



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – FUENTES RENOVABLES

**INVESTIGACIÓN SOBRE EL GRABADO ADITIVO DE SUSTRATOS TERMOPLÁSTICOS
PARA LA OBTENCIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS MEDIANTE EL USO DE UN HAZ DE
ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
M. en I. ALEJANDRO JARAMILLO MORA

TUTOR PRINCIPAL
Dr. ARMANDO ROJAS MORÍN, FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM

COMITÉ TUTOR
Dr. JAVIER EDUARDO AGUILLÓN MARTÍNEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM
Dr. ARTURO BARBA PINGARRÓN, FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
Dr. ADRIÁN ESPINOSA BAUTISTA, FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
Dr. SERGIO QUEZADA GARCÍA, FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM

MÉXICO, CDMX, ENERO 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta 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 titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidenta: **Dra. MARTÍN DEL CAMPO MÁRQUEZ CECILIA**
Secretario: **Dr. BARBA PINGARRÓN ARTURO**
1 er. Vocal: **Dr. ROJAS MORÍN ARMANDO**
2 do. Vocal: **Dr. ESPINOSA BAUTISTA ADRIÁN**
3 er. Vocal: **Dr. QUEZADA GARCÍA SERGIO**

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

MÉXICO, CDMX, CIUDAD UNIVERSITARIA, FACULTAD DE INGENIERÍA, CENTRO DE INGENIERÍA AVANZADA (CIA), EDIFICIO X.

TUTOR DE TESIS:

Dr. ARMANDO ROJAS MORÍN

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a **Dios** por darme los medios y haberme permitido llegar a este punto a pesar de todas las dificultades que se presentaron a lo largo de estos años, desde la preparación del protocolo de investigación hasta culminar con lo expuesto en este documento. Espero de igual forma, estos esfuerzos no sean en vano y sean de utilidad para que más personas estén interesadas en este campo de estudio, que poco a poco se irá convirtiendo en una necesidad vital para nuestro bienestar y del planeta en sí.

Agradezco a mi madre **Araceli Mora Arceo**, quien siempre me impulsó a continuar; fue un apoyo desde todos los ámbitos posibles para lograr esta meta. Aunque ya no estuvo presente para observar la culminación, sepa de alguna forma que siempre estaré agradecido con ella y extrañando su invaluable compañía, cariño y apoyo.

Agradezco a mi hermano mayor, **Dr. Gabriel Jaramillo Soto**, quien ha sido un guía y apoyo en este proyecto, e incluso para llevarlo más allá de los objetivos inicialmente planeados, y ser un ejemplo de ser humano y hermano. Agradezco también a mi padre **Gabriel Alejandro Jaramillo Morales**, quien, por medio de su trabajo y los frutos del mismo, tuve la oportunidad de alcanzar este punto en mi desarrollo académico y personal.

Le agradezco a mi tutor, **Dr. Armando Rojas Morín**, por todos estos años en los que hemos trabajado juntos para consumarse en este punto. Ha sido un largo camino desde el primer concentrador diseñado en Licenciatura, hasta la consumación de este proyecto que ha dado por resultado mi primera publicación en una revista arbitrada. Y espero sea la primera de muchas, o al menos de todos los que pueda desarrollar en este u otros ámbitos de estudio relacionados.

Agradezco el interés y apoyo de mi Comité Tutor: **Dr. Arturo Barba Pingarrón, Dr. Sergio Quezada García, Dr. Adrián Espinosa Bautista y Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez**. Quienes fueron los mejores críticos que pudiera haber pedido para la constante mejora y desarrollo de la investigación. La guía y apoyo que me dieron, tanto en lo particular como en forma grupal, lo considero invaluable y estoy muy agradecido con ello.

Por último, pero no menos importante, agradezco el apoyo económico otorgado por el **Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONAHCYT**. Adicionalmente agradezco el apoyo a los proyectos **PAPIIT-UNAM IT101221**: “Desarrollo de Tecnologías Alternativas de Modificación de Superficies para la mejora de materiales de Potencial Industrial”, y a **PAPIIT-UNAM IT102820**: “Aplicación de Material Foto-Resistivo a Placas para la fabricación de circuitos impresos mediante el uso de Energía Solar Concentrada”.

