradiación láser. Al exponer un material sólido a intensa radiación electromagnética, se desencadenan diferentes procesos térmicos y mecánicos en su superficie, tales como vaporización, ablación, fusión térmica, remoción y redeposición de material. Estos procesos forman patrones y estructuras en la superficie del material, organizadas en múltiples

escalas, desde la nano hasta la micrométrica, y pueden mejorar significativamente las propiedades físicas, químicas y mecánicas del material (Bonse et al., 2017b).

Las aplicaciones de estas superficies funcionales son amplias y abarcan desde la fabricación de dispositivos biomédicos, donde las propiedades antibacterianas y de adhesión controlada son de gran importancia, hasta la mejora de la eficiencia en sistemas energéticos, como en los paneles solares texturizados para reducir la reflexión y maximizar la absorción de luz. También tienen aplicaciones en la industria aeroespacial, donde la reducción de la fricción y el control de la humectabilidad pueden contribuir a una mayor eficiencia de los vehículos. La Figura 4 muestra un conjunto de aplicaciones de estas superficies funcionales, generadas a partir de tecnologías de texturización.



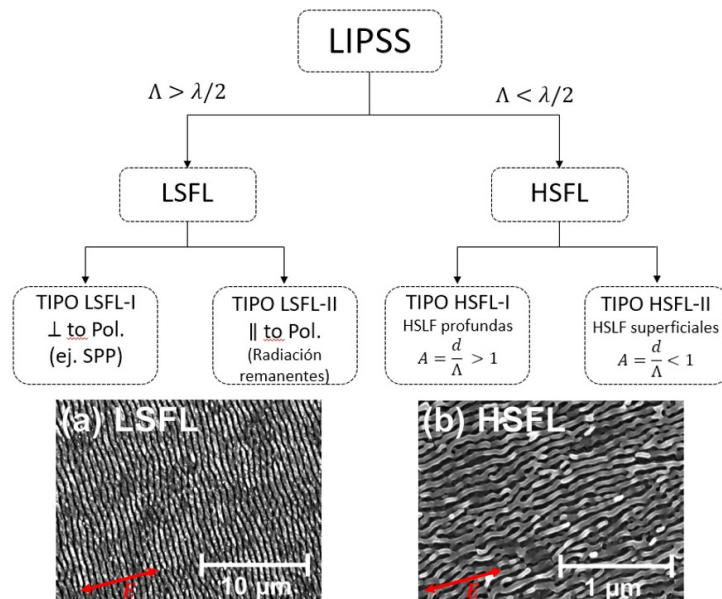
**Figura 4.** Superficies funcionales inspiradas en la naturaleza, generadas mediante texturizado de superficies con láser. Adaptado de "Bio-Inspired Functional Surfaces Based on Laser-Induced Periodic Surface Structures" Müller et al. (2016). Modificado por el autor.

### 2.2.2. Estructuras jerárquicas.

Al exponer un material sólido a una intensa radiación electromagnética, se desencadenan diversos procesos que dan lugar a la formación de patrones y estructuras multiescala en la superficie del material. Las estructuras jerárquicas son sistemas que presentan una organización estructural en diferentes escalas, desde la nanoescala hasta la macroescala. Cada nivel de estas estructuras aporta una funcionalidad distinta que, en conjunto, mejora las propiedades del material, haciendo posible que adquieran características funcionales únicas, como mayor absorción de energía, hidrofobicidad o mejora de propiedades mecánicas.

Uno de los ejemplos más destacados de estructuras multiescala generadas mediante irradiación láser son las estructuras periódicas inducidas por láser o LIPSS (por sus siglas en inglés, Laser-Induced Periodic Surface Structures). Estas estructuras se forman en la superficie del material irradiado y su aparición depende de diversos factores. Entre estos factores se incluyen las propiedades ópticas, térmicas y de rugosidad del material, así como parámetros de irradiación como la longitud de onda del láser ( $\lambda$ ), la polarización del haz ( $\mathbf{E}$ ), la fluencia por pulso ( $F_p$ ), el número de pulsos aplicados ( $N$ ), la frecuencia de repetición ( $f_{rep}$ ), el ángulo de incidencia ( $\theta$ ) y la duración del pulso ( $\tau$ ). Todos estos parámetros influyen en las características de las LIPSS, tales como su periodicidad ( $\Lambda$ ), su altura ( $H$ ) y su orientación.

De acuerdo con Bonse et al. (2017a) (Figura 5), las LIPSS se clasifican en dos tipos principales: LIPSS de baja frecuencia espacial (LSFL) y LIPSS de alta frecuencia espacial (HSFL). Las LSFL tienen una periodicidad mayor a la mitad de la longitud de onda del láser utilizado, mientras que las HSFL presentan una periodicidad menor que este valor. Además, se distinguen subtipos dentro de cada grupo dependiendo de la orientación de las estructuras respecto a la polarización del haz y la profundidad de las mismas. Estas estructuras juegan un papel fundamental en la modificación de las propiedades ópticas del material, facilitando, por ejemplo, la absorción de luz.



**Figura 5.** Diagrama de clasificación de las LIPSS. (a) Micrografía SEM de LIPSS del tipo LSFL. (b) Micrografía SEM de LIPSS del tipo HSFL. Tanto las micrografías (a) como (b) muestran estructuras generadas sobre una superficie de aleación de titanio (*Ti6Al4V*). Adaptado de “Laser-Induced Periodic Surface Structures - A Scientific Evergreen” Bonse et al. (2017a). Modificado por el autor.

Otra estructura importante en la irradiación láser son las estructuras en forma de barrancos, también conocidas como “grooves”. Estas se generan como resultado de un proceso de ablación selectiva, en el cual el material es eliminado siguiendo líneas o patrones definidos, creando surcos profundos y estrechos

en la superficie. La formación de estas estructuras depende de múltiples factores, como la polarización del haz, la fluencia del láser y la longitud de onda. La irradiación con láser de femtosegundo permite una ablación precisa debido a la corta duración de los pulsos, lo que minimiza la disipación de calor y evita el derretimiento de la superficie, generando surcos bien definidos (Bonse et al., 2017a).

En estudios realizados por Ou et al. (2016), se reportó la generación de estas estructuras en forma de barrancos durante el oscurecimiento láser de acero inoxidable, latón y aluminio, indicando que dichas estructuras permiten una absorción eficiente de la luz visible a través del acoplamiento de rejilla y el atrapamiento de cavidades. Estas estructuras se forman durante la ablación del material al recibir una irradiación intensa con láser de femtosegundos, creando depresiones bien definidas en la superficie.

La formación de cavidades se debe a una combinación de fenómenos térmicos y mecánicos que provocan la vaporización del material en áreas específicas. La profundidad, tamaño y densidad de las cavidades dependen directamente de los parámetros del láser, tales como la fluencia y la duración del pulso. Estas cavidades contribuyen significativamente a la mejora de propiedades del material, como la capacidad de absorción de luz, incrementando la eficiencia de dispositivos que aprovechan la energía solar, tales como destiladores solares y celdas fotovoltaicas (Müller et al., 2016). Además, pueden generarse múltiples estructuras adicionales, como nanopartículas, conos, microcanales y pilares, entre otras. Cada una de estas estructuras aporta características particulares que pueden ser aprovechadas en diversas aplicaciones tecnológicas.

## **2.3. Oscurecimiento de metales mediante texturizado láser.**

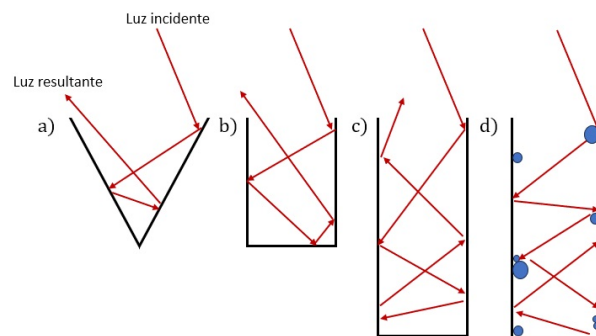
### **2.3.1. Mecanismos de Oscurecimiento.**

El texturizado superficial con láser de pulsos ultracortos (ps o fs) se ha convertido en una tecnología en constante crecimiento en el nano/microprocesado de materiales de alta calidad, ya que no genera daños térmicos en los materiales circundantes y ofrece un proceso más controlable, como se mencionó en la sección 2.1.3. A partir de esto, se han logrado diversos avances en la modificación de superficies, permitiendo alterar propiedades físicas, de mojabilidad y tribológicas, entre otras, con un enfoque particular en las propiedades ópticas, especialmente en el oscurecimiento de superficies, que es de interés para el presente documento.

El oscurecimiento de superficies metálicas y no metálicas tiene gran relevancia en campos de aplicación como sensores ópticos, grabado, celdas solares, entre otros, lo que ha impulsado diversos avances en el área. Por ejemplo, Huang et al. (2006) trabajaron en la microestructuración inducida por láser de femtosegundos en superficies de silicio, logrando mejorar su eficiencia de conversión optoelectrónica. Asimismo, Chen et al. (2023) fabricaron superficies altamente absorbentes mediante la generación de estructuras denominadas 'micro-bosques' en una aleación de aluminio, utilizando deposición competitiva de vapor inducida por láser, con posibles aplicaciones en sensores ópticos de precisión o dispositivos optoelectrónicos. Otro campo de aplicación, de gran interés para el presente documento, es el trabajo de Chen et al. (2022b), quienes, mediante el tratamiento de la superficie de aluminio con un láser de picosegundos, desarrollaron un evaporador superhidrofílico con capacidad de absorción, orientado a aplicaciones en desalinización solar.

En el oscurecimiento de metales influyen varios efectos que, en conjunto, logran transformar las altas reflectividades características de los metales en superficies altamente absorbentes. Estos efectos son el resultado de la generación de micro y nanoestructuras en el material irradiado por láser. Entre las estructuras que se generan destacan los siguientes mecanismos:

1. **Reflexiones múltiples:** Este efecto ocurre cuando la irradiación con láser induce la formación de ranuras, cavidades profundas y agujeros en la superficie del material. El atrapamiento de la luz juega un papel crucial en la superficie metálica procesada, ya que las múltiples reflexiones dentro de estas estructuras permiten una absorción más eficiente de la luz, como se ilustra en la Figura 6.



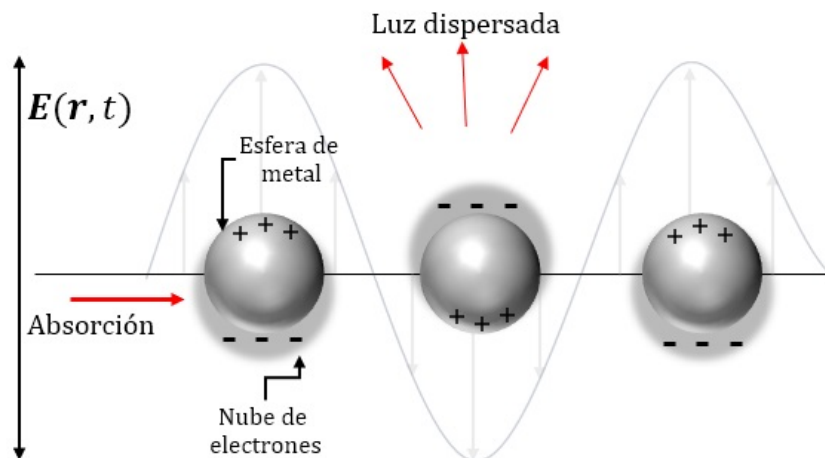
**Figura 6.** Diagrama que muestra cómo la luz incidente se dispersa y refleja múltiples veces dentro de diversas estructuras, como ranuras y cavidades profundas. Estas reflexiones incrementan la absorción de luz dentro del material irradiado por láser. Adaptado de "Femtosecond fiber laser based metal blackening" Huang et al. (2013a). Modificado por el autor.

En la Figura 6 se observa cómo cambia el trazado de los rayos de luz a medida que se producen múltiples reflexiones y absorciones dentro de las estructuras generadas. En la Figura 6 (a), se

muestran ranuras donde la luz se refleja repetidamente, mientras que en las Figuras 6(b) y 6 (c), se observa cómo el aumento de la profundidad de las cavidades incrementa tanto las reflexiones como las absorciones de luz, lo que favorece el atrapamiento de la luz en la superficie. En el caso de la Figura 6 (d), además de tener cavidades profundas, se presentan micro y nanoestructuras, así como partículas en las paredes de los agujeros, que refuerzan el atrapamiento de la luz al bloquear su escape de las cavidades, permitiendo múltiples absorciones iterativas y mejorando la eficiencia del proceso de oscurecimiento.

2. **Excitación de plasmones localizados:** La resonancia de plasmones superficiales localizados (LSPR) es un fenómeno óptico generado por la luz cuando interactúa con nanopartículas conductoras (NPs) que son más pequeñas que la longitud de onda incidente. El campo eléctrico de la luz incidente puede excitar colectivamente los electrones de una banda de conducción, resultando en oscilaciones coherentes de plasmones localizados con una frecuencia resonante que depende en gran medida de la composición, tamaño, geometría, entorno y distancia de separación de las nanopartículas (NPs).

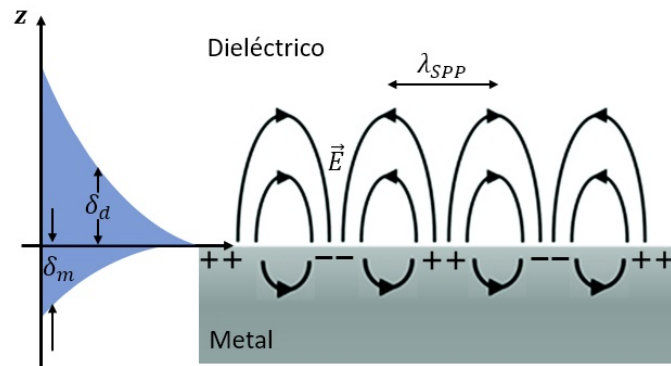
La excitación de LSPR permite reforzar el campo electromagnético, la absorción y el esparcimiento de la luz en función de las características de las NPs. En la Figura 7 se muestra el esquema de las nubes de electrones que oscilan en dirección opuesta a la del campo eléctrico cerca de las nanopartículas, resultando en la absorción o dispersión de la luz incidente.



**Figura 7.** Diagrama de la excitación de plasmones superficiales localizados (LSP) en presencia de un campo eléctrico oscilante. Adaptado de "Nanostructured surfaces as plasmonic biosensors: A review" Minopoli et al. (2022). Modificado por el autor.

3. **Excitación de plasmones polaritones de superficie:** Los plasmones polaritones de superficie (SPP) (Figura 8), son oscilaciones colectivas de los electrones de la banda de conducción de un metal asociadas a modos electromagnéticos confinados en la interfaz entre un metal y un

dieléctrico. Estas oscilaciones se producen cuando la luz incidente interactúa con los electrones de la superficie metálica, generando una resonancia que depende de la frecuencia de la luz y de las propiedades del material.



**Figura 8.** Diagrama de los plasmones superficiales (SPs) en la interfaz entre un metal y un material dieléctrico. Adaptado de “Surface Plasmon Excitation: Theory, Configurations, and Applications” Aftab et al. (2024). Modificado por el autor.

### 2.3.2. Aplicaciones del Oscurecimiento de Metales.

El estudio del oscurecimiento de metales es un campo de gran interés debido a sus numerosas aplicaciones en tecnologías como celdas solares, detectores, aplicaciones militares, entre otras. Por ejemplo, Ou et al. (2016) reportaron el oscurecimiento de acero inoxidable, latón y aluminio mediante láser de femtosegundos en el rango de luz visible, logrando una baja reflectancia de alrededor del 5%. De manera similar, Huang et al. (2013a) llevaron a cabo el oscurecimiento de metales utilizando un láser de fibra de femtosegundos, demostrando una absorción superior al 95% en todo el rango de longitudes de onda visibles. En este estudio, encontraron que la absorción mejorada del metal oscurecido se debe al atrapamiento de luz y a una variedad de estructuras superficiales a escala micro y nano.

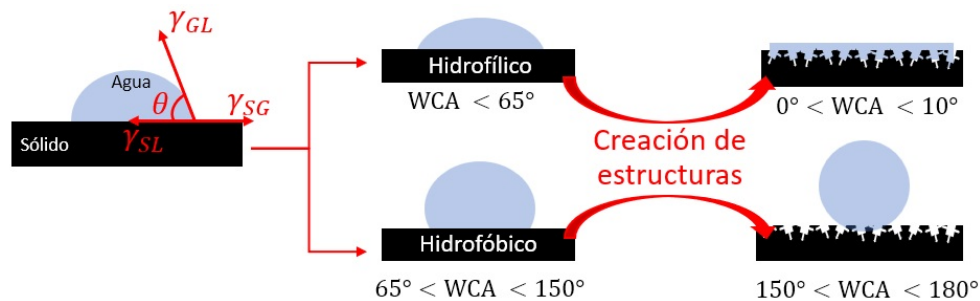
Asimismo, Singh et al. (2020) informaron sobre la creación de una superficie de aluminio súper absorbente de luz mediante texturizado con láser de femtosegundos, con el objetivo de lograr un saneamiento eficiente del agua basado en energía solar. En general, estos estudios y otros trabajos destacan el gran potencial del oscurecimiento de metales en aplicaciones como la construcción de detectores y sensores sensibles, absorbedores de energía solar y en el ámbito de la biomedicina.



## 2.4. Propiedades de mojabilidad de las superficies y la técnica de ángulo de contacto.

La modificación de la superficie para modificar las propiedades de mojabilidad (la capacidad de una superficie para atraer o repeler líquidos) es un tema que ha despertado gran interés debido a su relevancia en diversas aplicaciones. La mojabilidad de una superficie se mide a través del ángulo de contacto, que es el ángulo formado entre una gota de líquido y la superficie sobre la que se deposita. En la Figura 9 se muestra un esquema general de este ángulo, donde se observa cómo, dependiendo del valor del ángulo formado, se puede determinar si una superficie es hidrofílica (alta mojabilidad, con un ángulo de contacto bajo) o hidrofóbica (baja mojabilidad, con un ángulo de contacto alto).

Experimentalmente, el ángulo de contacto se mide utilizando el método de caída sésil, en el cual se deja reposar una gota de líquido sobre una superficie y se toma una imagen óptica. Posteriormente, se traza una línea de contacto en la interfaz entre la gota de líquido, el sólido sobre el que se apoya y el gas circundante. Para superficies perfectamente lisas, el ángulo de contacto  $\theta$ , como se muestra en la Figura 9, es el ángulo en el que la interfaz líquido-gas se encuentra con la interfaz sólido-líquido. Además, en la Figura 9 se ilustra cómo el ángulo de contacto (WCA, por sus siglas en inglés) puede determinar si una superficie es hidrofílica o hidrofóbica.



**Figura 9.** Diagrama que muestra el ángulo de contacto como indicador de la mojabilidad de una superficie y cómo la incorporación de estructuras jerárquicas permite modificar y ajustar dicha propiedad. Adaptado de "Superhydrophilic-superhydrophobic patterned surfaces: From simplified fabrication to emerging applications" Chen et al. (2022a). Modificado por el autor.

Una superficie es hidrofílica cuando el ángulo de contacto es menor a  $65^\circ$  ( $WCA < 65^\circ$ ), lo que significa que la superficie tiene alta mojabilidad, permitiendo que el agua se extienda sobre ella. Por otro lado, una superficie es hidrofóbica cuando el ángulo de contacto está entre  $65^\circ$  y  $150^\circ$  ( $65 < WCA < 150$ ), lo que indica baja mojabilidad, haciendo que el agua forme gotas más compactas sobre la superficie. La creación de micro o nanoestructuras en la superficie puede modificar significativamente estas propiedades de mojabilidad. Si las estructuras se diseñan adecuadamente, se puede obtener una superficie superhi-

drofílica, con ángulos de contacto cercanos a  $0^\circ$  (menores a  $10^\circ$ ), o una superficie superhidrofóbica, con ángulos de contacto entre  $150^\circ$  y  $180^\circ$ .

Estas modificaciones son fundamentales en aplicaciones tecnológicas, como en superficies auto-limpiables y en la optimización del transporte de líquidos a través de canales microfluídicos, aumentando así la eficiencia en diversas aplicaciones. La ecuación que describe el ángulo de contacto  $\theta$  para estas superficies se determina mediante la ecuación de Young, expresada de la siguiente manera:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{GL}} \quad (22)$$

donde  $\gamma_{SG}$ ,  $\gamma_{SL}$  y  $\gamma_{GL}$  hacen referencia a las tensiones superficiales entre sólido y gas, sólido y líquido, y gas y líquido, respectivamente. Cabe resaltar que esta ecuación es válida y se asume para un sustrato completamente plano e ideal (Chen et al., 2022a). Sin embargo, en la mayoría de los casos se trata de superficies rugosas. Para estos casos, se ha derivado a partir de datos experimentales la ecuación de Wenzel, Ecuación 23, que describe el estado de mojado uniforme en la superficie de un sólido rugoso:

$$\cos \theta_W = r \cos \theta \quad (23)$$

donde Chen et al. (2022a) definen  $r$  como “el factor de rugosidad”, que se define como la proporción entre el área real de la superficie y el área geométrica proyectada”. Además,  $\theta_W$  y  $\theta$  son el ángulo de contacto de Wenzel y el ángulo de contacto de Young, respectivamente. Este modelo contempla que la superficie rugosa es completamente mojada donde el líquido está en contacto. Sin embargo, el modelo de Wenzel solo considera superficies homogéneas. Para incluir otros factores, se desarrolló el modelo de Cassie-Baxter, ecuación 24, que describe superficies donde el líquido no llena las rugosidades y se forman bolsas de aire en la interfaz sólido-líquido. La ecuación está descrita como:

$$\cos \theta_C = f (1 + \cos \theta) - 1 \quad (24)$$

En la Ecuación 24,  $\theta_C$  se refiere al ángulo de contacto de Cassie-Baxter,  $\theta$  al ángulo de contacto de Young, y  $f$  a la fracción de la superficie que está en contacto con el líquido (Chen et al., 2022a). Este modelo permite explicar por qué algunas superficies presentan propiedades superhidrofóbicas: las zonas de aire bajo la gota de agua reducen el contacto real entre el agua y la superficie, lo que permite que

las gotas se deslicen más fácilmente.