RESUMEN

Se propone un método novedoso capaz de generar circuitos impresos utilizando energía solar concentrada (ESC). Hasta donde sabemos, la literatura abierta no ha informado que algún método emplee ESC para obtener circuitos impresos de forma aditiva.

Basado en el método Mill & Fill, un material conductor (aleación Sn63Pb37) se deposita dentro de una trinchera trazada sobre un sustrato termoplástico (PETG). El haz solar concentrado funde el material conductor para formar una pista sólida, mientras que el sustrato relaja su estructura y permite la inclusión de ésta.

La unión híbrida resultante entre plástico y metal es similar a las obtenidas por LAMP (unión asistida por láser de metal-polímero). Las veinte pruebas realizadas encontraron que la magnitud de la radiación solar directa y la eficiencia general del sistema son las variables más influyentes en el tiempo de exposición de la pista al haz solar concentrado.

Cada prueba, con sus condiciones propias, fue simulada en COMSOL Multiphysics®, y las temperaturas obtenidas experimentalmente fueron comparadas con las obtenidas por simulación. Se espera que esta propuesta sirva como puente entre ambos campos de estudio para que los concentradores solares sean considerados para la fabricación aditiva de circuitos impresos y amplíen el potencial de ESC para desarrollar bienes de consumo.

A su vez, se culmina con el desarrollo de una segunda nueva propuesta capaz de crear sustratos completos con pistas funcionales embebidas, empleando ESC para ello. Introduciendo un poco más a los concentradores solares y a ESC dentro de las posibles opciones y sistemas empleados por la manufactura aditiva de nuestros bienes de consumo.

ABSTRACT

A novel method capable of generating printed circuits using concentrated solar energy (CSE) is proposed. The open literature has reported that no method employs CSE to obtain printed circuits additively.

Based on the Mill and Fill method, a conductive material (Sn63Pb37 alloy) is deposited inside a trench milled on a thermoplastic substrate (PETG). The concentrated solar beam melts the conductive material to form a solid trace, while the substrate relaxes its structure and allows the inclusion of the path.

The resulting hybrid joining between plastic and metal is like those obtained by LAMP (laser-assisted joining of metal-polymer). The twenty conducted tests found that the magnitude of direct solar radiation and the overall system efficiency are the most influential variables on the exposure time of the trace to the solar spot.

Each test, with its conditions, was simulated in COMSOL Multiphysics®, and the temperatures obtained experimentally were compared with those obtained by simulation. This proposal is expected to serve as a bridge between both fields of study so that solar concentrators will be considered for the additive manufacturing of printed circuits and expand CSE's potential for developing consumer goods.

In turn, it culminates with developing a second new proposal capable of creating complete substrates with embedded functional traces, using CSE. Introducing a little more solar concentrators and CSE within the possible options and systems used by the additive manufacturing of our consumer goods.

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. COMPARACIÓN ENTRE LÁSER, PLASMA Y ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA PARA EL PROCESAMIENTO DE MATERIALES (FLAMANT ET AL., 1999, P. 118; SIERRA ET AL., 2005A, P. 1340).	27
TABLA 2. EXPERIMENTOS DE SÍNTESIS, TRATAMIENTO, MODIFICACIÓN Y UNIÓN DE MATERIALES, MEDIANTE EL USO DE ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA, MÁS RELEVANTES.	28
TABLA 2. EXPERIMENTOS DE SÍNTESIS, TRATAMIENTO, MODIFICACIÓN Y UNIÓN DE MATERIALES, MEDIANTE EL USO DE ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA, MÁS RELEVANTES (CONTINUACIÓN).	29
TABLA 2. EXPERIMENTOS DE SÍNTESIS, TRATAMIENTO, MODIFICACIÓN Y UNIÓN DE MATERIALES, MEDIANTE EL USO DE ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA, MÁS RELEVANTES (CONTINUACIÓN).	30
TABLA 2. EXPERIMENTOS DE SÍNTESIS, TRATAMIENTO, MODIFICACIÓN Y UNIÓN DE MATERIALES, MEDIANTE EL USO DE ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA, MÁS RELEVANTES (CONTINUACIÓN).	31
TABLA 3. EXPERIMENTOS DE SÍNTESIS, TRATAMIENTO, MODIFICACIÓN Y UNIÓN DE MATERIALES, MEDIANTE EL USO DE CONCENTRADORES SOLARES CON LENTE DE FRESNEL Y ESC, MÁS RELEVANTES.....	33
TABLA 3. EXPERIMENTOS DE SÍNTESIS, TRATAMIENTO, MODIFICACIÓN Y UNIÓN DE MATERIALES, MEDIANTE EL USO DE CONCENTRADORES SOLARES CON LENTE DE FRESNEL Y ESC, MÁS RELEVANTES (CONTINUACIÓN).....	34
TABLA 3. EXPERIMENTOS DE SÍNTESIS, TRATAMIENTO, MODIFICACIÓN Y UNIÓN DE MATERIALES, MEDIANTE EL USO DE CONCENTRADORES SOLARES CON LENTE DE FRESNEL Y ESC, MÁS RELEVANTES (CONTINUACIÓN).....	35
TABLA 4. PATENTES RELEVANTES POR EL USO DE LA ENERGÍA SOLAR PARA EL GRABADO DE CIRCUITOS IMPRESOS, O EN ALGUNO DE SUS PASOS INTERMEDIOS.	35
TABLA 4. PATENTES RELEVANTES POR EL USO DE LA ENERGÍA SOLAR PARA EL GRABADO DE CIRCUITOS IMPRESOS, O EN ALGUNO DE SUS PASOS INTERMEDIOS (CONTINUACIÓN).	36
TABLA 4. PATENTES RELEVANTES POR EL USO DE LA ENERGÍA SOLAR PARA EL GRABADO DE CIRCUITOS IMPRESOS, O EN ALGUNO DE SUS PASOS INTERMEDIOS (CONTINUACIÓN).	37
TABLA 5. PATENTES, DESARROLLOS Y AVANCES RELEVANTES PARA EL MÉTODO DE GRABADO DE CIRCUITOS IMPRESOS "FRESAR Y LLENAR" (MILL & FILL).	38
TABLA 5. PATENTES, DESARROLLOS Y AVANCES RELEVANTES PARA EL MÉTODO DE GRABADO DE CIRCUITOS IMPRESOS "FRESAR Y LLENAR" (MILL & FILL) (CONTINUACIÓN).	39
TABLA 6. RESUMEN DE LOS PARÁMETROS, VALORES Y ECUACIONES UTILIZADAS PARA LA SIMULACIÓN.	74
TABLA 7. COMPONENTES DEL ARREGLO Y DISPONIBLES EN LA BIBLIOTECA DE MATERIALES EN COMSOL®, JUNTO A LOS DATOS AGREGADOS MANUALMENTE Y SUS REFERENCIAS.	75
TABLA 8. RESUMEN DE LAS VARIABLES MEDIDAS A LO LARGO DE LA SERIE DE EXPERIMENTOS Y SUS VALORES MÁS REPRESENTATIVOS	87
TABLA 9. RESUMEN DE LA EFICIENCIA GENERAL DEL SISTEMA Y COMPARACIÓN ENTRE LAS TEMPERATURAS DEL ARREGLO DE MATERIALES OBTENIDAS MEDIANTE EXPERIMENTACIÓN Y MEDIANTE SIMULACIÓN.....	90
TABLA 10. INVESTIGACIONES MÁS IMPORTANTES ASOCIADAS A LA OBTENCIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS MEDIANTE MODELADO O FABRICACIÓN DE FILAMENTO FUNDIDO.	104
TABLA 10. INVESTIGACIONES MÁS IMPORTANTES ASOCIADAS A LA OBTENCIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS MEDIANTE MODELADO O FABRICACIÓN DE FILAMENTO FUNDIDO (CONTINUACIÓN).	105
TABLA 11. PATENTES RELEVANTES POR EL USO DE LA ENERGÍA SOLAR PARA EL MODELADO O FABRICACIÓN POR DEPOSICIÓN FUNDIDA, O EN ALGUNO DE SUS PASOS INTERMEDIOS.	106
TABLA 11. PATENTES RELEVANTES POR EL USO DE LA ENERGÍA SOLAR PARA EL MODELADO O FABRICACIÓN POR DEPOSICIÓN FUNDIDA, O EN ALGUNO DE SUS PASOS INTERMEDIOS (CONTINUACIÓN).	107