## 2.5. Destilación solar.

### 2.5.1. Análisis térmico de un destilador solar.

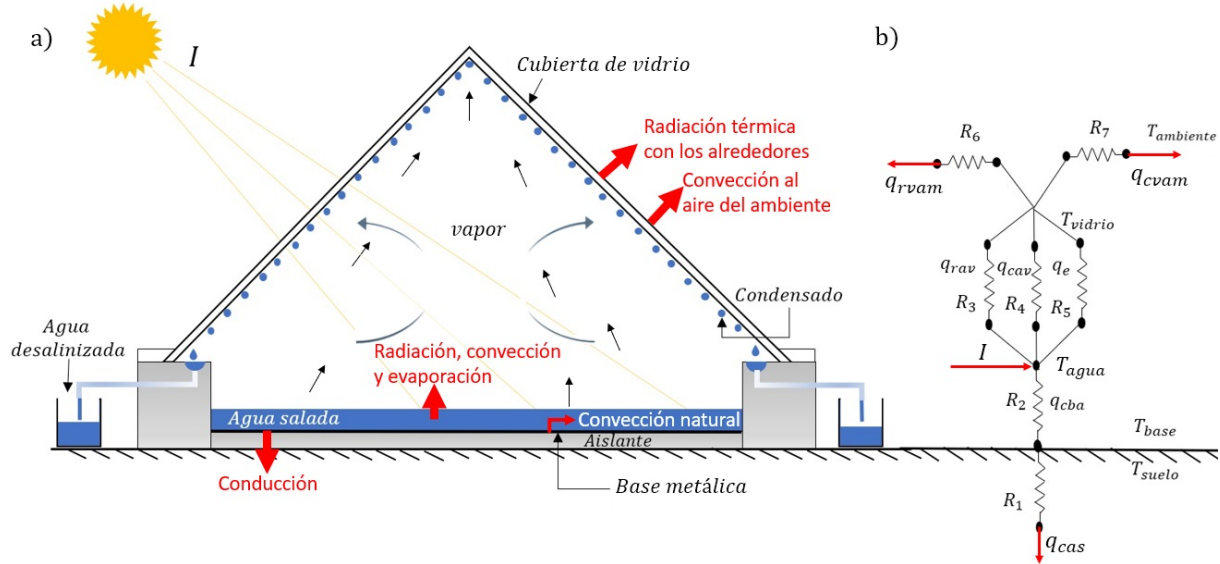
La destilación solar es un proceso mediante el cual se utiliza la energía del sol para desalinizar el agua. Este método aprovecha la radiación solar para evaporar el agua de una fuente contaminada o salina, y luego condensa el vapor en una superficie fría para obtener agua limpia. Se trata de una técnica simple y eficiente que imita el ciclo natural del agua: evaporación, condensación y precipitación. Estos procesos se llevan a cabo dentro de un dispositivo denominado destilador solar, que en general está compuesto por los siguientes elementos:

- Cubierta transparente: puede ser de vidrio o plástico, y permite que la radiación solar entre, calentando el agua. Esta superficie también actúa como superficie de condensación para el vapor.
- Base negra absorbente: la base, donde se coloca el agua, suele ser de color oscuro o estar recubierta con materiales que maximizan la absorción de calor, lo que facilita la evaporación del agua.
- Depósito para el agua: el agua salina o contaminada se coloca en la base del destilador solar.
- Canales de recolección: recogen el agua destilada que se condensa en la superficie interna del vidrio o plástico y la conducen hacia un depósito de almacenamiento.

La Figura 10 presenta el diagrama de un destilador solar de doble pendiente convencional, destacando los principales mecanismos de transferencia de calor. En la Figura 10 (a) se muestra un esquema de la perspectiva frontal del destilador solar de doble pendiente. Para una mejor comprensión de los mecanismos de transferencia térmica, en la Figura 10 (b) se presenta un diagrama que representa un modelo de resistencias térmicas y flujos de calor, donde  $R$  simboliza las resistencias térmicas de diferentes procesos y  $q$  indica las correspondientes transferencias de calor.

Inicialmente, la radiación solar  $I$  incide sobre la cubierta de vidrio, y la mayor parte de esta radiación se transmite e incide sobre la base metálica. Una fracción de la radiación se transfiere por conducción a través del aislante hacia el suelo  $q_{cas}$ , y otra parte se transfiere por convección de la base metálica al

agua salada  $q_{cba}$ , incrementando su temperatura hasta alcanzar la evaporación  $q_{eav}$ . El vapor ascendente transfiere calor a la cubierta de vidrio por convección  $q_{cav}$ , lo que resulta en la formación de condensado que se recolecta como agua desalinizada. La cubierta de vidrio actúa como superficie condensadora, y el calor que ella capta se disipa al ambiente mediante radiación  $q_{rvam}$  y convección  $q_{cvam}$ .



**Figura 10.** (a) Diagrama de la perspectiva frontal de un destilador solar de doble pendiente ilustrando los mecanismos de transferencia de calor. (b) Diagrama de resistencias térmicas.

Como se describe en Carranza et al. (2021), la transferencia de calor entre el agua y la cubierta de vidrio por radiación ( $q_{rav}$ ), por convección ( $q_{cav}$ ) y por evaporación ( $q_e$ ) está dada por las siguientes ecuaciones:

$$q_{rav} = h_{rav} A_a (T_a - T_v), \quad (25)$$

$$q_{cav} = h_{cav} A_a (T_a - T_v), \quad (26)$$

$$q_e = h_{eav} A_a (T_a - T_v), \quad (27)$$

donde  $h_{rav}$ ,  $h_{cav}$  y  $h_{eav}$  son los coeficientes de transferencia de calor por radiación, convección y evaporación, respectivamente, expresados en  $[\text{W}/\text{m}^2 \text{K}]$ .  $A_a$  representa el área de la superficie del agua, y  $T_a$  y  $T_v$  son las temperaturas del agua y del vidrio, respectivamente, medidas en escala absoluta. En

la Tabla 2 se describen, de acuerdo con Dunkle (1961), las ecuaciones para determinar el coeficiente de transferencia de calor por radiación  $h_{rav}$ , el coeficiente de transferencia de calor por convección  $h_{cav}$  y el coeficiente de transferencia de calor por evaporación  $h_{eav}$ . Además, se incluyen las correlaciones necesarias para calcular la presión de vapor correspondiente a la temperatura del agua  $P_a$  y la presión de vapor correspondiente a la temperatura del vidrio  $P_v$ . En este trabajo de tesis, se han asumido los valores de  $\varepsilon_a$  (emisividad del agua) como 0.96 y  $\varepsilon_v$  (emisividad del vidrio) como 0.88 (Kabeel et al., 2017).

El cálculo de los coeficientes de transferencia de calor es fundamental para mejorar la eficiencia de los destiladores solares, ya que permiten optimizar el proceso de evaporación y condensación del agua salina, lo que incrementa la cantidad de agua destilada producida. En la práctica, estos coeficientes permiten determinar la capacidad de un destilador solar.

**Tabla 2.** Métodos para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor, presiones de vapor y otros símbolos implicados.

Simbolo	Definición	Ecuación
$h_{rav}$	Coeficiente de transferencia de calor por radiación	$h_{rav} = \left(\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1}{\varepsilon_v}\right)^{-1} \sigma \left[(T_a + 273)^2 + (T_v + 273)^2\right] (T_a + T_v + 546)$
$h_{cav}$	Coeficiente de transferencia de calor por convección	$h_{cav} = 0.884 \left[T_a - T_v + \frac{(P_a - P_v)(T_a + 273)}{268.9 \times 10^3} - P_a\right]^{1/3}$
$h_{eav}$	Coeficiente de transferencia de calor por evaporación	$h_{eav} = 16.273 \times 10^{-3} h_{cav} \left(\frac{P_a - P_v}{T_a - T_v}\right)$
$P_a$	Presión de vapor determinada a la temperatura del agua	$P_a = \exp\left(25.317 - \frac{5,144}{T_a + 273}\right)$
$P_v$	Presión de vapor determinada a la temperatura del vidrio	$P_v = \exp\left(25.317 - \frac{5,144}{T_v + 273}\right)$
$\varepsilon_a$	Emisividad del agua	
$\varepsilon_v$	Emisividad del vidrio	
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

Por otra parte, de acuerdo con Kabeel et al. (2019), la eficiencia térmica ( $\eta_d$ ) de un destilador solar se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_d = \frac{m_d \cdot h_{as}}{3600 \cdot A_b \cdot \sum I_d(t)} \quad (28)$$

La Ecuación 28,  $\eta_d$  es una magnitud adimensional que depende de la masa de agua destilada  $m_d$ , donde  $I_d$  representa la intensidad solar diaria total expresada en  $[\text{W}/\text{m}^2]$ ,  $A_b$  es el área superficial de la base y  $h_{as}$  es el calor latente de vaporización del agua contenida en la base a la temperatura promedio del agua  $\overline{T_a}$ . Es importante resaltar que la Ecuación 28  $A_b$  representa el área que absorbe la radiación solar incidente. Si en algún momento el área que absorbe la radiación solar es otra, entonces hay que reemplazar  $A_b$  por dicha área. El valor de  $h_{as}$ , con  $T_a$  expresada en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), se puede determinar mediante la siguiente correlación (Dunkle, 1961):

$$h_{as} = 2,501.897 - 2.407 T_a + 1.192 \times 10^{-3} T_a^2 - 1.586 \times 10^{-5} T_a^3 \quad (29)$$

## Capítulo 3. Metodología

A lo largo de este capítulo se describe el montaje experimental utilizado para el procesamiento de las superficies de aluminio, así como las técnicas empleadas para la caracterización de la morfología, la absorbancia y la humectabilidad de dichas superficies. Se detallan los procedimientos y equipos utilizados en el procesamiento.

### 3.1. Muestra de Aluminio (Al)

En este trabajo de tesis se utilizó como muestra una lámina de aluminio (Al) reflectante, que proporciona un 90% de reflexión solar total. Esta lámina está fabricada a partir de la aleación 5005 y tratada térmicamente al estado H34. La información detallada se encuentra en la ficha técnica proporcionada por el proveedor, la cual se presenta en el Anexo A (Aalco, 2024). A continuación, se describe la aleación 5005 y el tratamiento térmico H34.

- Aleación 5005:** la aleación 5005 de aluminio se utiliza ampliamente en aplicaciones como paneles de revestimiento de edificios, techos, componentes de vehículos, colectores solares, entre otros, donde se requiere alta resistencia a la corrosión y un acabado anodizado. Esta aleación pertenece a la serie 5000 de aleaciones de aluminio, las cuales están principalmente aleadas con magnesio para mejorar su resistencia. La composición química y propiedades de la aleación 5005 se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3.** (a) Composición química , (b) Propiedades del material

Elemento	Composición (%)
Magnesio (Mg)	0.5 - 1.10
Hierro (Fe)	0.0 - 0.70
Silicio (Si)	0.0 - 0.30
Zinc (Zn)	0.0 - 0.25
Manganesio (Mn)	0.0 - 0.20
Cobre (Cu)	0.0 - 0.20
Cromo (Cr)	0.0 - 0.1
Aluminio (Al)	97.15 - 99.5

Propiedad	Valor
Densidad	2.70 g/cm <sup>3</sup>
Punto de fusión	655 °C
Expansión térmica	23.5 × 10 <sup>-6</sup> /K
Módulo de elasticidad	69.5 GPa
Conductividad térmica	201 W/m·K
Resistividad eléctrica	52 % IACS
Resistividad eléctrica	0.033 × 10 <sup>-6</sup> Ω·m

- Tratamiento térmico H34:** el tratamiento térmico H34 significa que la aleación ha sido sometida a un proceso específico de endurecimiento por deformación. H3 indica que el material ha sido

endurecido por deformación y luego estabilizado mediante un tratamiento térmico a baja temperatura para reducir tensiones internas sin reducir significativamente la resistencia del material. El grado 4 corresponde a aproximadamente tres cuartas partes ( $3/4$ ) del endurecimiento total posible que puede alcanzar el material. Cuando la aleación 5005 se encuentra en el estado H34, exhibe una mayor resistencia mecánica, ya que el proceso de endurecimiento por deformación incrementa tanto su resistencia a la tracción como su dureza.

## 3.2. Arreglo experimental para el procesamiento de materiales

### 3.2.1. Diagrama del arreglo óptico experimental

El sistema óptico utilizado para la fabricación de las superficies de aluminio texturizadas se presenta en la Figura 11. El sistema de microprocesado láser consta de un láser comercial de titanio:zafiro ( $\text{Ti} : \text{Al}_2\text{O}_3$ ), de la marca Atseva, modelo TiF 15, el cual emite pulsos ultracortos con una duración en el rango de los femtosegundos. Estos pulsos son amplificados mediante un amplificador Coherent de la serie Legend Elite HE+, alimentado por un láser de bombeo Revolution integrado. Este sistema produce pulsos con una duración de 120 fs, una longitud de onda centrada en 800 nm y una frecuencia de repetición de 5 kHz.

A la salida del amplificador, el haz láser, representado por las flechas rojas, pasa a través de un “atenuador óptico”, compuesto por una placa retardadora de media onda ( $\lambda/2$ , Thorlabs WPH10M-808) y un cubo de polarización lineal. Este sistema permite ajustar la intensidad del haz que incide sobre la muestra. A continuación, el haz láser pasa a través de una placa retardadora de un cuarto de onda ( $\lambda/4$ , Thorlabs WPQ10M-808), que convierte la luz polarizada linealmente en luz con polarización circular o elíptica. Un conjunto de espejos dieléctricos permite manipular y dirigir el haz láser (representado por las flechas rojas) hacia la muestra, el cual es enfocado en esta por medio de una lente esférica plano-convexa con una distancia focal de  $f = 150 \text{ mm}$  (Thorlabs LA1433-B), denominada lente de procesamiento (L.P).

La muestra está posicionada en una mesa de traslación XYZ (Sigma-Koki Mod. SSP20-85), que utiliza motores para mover la plataforma con alta precisión en relación al haz láser, logrando movimientos controlados en el rango de micrómetros. Esta estación permite ajustar la muestra a la distancia focal de la lente de procesamiento mediante el ajuste del eje Z, y también permite mover la muestra a lo largo de los ejes XY para determinar el punto de irradiación. La mesa de traslación ofrece un rango de movimiento de



85 mm en cada eje, con una velocidad máxima de 25 mm y una resolución espacial de  $1 \mu\text{m}$ . Además, permite ajustes angulares para asegurar que la muestra esté perpendicular al haz láser. Por último, una serie de dispositivos de medición monitorea diversos parámetros del láser, como la potencia, la distancia focal del haz sobre la muestra, el perfil de intensidad, entre otros.

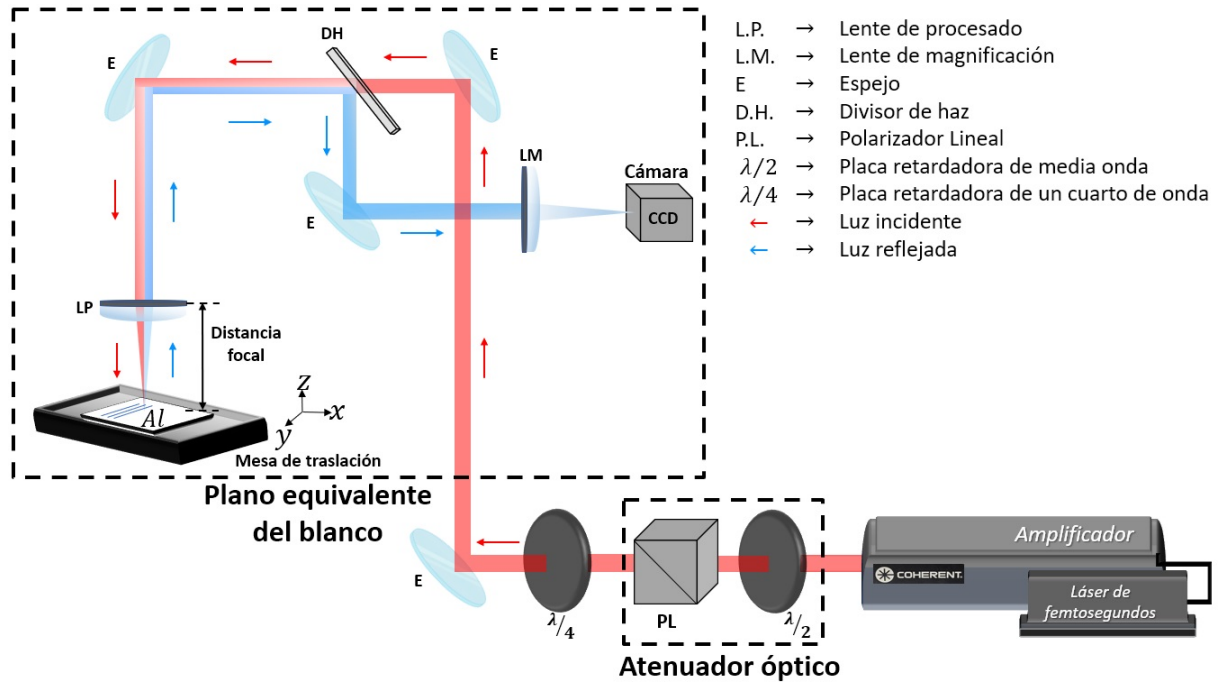


Figura 11. Diagrama del arreglo óptico experimental utilizado para el procesamiento de materiales.

### 3.2.2. Sistema de plano equivalente de blanco (PEB)

Se realizó un monitoreo de parámetros como la potencia, la distancia focal del haz sobre la muestra, el perfil de intensidad, entre otros, utilizando el sistema de monitoreo PEB que se muestra en la Figura 11.

El sistema de monitoreo PEB, indicado en la Figura 11 dentro del cuadro de líneas punteadas, está compuesto por varios elementos ópticos. La luz del haz láser reflejada por la muestra (representada por las flechas azules) pasa a través de la lente de procesado (LP), que tiene una distancia focal de  $f_{LP} = 150 \text{ mm}$ . Una serie de espejos (E) guían el haz láser hasta un divisor de haz (D.H.), donde parte de la luz (representada por las flechas azules) es dirigida hacia una lente de magnificación (L.M.), que tiene una distancia focal de  $f_{LM} = 500 \text{ mm}$ . Finalmente, la luz es dirigida hacia una cámara Thorlabs, modelo DCC1545M-GL para la recolección de la luz reflejada.

Por medio del sistema PEB se midió el tamaño del haz. Por medio de esta técnica se obtuvieron imágenes

del perfil transversal de la intensidad del haz enfocado en la muestra. Las imágenes obtenidas presentan un factor de magnificación determinado por el conjunto de dos lentes del sistema PEB:

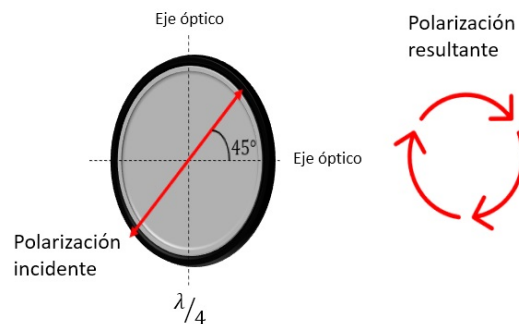
$$\text{Magnificación} = \frac{f_{LM}}{f_{LP}} \quad (30)$$

donde  $f_{LM}$  y  $f_{LP}$  son las distancias focales de la lente de magnificación y de la lente de procesado, respectivamente. Adicionalmente, mediante el sistema PEB se asegura que el láser incida perpendicularmente a la superficie de la muestra. Además, el sistema permite determinar el diámetro del haz enfocado sobre la muestra, así como determinar la distancia focal del haz en la muestra.

### 3.2.3. Control de polarización

Las estructuras generadas en la superficie presentan una dependencia del estado de polarización del campo eléctrico incidente, como se demostró en Fraijo Rodas (2021). En el montaje experimental mostrado en la Figura 11, se añadió una placa de cuarto de onda después del atenuador óptico, con el objetivo de manipular el estado de polarización del haz y llevar a cabo irradiaciones con polarización circular.

Una placa de cuarto de onda tiene dos ejes principales: el eje rápido, donde la luz viaja más rápido, y el eje lento, donde la luz viaja más lento. La diferencia en la velocidad de propagación entre los dos ejes crea una diferencia de camino óptico, resultando en un desfase de 90 grados entre los componentes de la luz alineados con estos ejes. Como se muestra en la Figura 12



**Figura 12.** Transformación de polarización lineal a circular

Cuando la luz polarizada linealmente incide a 45 grados respecto a los ejes de la placa, los componentes del campo eléctrico en los ejes rápido y lento estarán desfasados en 90 grados después de pasar por la

placa. Esto produce una polarización circular si la magnitud de los componentes es la misma. Para la luz polarizada en otros ángulos, la salida será luz elípticamente polarizada debido a la diferencia de fase introducida.

### 3.2.4. Amplificador láser

El amplificador Coherent de la serie Legend Elite HE+ es un dispositivo avanzado diseñado para amplificar pulsos de femtosegundos generados por un oscilador de Ti:Zafiro. Este sistema se caracteriza por su alta energía de pulsos y su estabilidad, lo que lo hace ideal para aplicaciones en procesamiento de materiales, investigación científica y medicina. La técnica utilizada en este amplificador se conoce como Chirped Pulse Amplification (por sus siglas en inglés CPA). Esta técnica permite amplificar pulsos ultracortos sin dañarlos, manteniendo su alta energía y corta duración. La Figura 13 muestra el proceso de amplificación de pulsos ultracortos, basado en una imagen modificada de Mori (2010).

El proceso comienza con un oscilador de Ti:Zafiro, que genera pulsos con un ancho temporal de femtosegundos con baja energía. Estos pulsos iniciales tienen típicamente una duración en el orden de los 100 fs y una energía en el rango de nanojoules (nJ). Seguido a esto, el sistema utiliza un láser de bombeo Revolution, el cual proporciona la energía necesaria para la amplificación de los pulsos generados por el oscilador. Este láser de bombeo es un láser de estado sólido que emite luz a una longitud de onda adecuada para excitar los átomos en el cristal de Ti:Zafiro del oscilador. Antes de ser amplificados, los pulsos de femtosegundos son estirados temporalmente utilizando un dispositivo estirador dispersivo, como por ejemplo un par de rejillas de difracción, que se basa en principios de dispersión cromática para separar temporalmente las diferentes frecuencias del pulso. Este dispositivo óptico se utiliza para aumentar temporalmente la duración de un pulso de luz. Este estiramiento es necesario para reducir la intensidad pico del pulso, evitando así daños en el cristal de Ti:Zafiro durante la amplificación. La duración del pulso se incrementa significativamente en esta etapa.

Los pulsos estirados son introducidos en la cavidad del amplificador, donde interactúan con los átomos excitados del cristal de Ti:Zafiro. A través del proceso de emisión estimulada, los pulsos ganan energía de estos átomos, resultando en una amplificación significativa de la energía del pulso. Una vez amplificados, los pulsos son comprimidos nuevamente. Este proceso se realiza mediante un compresor de pulsos, que puede consistir en otro par de rejillas, utilizado para reducir la duración temporal de un pulso de luz previamente estirado. Los pulsos, ahora comprimidos y amplificados, son emitidos desde el amplificador

con una energía significativamente mayor que la de los pulsos originales generados por el oscilador. Obteniendo como resultante pulsos ultracortos de alta energía.

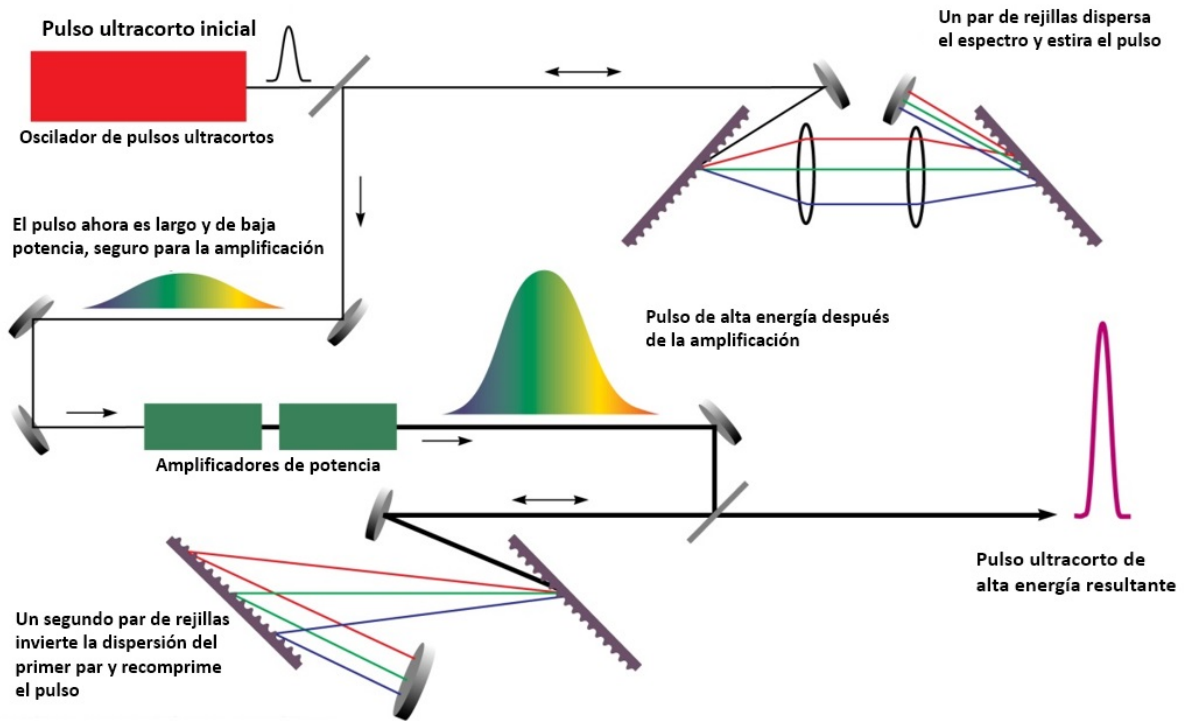


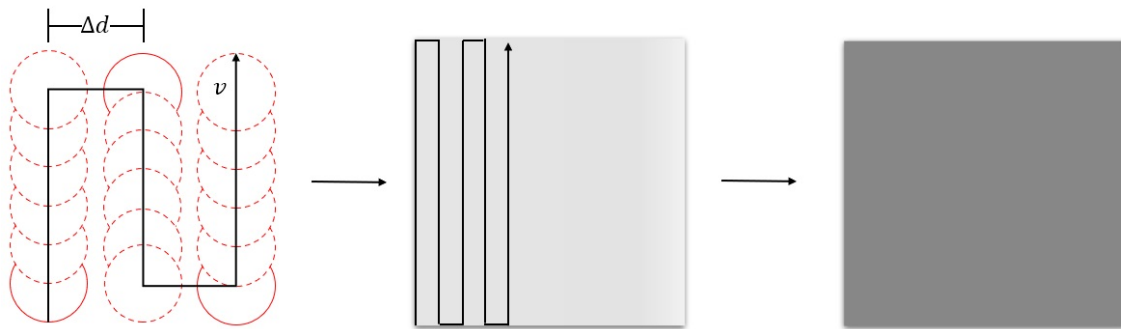
Figura 13. Proceso de amplificación de pulsos ultracortos. Basado en una imagen modificada de Mori 2010.

### 3.3. Diseño experimental y parámetros de irradiación

Como se mencionó en la subsección 2.1.6.3 del capítulo 2, la fluencia integrada de barrido ( $F_{int}$ ) se refiere a la incidencia de un tren de pulsos láser sobre una misma área. Sin embargo, para generar áreas extendidas que permitan texturizar completamente la superficie de trabajo, es necesario realizar un barrido lineal del haz láser enfocado a una velocidad constante sobre toda el área de la muestra. En la Figura 14, se presenta de izquierda a derecha el esquema del proceso de barrido. Primero, se ilustra la distribución del tren de pulsos al realizar el barrido a una velocidad constante ( $v$ ), donde  $\Delta d$  representa la distancia entre barridos consecutivos. El barrido se realizó en zigzag, con la trayectoria del láser configurada para desplazarse de ida y vuelta a lo largo del eje  $x$  y avanzar a lo largo del eje  $y$ . Esta técnica permitió producir un área tratada de forma cuadrada.

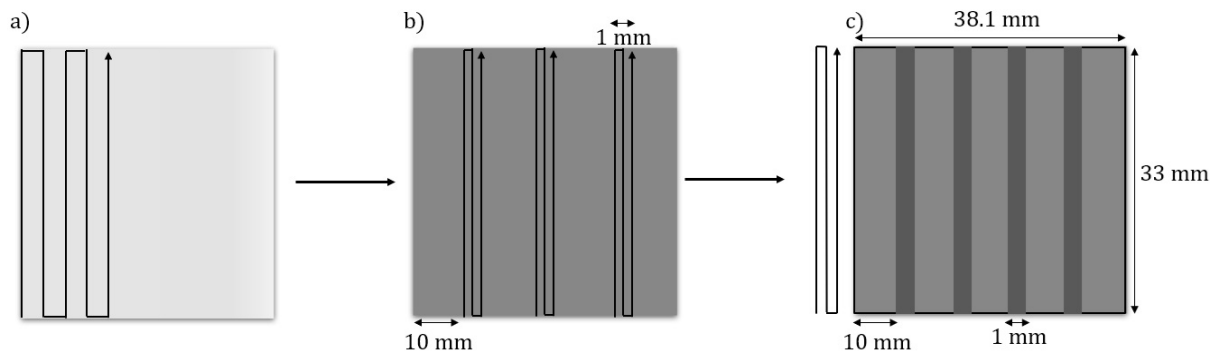
Se llevaron a cabo dos experimentos. En el primer experimento, la muestra fue irradiada siguiendo el esquema de barridos presentado en la Figura 14. Inicialmente, se realizaron irradiaciones sobre un área

cuadrada de 1 cm por lado. Posteriormente, el área irradiada se amplió a dimensiones de 38.1 mm de ancho y 33 mm de alto, logrando cubrir toda la superficie de interés.



**Figura 14.** Esquema de barridos lineales en áreas extendidas

El segundo experimento consistió en un proceso de dos pasos: como se describe en la Figura 15.



**Figura 15.** Esquema de barridos para el experimento de irradiación mediante un proceso de dos pasos. (a) Representación de la irradiación inicial, en la que se realiza un barrido lineal cubriendo un área total de 38.1 mm de ancho por 33 mm de alto. (b) Esquema de la segunda etapa de irradiación, con áreas de 1 mm de ancho y 33 mm de alto, realizadas cada 10 mm de separación. (c) Ilustración del área total irradiada en el segundo experimento.

En este segundo experimento (Figura 15), la lámina irradiada, con una superficie total de 38.1 mm de ancho y 33 mm de alto, fue nuevamente irradiada, aplicando una serie de barridos adicionales. La segunda irradiación se llevó a cabo en áreas de 1 mm de ancho y 33 mm de alto, realizadas cada 10 mm de separación, generando los patrones observados en la Figura 15 (c). Posteriormente, las placas de aluminio texturizadas mediante los experimentos descritos fueron integradas al sistema de destilación solar, cuyo diseño y funcionamiento se describen en la sección 3.5. A partir de esta integración, se evaluó la eficiencia térmica del destilador solar en dos condiciones: con las placas de aluminio sin texturizar y, posteriormente, con las placas texturizadas, con el objetivo de determinar el impacto de las superficies texturizadas en el proceso de destilación.

### 3.4. Técnicas de caracterización

A lo largo del desarrollo de este proyecto, fue fundamental realizar un monitoreo constante de las características morfológicas y estructurales de la muestra tratada con láser. Con este objetivo, se emplearon diversas técnicas de caracterización, entre las que se incluyen microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido, perfilometría óptica, goniómetro de ángulo de contacto y espectrometría UV-Vis. Estas técnicas permitieron un análisis detallado de la morfología superficial, las propiedades de mojabilidad y las características ópticas de las muestras tratadas, proporcionando una evaluación de los efectos del tratamiento láser.

- **Microscopio óptico:** La microscopía óptica es una técnica de caracterización que emplea luz visible y un conjunto de lentes ópticas para observar y analizar la estructura y propiedades de materiales a micro y nanoscala. La muestra se coloca en la platina del microscopio y se ilumina mediante una fuente de luz visible. Esta luz puede ser transmitida a través de la muestra (microscopía por transmisión) o reflejada desde su superficie (microscopía por reflexión). La interacción de la luz con la muestra varía según su estructura y composición, pudiendo ser absorbida, transmitida, reflejada, refractada o dispersada, lo que proporciona información detallada sobre la muestra.

La luz que interactúa con la muestra pasa a través de una serie de lentes en el microscopio. La lente objetivo, la más cercana a la muestra, tiene una alta capacidad de ampliación y forma la imagen real primaria de la muestra. La lente del ocular, a través de la cual el observador ve la imagen, amplía aún más la imagen formada por el objetivo, produciendo una imagen virtual visible para el ojo. La ampliación total del microscopio se determina multiplicando la capacidad de ampliación del objetivo por la del ocular. No obstante, la capacidad del microscopio para revelar detalles finos está limitada por la difracción de la luz, lo que define su resolución. En este trabajo se utilizó un microscopio Olympus BX41 (Figura 16), el cual permitió llevar a cabo una caracterización detallada de las modificaciones superficiales inducidas por el proceso de irradiación.



**Figura 16.** Microscopio Olympus BX41. Fuente: Spectra Services Inc. (n.d.).

- **Microscopio electrónico de barrido:** El Microscopio Electrónico de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés) es una técnica de caracterización utilizada para obtener imágenes detalladas de la superficie de una muestra. A diferencia de los microscopios ópticos, que utilizan luz visible, el SEM utiliza un haz de electrones para explorar la superficie de la muestra, proporcionando imágenes con una resolución de 0.4 a 20 nanómetros.

El Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) genera un haz de electrones por medio de un cátodo (electrones incidentes) que son acelerados mediante una diferencia de potencial, en el rango de 220 V y 30 keV. Este haz viaja a través de una columna de vacío de  $10^{-4}$  Pa. El haz de electrones es enfocado y dirigido hacia la muestra mediante un sistema de lentes electromagnéticas. Al interactuar con la muestra, el haz genera diferentes señales que son interpretadas por diversos detectores. Además, se aplica un campo eléctrico que permite el barrido del haz de electrones a lo largo de toda la superficie de la muestra, generando así una imagen de la superficie del área de interés, que posteriormente es observada en la pantalla del computador.

El haz de electrones puede interactuar con el material de diferentes formas, proporcionando señales que resultan en la imagen o generando otra información sobre la muestra. Cuando un haz de electrones incide sobre una muestra, se obtienen diferentes tipos de señales, como las que se presentan a continuación:

- **Electrones Auger:** Cuando el haz de electrones interactúa con la muestra a pocos nanómetros de profundidad ( $\sim 1$  nm) los cuales nos proporcionan información sobre la composición química de la superficie.
  - **Electrones Secundarios:** Para el caso de mayor profundidad ( $\sim 100$  nm) el haz de electrones interactúa con las capas electrónicas del material y proporcionan información sobre la morfología.

- **Electrones Retrodispersados:** Cuando el haz de electrones interactúan con la muestra a mayor profundidad ( $\sim 500 \text{ nm}$ ) se detectan los electrones retrodispersados que contribuyen a las imágenes con diferente brillantez en función de la composición química superficial.
- **Rayos X Característicos:** Permiten la detección cualitativa y cuantitativa de los elementos químicos presentes en la superficie de la muestra, proporcionando un análisis detallado de su composición.

Cada tipo de señal proporciona información distinta sobre la muestra. Las señales detectadas se convierten en señales eléctricas que son procesadas para formar una imagen en una pantalla. La intensidad de la señal detectada en cada punto de la muestra se convierte en un punto de luz en la pantalla, formando así una imagen de la superficie. Esta imagen permite obtener información morfológica y de composición química superficial de la muestra.

En este trabajo se utilizó un microscopio Electrónico de Barrido (SEM) Hitachi SU3500 (Figura 17).



**Figura 17.** Microscopio electrónico de barrido Hitachi SU3500. Fuente: Hitachi High-Tech. (n.d.).

- **Perfilómetro óptico:** El perfilómetro óptico es una técnica de caracterización no destructiva utilizada para medir la topografía de superficies con alta precisión y resolución.

El perfilómetro óptico utiliza un haz de luz coherente, típicamente un láser, para iluminar la superficie de la muestra. La luz reflejada desde la superficie se recoge y se analiza para obtener información sobre la topografía de la muestra. El principio físico fundamental detrás del perfilómetro óptico es la interferometría. En este método, la luz reflejada desde la superficie de la muestra se combina con una luz de referencia en un interferómetro, creando un patrón de interferencia. Este patrón de interferencia depende de las diferencias de fase entre las ondas de luz reflejadas desde



diferentes puntos de la superficie de la muestra. Estas diferencias de fase corresponden a variaciones en la altura de la superficie de la muestra. Al analizar el patrón de interferencia, se puede reconstruir la topografía de la superficie con una resolución vertical en el rango de nanómetros.

Para este trabajo se utilizó un perfilómetro óptico de KEYENCE VR-6000 (Figura 18), que facilita la medición tridimensional de superficies con alta precisión, alcanzando una resolución de  $0.1 \mu\text{m}$



**Figura 18.** Perfilómetro óptico de KEYENCE. Fuente: KEYENCE Corporation. (n.d.).

- **Goniómetro de ángulo de contacto:** El goniómetro de ángulo de contacto es una herramienta de caracterización empleada para determinar el ángulo que se forma entre una gota de líquido y una superficie sólida. Esta medida proporciona información crucial sobre las propiedades de humectabilidad del material.

La muestra sólida cuya superficie va a ser caracterizada se coloca sobre una platina horizontal del goniómetro. Se dispensa una gota de líquido sobre la superficie de la muestra utilizando una jeringa de microlitros. La gota debe tener un volumen pequeño para evitar efectos significativos de la gravedad que puedan afectar la forma de la gota. Un sistema compuesto por una cámara de alta resolución y una iluminación adecuada, colocado perpendicularmente a la superficie de la muestra, asegura que el contorno de la gota sea claramente visible y captura la imagen de la gota depositada.

El software de análisis de imágenes del goniómetro interpreta la captura para calcular el ángulo de contacto, definido como el ángulo entre la tangente a la superficie de la gota en el punto de contacto y la superficie sólida.

Para este trabajo se utilizó un goniómetro de ángulo de contacto Ossila, modelo L2004A1 (Figura 19), que opera en el rango de  $5^\circ$  a  $180^\circ$  con un ancho máximo de gota de 20 mm y una cámara con resolución máxima de  $1920 \times 1080$ .

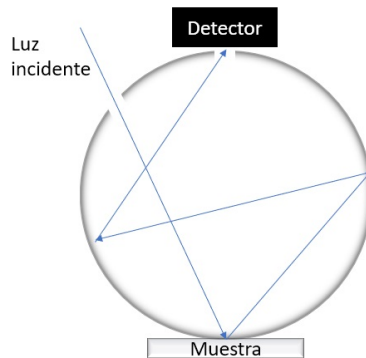


**Figura 19.** Goniómetro de ángulo de contacto de Ossila. Fuente: Ossila. (n.d.).

- Espectrofotómetro UV-Vis:** La espectrofotometría UV-Vis es una técnica de caracterización ampliamente utilizada para estudiar los procesos de absorción, transmisión y reflectancia de la luz en las regiones del ultravioleta (UV), visible (Vis) e infrarrojo cercano (NIR) del espectro electromagnético al interactuar con una muestra. Esta técnica proporciona información valiosa sobre la estructura molecular, concentración y propiedades ópticas de sustancias en soluciones, sólidos y gases.

Un espectrofotómetro está equipado con una fuente de luz y un detector. La fuente emite luz que abarca un amplio rango de longitudes de onda, desde 200 nm hasta 800 nm, cubriendo las regiones del ultravioleta (UV) y visible (Vis) del espectro electromagnético. La luz generada por la fuente interactúa con la muestra a analizar y, dependiendo de las propiedades de la muestra, una parte de la luz será absorbida, mientras que el resto será transmitida o reflejada.

Para una medición completa de las propiedades ópticas de un material, como la absorción, reflexión, transmisión y dispersión, se utiliza una esfera integradora acoplada al espectrofotómetro. La Figura 20 muestra un esquema simplificado de una esfera integradora utilizada en la medición de propiedades ópticas. La esfera integradora es una estructura hueca con una superficie interna altamente reflectante que permite que la luz incidente se disperse y refleje múltiples veces, asegurando su distribución uniforme en todas las direcciones. La luz que interactúa con la muestra se promedia dentro de la esfera antes de llegar al detector, lo que permite obtener una medición uniforme de la luz reflejada o transmitida.



**Figura 20.** Esquema simplificado de una esfera integradora utilizada en la medición de propiedades ópticas

El detector, colocado en una de las aberturas de la esfera, mide la intensidad de la luz que ha sido promediada dentro de la esfera, proporcionando una medición precisa y representativa de las propiedades ópticas de la muestra sólida. Después de interactuar con la muestra, la luz transmitida o reflejada ingresa al espectrofotómetro, donde es dispersada mediante un sistema de rejillas de difracción que separa las diferentes longitudes de onda. La luz dispersada se dirige hacia un detector que la convierte en señales eléctricas proporcionales a la intensidad de la luz en cada longitud de onda.

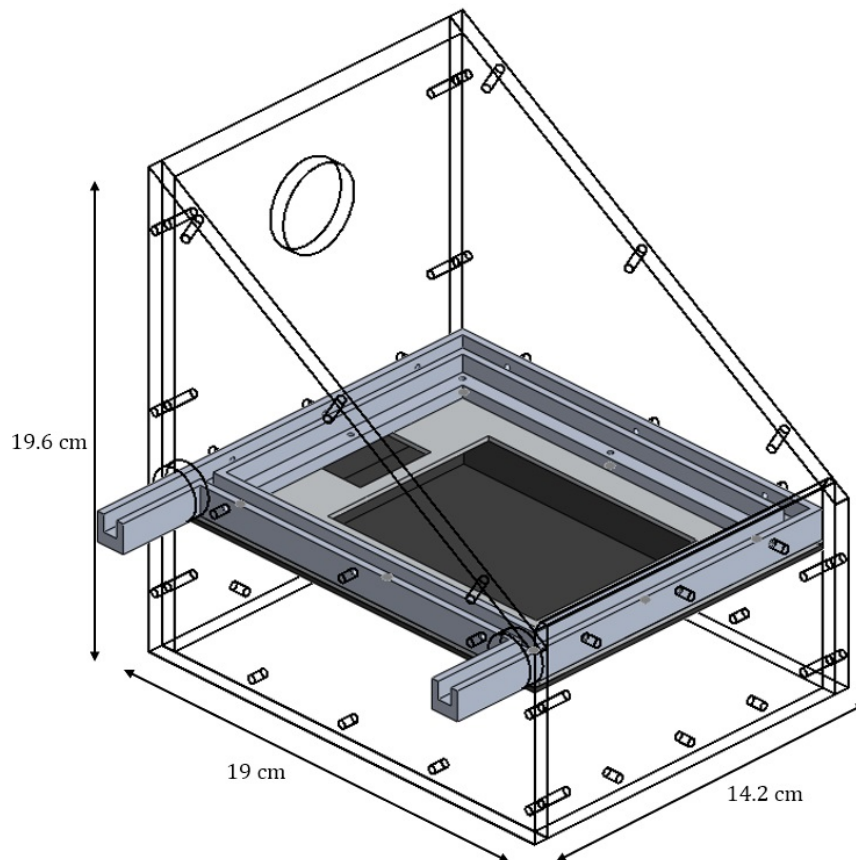
Las señales eléctricas generadas por el detector son procesadas por un sistema electrónico avanzado, que elimina el ruido y mejora la precisión de la medición. Los datos procesados se envían a un ordenador, donde son visualizados y analizados mediante un software especializado. Este software permite generar espectros de absorción, transmisión y reflectancia, proporcionando información detallada sobre las propiedades ópticas de la muestra. Para este trabajo se utilizó un espectrofotómetro UV-visible AVANTES, modelo AvaSpecs-2048 (Figura 21), equipado con una fuente de luz modelo AvaLight-DH-S-BAL que trabaja en el rango de longitudes de onda de 200 nm a 1100 nm con una resolución de 20 nm y un detector de matriz CMOS (Semiconductor Complementario de Óxido Metálico) .



**Figura 21.** Espectrofotómetro UV-Vis AvaSpec-ULS2048CL-EVO de Avantes. Fuente: Avantes. (n.d.).

### 3.5. Diseño del destilador solar

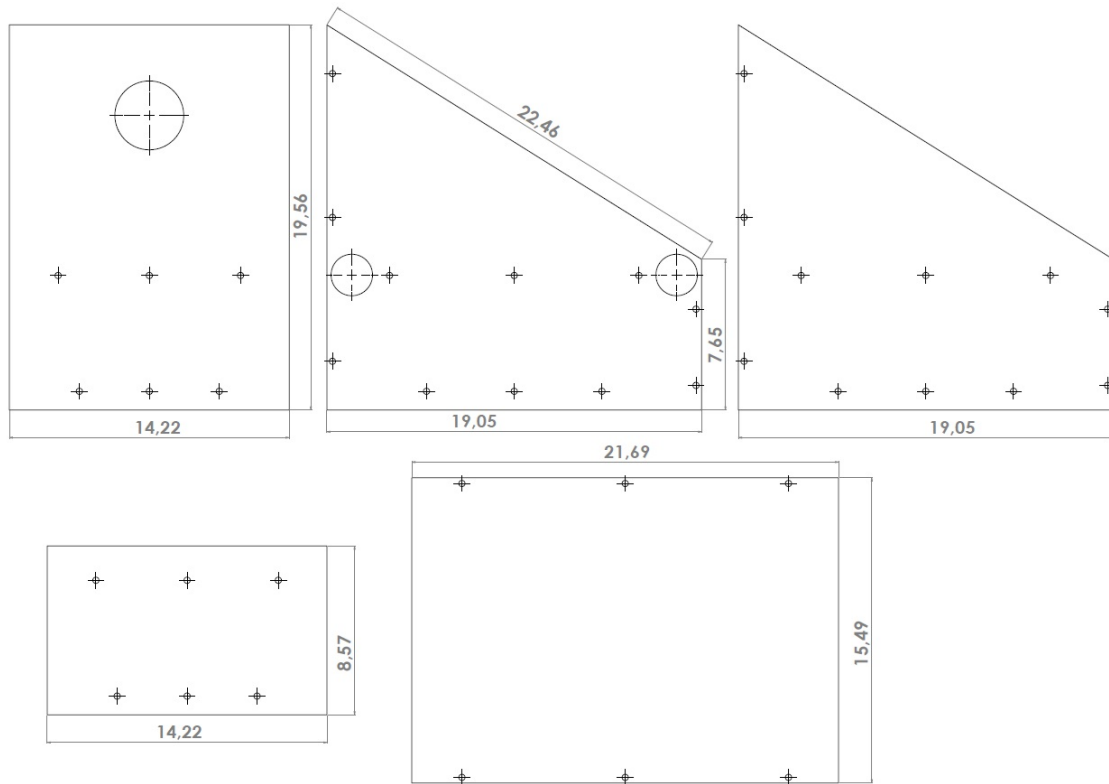
El diseño del destilador solar se muestra en la Figura 22. El destilador solar de pendiente única tiene dimensiones de 19 cm de largo, 14.2 cm de ancho y 19.6 cm de alto. Estas dimensiones permiten un tamaño compacto, adecuado para evaluar la eficiencia del proceso de desalinización como prueba de concepto. Se construyó teniendo en cuenta las coordenadas geográficas del lugar (latitud  $31^{\circ}52'17.4''$  N y longitud  $116^{\circ}36'2.6''$  O), en Ensenada, Baja California, México. El destilador se fabricó utilizando acrílico transparente para las paredes frontal, posterior, derecha, izquierda, y la parte superior o techo, con un grosor de 0.64 cm. El techo se cortó en un ángulo de  $32^{\circ}$ , correspondiente a la latitud del lugar. Todas las piezas se conectaron entre sí mediante tornillos para garantizar la estabilidad de la estructura.