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. CLASIFICACIÓN DE LOS CIRCUITOS IMPRESOS (NAKAHARA, 2008, p. 5.2). SIGNIFICADO DE SIGLAS: SINGLE SIDED BOARD (SSB), DOUBLE SIDED BOARD (DSB), MULTILAYER BOARD (MLB), PLATED-THROUGH-HOLE (PTH).	3
FIGURA 2. SECUENCIA DEL PROCESO DE FOTOLITOGRAFÍA POSITIVA Y NEGATIVA PARA LA OBTENCIÓN DE UN PCB. EN AMBOS CASOS EL PROCESO ES SUSTRACTIVO. (CONAGHAN, 2008, p. 26.2).	5
FIGURA 3. ESQUEMA QUE ILUSTRAS EL PROCESO DE OBTENCIÓN DEL PATRÓN DEL CIRCUITO MEDIANTE LÁSER DIRECTO (LDI) (SÜLLAU ET AL., 1999; BARBUCHA ET AL., 2005, p. 2).	7
FIGURA 4. COMPARACIÓN ENTRE LOS PROCESOS DE GRABADO MEDIANTE LÁSER DIRECTO (LDI) (A LA IZQUIERDA) Y MICRO-MAQUINADO CON LÁSER (A LA DERECHA) (SÜLLAU ET AL., 1999; NOWAK ET AL., 2013, p. 321).	9
FIGURA 5. COMPARACIÓN ENTRE LOS PASOS DEL PROCESO DE GRABADO DE CIRCUITOS IMPRESOS MEDIANTE FOTOLITOGRAFÍA (ARRIBA), Y LOS PASOS ELIMINADOS MEDIANTE LA IMPRESIÓN SELECTIVA DE LA CAPA PROTECTORA (ABAJO) (SCOTT, 2005, p. 35).	10
FIGURA 6. CONCENTRADOR SOLAR CON LENTE DE FRESNEL Y CAMA DE ARENA USADOS PARA LA IMPRESIÓN EN 3D DE FIGURAS DE VIDRIO (KAYSER, 2011).	40
FIGURA 7. ESCULTURA DE VIDRIO IMPRESA MEDIANTE EL CONCENTRADOR SOLAR Y CAMA DE ARENA DE MARKUS KAYSER (KAYSER, 2011).	40
FIGURA 8. FIGURA EN FORMA DE S IMPRESA MEDIANTE SINTERIZADO SOLAR EN 3D (IMHOF ET AL., 2017, p. 13).	41
FIGURA 9. IMPRESORA SOLAR (SOLAR TANNING PRINTER) (SETH, 2011).	41
FIGURA 10. ESQUEMA DEL PROTOTIPO PARA REALIZAR EL GRABADO DE CIRCUITOS IMPRESOS MEDIANTE ESC.	48
FIGURA 11. PIEZAS DESARROLLADAS MEDIANTE SOFTWARE DE CAD QUE CONFORMAN AL RECEPTOR SOLAR. DE IZQUIERDA A DERECHA, LAS PIEZAS SON LA TAPA, CUERPO Y BASE DEL RECEPTOR.	51
FIGURA 12. ENSAMBLE DE LAS PIEZAS QUE CONFORMAN AL RECEPTOR SOLAR.	52
FIGURA 13. TOTAL DE PIEZAS INVOLUCRADAS EN EL ENSAMBLE DEL RECEPTOR SOLAR.	52
FIGURA 14. SECUENCIA DEL ENSAMBLE DE LAS PIEZAS QUE CONFORMAN AL RECEPTOR SOLAR. EN EL INCISO “A” SE MUESTRAN LA TAPA Y SU TORNILLERÍA, EN “B” EL ENSAMBLE DE ÉSTAS. EN “C” SE MUESTRAN LAS PIEZAS QUE CONFORMAN EL ENSAMBLE CUERPO Y TAPA. EN “D” SE OBSERVAN UNIDOS EL CUERPO Y LA TAPA, ASÍ COMO LA BASE Y ELEMENTOS RESTANTES. ESTOS ÚLTIMOS SE USARÁN PARA EL ENSAMBLE FINAL UNA VEZ QUE EL ARREGLO DE MATERIALES SE ENCUENTRE EN POSICIÓN.	53