**Figura 22.** Diseño del destilador solar vista 3D (configuración #1).

El destilador tiene en su interior una charola de aluminio pintada de negro, con un área de  $0.0109 \text{ m}^2$ , sobre la cual se deposita el agua a destilar. Para recolectar el agua condensada, se colocaron canales en las paredes derecha, izquierda, frontal y posterior, los cuales terminan en dos tubos de plástico que dirigen el agua destilada hacia un contenedor externo. Además, el destilador cuenta con aislantes de poliestireno en la parte inferior y una base de madera para evitar pérdidas de calor. Al destilador sin

láminas texturizadas se le denominó configuración #1. Las dimensiones de las paredes y el techo se presentan en la Figura 23. En la vista frontal del destilador, las figuras de la parte superior muestran los diagramas esquemáticos con las dimensiones en cm de la pared posterior, la pared izquierda y la pared derecha, respectivamente. Las figuras de la parte inferior representan los diagramas esquemáticos con las dimensiones en cm de la pared frontal y del techo, respectivamente.



**Figura 23.** Diagrama esquemático con las medidas correspondientes a cada una de las paredes y el techo del destilador.

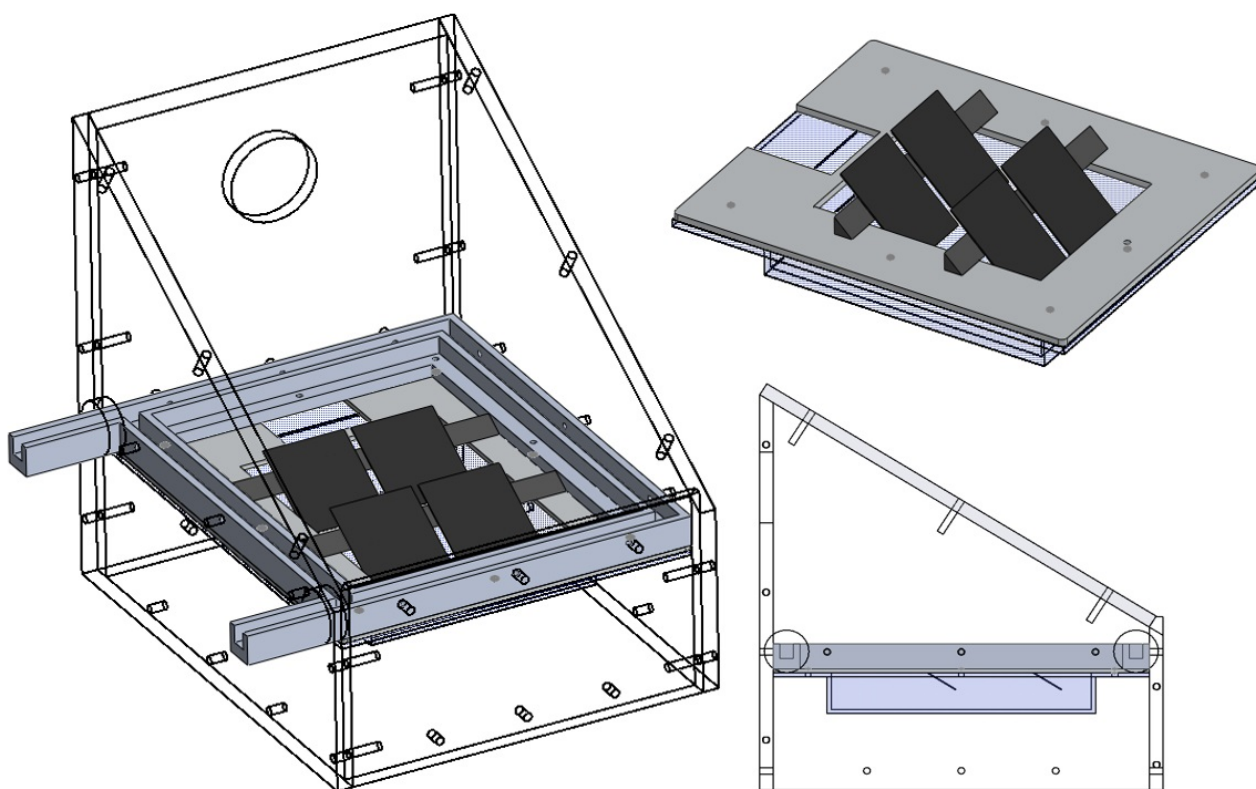
Se desarrollaron dos diseños de configuraciones para realizar pruebas de eficiencia utilizando láminas texturizadas integradas dentro del destilador, como se muestra en la Figura 24. En el primer diseño, denominado configuración #2, las láminas se disponen en una matriz de cuatro unidades, cada una inclinada a un ángulo de  $32^\circ$  respecto a la horizontal. Esta configuración permite que las láminas estén en contacto directo con el agua, pero sin estar totalmente sumergidas. Por otro lado, la Figura 25, correspondiente a la configuración #3, muestra una matriz compuesta por seis láminas, todas colocadas sobre la base de la charola de manera que el agua las recubre completamente.

En la Tabla 4 se presenta la matriz experimental que contiene la información sobre la fecha en que se realizó cada experimento, así como las horas de encendido y apagado del sistema, es decir, el intervalo de tiempo durante el cual se llevó a cabo cada prueba para las tres configuraciones descritas. Las configuraciones se etiquetan de la siguiente manera: configuración #1 corresponde al destilador sin

láminas texturizadas; configuración #2 corresponde al destilador con láminas texturizadas dispuestas en un ángulo de  $32^\circ$  respecto a la horizontal; y configuración #3 corresponde al destilador con láminas colocadas horizontalmente sobre la charola, como se muestra en las Figuras 22, 24 y 25, respectivamente.

**Tabla 4.** Matriz experimental de las tres configuraciones utilizadas para la evaluación de la eficiencia del destilador solar.

Configuración	Fecha	Hora encendido	Hora apagado	Tiempo de funcionamiento
#1 Sin láminas	24/08/2024	9:11	18:15	9 h 04 min
	26/08/2024	9:00	18:15	9 h 15 min
	26/08/2024	9:01	18:00	8 h 59 min
	29/08/2024	9:17	18:40	9 h 23 min
	30/08/2024	8:02	18:05	10 h 03 min
#2 Láminas texturizadas inclinadas 32 grados respecto a la horizontal	15/09/2024	8:40	18:30	9 h 50 min
	17/09/2024	8:34	17:30	8 h 56 min
	18/09/2024	9:00	17:40	8 h 40 min
	19/09/2024	10:36	17:00	6 h 24 min
	20/09/2024	8:52	18:00	9 h 08 min
#3 Láminas texturizadas en posición horizontal sobre el fondo de la charola	24/09/2024	8:30	17:56	9 h 26 min
	25/09/2024	9:06	18:40	9 h 34 min
	26/09/2024	8:56	18:00	9 h 04 min
	27/09/2024	9:34	18:00	8 h 26 min
	01/10/2024	7:52	18:00	10 h 08 min



**Figura 24.** Diagrama 3D de la configuración experimental #2.

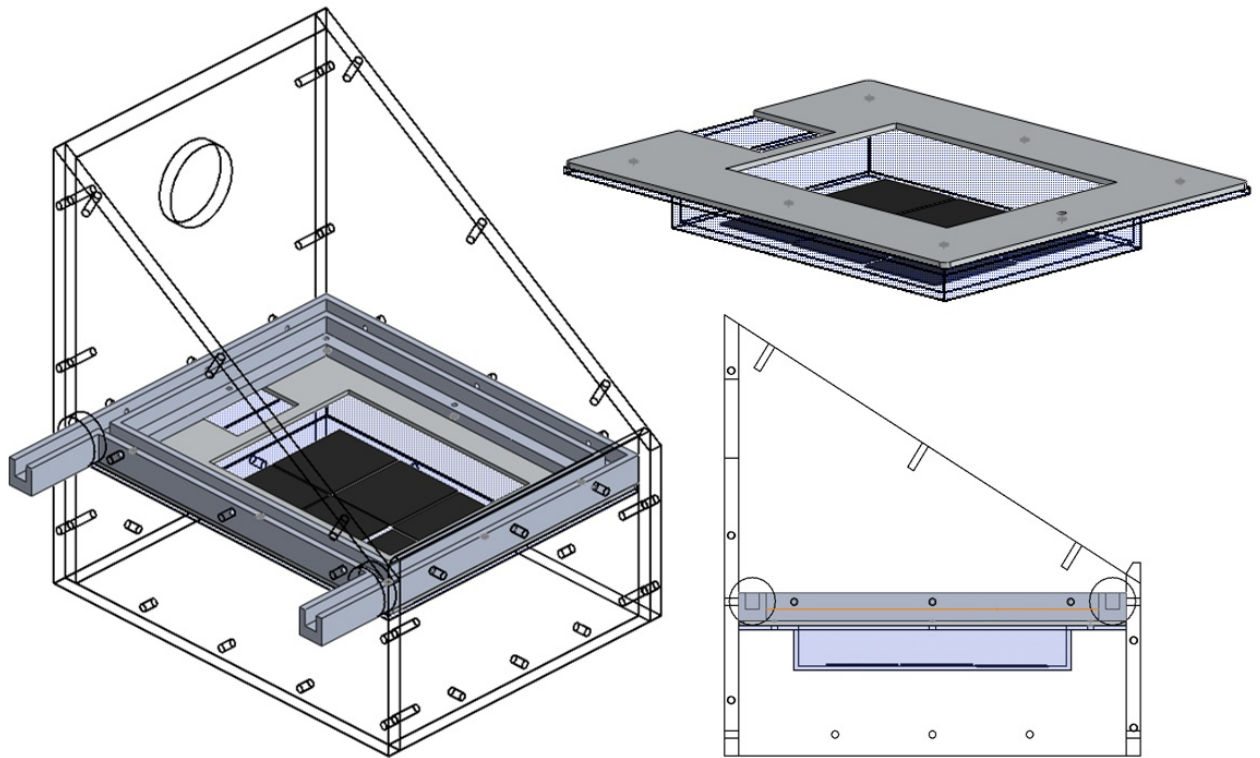


Figura 25. Diagrama 3D de la configuración experimental #3.

### 3.6. Instalación experimental e instrumentación

Para mantener un nivel de agua constante dentro del destilador, se implementó un sistema automático de control de nivel que utiliza una bomba de pecera, un sensor de nivel de agua y un sensor de temperatura, que se muestran en la Figura 26. El sensor de nivel detecta cuando el agua ha alcanzado un nivel mínimo dentro de la charola y activa la bomba hasta que el nivel vuelve a alcanzar un valor adecuado. Este sistema garantiza que el destilador funcione de manera óptima sin necesidad de intervención manual. Adicionalmente, el sistema cuenta con un sensor de temperatura para monitorear la temperatura del agua dentro del sistema. Las especificaciones de todos los sensores utilizados se presentan en la Tabla 5. En la Figura 27 se presenta una fotografía del destilador solar ensamblado, donde se observan las conexiones y los sensores incorporados.

En las pruebas experimentales se utilizó agua del grifo en los casos donde no se utilizaron las superficies texturizadas. En los casos donde si se utilizaron, se empleó agua de garrafón. Esto se hizo así por el momento para evitar el escenario en que las sales disueltas en el agua se depositen sobre las superficies texturizadas y afecten su rendimiento. En todos los casos, tanto para el agua de alimentación como para

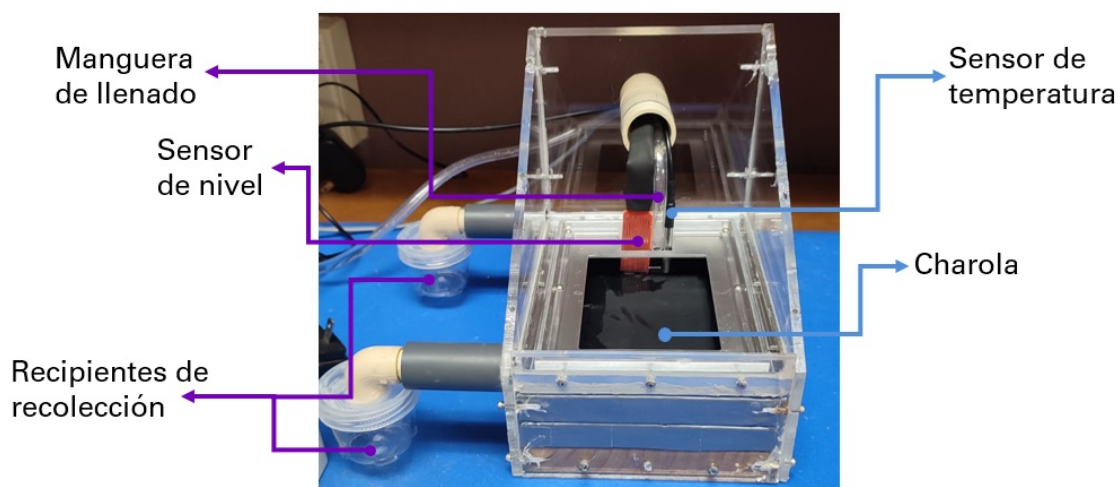
el destilado obtenido, se realizaron mediciones de la salinidad (sólidos totales disueltos, TDS), expresada en ppm (partes por millón), y de la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con el instrumento mostrado en la Figura 26 (d). El procedimiento que se siguió durante las pruebas con el destilador solar se muestra en la Figura 28.



**Figura 26.** (a) Sensor de temperatura impermeable DS18B20. (b) Mini bomba de agua sumergible. (c) Sensor de nivel de agua para Arduino. (d) Medidor de sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica.

**Tabla 5.** Especificaciones de los sensores.

Instrumento de medición	Especificaciones
Sensor de temperatura DS18B20	Rango de medición: $-55^{\circ}\text{C}$ a $125^{\circ}\text{C}$
	Precisión: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
Sensor de nivel de agua	Área de detección: $40 \times 16\text{mm}$
	Precisión: 1 mm
Medidor de sólidos totales disueltos	Rango de medición: 0 – 999 ppm a $0.1 - 80^{\circ}\text{C}$
	Precisión: $\pm 2\%$
Medidor de conductividad eléctrica	Rango de medición: 0 – 999 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a $0.1 - 80^{\circ}\text{C}$
	Precisión: $\pm 2\%$



**Figura 27.** Fotografía del destilador solar ensamblado sin superficies texturizadas.





**Figura 28.** Procedimiento seguido durante las pruebas con el destilador solar.

## Capítulo 4. Resultados y discusión

---

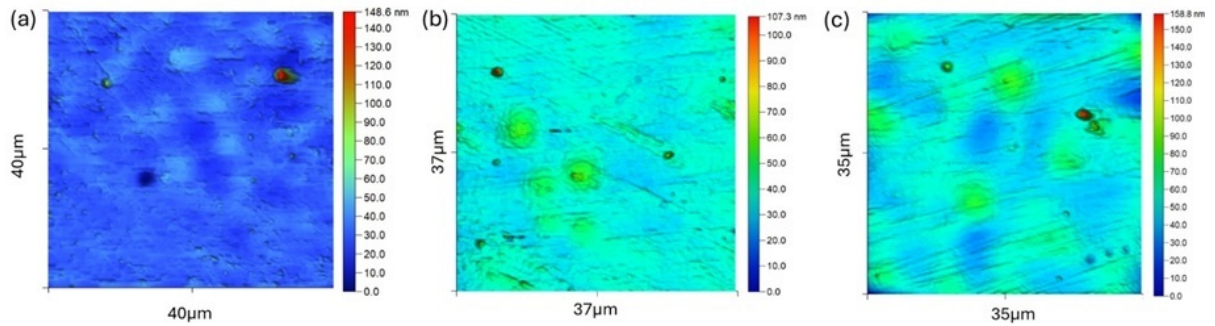
En este capítulo se presenta el espectro de reflectancia de la muestra previo a su texturizado y la caracterización de su topografía por medio de la técnica AFM. También se muestra el procedimiento establecido para realizar el texturizado de la muestra considerando distintos parámetros de irradiación, tales como velocidad de barrido, fluencia por pulso y estado de polarización del haz incidente. El análisis de la topografía, reflectancia y propiedades de mojabilidad de las superficies texturizadas es mostrado posteriormente. Además, se presentan los resultados de la eficiencia térmica del destilador al incorporar las superficies texturizadas en el destilador solar.

### 4.1. Caracterización de la muestra de aluminio (Al)

Previo al procesado láser de la lámina de aluminio, se determinó su rugosidad promedio, espectro de reflectancia y su mojabilidad.

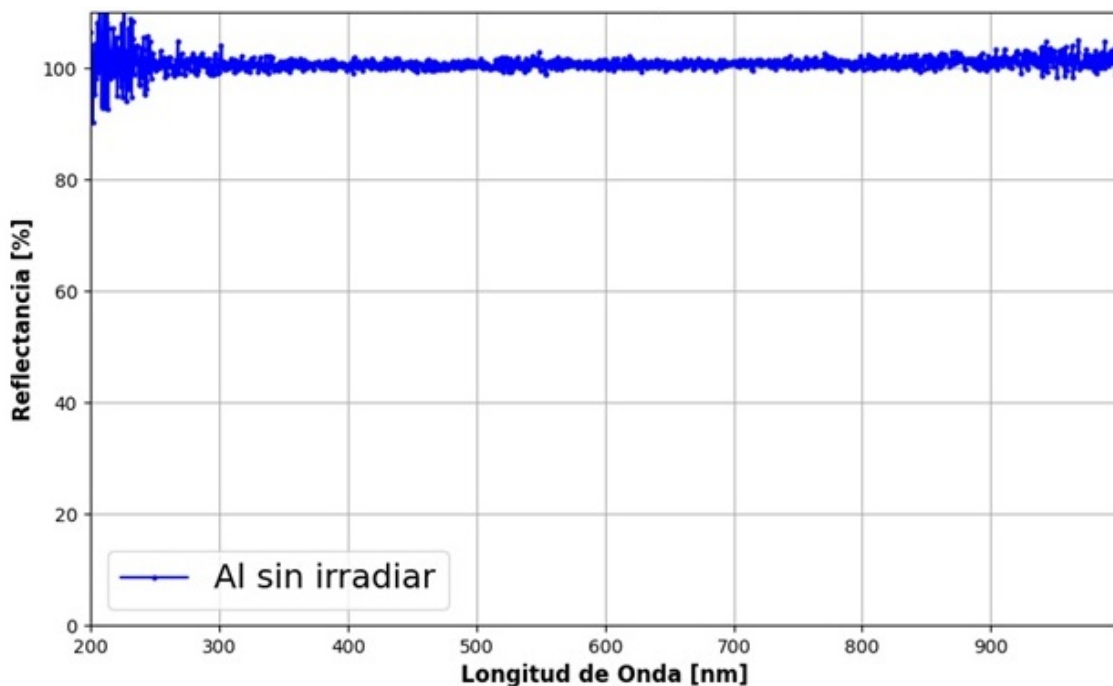
Existen varias formas de medir la rugosidad de una superficie, la  $\sigma_a$  (rugosidad media) y RMS (raíz cuadrada media) son las más utilizadas.  $\sigma_a$  ofrece una visión muy sencilla al medir la diferencia entre picos y valles a lo largo de la superficie y crear una línea recta, mientras que RMS crea una imagen más amplia al observar también el ancho de los picos y valles. La rugosidad superficial de la lámina de aluminio se determinó utilizando la técnica AFM realizando mediciones en distintas zonas de la lámina. La Figura 29 muestra los mapas topográficos obtenidos en cada región. La primera región (Figura 29 (a)) presentó un valor de  $\sigma_{RMS}$  de 6 nm y una  $\sigma_a$  de 28 nm. La segunda región (Figura 29 (b)) presentó un valor de  $\sigma_{RMS}$  de 4 nm y una  $\sigma_a$  de 36 nm. Mientras que la tercera región (Figura 29 (c)) presentó un valor de  $\sigma_{RMS}$  de 8 nm y una  $\sigma_a$  de 51 nm. El análisis de la rugosidad fue realizado mediante el software Gwyddion.

Como se ha reportado en la literatura, existe una fuerte relación entre la rugosidad cuadrática media de una superficie y su reflectancia (Bennett & Porteus, 1961), de tal manera que, cuando la rugosidad cuadrática media es pequeña en comparación con la longitud de onda y la superficie es perfectamente conductora se espera obtener mayormente una reflectancia especular de la unidad. Aunque este en el caso ideal, la reflexión en superficies reales siempre está mezclada con una cierta cantidad de dispersión, para superficies altamente especulares, como la lámina de aluminio utilizada en esta tesis, esta dispersión debe estar cerca de la dirección especular. Teniendo esto en consideración, la medición del espectro de reflectancia de la lámina de aluminio se realizó en modo especular.



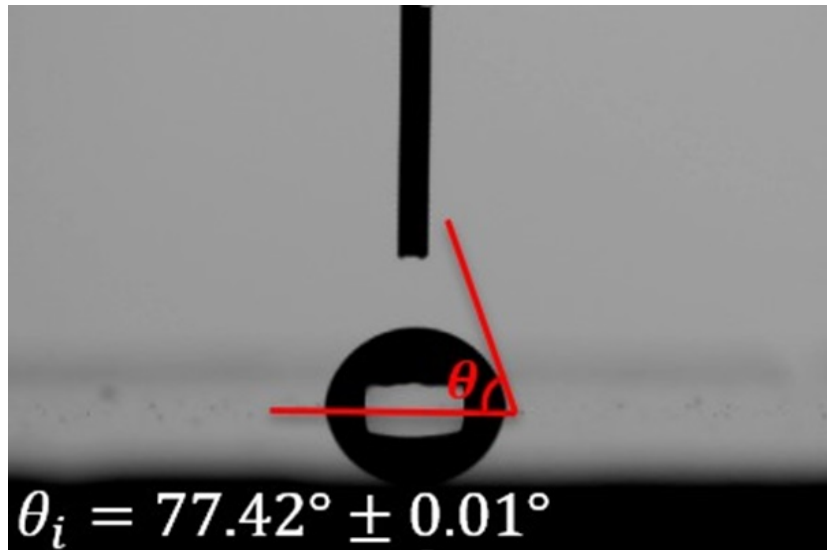
**Figura 29.** Mapas topográficos de la muestra obtenido mediante AFM en un área de (a)  $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ , (b)  $37 \mu\text{m} \times 37 \mu\text{m}$  y (c)  $35 \mu\text{m} \times 35 \mu\text{m}$ . La imagen muestra variaciones de altura en la superficie, donde los colores representan diferentes valores de elevación.

La Figura 30 muestra el espectro de reflectancia medido en un rango de longitudes de onda de 200 nm - 1000 nm. Los resultados indican una reflectancia del 100 % en todo el rango evaluado. Es importante mencionar que para realizar esta medición el espectro de referencia es tomado de la misma lámina, por eso se obtiene un valor de 100 %. Esto se debe a que no se encontró otro material que mostrara mayor reflectividad. Sin embargo, era de esperarse un alto porcentaje de reflexión de la luz, ya que, este comportamiento es típico de las superficies de aluminio con acabado espejo, las cuales reflejan eficientemente la radiación en la región UV-visible del espectro electromagnético. Este valor de reflectancia inicial se estableció como referencia para estudiar los cambios inducidos por el texturizado láser.



**Figura 30.** Espectro de reflectancia especular de la muestra de aluminio sin irradiar medido a incidencia normal.

Finalmente se evaluó la mojabilidad de la lámina de aluminio utilizando la técnica de medición del ángulo de contacto. La Figura 31 muestra la imagen correspondiente al experimento, donde se midió un ángulo de contacto de  $\theta = 77.42^\circ \pm 0.01^\circ$ . Este valor sugiere que la superficie posee características de moderada hidrofobicidad, indicando una mojabilidad intermedia. En este caso, el agua no se extiende completamente sobre la superficie, pero tampoco es completamente repelida.

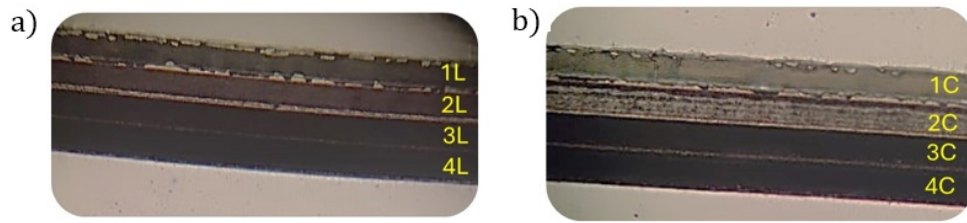


**Figura 31.** Imagen de una gota de agua sobre la superficie de la lámina de aluminio sin texturizar. El ángulo de contacto medido está indicado en rojo.

## 4.2. Texturizado de aluminio con pulsos láser y análisis de reflectancia y mojabilidad.

### 4.2.1. Determinación de la fluencia umbral de oscurecimiento del Al.

Para generar el oscurecimiento del Al por irradiación láser, se realizaron barridos lineales variando la fluencia por pulso del láser y la velocidad de barrido. Además, se consideraron dos estados de polarización para el haz incidente: lineal y circular. El efecto de oscurecimiento comenzó a observarse, para 10 barridos lineales separados por una distancia de  $10 \mu\text{m}$  con fluencias por pulso de  $0.63 \text{ J/cm}^2$  a una velocidad de barrido de  $10 \text{ mm/s}$ . La Figura 32 muestra las micrografías ópticas de las zonas irradiadas con polarización lineal (a) y circular (b). Las fluencias por pulso que se consideraron son  $0.63 \text{ J/cm}^2$ ,  $0.94 \text{ J/cm}^2$ ,  $1.26 \text{ J/cm}^2$ ,  $1.57 \text{ J/cm}^2$ , referenciados en las micrografías ópticas con los números 1,2,3 y 4 respectivamente.



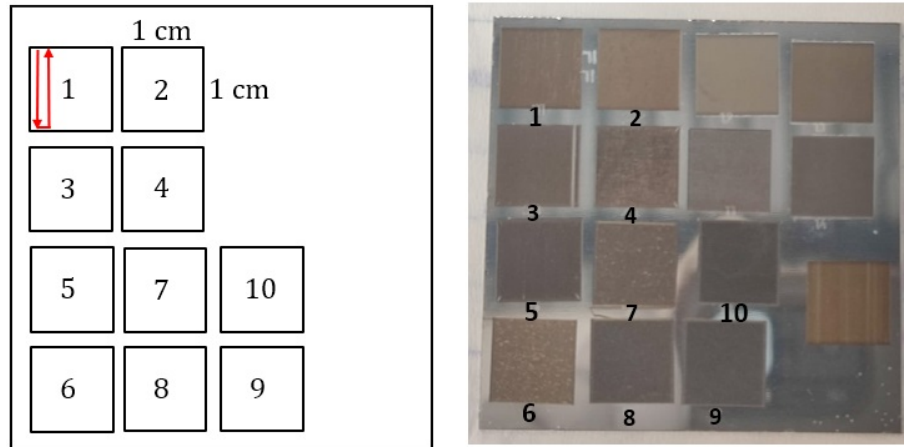
**Figura 32.** Micrografías ópticas de los barridos realizados con polarización lineal (a) y circular (b).

En todos los casos estudiados, se observa remoción de material, la cual aumenta progresivamente generando bordes más definidos a medida que incrementa la fluencia por pulso. En las irradiaciones realizadas con polarización lineal, se observa que el color de la región irradiada evoluciona de tonalidades grisáceas verdosas a rojizas, y finalmente a negruzcas. Al cambiar el estado de polarización a circular, las superficies de los casos 1C y 2C exhiben un menor grado de oscurecimiento en comparación con las irradiadas con polarización lineal. No obstante, al aumentar la fluencia por pulso (en los casos 3C y 4C), se logró oscurecer la superficie. Estas diferencias observadas entre los dos estados de polarización sugieren que el estado de polarización tiene una influencia significativa en la morfología de la superficie.

#### 4.2.2. Fabricación de áreas texturizadas extendidas.

Se fabricaron 10 superficies texturizadas de un área de  $1 \text{ cm}^2$ . La Figura 33 muestra, a la izquierda, un diagrama esquemático de dichas irradiaciones. Cada cuadrante corresponde a una irradiación específica realizada con los parámetros descritos en la Tabla 6. La numeración de los cuadrantes indica las etiquetas asignadas a cada irradiación. A la derecha de la figura se presenta una fotografía de la lámina de aluminio con las 10 irradiaciones mencionadas.

Debido a que en los resultados previos se observó el oscurecimiento del Aluminio para fluencias por pulso de  $1.26 \text{ J/cm}^2$ , para estos experimentos se decidió explorar valores de fluencia mayores, de hasta  $2.83 \text{ J/cm}^2$ . En la superficie del aluminio, se observan diversas tonalidades según la fluencia por pulso y el estado de polarización. Se distinguen colores rosados, amarillos y grisáceos. Las áreas con mayor oscurecimiento visual coinciden con los cuadrantes 8, 9 y 10, donde las superficies fueron texturizadas usando polarización circular. Es interesante notar que entre los cuadrantes 5 y 10, a pesar de haber utilizado los mismos parámetros de velocidad de barrido, fluencia y separación entre barridos, se observa un mayor oscurecimiento de la superficie en el cuadrante 10, que es correspondiente con el uso de polarización circular.



**Figura 33.** (a) Esquema y (b) fotografía de las áreas irradiadas (etiquetas de la 1 a la 10) en la lámina de aluminio.

Este comportamiento revela la importancia del estado de polarización en el procesamiento de materiales con láser.

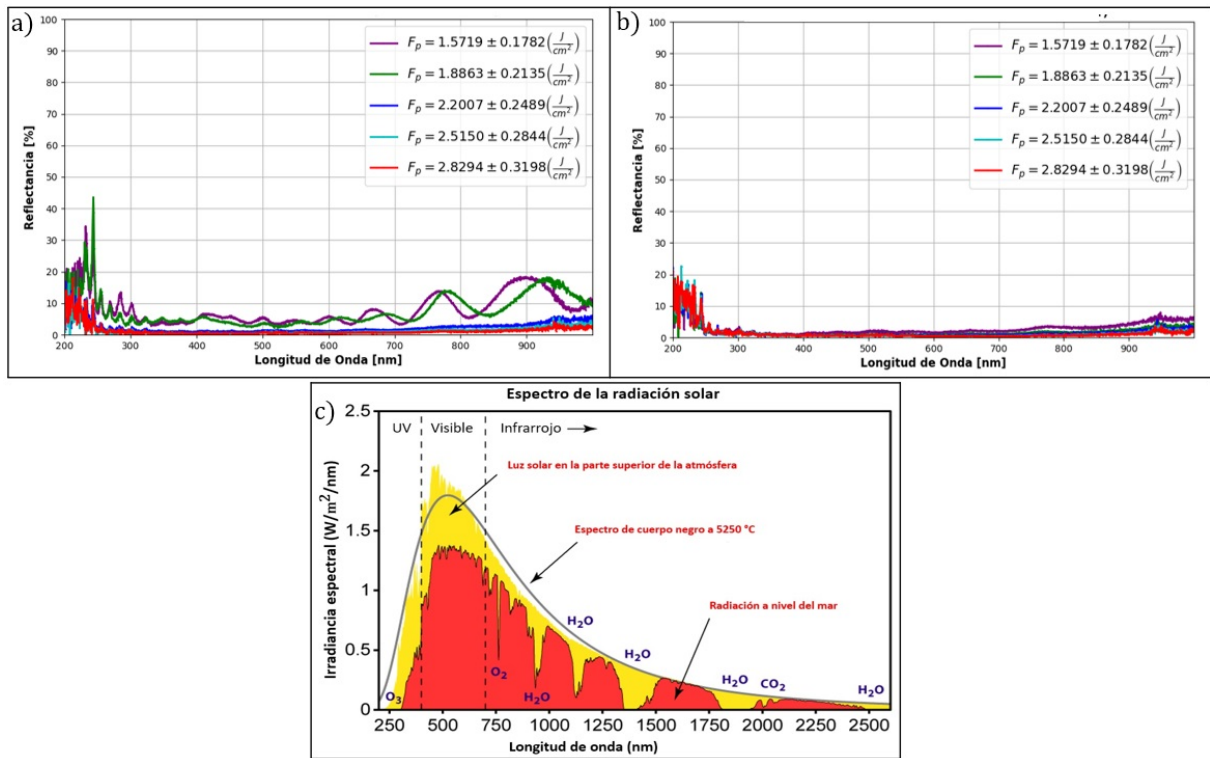
**Tabla 6.** Parámetros utilizados en las irradiaciones realizadas con las etiquetas de 1 a 10.

#	Estado de polarización	$v$ [mm/s]	$\Delta d$ [ $\mu\text{m}$ ]	$P_{prom}$ [mW]	$F_p$ [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]
1	Polarización lineal	$10 \pm 0.5$	$10 \pm 0.005$	$500 \pm 5$	$1.57 \pm 0.18$
2		$10 \pm 0.5$	$10 \pm 0.005$	$600 \pm 5$	$1.89 \pm 0.21$
3		$10 \pm 0.5$	$10 \pm 0.005$	$700 \pm 5$	$2.20 \pm 0.25$
4		$10 \pm 0.5$	$10 \pm 0.005$	$800 \pm 5$	$2.52 \pm 0.28$
5		$10 \pm 0.5$	$10 \pm 0.005$	$900 \pm 5$	$2.83 \pm 0.32$
6	Polarización circular	$10 \pm 0.5$	$10 \pm 0.005$	$500 \pm 5$	$1.57 \pm 0.18$
7		$10 \pm 0.5$	$10 \pm 0.005$	$600 \pm 5$	$1.89 \pm 0.21$
8		$10 \pm 0.5$	$10 \pm 0.005$	$700 \pm 5$	$2.20 \pm 0.25$
9		$10 \pm 0.5$	$10 \pm 0.005$	$800 \pm 5$	$2.52 \pm 0.28$
10		$10 \pm 0.5$	$10 \pm 0.005$	$900 \pm 5$	$2.83 \pm 0.32$

Para la medición de los espectros de reflectancia de las 10 regiones texturizadas, dado que el equipo no tenía instalada la esfera integradora y por lo tanto no podían realizarse mediciones en modo de reflexión difusa, se realizaron mediciones en modo especular. Estas mediciones se utilizaron para tener una idea aproximada del efecto de los parámetros de irradiación en la respuesta óptica de las superficies. Las mediciones se realizaron con luz a incidencia normal. Los espectros de reflectancia obtenidos se presentan en la Figura 34 (a) y 34 (b).

La Figura 34 muestra los espectros de reflectancia de las superficies de aluminio texturizadas con polarización lineal (recuadro a)) y circular (recuadro b)). En ambos casos, se observa una correlación entre la reflectancia y fluencia por pulso utilizada durante el procesado del Al con láser. A medida que  $F_p$  aumenta, la curva espectral de reflectancia disminuye en porcentaje, señalando que la capacidad de la muestra

para reflejar la luz se reduce debido a la modificación de la superficie. Al comparar ambos gráficos, se puede notar que las superficies procesadas con polarización circular presentan un menor porcentaje de reflexión especular en el rango de 300 nm a 900 nm.

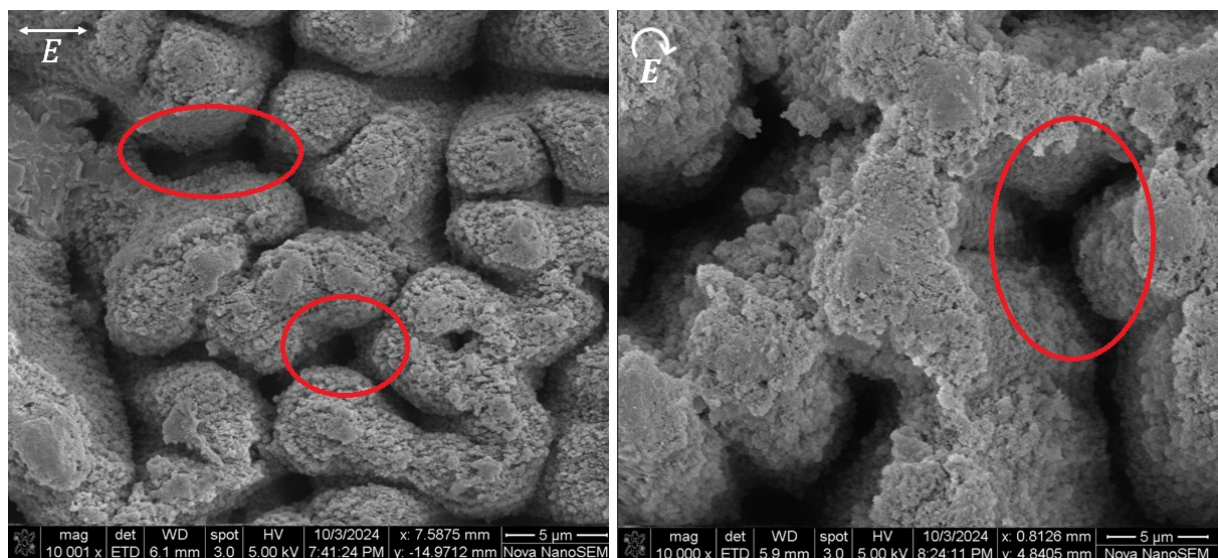


**Figura 34.** (a) Espectro de reflectancia para las irradiaciones realizadas con polarización lineal. (b) Espectro de reflectancia para las irradiaciones realizadas con polarización circular. (c) Espectro de la radiación solar.

El espectro del recuadro (c) corresponde al espectro de radiación solar incidente, la atmósfera y a nivel del mar, que abarca desde el ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo (IR). Cabe resaltar que la mayor parte de la radiación solar se concentra en las regiones infrarroja y visible. Esta información es relevante para analizar la eficiencia de absorción de energía de las muestras irradiadas, ya que se busca que las superficies texturizadas absorban la mayor cantidad posible de radiación solar, especialmente en el rango visible e infrarrojo, donde se concentra la mayor parte de la energía solar. Comparando este espectro con los espectros de reflectancia obtenidos, se observa que las superficies texturizadas con polarización circular podrían tener un gran potencial para ser utilizadas como absorbedores solares. Para verificar su aplicabilidad, se requiere hacer un análisis del espectro de reflectancia en modo de reflexión difusa.

Para analizar el efecto de los parámetros de irradiación, particularmente la polarización, en la morfología de las superficies y en su respuesta óptica, las superficies 5 y 10 se examinaron con la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM). Las micrografías se presentan en la Figura 35.

Las micrografías SEM muestran las estructuras a microescala generadas en ambas superficies tratadas. Se observa que la morfología de las superficies está conformada por microestructuras que generan cavidades de diversos diámetros. Se observan cavidades, conos, surcos, ranuras y estructuras en forma de “pilares” con una textura rugosa, tanto para la polarización lineal como para la polarización circular. En la superficie texturizada con polarización lineal, las cavidades tienen diámetros entre 1 y 2  $\mu\text{m}$ , y se detecta la formación de micro-conos con diámetros de aproximadamente 4.5  $\mu\text{m}$ . En contraste, en la superficie procesada con polarización circular, se identifican cavidades amorfas con dimensiones de entre 5 y 10  $\mu\text{m}$ . En ambos casos, las estructuras presentan una organización jerárquica, dado que la superficie exhibe un texturizado compuesto por partículas y porosidades en la escala nanométrica. La formación de cavidades amplias favorece un atrapamiento más eficiente de la luz, incentivando múltiples reflexiones y absorciones dentro de las grietas, lo cual evidencia el efecto de múltiples absorciones descrito en la sección 2.3.



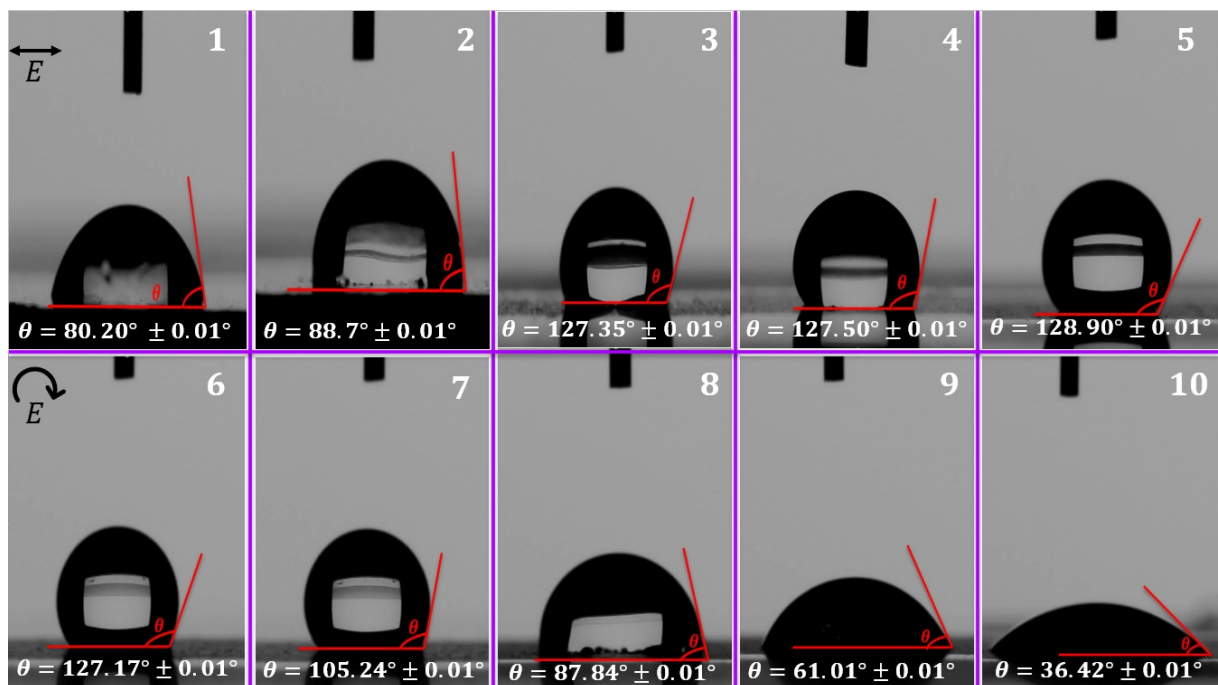
**Figura 35.** Micrografías SEM de las estructuras generadas con (a) Polarización lineal (etiqueta 5) y (b) Polarización circular (etiqueta 10).

Esta diferencia en las características morfológicas puede explicar el mayor oscurecimiento observado en las superficies irradiadas con polarización circular. Este comportamiento se relaciona con los resultados de reflectancia y absorción presentados anteriormente, indicando un incremento en la capacidad de absorción del material tratado. Se llevó a cabo un estudio de la mojabilidad de la superficie utilizando la técnica de ángulo de contacto. En la Figura 36 se muestran los resultados obtenidos para las mediciones del ángulo de contacto, realizadas con agua desionizada como líquido de prueba. Las mediciones fueron obtenidas mediante el software de análisis propio del goniómetro de ángulo de contacto. Se presentan en



total los resultados de las 10 superficies irradiadas, cada una etiquetada en la imagen correspondiente y con su valor de ángulo de contacto mostrado en la parte inferior.

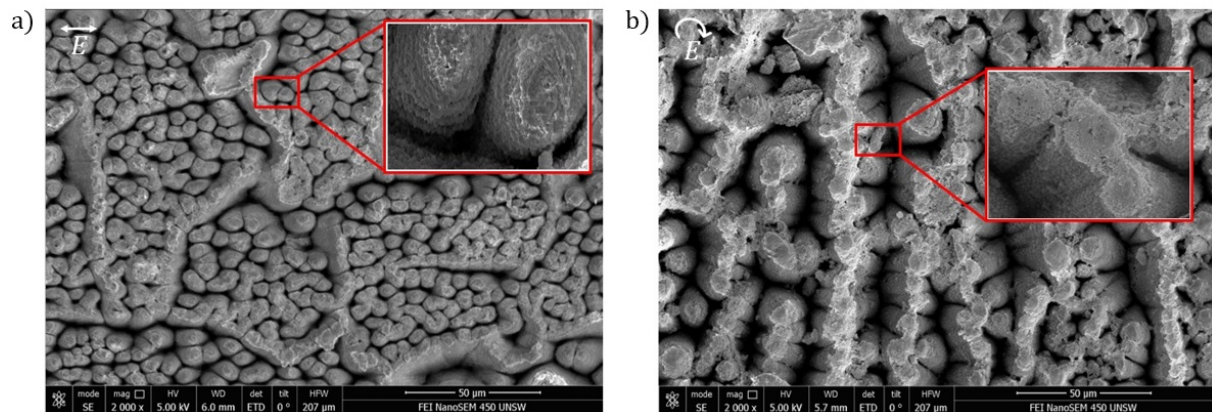
Los resultados de la Figura 36 evidencian una clara dependencia de la mojabilidad de la superficie con respecto a la polarización del haz láser, para las superficies irradiadas con polarización lineal (etiquetas 1 a 5), se observan ángulos de contacto entre  $80.20^\circ$  y  $128.90^\circ$ , lo que indica un comportamiento hidrofóbico. Se observa que a medida que aumenta la fluencia por pulso ( $F_p$ ), la superficie tiende a ser más hidrofóbica, ya que los ángulos de contacto aumentan en irradiaciones con mayor fluencia. Este comportamiento implica que el tratamiento con mayor energía modifica la estructura de la superficie, incrementando la capacidad de repeler el agua. Por otra parte, las superficies irradiadas con polarización circular (etiquetas 6 a 10) muestran ángulos de contacto que varían entre  $127.17^\circ$  y  $36.42^\circ$ . Se evidencia una disminución significativa en los ángulos de contacto a medida que aumenta la fluencia por pulso, lo que sugiere una modificación progresiva hacia un comportamiento más hidrofílico.



**Figura 36.** Mediciones del ángulo de contacto realizadas en las irradiaciones con las etiquetas de 1 a 10.

En general, las superficies tratadas con mayor fluencia tienden a reducir su capacidad de repeler el agua y favorecen la extensión del líquido sobre la superficie particularmente en este caso para las irradiaciones con polarización circular. La Figura 37 muestra las micrografías SEM, a una escala mayor, de las superficies 5 y 10 que contrastan en sus propiedades de mojabilidad. Siendo las superficies que presentan la mayor hidrofobicidad (etiqueta 5) y la mayor hidrofiliidad (etiqueta 10).

Las micrografías SEM presentadas en la Figura 37 permiten analizar la correlación entre la morfología y las propiedades de mojabilidad de las superficies irradiadas. En la imagen, correspondiente a la superficie con la etiqueta 5, se observan estructuras en forma de conos bien definidos. Entre estos conos se generaron ranuras estrechas, lo cual es un aspecto clave para entender el comportamiento hidrofóbico de la superficie. De acuerdo con el modelo de Cassie-Baxter (Drelich et al. (2011); Chen et al. (2022a)), las ranuras estrechas favorecen el atrapamiento de aire, generando burbujas dentro de estas ranuras. Este fenómeno reduce el área de contacto entre el líquido y la superficie sólida, haciendo que el líquido se asiente sobre una superficie compuesta de sólido y aire. Este tipo de superficie compuesta reduce la interacción directa entre la superficie y el líquido, inhibiendo la penetración del líquido en las ranuras y aumentando así el ángulo de contacto. Como resultado, se incrementa la hidrofobicidad de la superficie.