FIGURA 15. MATERIALES INVOLUCRADOS EN EL ARREGLO ALOJADO AL INTERIOR DEL RECEPTOR	54
FIGURA 16. ELEMENTOS PARA REALIZAR EL GRABADO DE LAS TRINCHERAS SOBRE EL SUSTRATO (IZQUIERDA) Y LOS RESULTADOS DEL PROCESO PARA UN CIRCUITO EN PARTICULAR (DERECHA).	54
FIGURA 17. SUSTRATO PETG Y SUS ALAMBRES RESPECTIVOS PARA CADA TRINCHERA (IZQUIERDA). BASE DEL RECEPTOR, SUSTRATO DE PETG Y TARJETA FENÓLICA FR4 (DERECHA).	55
FIGURA 18. SUSTRATO DE PETG CON ALAMBRES COLOCADOS, SEGUIDO POR UNA TARJETA FENÓLICA FR4, EN POSICIÓN SOBRE LA BASE DEL RECEPTOR.	55
FIGURA 19. ARREGLO DE MATERIALES ALOJADO AL INTERIOR DEL RECEPTOR SOLAR, LISTO PARA SU EXPOSICIÓN A ESC (IZQUIERDA). DETALLE DE LAS PISTAS GRABADAS SOBRE EL SUSTRATO DE PETG CON ALAMBRE EMBEBIDO Y MATERIAL CONDUCTOR COLOCADOS (DERECHA).	56
FIGURA 20. SUSTITOS DEL ARREGLO DE MATERIALES CON UNA SIMULACIÓN DEL CIRCUITO DE INTERÉS (IZQUIERDA). MONTAJE DEL SUSTITUTO AL INTERIOR DEL RECEPTOR SOLAR (DERECHA).	57
FIGURA 21. FOCOS RESULTANTES DE LA EXPOSICIÓN DEL SUSTITUTO AL HAZ SOLAR CONCENTRADO A 140 MM DE LA LENTE DE FRESNEL.	57
FIGURA 22. BOSQUEJO DE LAS DIMENSIONES DE LAS PISTAS DEL CIRCUITO DE PRUEBA (IZQUIERDA) E ILUSTRACIÓN DE LOS FOCOS ELÍPTICOS OBTENIDOS A 140 MM DE DISTANCIA A LA LENTE DE FRESNEL (DERECHA, A 84.3° EN COLOR ROJO Y 81.4° EN COLOR VERDE, DE ELEVACIÓN). MEDIDAS EN MM.	58
FIGURA 23. ESQUEMA Y RESUMEN DE LOS FACTORES PRINCIPALES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE LA LENTE DE FRESNEL (VICTORIA ET AL., 2016, p. 408).	61
FIGURA 24. ESQUEMA COMPLETO DE LOS MATERIALES, COMPONENTES Y SECUENCIA DE GRABADO DE CIRCUITOS IMPRESOS MEDIANTE ESC.	64
FIGURA 25. ESQUEMA PARA LA DEFINICIÓN DE DOMINIOS, INTERACCIONES DE CALOR, DIMENSIONES E INTERFACES DE CADA UNO DE LOS ELEMENTOS DEL ARREGLO DE MATERIALES	66
FIGURA 26. ENSAMBLE DEL ARREGLO DE MATERIALES PARA UN FOCO DE 15x13 MM Y UNA PISTA EN FORMA DE L, CON 1 MM DE PROFUNDIDAD (IZQUIERDA). EL ALAMBRE EMBEBIDO AL FONDO DE LA PISTA, RODEADO POR EL MATERIAL CONDUCTOR (DERECHA).	73
FIGURA 27. CONCENTRADOR SOLAR CON LENTE DE FRESNEL Y EQUIPO USADO PARA LA EXPERIMENTACIÓN (IZQUIERDA). DETALLE DE LOS DIFERENTES INSTRUMENTOS UTILIZADOS (DERECHA).	82
FIGURA 28. CONFIGURACIÓN ALTERNATIVA DE LOS INSTRUMENTOS	82