**Figura 37.** Micrografías SEM de las estructuras generadas con: (a) Polarización lineal (etiqueta 5) y (b) Polarización circular (etiqueta 10), utilizadas para el análisis de la mojabilidad de la superficie.

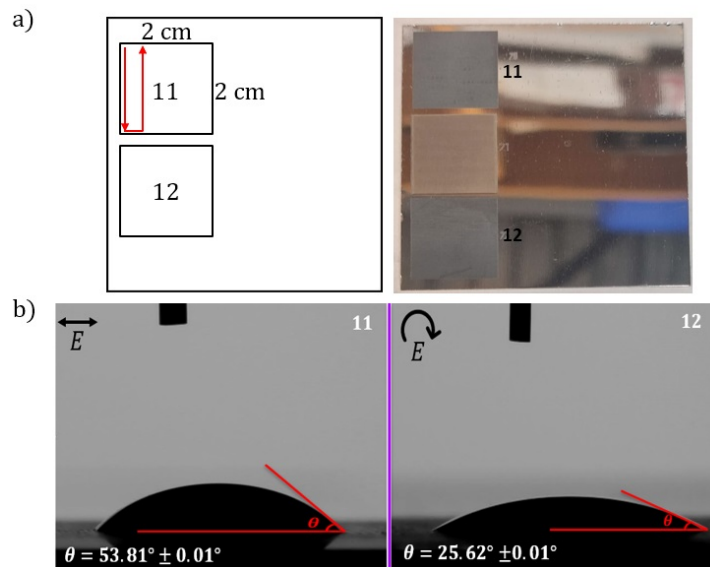
En el caso específico de la etiqueta 5, las estructuras descritas presentan un ángulo de contacto de  $128.90^\circ$ , lo cual indica claramente que se trata de una superficie hidrofóbica. Este resultado es coherente con lo reportado en la literatura, ya que las micrografías SEM muestran similitudes con las estructuras observadas por Bhushan et al. (2011) y Bhushan & Jung (2011) para superficies hidrofóbicas, como las hojas de loto (*Nelumbo nucifera*). Estas hojas son conocidas por su capacidad para repeler el agua.

Por otro lado, la imagen (b) de la Figura 37 corresponden a la superficie con la etiqueta 10, donde se generaron estructuras tipo “barrancos” con separaciones más amplias entre ellas. En este caso, no se presentan burbujas de aire, y el fluido puede penetrar en las estructuras. De acuerdo con el modelo de Wenzel (Drelich et al. (2011)), la superficie en contacto es completamente mojada por el líquido, ya que estas irregularidades o estructuras son lo suficientemente amplias para que el líquido llene los espacios entre ellas. Es importante destacar que los resultados descritos corresponden a las irradiaciones

realizadas con los parámetros presentados en la Tabla 6.

#### 4.2.3. Optimización de los parámetros de irradiación para incrementar la hidrofiliidad.

Considerando los análisis previos, se procedió a fabricar dos superficies con los parámetros de irradiación presentados en la Tabla 7. Esto con el fin de investigar la posibilidad de mejorar las propiedades de mojabilidad de las superficies texturizadas sin afectar la respuesta óptica. La Figura 38 (a) muestra el diagrama esquemático de dichas irradiaciones, a la derecha, una fotografía de la lámina de aluminio con las superficies procesadas y en (b) se muestran los resultados de las mediciones de ángulo de contacto.



**Figura 38.** a) Esquema y fotografía de las áreas irradiadas (etiquetas 11 y 12) en la lámina de aluminio. b) Mediciones del ángulo de contacto realizadas en las irradiaciones con las etiquetas 11 y 12.

La Figura 38 (a) muestra que las superficies irradiadas siguen presentando una tonalidad oscura para ambos estados de polarización. Este oscurecimiento evidencia la modificación superficial del material con la irradiación láser, tal como se observó en irradiaciones previas en áreas más pequeñas. Por otro lado, la Figura 38 (b) presenta los resultados de las mediciones del ángulo de contacto en donde se observaron ángulos de  $53.81^\circ$  para polarización lineal y  $25.62^\circ$  para polarización circular, lo cual indica un comportamiento hidrofílico para ambas superficies irradiadas, aunque con un grado de mojabilidad más acentuado en la superficie irradiada con polarización circular.

Cabe destacar que, en esta configuración (Tabla 7), la superficie irradiada con polarización lineal ahora

presenta un comportamiento hidrofílico, lo cual contrasta con los resultados obtenidos con los parámetros en las irradiaciones previas. Esto sugiere que la modificación de parámetros como la velocidad de barrido y separación entre barridos tienen un impacto significativo en la morfología superficial y, por lo tanto, en las propiedades de mojabilidad del aluminio texturizado.

**Tabla 7.** Parámetros utilizados en las irradiaciones realizadas con las etiquetas de 11 y 12.

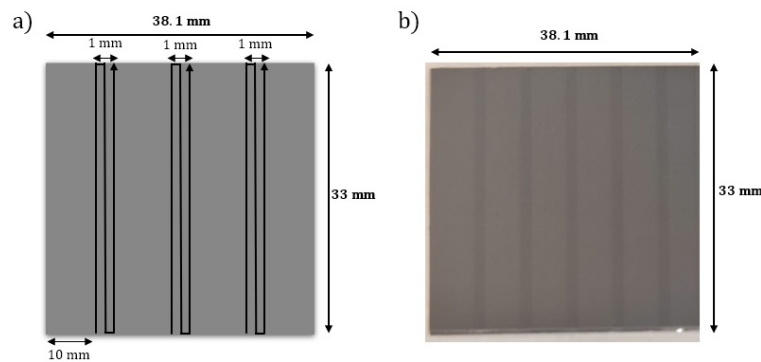
#	Estado de polarización	$v$ [mm/s]	$\Delta d$ [ $\mu\text{m}$ ]	$P_{prom}$ [mW]	$F_p$ [ $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ]
11	Polarización lineal	$2 \pm 0.5$	$100 \pm 0.005$	$900 \pm 5$	$2.8294 \pm 0.3198$
12	Polarización circular	$2 \pm 0.5$	$100 \pm 0.005$	$900 \pm 5$	$2.8294 \pm 0.3198$

Los resultados obtenidos en esta sección nos indican que es posible mejorar las propiedades de hidrofiliidad de las superficies variando los parámetros de irradiación, tales como distancia entre barridos y la velocidad de barrido. Pevio al análisis de la reflectividad de las superficies, se optó por realizar un experimento más. Este consiste en texturizar una superficie con los parámetros presentados en la Tabla 8 y después efectuar una segunda irradiación en regiones específicas, esto con el fin de generar canales dentro de la superficie texturizada. Este procedimiento está descrito en la sección 3.3 y está ilustrado en la Figura 15.

Los resultados de este experimento se presentan en la Figura 39 donde (a) hace referencia al esquema de irradiación seguido para este experimento, en una superficie total de 38.1 mm de ancho y 33 mm de alto, y (b) muestra una fotografía del resultado de estas irradiaciones.

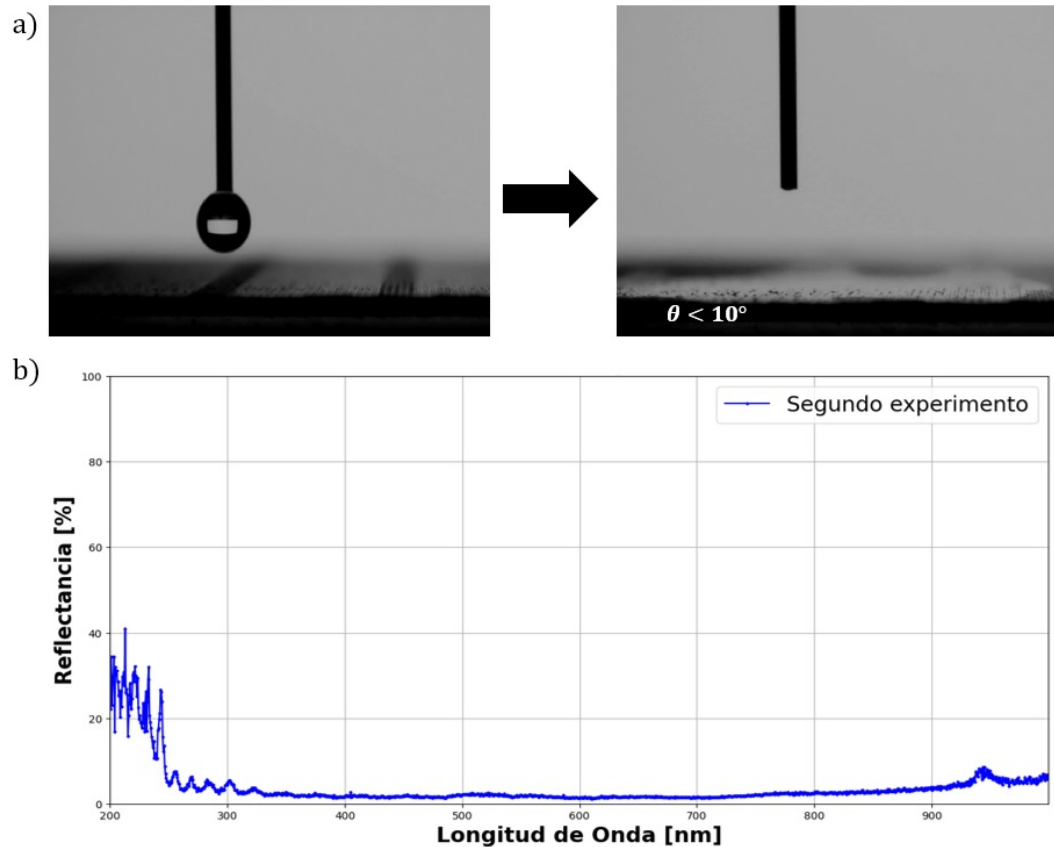
**Tabla 8.** Parámetros utilizados en las irradiaciones realizadas para la etiqueta 13.

#	Estado de polarización	$v$ [mm/s]	$\Delta d$ [ $\mu\text{m}$ ]	$P_{prom}$ [mW]	$F_p$ [ $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ]
13	Polarización circular	$2 \pm 0.5$	$100 \pm 0.005$	$900 \pm 5$	$2.8294 \pm 0.3198$



**Figura 39.** (a) Esquema del área extendida irradiada correspondiente a la etiqueta 13 en la lámina de aluminio. (b) Micrografía de la superficie texturizada.

En la micrografía se puede observar un oscurecimiento más pronunciado en las secciones donde se realizó la segunda irradiación. En esta muestra se realizaron mediciones del ángulo de contacto y de reflectancia de la superficie. Los resultados se presentan en la Figura 40.

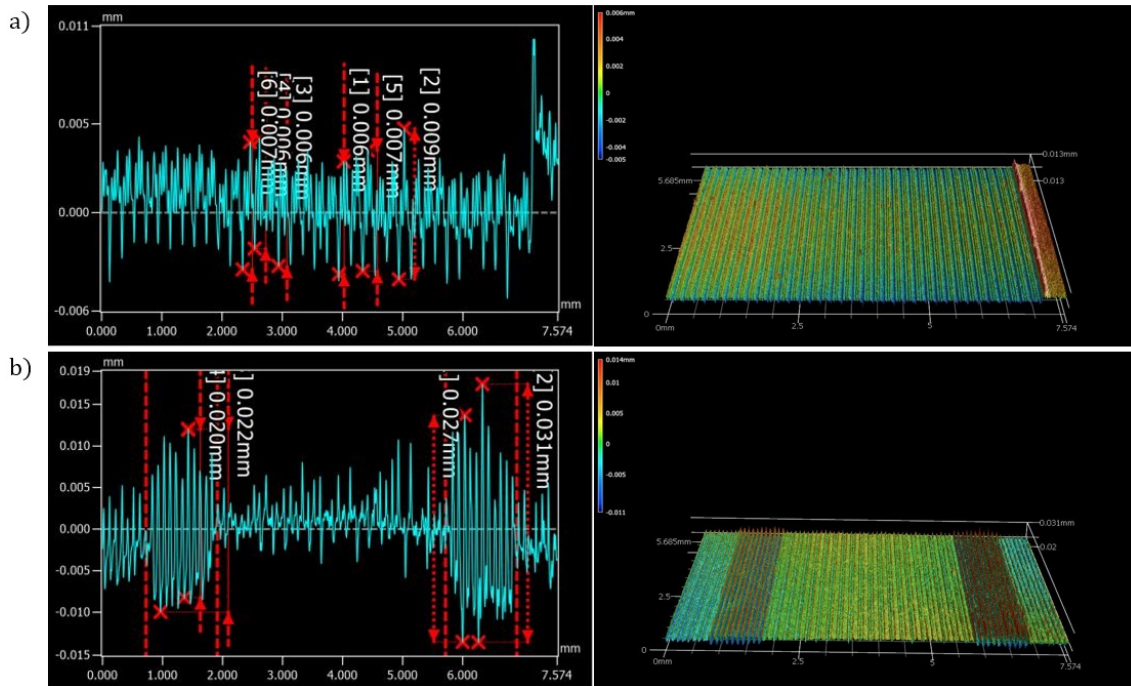


**Figura 40.** (a) Mediciones del ángulo de contacto para el área extendida total tras un segundo paso de irradiación. (b) Espectro de reflectancia de la muestra correspondiente al área extendida total con un segundo paso de irradiación.

En la Figura 40 (a), se presentan las mediciones del ángulo de contacto realizadas en la superficie texturizada. En la imagen se puede observar el comportamiento del agua sobre una de las zonas re-irradiadas. El ángulo de contacto es menor a  $10^\circ$ . Cabe resaltar que el ángulo de contacto mínimo detectable por el equipo es de  $10^\circ$ , lo cual indica que la superficie ha adquirido propiedades de súper hidrofiliicidad. Este comportamiento de mojabilidad evidencia que el proceso de re-irradiación ha generado una modificación significativa en la estructura superficial del aluminio, promoviendo una mayor afinidad con el agua y logrando que esta se distribuya de manera uniforme sobre la superficie, mojándola por completo.

En la Figura 40 (b), se presenta el espectro de reflectancia de la superficie. Este espectro de reflectancia se midió en modo de reflexión especular. Se observa que la reflectancia presenta valores por debajo del

5 % en el rango de longitudes de onda entre 200 nm y 900 nm. Estos resultados indican una reducción de aproximadamente 95 % de la reflectancia especular del aluminio sin irradiar. Adicionalmente, se realizó la medición de la topografía de la superficie mediante perfilómetro óptico, tanto antes como después del segundo paso de re-irradiación. Los resultados de estas mediciones se muestran en la Figura 41.

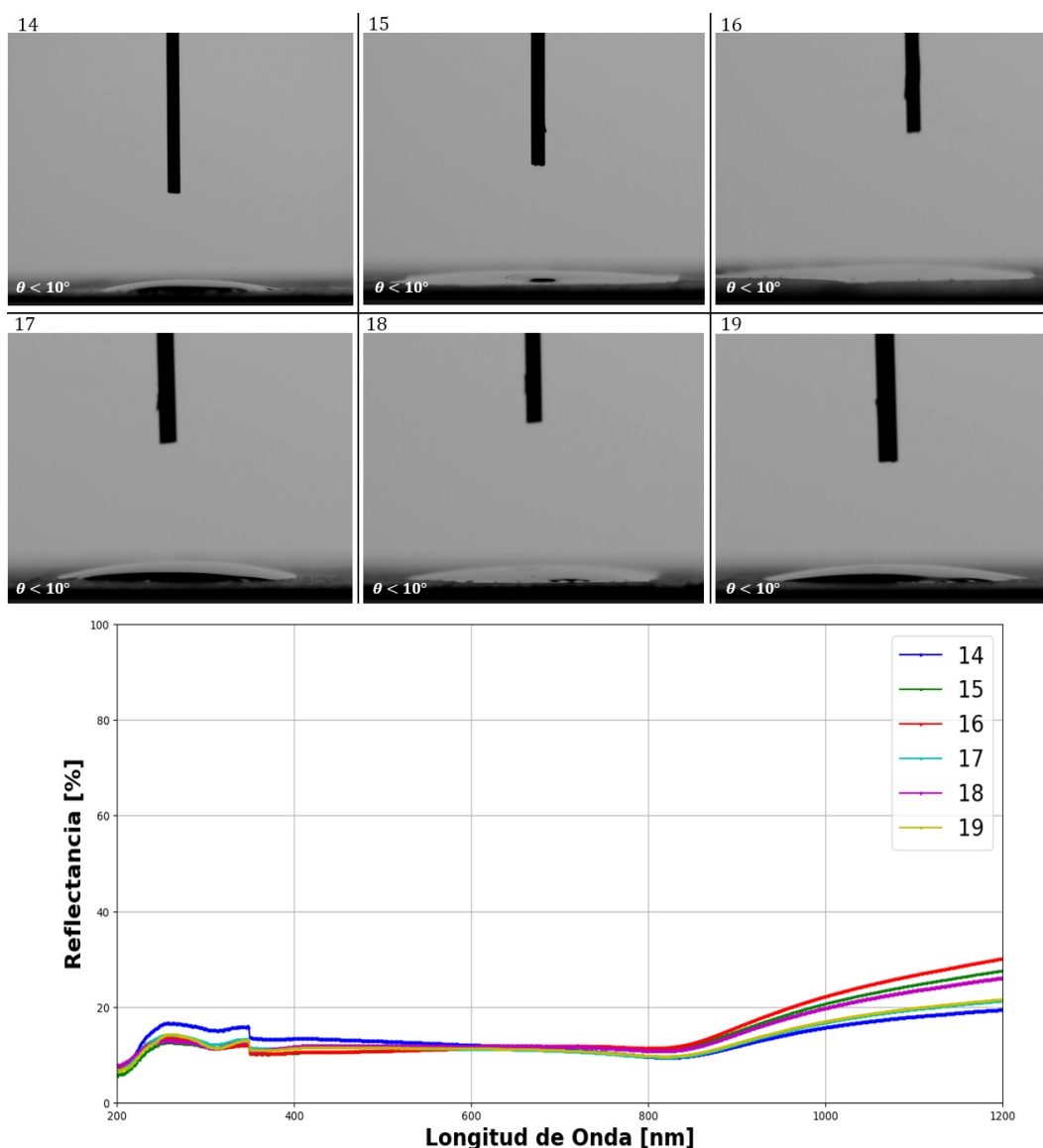


**Figura 41.** (a) Topografía de la superficie medida mediante perfilómetro óptico antes de la segunda irradiación. (b) Topografía de la superficie medida mediante perfilómetro óptico después de la segunda irradiación.

Los resultados de la topografía de la superficie muestran que después de realizar la segunda irradiación sobre la superficie ya tratada, se generaron una serie de “micro canales” de mayor profundidad. Esto se debe a la remoción adicional de material durante la segunda irradiación. Estos micro canales favorecen un mayor atrapamiento de la luz, lo cual explica la tonalidad más oscura observada en las secciones donde se realizó la segunda irradiación. Además, al analizar la mojabilidad de la superficie, se evidencia que estos canales promueven la distribución del líquido a lo largo de la superficie, facilitando su escurrimiento a través de los micro canales. La disminución de la reflectancia y el aumento en la hidrofiliidad de la superficie evidencian que la irradiación ha modificado las propiedades ópticas y de mojabilidad del aluminio. Los resultados de este segundo experimento indican que estas condiciones son las más adecuadas para las láminas destinadas al destilador solar.

Las muestras finales de aluminio texturizado, destinadas al destilador solar, se obtuvieron utilizando los parámetros descritos en la Tabla 8. Seguido del proceso de re-irradiación (Figura 39) se fabricaron seis

láminas de aluminio texturizadas, identificadas con las etiquetas 14, 15, 16, 17, 18 y 19, cada una con dimensiones de 38.1 mm de ancho y 33 mm de alto. La caracterización del ángulo de contacto y la reflectancia de las superficies irradiadas se presenta en la Figura 42. En la parte superior de la imagen se muestran las fotografías de las mediciones del ángulo de contacto para cada una de las seis láminas. Se puede observar que todas las muestras presentan un ángulo de contacto menor a  $10^\circ$ , lo cual indica que se mantiene un alto nivel de hidrofiliicidad en todas ellas. Aunque no todas las superficies presentan exactamente el mismo ángulo.



**Figura 42.** Mediciones del ángulo de contacto y espectro de reflectancia para las muestras finales.

En la parte inferior de la Figura 42, se muestra el espectro de reflectancia de las seis muestras de aluminio en función de la longitud de onda, en un rango de 200 a 1200 nm. Cabe mencionar que para

estas mediciones se utilizó un espectrofotómetro acoplado a una esfera integradora, lo cual permite medir la reflectancia en modo de reflexión difusa, que es lo que se espera que ocurra en superficies opacas. Se observa que la reflectancia se mantiene por debajo del 18 % en la región del espectro entre 200 nm y 900 nm, lo cual indica una alta absorción de luz en esa región. También se observa un ligero incremento en la reflectancia hacia el rango cercano a 1200 nm. Aunque los espectros de las seis muestras no son exactamente iguales, las diferencias no son significativas, lo cual indica que el proceso de texturizado láser es reproducible.

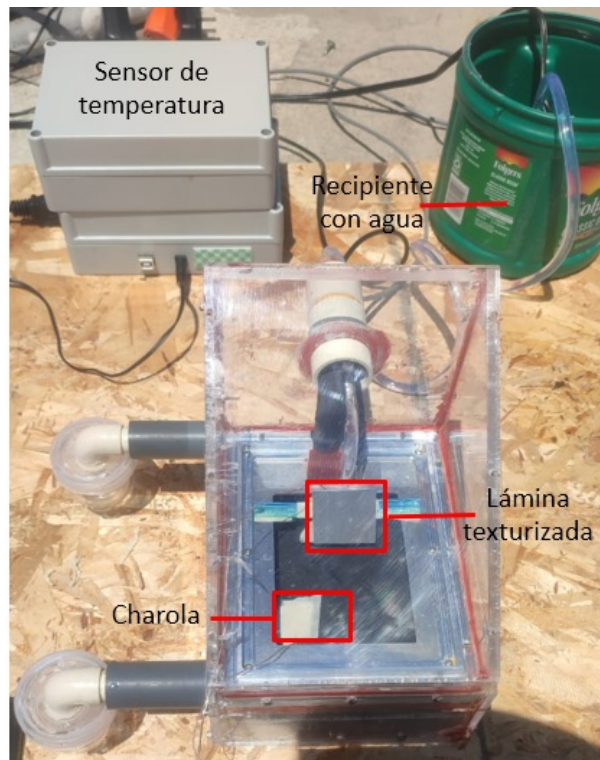
Estos resultados muestran que las láminas de aluminio re-irradiadas presentan una disminución del 82 % con respecto a la lámina sin irradiar, y propiedades de superhidrofilicidad, lo cual las hace adecuadas para su utilización en el destilador solar, cumpliendo con los objetivos de favorecer la absorción de radiación solar y mejorar la distribución del agua sobre las superficies.

#### **4.2.4. Evaluación del desempeño térmico de las superficies texturizadas en el destilador solar**

Como una primera prueba, se evaluó la temperatura alcanzada por la lámina texturizada, inclinada a un valor igual que la latitud local, en comparación con la temperatura alcanzada por la charola en el destilador sin agua. Se colocó un termopar tipo k sobre la superficie de la charola y, simultáneamente, se situó la lámina texturizada dentro del sistema, también equipada con un termopar tipo k en su superficie. Para aislar el sistema del viento y otros factores ambientales, se cerró la cubierta del destilador. Tanto la charola como la lámina texturizada se expusieron durante una hora al mediodía solar. El destilador se orientó hacia el sur geográfico para maximizar la captación de la radiación solar disponible. En la Figuras 43 se muestra la configuración de este experimento y en la Figura 44 se grafican los resultados de las mediciones de temperatura.

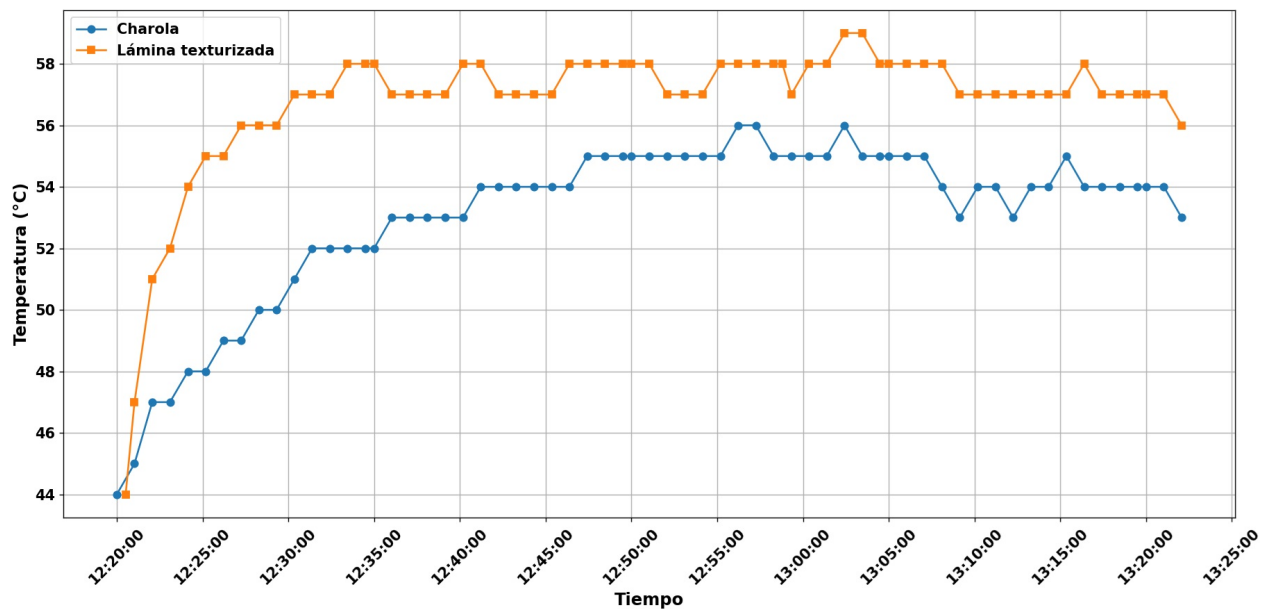
En la Figura 44 se observa que la lámina texturizada alcanzó una temperatura mayor durante todo el periodo de exposición. La lámina texturizada mostró un aumento rápido de temperatura durante los primeros minutos, estabilizándose posteriormente en valores cercanos a 58 °C. Por otro lado, la charola presentó un incremento de temperatura más gradual, alcanzando un máximo cercano a 55 °C. Se observó una diferencia de 3 °C aproximadamente entre la temperatura máxima alcanzada por la charola y la de la lámina texturizada. Estos resultados indican que la lámina texturizada presentó una mayor absorptividad, ya que logró alcanzar temperaturas más altas que la charola.





**Figura 43.** Fotografía del montaje experimental para determinar la temperatura alcanzada por la lámina texturizada en comparación con la temperatura alcanzada por la charola.

Esta diferencia puede atribuirse a la modificación de la estructura superficial de la lámina, lo cual favoreció una mayor absorción de la energía solar y resultó en un incremento significativo de la temperatura.

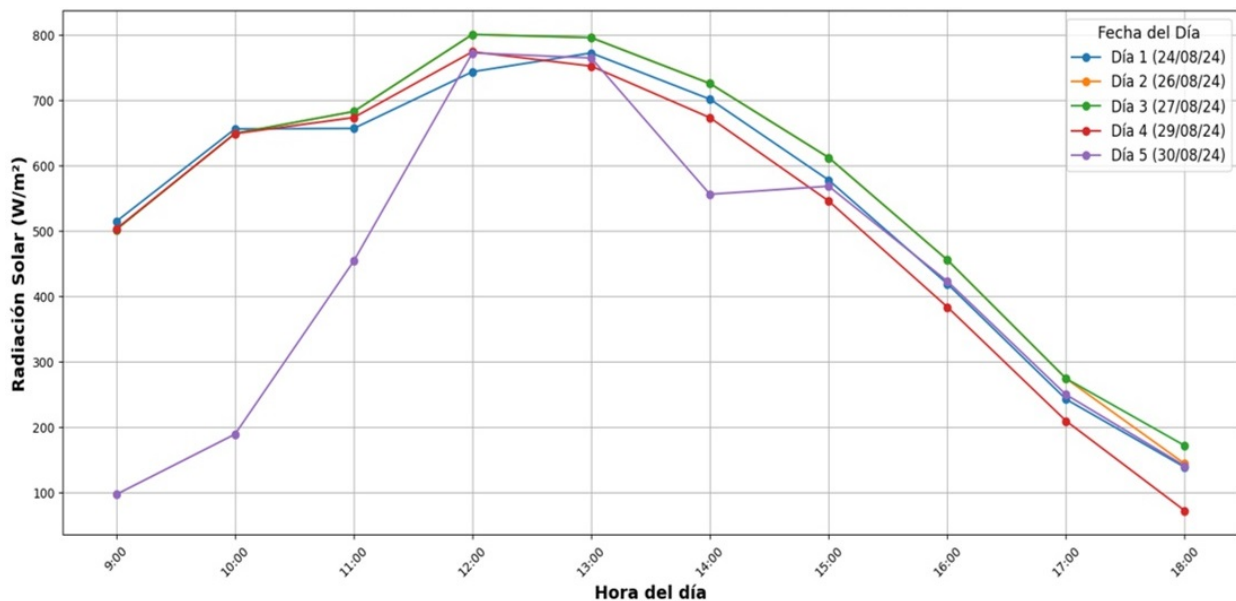


**Figura 44.** Comparación de la temperatura entre la charola y la lámina texturizada durante 1 hora. Se presentan las mediciones de temperatura de la charola (línea azul) y de la lámina texturizada (línea naranja).

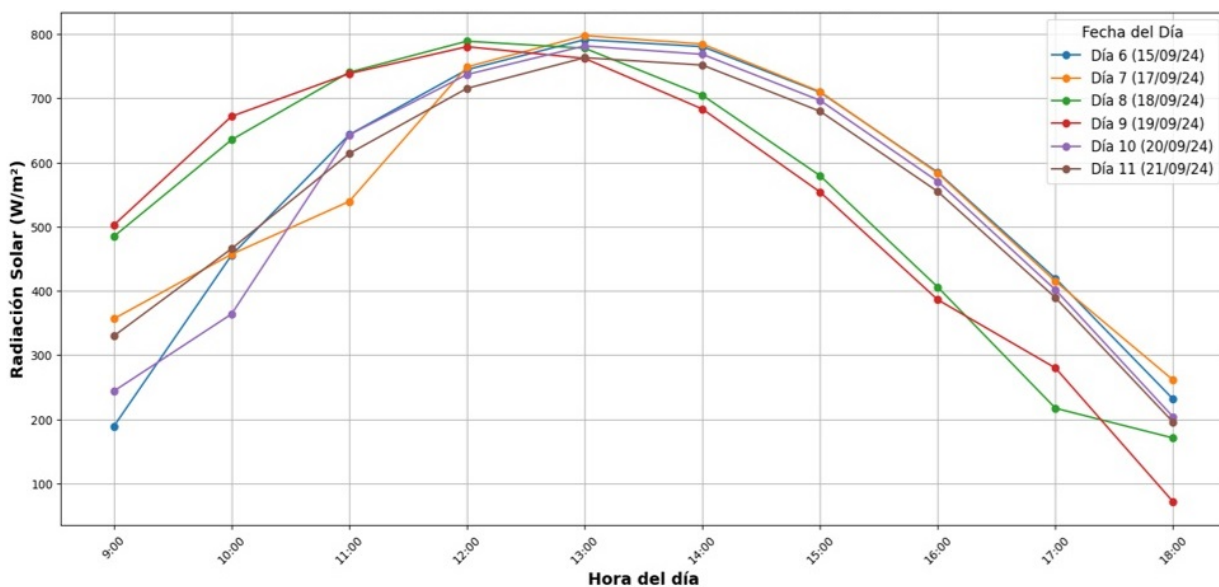
### 4.3. Desempeño del destilador solar

El desempeño del destilador se evaluó para las tres configuraciones descritas en la Sección 3.5. En la Tabla 4 se presentan los días y el tiempo de funcionamiento de cada configuración. Las mediciones de radiación solar registradas durante los días de prueba se muestran en las Figuras 45, 46 y 47, en el intervalo de 9:00 a 18:00. Las gráficas de las Figuras 45 y 46, correspondientes a los días de los experimentos realizados para las configuraciones #1 y #2, muestran que en ambos casos se alcanzó un pico de radiación solar cercano a  $800 \text{ W/m}^2$ . En contraste, la gráfica de la Figura 47, correspondiente a los días en que se realizaron los experimentos con la configuración #3, muestra un pico de radiación solar cercano a  $700 \text{ W/m}^2$ .

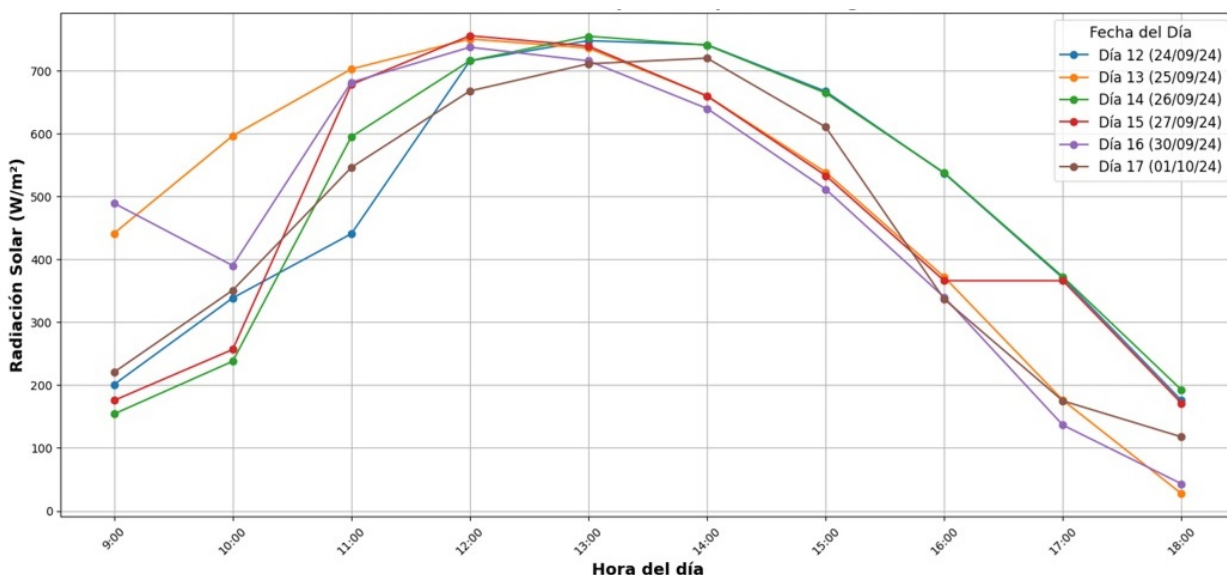
En general, se observa que la radiación solar sigue un patrón similar para las tres configuraciones, con un aumento constante durante la mañana, alcanzando un máximo alrededor del mediodía, y luego disminuyendo hacia la tarde. En la Tabla 9 se proporcionan los valores de radiación solar acumulada cada día, así como los valores promedio de las otras variables ambientales: temperatura ambiente, velocidad del viento y humedad relativa. Se puede percibir que en los días de experimentación con las configuraciones #1 y #2 se presentaron valores más altos de acumulado de radiación solar, superando en varios casos los  $5500 \text{ W/m}^2$ . Sin embargo, en los días que se trabajó con la configuración #3 los acumulados de radiación fueron inferiores entre  $4544$  y  $4681 \text{ W/m}^2$ .



**Figura 45.** Radiación solar horaria durante los días en los que se realizaron los experimentos con la configuración #1: sin láminas.



**Figura 46.** Radiación solar horaria durante los días en los que se realizaron los experimentos con la configuración #2: láminas texturizadas inclinadas 32 grados respecto a la horizontal.



**Figura 47.** Radiación solar horaria durante los días en los que se realizaron los experimentos con la configuración #3: láminas texturizadas en posición horizontal sobre el fondo de la charola.

De la Tabla 9 también se puede apreciar que la temperatura ambiente promedio varió entre 19.7 °C y 22.2 °C, indicando una relativa uniformidad de este parámetro. En cambio, la velocidad del viento promedio mostró variaciones considerables, oscilando entre 1.4 m/s y 10.1 m/s. Una mayor velocidad del viento y una menor temperatura ambiente promueven una mayor tasa de condensación del vapor generado en el destilador, y en consecuencia una mayor producción de destilado (agua desalinizada).

**Tabla 9.** Condiciones ambientales de las tres configuraciones durante cada día del experimento.

Configuración	Día	Acumulado de radiación solar [ $W \cdot h/m^2$ ]	$\bar{T}_{ambiente}$ [ $^{\circ}C$ ]	$\bar{v}_{viento}$ [m/s]	$\overline{HR}$ [%]
#1 Sin láminas	24/08/2024	5416.67	21.3	5.0	79.4
	26/08/2024	5636.00	22.2	9.5	82.3
	27/08/2024	5663.08	21.5	10.1	83.2
	29/08/2024	5229.92	20.9	10.8	79.2
	30/08/2024	4861.50	21.1	9.6	81.7
#2 Láminas texturizadas inclinadas 32 grados respecto a la horizontal	15/09/2024	5591.83	21.8	5.2	70.0
	17/09/2024	5653.81	20.4	3.3	65.5
	18/09/2024	5335.00	20.6	2.8	70.4
	19/09/2024	4856.42	21.5	2.3	66.1
	20/09/2024	5496.67	20.8	3.5	72.4
#3 Láminas texturizadas en posición horizontal sobre el fondo de la charola	24/09/2024	4998.08	20.8	2.8	81.2
	25/09/2024	4997.12	20.3	3.9	79.2
	26/09/2024	4961.03	20.2	3.5	80.2
	27/09/2024	4392.92	19.7	2.7	81.4
	01/10/2024	4544.08	19.7	1.4	85.1

Por último, la humedad relativa promedio fluctuó entre 65.5% y 85.1%. En general, las condiciones ambientales mostraron diferencias importantes entre los días de experimentación. La configuración #3 parece haber tenido condiciones menos favorables, con menor radiación solar acumulada y baja velocidad del viento. El volumen destilado colectado al final de cada prueba se muestra en la Tabla 10. Para medir estos volúmenes se utilizó una probeta calibrada con una resolución de 0.1 mL.

**Tabla 10.** Volumen destilado obtenido durante cada día de prueba para las tres configuraciones.

Configuración	Fecha	Destilado [ $m^3/día$ ]
#1 Sin láminas	24/08/2024	$2.61 \times 10^{-5}$
	26/08/2024	$2.00 \times 10^{-5}$
	27/08/2024	$2.50 \times 10^{-5}$
	29/08/2024	$2.67 \times 10^{-5}$
	30/08/2024	$2.27 \times 10^{-5}$
#2 Láminas texturizadas inclinadas 32 grados respecto a la horizontal	15/09/2024	$1.63 \times 10^{-5}$
	17/09/2024	$1.50 \times 10^{-5}$
	18/09/2024	$2.15 \times 10^{-5}$
	19/09/2024	$1.54 \times 10^{-5}$
	20/09/2024	$1.89 \times 10^{-5}$
#3 Láminas texturizadas en posición horizontal sobre el fondo de la charola	24/09/2024	$1.62 \times 10^{-5}$
	25/09/2024	$1.50 \times 10^{-5}$
	26/09/2024	$2.17 \times 10^{-5}$
	27/09/2024	$1.60 \times 10^{-5}$
	01/10/2024	$1.76 \times 10^{-5}$

En la Tabla 10 se puede notar que para la configuración #1, sin láminas, la producción de destilado varía entre  $2.00 \times 10^{-5}$  y  $2.67 \times 10^{-5} m^3/día$ . Para la configuración #2, con láminas texturizadas inclinadas a 32 grados respecto a la horizontal, la producción de destilado se ubicó entre  $1.50 \times 10^{-5}$  y  $2.15 \times 10^{-5} m^3/día$ . Finalmente para la configuración #3, con láminas texturizadas en posición horizontal sobre el fondo de la charola la producción de destilado estuvo entre  $1.50 \times 10^{-5}$  y  $2.17 \times 10^{-5} m^3/día$ .

Con excepción de los días 18 y 26 de septiembre (correspondientes a las configuraciones #2 y #3), se obtuvo mayor destilado con la configuración #1, debido a la influencia de las variables ambientales principalmente. Sin embargo, para hacer una comparación más equitativa se realizó el cálculo de la eficiencia térmica del destilador usando la Ecuación 28.

En dicha ecuación intervienen la masa de agua destilada, la radiación solar diaria acumulada y el área superficial que recibe la radiación. El área de la configuración #1 es  $A_b = 0.0109 \text{ m}^2$ , que corresponde al área de la charola. En la configuración #2, el área total de la matriz de 4 láminas texturizadas es  $A_b = 0.005029 \text{ m}^2$ . Para la configuración #3, el área total de la matriz de 6 láminas texturizadas es  $A_b = 0.007544 \text{ m}^2$ . Para determinar el calor latente de vaporización  $h_{as}$ , se utilizaron las propiedades del agua tomadas de tablas termodinámicas (The Engineering ToolBox, 2010), a la temperatura promedio del agua para cada día. Los resultados se muestran en la gráfica de la Figura 48.

De la Figura 48 se observa que la configuración #1, presentó eficiencias más bajas en comparación con la configuración #2 y relativamente similares a las eficiencias de la configuración #3, con excepción del día 26 de septiembre. En cambio, la configuración #2 tuvo las eficiencias más altas. Se cree que esta mejora es resultado del efecto combinado de la alta absorptividad y alta mojabilidad de las superficies texturizadas. Además, la disposición inclinada de las láminas, maximizó la absorción radiación solar especialmente al mediodía, como lo sugiere también la Figura 44.

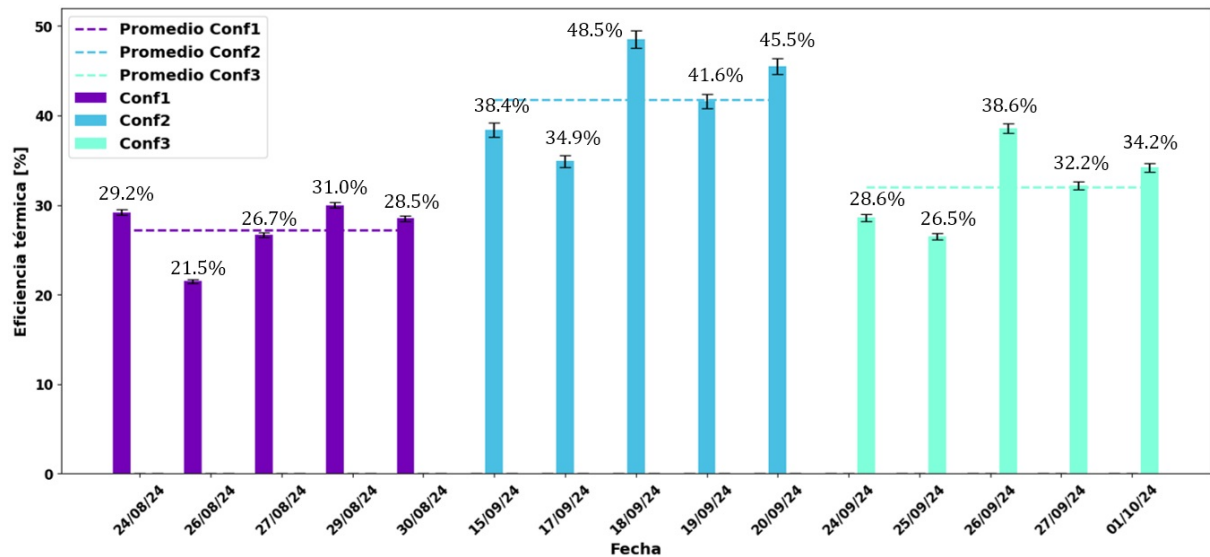


Figura 48. Eficiencias térmicas para cada configuración del destilador solar.

Aunque la Configuración #1 produjo mayores volúmenes de destilado, las eficiencias más bajas indicaron un aprovechamiento menos efectivo de la energía. Por otra parte las configuraciones #2 y #3 que

incluyen las láminas texturizadas lograron un mejor uso de la energía térmica. En la Tabla 11 se presenta un resumen con el promedio de destilado obtenido por día y el promedio de la eficiencia térmica para cada configuración. Se confirma que, en general, la configuración #2, permitió un aprovechamiento más eficiente de la energía solar disponible. Se considera que, al estar las superficies texturizadas en una posición inclinada igual a la latitud local, orientadas al sur y parcialmente inundadas, experimentaron aumentos de temperatura más altos que en la configuración #3 y mayores también que los de la base de la charola. Esto, en combinación con la alta absorptividad y mojabilidad, favoreció la tasa de evaporación de agua. En contraste, en la configuración #3 solo se demostró una absorptividad de las superficies procesadas con láser ligeramente mayor que la absorptividad de la charola recubierta con una pintura negra comercial. Una mayor absorptividad llevó a una temperatura superficial más elevada y a mayor evaporación de agua en consecuencia.

**Tabla 11.** Destilado promedio y eficiencia térmica promedio para las tres configuraciones.

Configuración	Día	Destilado promedio [m <sup>3</sup> /día]	Eficiencia térmica promedio [%]
#1 Sin láminas	24/08/2024	$2.41 \times 10^{-5}$	27.4
	26/08/2024		
	27/08/2024		
	29/08/2024		
	30/08/2024		
#2 Láminas texturizadas inclinadas 32 grados respecto a la horizontal	15/09/2024	$1.74 \times 10^{-5}$	41.8
	17/09/2024		
	18/09/2024		
	19/09/2024		
	20/09/2024		
#3 Láminas texturizadas en posición horizontal sobre el fondo de la charola	24/09/2024	$1.73 \times 10^{-5}$	32.0
	25/09/2024		
	26/09/2024		
	27/09/2024		
	01/10/2024		

# Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones para trabajo futuro

---

## 5.1. Conclusiones

En este trabajo de tesis se estudió el efecto de distintos parámetros de irradiación láser sobre las propiedades de mojabilidad y reflectancia de láminas de aluminio para ser utilizadas en un destilador solar bajo condiciones de clima real en la ciudad de Ensenada, BC. Para irradiar las superficies se empleó un láser de Titanio-Zafiro con un amplificador Coherent, serie Legend Elite HE+. Este láser emite pulsos con una duración de 120 fs, una longitud de onda centrada en 800 nm y una frecuencia de repetición de 5 kHz. Para diseñar el destilador solar se utilizó el programa SolidWorks. Las piezas se fabricaron en el taller de mecánica fina y el ensamble se realizó en el Laboratorio de Energías Renovables. De la caracterización de las superficies y los experimentos en el destilador solar se obtuvieron las siguientes conclusiones::

Se generaron superficies con estructuras jerárquicas que atrapan la luz, disminuyendo su reflectancia en consecuencia. Se observó que el estado de polarización del haz láser y la amplitud de las cavidades que se forman sobre las superficies juegan un papel fundamental en las propiedades hidrofóbicas o hidrofílicas de éstas.