FIGURA 29. DIAGRAMA DE INSTRUMENTACIÓN	82
FIGURA 30. SECUENCIA DE EXPOSICIÓN DEL CIRCUITO AL HAZ SOLAR CONCENTRADO	83
FIGURA 31. CIRCUITO IMPRESO OBTENIDO MEDIANTE GRABADO ADITIVO IMPULSADO POR ESC.	85
FIGURA 32. ELEMENTOS DE MONTAJE SUPERFICIAL MONTADOS SOBRE EL CIRCUITO DE PRUEBA (IZQUIERDA) Y PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO (DERECHA).....	85
FIGURA 33. OTROS CIRCUITOS ELABORADOS MEDIANTE EL MISMO PROCEDIMIENTO, SE MUESTRAN TANTO CIRCUITO IMPRESO OBTENIDO COMO PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO. EN A SE OBSERVA UN CIRCUITO DONDE LA LUMINOSIDAD DEL LED DEPENDE DE LA ILUMINACIÓN PRESENTE SOBRE LA FOTORRESISTENCIA. EN B SE MUESTRA UN CIRCUITO CUYO POTENCIÓMETRO SE ENCARGA DE REPARTIR LA ENERGÍA ENTRE LOS LEDs' CONECTADOS. C Y D MUESTRAN CIRCUITOS CON TEMPORIZADORES 555, C ESTÁ EN CONFIGURACIÓN MONOESTABLE Y D EN AESTABLE.	86
FIGURA 34. IMAGEN DE LAS VEINTE PRUEBAS REALIZADAS DE UNA PISTA EN FORMA DE L	87
FIGURA 35. IMÁGENES DE ALGUNOS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES. LAS IMÁGENES A) Y B) SON DE LA PRUEBA 03E (VISTA FRONTAL Y POSTERIOR), LAS IMÁGENES C) Y D) SON DE LA PRUEBA 04B (VISTA FRONTAL Y POSTERIOR) Y LAS IMÁGENES E) Y F) QUE MUESTRAN CORTES A LO LARGO DE LAS PISTAS PERTENECIENTES A PRUEBAS CON CIRCUITOS COMPLETOS. ESCALA EN MM.....	88
FIGURA 36. SIMULACIONES DEL ARREGLO DE MATERIALES REALIZADAS MEDIANTE EL SOFTWARE COMSOL MULTIPHYSICS®. LA IMAGEN SUPERIOR MUESTRA EL INTERIOR DE LA PISTA, MIENTRAS QUE LA INFERIOR MUESTRA EL ARREGLO DE MATERIALES COMPLETO.	91
FIGURA 37. DIAGRAMA MOSTRANDO LA RELACIÓN ENTRE LA EFICIENCIA GENERAL DEL SISTEMA, LA RADIACIÓN SOLAR DIRECTA Y EL TIEMPO DE EXPOSICIÓN DE CADA PRUEBA. CADA PUNTO REPRESENTA UNO DE LOS EXPERIMENTOS LLEVADOS A CABO BAJO SUS CONDICIONES PARTICULARES DE IRRADIACIÓN, TIEMPO DE EXPOSICIÓN Y EFICIENCIA GENERAL DEL SISTEMA.	92
FIGURA 38. SUPERFICIE AJUSTADA A LOS PUNTOS EXPERIMENTALES LLEVADOR A CABO. LA RELACIÓN ENTRE LA RADIACIÓN SOLAR DIRECTA, LA EFICIENCIA GENERAL Y EL TIEMPO DE EXPOSICIÓN SE PUEDE OBSERVAR	93
FIGURA 39. INYECTOR DE PCL AUXILIADO MEDIANTE ESC.	108
FIGURA 40. SUSTRATOS CON PISTAS CONDUCTORAS ALOJADAS.....	108
FIGURA 41. MOLDES PARA EL DEPÓSITO DEL MATERIAL TERMOPLÁSTICO (IZQUIERDA), MOLDE CON TARJETA FENÓLICA O PLANCHA (DERECHA)...	109
FIGURA 42. SECUENCIA PARA LA DEPOSICIÓN DE PCL SOBRE EL MOLDE CUADRADO.	110
FIGURA 43. TEMPERATURA DE LA BOQUILLA A LO LARGO DEL DEPÓSITO DE MATERIAL SOBRE UN MOLDE CUADRADO.....	111
FIGURA 44. UBICACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN Y ESQUEMA DEL SISTEMA.	112
FIGURA 45. DEPÓSITO DE LAS PISTAS CONDUCTORAS SOBRE EL SUSTRATO CUADRADO DE PCL.....	112
FIGURA 46. SUSTRATOS DE PCL OBTENIDOS A TRAVÉS DE FABRICACIÓN MEDIANTE FILAMENTO FUNDIDO AUXILIADO MEDIANTE ESC.	112
FIGURA 47. CIRCUITOS OBTENIDOS A PARTIR DE LOS SUSTRATOS DE PCL.	113
FIGURA 48. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE CADA UNO DE LOS CIRCUITOS OBTENIDOS A TRAVÉS DE FABRICACIÓN MEDIANTE FILAMENTO FUNDIDO DE PCL AUXILIADO POR ESC.	113
FIGURA 49. PROCESO DE INCLUSIÓN DE PISTAS EMBEBIDAS SOBRE UN SUSTRATO BASE Y LA COLOCACIÓN DE UN SEGUNDO SUSTRATO Y PISTAS CORRESPONDIENTES.	115
FIGURA 50. CIRCUITOS DE DOS PISOS Y PISTAS EMBEBIDAS DE POLI(E-CAPROLACTONA). SE MUESTRA UN CIRCUITO SIN ELEMENTOS Y OTRO CON ELEMENTOS Y MOSTRANDO PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO.	116
FIGURA 51. NUEVO DISEÑO DE RECEPTOR SOLAR CON SUJETADOR DE MOLDES (IZQUIERDA) Y PISTAS EMBEBIDAS PARA LA CONFORMACIÓN DE CIRCUITOS INSERTADOS A JUMPERS (DERECHA).	117
FIGURA 52. SE RECALENTÓ EL SUSTRATO EN LAS ZONAS DONDE SE UBICARÍAN PISTAS DEL CIRCUITO DESEADO. A LA IZQUIERDA SE PUEDEN OBSERVAR LAS PISTAS INSERTADAS, Y A LA DERECHA SE OBSERVAN LOS GRADIENTES DE TEMPERATURA PRESENTES EN EL PROCESO.	117
FIGURA 53. CIRCUITO ELÉCTRICO LISTO PARA USARSE (IZQUIERDA), PRUEBA DE OPERACIÓN (DERECHA).....	117
FIGURA 54. PROCESO DE OBTENCIÓN DEL SUSTRATO DEL CIRCUITO MOSTRADO.	118
FIGURA 55. OTROS CIRCUITOS OBTENIDOS USANDO LA MISMA TÉCNICA, SE MUESTRA CADA UNO CON SU PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO. (A) CIRCUITO CON APAGO RETARDADO, (B) CIRCUITO CON TRANSISTOR Y LDR, (C) CONTROL DE VOLTAJE PARA MOTORES DE DC Y CIRCUITO QUE INDICA LA POTENCIA SUMINISTRADA.	119

TABLA DE SIMBOLOS

α_{Cu}	Absortividad de la capa de cobre de la tarjeta fenólica
α_{CON}	Absortividad del material conductor
α_{WIN}	Absortividad del material de la ventana del receptor
α_{SUS}	Absortividad del sustrato termoplástico
A_{in}	Área de la apertura de entrada de la lente de Fresnel
A_{out}	Área del foco a la salida de la lente de Fresnel
L_{CON}	Calor latente de fusión del material conductor
c_{pWIRE}	Capacidad térmica específica del alambre embebido a presión constante
c_{pCu}	Capacidad térmica específica del cobre de la tarjeta a presión constante
c_{pCON}	Capacidad térmica específica del material conductor a presión constante
c_{pWIN}	Capacidad térmica específica de la ventana del receptor a presión constante
c_{pSUB}	Capacidad térmica específica del sustrato termoplástico a presión constante
h_{WIN}	Coefficiente de transferencia de calor por convección
V_{Xend}	Coordenada para indicar el largo de la ventana del receptor
V_{Zend}	Coordenada para indicar el espesor de la ventana del receptor
C_{Xend}	Coordenada para indicar el largo de la trinchera sobre el sustrato
C_{Zini}	Coordenada para indicar la ubicación de la superficie de la trinchera
C_{Zend}	Coordenada para indicar la ubicación del fondo de la trinchera
W_{Xend}	Coordenada para indicar el largo del alambre embebido
W_{Zini}	Coordenada para indicar la ubicación de la cara superior del alambre embebido
W_{Zend}	Coordenada para indicar la ubicación de la cara inferior del alambre embebido
U_{Xend}	Coordenada para indicar el largo de la tarjeta fenólica
U_{Zini}	Coordenada para indicar la ubicación de la superficie de la capa de cobre
U_{Zend}	Coordenada para indicar la ubicación del fondo de la capa de cobre
k_{WIRE}	Conductividad térmica del alambre embebido
k_{Cu}	Conductividad térmica del cobre de la tarjeta fenólica
k_{CON}	Conductividad térmica del material conductor eléctrico
k_{SUB}	Conductividad térmica del sustrato termoplástico
k_{WIN}	Conductividad térmica de la ventana del receptor
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
ρ_{WIRE}	Densidad del alambre embebido al interior de la pista
ρ_{Cu}	Densidad de cobre de la tarjeta fenólica