Las superficies irradiadas con polarización lineal, velocidad de barrido de 10 mm/s, separación entre barridos de 10  $\mu\text{m}$  y fluencias por pulso de 1.57, 1.89, 2.20, 2.52 y 2.83  $\text{J}/\text{cm}^2$  presentaron un comportamiento hidrofóbico, con ángulos de contacto de 80.20°, 88.70°, 127.35°, 127.50° y 128.90°, respectivamente. En cambio, las superficies irradiadas con polarización circular, y los mismos valores de velocidad barrido, espaciado y fluencia por pulso, mostraron tendencia hacia un comportamiento hidrofílico, con ángulos de contacto de 127.17°, 105.24°, 87.84°, 61.01° y 36.42°, respectivamente. A mayor energía, la polarización lineal favoreció la hidrofobicidad mientras que la polarización circular la disminuyó. Estos resultados evidencian que la polarización circular favorece la transición hacia una superficie más hidrofílica bajo las mismas condiciones de irradiación, mientras que la polarización lineal contribuye a un comportamiento hidrofóbico.

El proceso de re-irradiación de las superficies tratadas produjo micro canales de mayor profundidad, lo que mejoró el atrapamiento de luz. La reflectancia en modo de reflexión difusa se mantuvo por debajo del 18 % en el rango de 200 nm a 900 nm, lo cual indica una alta absorción de luz en esa región. Las láminas de aluminio re-irradiadas mostraron una disminución del 82 % en la reflectancia en comparación

con las láminas sin irradiar. Todas las muestras reirradiadas presentaron un ángulo de contacto menor a  $10^\circ$ , lo que confirma sus propiedades de superhidrofilicidad. Aunque los valores exactos del ángulo de contacto variaron ligeramente entre las superficies, el nivel de hidrofilicidad se mantuvo alto. Las diferencias observadas en los espectros de las muestras no fueron significativas, lo que sugiere que el proceso de texturizado láser es altamente reproducible.

El análisis realizado demuestra una correlación clara entre la morfología de la superficie y sus propiedades de mojabilidad. La modificación de parámetros como la velocidad de barrido y la separación entre barridos tiene un impacto significativo en la morfología, lo cual influye directamente en las propiedades de mojabilidad del aluminio texturizado. Los resultados indican que es posible mejorar las propiedades de hidrofilicidad de las superficies al ajustar los parámetros de irradiación, tales como la distancia entre barridos y la velocidad de barrido.

La eficiencia del destilador solar presentó los mayores incrementos cuando las superficies irradiadas se colocaron en una posición inclinada  $32^\circ$  respecto a la horizontal. En este caso, los valores de eficiencia registrados fueron de 34.9 % a 45.8 %. En el caso donde las superficies procesadas se situaron de forma horizontal en el fondo de la charola del destilador, la eficiencia osciló entre 26.5 % y 38.6 %. Y en el caso donde no se utilizaron superficies irradiadas la eficiencia se mantuvo entre 21.5 % y 31.0 %.

## **5.2. Recomendaciones para trabajo futuro**

En futuras investigaciones se recomienda explorar el uso de otros materiales para fabricar las superficies irradiadas, como acero inoxidable y cobre, ya que, de acuerdo con la literatura, dichos materiales pueden alcanzar valores significativamente altos de absorbancia si son procesados adecuadamente. Asimismo, se sugiere realizar texturizados en superficies de mayor área para incrementar la capacidad de captación de radiación solar y, en consecuencia, mejorar el rendimiento del destilador. También se recomienda llevar a cabo pruebas con agua de mar para evaluar el rendimiento de las superficies texturizadas en condiciones reales de desalinización, enfrentando los desafíos asociados con la precipitación de las sales sobre las superficies. Por último, se sugiere estudiar el efecto de otros parámetros de irradiación, para comprender mejor la relación entre las condiciones de procesamiento y las propiedades de mojabilidad y absorbancia, permitiendo optimizar el proceso de texturizado para distintas aplicaciones.



## Literatura citada

- Aalco (2024). Aluminium alloy 5005-h34 sheet. [https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-5005-H34-Sheet\\_137.ashx](https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-5005-H34-Sheet_137.ashx).
- Aftab, M., Mansha, M. S., Iqbal, T., & Farooq, M. (2024). Surface plasmon excitation: theory, configurations, and applications. *Plasmonics*, 19(4), 1701–1719. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/s11468-023-02095-2>.
- Ahmmmed, K. T., Grambow, C., & Kietzig, A.-M. (2014). Fabrication of micro/nano structures on metals by femtosecond laser micromachining. *Micromachines*, 5(4), 1219–1253. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/mi5041219>.
- Anisimov, S. I., Kapeliovich, B. L., & Perelman, T. L. (1974). Electron emission from metal surfaces exposed to ultrashort laser pulses. [http://www.jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e\\_039\\_02\\_0375.pdf](http://www.jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_039_02_0375.pdf).
- Bennett, H. E. & Porteus, J. (1961). Relation between surface roughness and specular reflectance at normal incidence. *JOSA*, 51(2), 123–129. <https://doi.org/https://doi.org/10.1364/JOSA.51.000123>.
- Bhushan, B. & Jung, Y. C. (2011). Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction. *Progress in Materials Science*, 56(1), 1–108. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.04.003>.
- Bonse, J., Höhm, S., Kirner, S. V., Rosenfeld, A., & Krüger, J. (2017a). Laser-induced periodic surface structures— a scientific evergreen. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 23(3). <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2016.2614183>.
- Bonse, J., Kirner, S. V., Höhm, S., Epperlein, N., Spaltmann, D., Rosenfeld, A., & Krüger, J. (2017b). Applications of laser-induced periodic surface structures (lipss). In *Laser-based Micro-and Nanoprocessing XI*, volume 10092, 114–122. SPIE. <https://doi.org/https://doi.org/10.1117/12.2250919>.
- Bonse, J., Rosenfeld, A., & Krüger, J. (2009). On the role of surface plasmon polaritons in the formation of laser-induced periodic surface structures upon irradiation of silicon by femtosecond-laser pulses. *Journal of Applied Physics*, 106(10). <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/1.3261734>.
- Boriskina, S. V., Raza, A., Zhang, T., Wang, P., Zhou, L., & Zhu, J. (2019). Nanomaterials for the water-energy nexus. *MRS Bulletin*, 44(1), 59–66. <https://doi.org/doi:10.1557/mrs.2018.325>.
- Burns, A. (2005). Action research: an evolving paradigm? *Language Teaching*, 38(2), 57–74. <https://doi.org/10.1017/S0261444805002661>.
- Carranza, F., Villa, C.-D., Aguilar, J., Borbon-Nunez, H. A., & Saucedo, D. (2021). Experimental study on the potential of combining tio<sub>2</sub>, zno, and al<sub>2</sub>o<sub>3</sub> nanoparticles to improve the performance of a double-slope solar still equipped with saline water preheating. *Desalination and Water Treatment*, 216, 14–33. <https://doi.org/https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26760>.
- Chaleard, C., Detalle, V., Kocon, S., Lacour, J.-L., Nouvellon, C., Mauchien, P., Salle, B., & Semerok, A. F. (1998). Experimental investigation of laser ablation efficiency of metals. In *ALT'97 International Conference on Laser Surface Processing*, volume 3404, 432–440. SPIE. <https://doi.org/https://doi.org/10.1117/12.308651>.
- Chen, H., Li, X., & Li, D. (2022a). Superhydrophilic–superhydrophobic patterned surfaces: From simplified fabrication to emerging applications. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 5(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/10.0013222>.

- Chen, Q., Duan, J., Xiong, W., & Deng, L. (2023). High-performance anti-reflection micro-forests on aluminium alloy fabricated by laser induced competitive vapor deposition. *Optics Express*, *31*(8), 12802–12818. <https://doi.org/https://doi.org/10.1364/OE.484426>.
- Chen, Z., Lin, Y., Qian, Q., Su, P., Ding, Y., Tuan, P. D., Chen, L., & Feng, D. (2022b). Picosecond laser treated aluminium surface for photothermal seawater desalination. *Desalination*, *528*, 115561. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115561>.
- Drelich, J., Chibowski, E., Meng, D. D., & Terpilowski, K. (2011). Hydrophilic and superhydrophilic surfaces and materials. *Soft Matter*, *7*(21), 9804–9828. <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/C1SM05849E>.
- Dunkle, R. (1961). Solar water distillation: the roof type still and a multiple effect diffusion still. In *Proc. International Heat Transfer Conference, University of Colorado, USA, 1961*, volume 5, 895. <https://nla.gov.au/nla.obj-41433492/view?partId=nla.obj-41433603#page/n1/mode/1up>.
- Fork, R., Greene, B., & Shank, C. V. (1981). Generation of optical pulses shorter than 0.1 psec by colliding pulse mode locking. *Applied Physics Letters*, *38*(9), 671–672. <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/1.92500>.
- Fowles, G. (2011). *Introduction to modern optics*, (2a ed.). Holt, Rinehart and Winston, INC, Universidad de Utah. Archivo PDF.
- Fraijo Rodas, A. (2021). *Efecto de la polarización en la formación de LIPSS en bismuto*. [Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3575>.
- Garrelie, F., Colombier, J.-P., Pigeon, F., Tonchev, S., Faure, N., Bounhalli, M., Reynaud, S., & Parriaux, O. (2011). Evidence of surface plasmon resonance in ultrafast laser-induced ripples. *Optics express*, *19*(10), 9035–9043. <https://doi.org/https://doi.org/10.1364/OE.19.009035>.
- Guosheng, Z., Fauchet, P., & Siegman, A. (1982). Growth of spontaneous periodic surface structures on solids during laser illumination. *Physical Review B*, *26*(10), 5366. <https://doi.org/https://doi.org/10.1103/PhysRevB.26.5366>.
- Hecht, E. (2000). *Óptica*, (3ra ed.). Addison Wesley Iberoamericana, S.A. Archivo PDF.
- Hermosillo-Villalobos, J. J. (1989). Destilación solar. In *Huella cuadernos de divulgación académica*, volume 16, 14–19, Tlaquepaque, Jalisco: ITESO. ITESO. <https://rei.iteso.mx/items/02bb8b46-4fb7-4c75-9517-b2209022815a>.
- Huang, H., Yang, L.-M., & Liu, J. (2013a). Femtosecond fiber laser based metal blackening. In *Nanophotonics and Macrophotonics for Space Environments VII*, volume 8876, 157–167. SPIE. <https://doi.org/https://doi.org/10.1117/12.2026244>.
- Huang, M., Cheng, Y., Zhao, F., & Xu, Z. (2013b). The significant role of plasmonic effects in femtosecond laser-induced grating fabrication on the nanoscale. *Annalen der Physik*, *525*(1-2), 74–86. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/andp.201200136>.
- Huang, M., Zhao, F., Cheng, Y., Xu, N., & Xu, Z. (2009). Origin of laser-induced near-subwavelength ripples: interference between surface plasmons and incident laser. *ACS nano*, *3*(12), 4062–4070. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/nn900654v>.
- Huang, Z., Carey, J. E., Liu, M., Guo, X., Mazur, E., & Campbell, J. C. (2006). Microstructured silicon photodetector. *Applied Physics Letters*, *89*(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/1.2227629>.

- IPPC (International Plant Protection Convention) (2014). Climate change 2014 synthesis report. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.
- Kabeel, A., Abdelgaied, M., & Eisa, A. (2019). Effect of graphite mass concentrations in a mixture of graphite nanoparticles and paraffin wax as hybrid storage materials on performances of solar still. *Renewable Energy*, *132*, 119–128. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.147>.
- Kabeel, A. E., Omara, Z., & Essa, F. (2017). Numerical investigation of modified solar still using nanofluids and external condenser. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *75*, 77–86. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.01.017>.
- Keilmann, F. & Bai, Y. (1982). Periodic surface structures frozen into co<sub>2</sub> laser-melted quartz. *Applied Physics A*, *29*, 9–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF00618110>.
- Lab, P. O. (2024). Reflectance spectroscopy - colorimetry. <https://physicsopenlab.org/2021/07/03/reflectance-spectroscopy-colorimetry/>.
- Lee, K. & Ki, H. (2019). Femtosecond laser patterning based on the control of surface reflectance. *Applied Surface Science*, *494*, 187–195. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.07.163>.
- Lee, Hoesung and Calvin, Katherine and Dasgupta, Dipak and Krinner, Gerhard and Mukherji, Aditi and Thorne, Peter and Trisos, Christopher and Romero, José and Aldunce, Paulina and Barrett, Ko and others (2023). Climate change 2023: synthesis report. contribution of working groups i, ii and iii to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. <https://openresearch-repository.anu.edu.au/items/b0854f03-2f23-424f-8123-53e36e9c695a>.
- Li, J., Du, M., Sun, Q., & Yi, F. (2022). Analysis of anti-reflection mechanisms of the black aluminum alloy made by femtosecond laser processing. *Materials Research Express*, *9*(12), 125006. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/2053-1591/aca8e9>.
- Liu, J.-M. (1982). Simple technique for measurements of pulsed gaussian-beam spot sizes. *Optics letters*, *7*(5), 196–198. <https://doi.org/https://doi.org/10.1364/OL.7.000196>.
- Luo, X., Cai, M., Liu, W., Chen, C., Pan, R., Zhang, H., & Zhong, M. (2019). Flexible control over optical reflection property of metallic surfaces via pulse laser. *Journal of Laser Applications*, *31*(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.2351/1.5096077>.
- Minopoli, A., Acunzo, A., Della Ventura, B., & Velotta, R. (2022). Nanostructured surfaces as plasmonic biosensors: A review. *Advanced Materials Interfaces*, *9*(2), 2101133. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/admi.202101133>.
- Mori, A. (2010). *Time domain pulse shaping using a genetic algorithm*. [Tesis de Maestría en Ciencias, Stellenbosch. University of Stellenbosch]. <https://scholar.sun.ac.za/server/api/core/bitstreams/2f5ec889-e8c8-4dfc-b48a-2a07105a5130/content>.
- Müller, F. A., Kunz, C., & Gräf, S. (2016). Bio-inspired functional surfaces based on laser-induced periodic surface structures. *Materials*, *9*(6), 476. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma9060476>.
- Ou, Z., Huang, M., & Zhao, F. (2016). The fluence threshold of femtosecond laser blackening of metals: The effect of laser-induced ripples. *Optics & Laser Technology*, *79*, 79–87. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.11.018>.

- Phillips, K. C., Gandhi, H. H., Mazur, E., & Sundaram, S. (2015). Ultrafast laser processing of materials: a review. *Advances in Optics and Photonics*, 7(4), 684–712. <https://doi.org/https://doi.org/10.1364/AOP.7.000684>.
- Rai-Choudhury, P. (1997). *Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication: Micromachining and Microfabrication*, (2 ed.). IET. <https://doi.org/10.1117/3.2265070>.
- Segovia, P., Wong, A., Santillan, R., Camacho-Lopez, M., & Camacho-Lopez, S. (2021). Multi-phase titanium oxide lipss formation under fs laser irradiation on titanium thin films in ambient air. *Optical Materials Express*, 11(9), 2892–2906. <https://doi.org/https://doi.org/10.1364/OME.431210>.
- Segovia-Olvera, P., Sotelo, L., Esqueda-Barron, Y., Plata, M., Ramos, N., & Camacho-Lopez, S. (2022). Femtosecond large-area fabrication of multi-phase titanium oxide lipss on thin films. *Applied Surface Science*, 606, 154762. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.154762>.
- Singh, S. C., ElKabbash, M., Li, Z., Li, X., Regmi, B., Madsen, M., Jalil, S. A., Zhan, Z., Zhang, J., & Guo, C. (2020). Solar-trackable super-wicking black metal panel for photothermal water sanitation. *Nature Sustainability*, 3(11), 938–946. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41893-020-0566-x>.
- Sipe, J., Young, J. F., Preston, J., & Van Driel, H. (1983). Laser-induced periodic surface structure. i. theory. *Physical Review B*, 27(2), 1141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1103/PhysRevB.27.1141>.
- Svelto, O. (2010). *Principles of lasers*, (5 ed.). Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4419-1302-9>.
- The Engineering ToolBox (2010). Water - heat of vaporization vs. temperature. [https://www.engineeringtoolbox.com/water-properties-d\\_1573.html](https://www.engineeringtoolbox.com/water-properties-d_1573.html).
- UNESCO World Water Assessment Programme (2023). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023*. <https://policycommons.net/artifacts/10610206/informe-mundial-de-las-naciones-unidas-sobre-el-desarrollo-de-los-recursos-hidricos-2023/11516388/>.
- Valero, A., Uche, J., & Serra, L. (2001). La desalación como alternativa al phn. *Informe técnico, CIRCE y Centro Politécnico Superior de la Universidad de Zaragoza*. <https://www.uv.es/choliz/Desalacion.pdf>.
- Von Medeazza, G. (2008). *Escasez de agua dulce y desalinización: Los casos de Marruecos, Lanzarote (España), Palestina y el sur de la India*. Nueva Cultura del Agua. Bakeaz. [https://books.google.cl/books?hl=es&lr=lang\\_es&id=ZyaqDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA9&dq=Escasez+de+agua+dulce+y+desalinizaci%C3%B3n%7B%5C%27o%7Dn:+Los+casos+de+Marruecos,+Lanzarote+\(Espa%7B%5C~n%7Da\),+Palestina+y+el+sur+de+la+India&ots=vPFuxgqWBR&sig=Hk3Ie\\_3WQqXjq3GfGx-8WnCsWdk#v=onepage&q=Escasez%20de%20agua%20dulce%20y%20desalinizaci%C3%B3n%7B%5C%27o%7Dn%3A%20Los%20casos%20de%20Marruecos%2C%20Lanzarote%20\(Espa%7B%5C~n%7Da\)%2C%20Palestina%20y%20el%20sur%20de%20la%20India&f=false](https://books.google.cl/books?hl=es&lr=lang_es&id=ZyaqDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA9&dq=Escasez+de+agua+dulce+y+desalinizaci%C3%B3n%7B%5C%27o%7Dn:+Los+casos+de+Marruecos,+Lanzarote+(Espa%7B%5C~n%7Da),+Palestina+y+el+sur+de+la+India&ots=vPFuxgqWBR&sig=Hk3Ie_3WQqXjq3GfGx-8WnCsWdk#v=onepage&q=Escasez%20de%20agua%20dulce%20y%20desalinizaci%C3%B3n%7B%5C%27o%7Dn%3A%20Los%20casos%20de%20Marruecos%2C%20Lanzarote%20(Espa%7B%5C~n%7Da)%2C%20Palestina%20y%20el%20sur%20de%20la%20India&f=false).
- Wu, N., Wang, Z., Wang, X., Shimotsuma, Y., Nishi, M., Miura, K., & Hirao, K. (2011). Nano-periodic structure formation on titanium thin film with a femtosecond laser. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 119(1395), 898–901. <https://doi.org/https://doi.org/10.2109/jcersj2.119.898>.

# Anexos

## Anexo A: Ficha Técnica del Material

### Aluminium Alloy 5005 - H34 Sheet



#### SPECIFICATIONS

Commercial	5005
EN	5005

Aluminium alloy 5005 is a medium strength alloy with very good resistance to atmospheric corrosion and very good weldability that is highly suitable for decorative anodising. PLEASE NOTE THAT WHILST ALLOY 5005 IS SUITABLE FOR ANODISING, STREAKS CAN OCCUR - IF THE FINISH YOU ARE SEEKING IS CRITICAL PLEASE SPECIFY 'SPECIAL ANODISING QUALITY' AT TIME OF ORDER.

Applications - Alloy 5005 is typically used for:  
Buildings – Roofing, Cladding, Corrugated Sheet  
Signage, Road Signs & Name Plates  
Food & Chemical Equipment  
Furniture  
Anodised Parts  
HVAC Equipment  
Packaging  
Pipe and Tube  
Can Bodies

#### CHEMICAL COMPOSITION

BS EN 573-3:2009 Alloy 5005	
Element	% Present
Magnesium (Mg)	0.50 - 1.10
Iron (Fe)	0.0 - 0.70
Silicon (Si)	0.0 - 0.30
Zinc (Zn)	0.0 - 0.25
Manganese (Mn)	0.0 - 0.20
Copper (Cu)	0.0 - 0.20
Others (Total)	0.0 - 0.15
Chromium (Cr)	0.0 - 0.10
Other (Each)	0.0 - 0.05
Aluminium (Al)	Balance

#### ALLOY DESIGNATIONS

#### TEMPER TYPES

The most common tempers for 5005 aluminium are:

- H34 - Stabilised - A low temperature thermal treatment or heat introduced during manufacture which stabilises the mechanical properties and relieves residual internal stress, plus usually improves ductility

#### SUPPLIED FORMS

- Sheet

#### GENERIC PHYSICAL PROPERTIES

Property	Value
Density	2.70 g/cm <sup>3</sup>
Melting Point	655 °C
Thermal Expansion	23.5 x10 <sup>-6</sup> /K
Modulus of Elasticity	69.5 GPa
Thermal Conductivity	201 W/m.K
Electrical Resistivity	52 % IACS
Electrical Resistivity	0.033 x10 <sup>-6</sup> Ω .m

#### MECHANICAL PROPERTIES

BS EN 485-2:2008 Aluminium Sheet 0.2mm to 12.5mm	
Property	Value
Proof Stress	110 Min MPa
Tensile Strength	145 - 185 MPa
Hardness Brinell	47 HB

The properties above are for material in the H34 condition

[1 OF 2] CONTINUED ➔

**Aluminium Alloy  
5005 - H34 Sheet**



#### CONTACT

**Address:** Please make contact directly with your local service centre, which can be found via the Locations page of our web site  
**Web:** [www.aalco.co.uk](http://www.aalco.co.uk)

#### REVISION HISTORY

**Datasheet Updated** 18 July 2019

#### DISCLAIMER

This Data is indicative only and as such is not to be relied upon in place of the full specification. In particular, mechanical property requirements vary widely with temper, product and product dimensions. All information is based on our present knowledge and is given in good faith. No liability will be accepted by the Company in respect of any action taken by any third party in reliance thereon.

Please note that the 'Datasheet Update' date shown above is no guarantee of accuracy or whether the datasheet is up to date.

The information provided in this datasheet has been drawn from various recognised sources, including EN Standards, recognised industry references (printed & online) and manufacturers' data. No guarantee is given that the information is from the latest issue of those sources or about the accuracy of those sources.

Material supplied by the Company may vary significantly from this data, but will conform to all relevant and applicable standards.

As the products detailed may be used for a wide variety of purposes and as the Company has no control over their use; the Company specifically excludes all conditions or warranties expressed or implied by statute or otherwise as to dimensions, properties and/or fitness for any particular purpose, whether expressed or implied.

Advice given by the Company to any third party is given for that party's assistance only and without liability on the part of the Company. All transactions are subject to the Company's current Conditions of Sale. The extent of the Company's liabilities to any customer is clearly set out in those Conditions; a copy of which is available on request.

[2 OF 2]

Aalco is a registered trademark of Aalco Metals Ltd

© Copyright: Aalco Metals Ltd, Parkway House, Unit 6 Parkway Industrial Estate, Wednesbury WS10 7WP