ρ_{CON}	Densidad del material conductor eléctrico
ρ_{WIN}	Densidad del material de la ventana del receptor
ρ_{SUB}	Densidad del sustrato termoplástico
η_g	Eficiencia general de la lente de Fresnel
ϵ_{WIRE}	Emisividad del alambre embebido al fondo de la pista
ϵ_{Cu}	Emisividad del cobre de la tarjeta fenólica
ϵ_{CON}	Emisividad del material conductor
$\zeta(t)$	Frente o límite que separa las fases sólida y líquida del material conductor
IAS	Interface alambre-sustrato
$ICAsup$	Interface conductor-alambre cara superior
$ICAlat$	Interface conductor-alambre cara lateral
$ICSinf$	Interface conductor-sustrato cara inferior
$ICSlat$	Interface conductor-sustrato cara lateral
IVC	Interface ventana-conductor
IVS	Interface ventana-sustrato
G_{in}	Irradiación promedio en la apertura de entrada de la lente de Fresnel
G_{Cu}	Irradiación promedio sobre la capa de cobre de la tarjeta fenólica
G_{CON}	Irradiación promedio sobre el material conductor
G_{out}	Irradiación promedio presente en el foco de la lente de Fresnel
P_{in}	Poder radiante presente a la entrada de la lente de Fresnel
P_{out}	Poder radiante presente a la salida de la lente de Fresnel
T_{amb}	Temperatura ambiente
T_{WZend}	Temperatura superficial en la cara inferior del alambre embebido
T_{CZend}	Temperatura superficial en la cara inferior del material conductor
T_{CXend}	Temperatura superficial en la pared de la trinchera
T_{UZini}	Temperatura superficial en la cara superior de la capa de cobre
T_{CZini}	Temperatura superficial en la cara superior del material conductor
T_{VZO}	Temperatura superficial al exterior de la ventana del receptor
τ_{WIN}	Transmisibilidad de la ventana del receptor
τ_{SUB}	Transmisibilidad del sustrato termoplástico

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN.....	IV
ABSTRACT.....	V
LISTA DE TABLAS	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
TABLA DE SIMBOLOS.....	IX
OBJETIVO:	1
HIPÓTESIS.....	1
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.....	2
1.1. Breve descripción de los Circuitos Impresos	2
1.1.1. Los circuitos impresos y el medio ambiente	5
1.2. Métodos Sustractivos mediante Láser para la elaboración de circuitos impresos	6
1.3. La Manufactura Aditiva y los circuitos impresos	10
1.3.1. La manufactura aditiva y la escritura directa de circuitos impresos	12
1.3.2. Tintas, polímeros y otros materiales conductores usados en la escritura directa de circuitos impresos	14
REFERENCIAS	18
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.....	26
2.1. Investigaciones relevantes en torno al uso de la energía solar concentrada para la modificación superficial de materiales.....	26
2.2. Patentes relevantes donde se usa la Energía Solar para el grabado de circuitos impresos.....	35
2.3. Descripción de métodos de grabado de circuitos impresos relevantes al proyecto.....	37
2.4. Proyectos de Investigación relevantes.....	39
REFERENCIAS	42
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE GRABADO ADITIVO CON ESC Y MODELO DEL FENÓMENO	48
3.1. Descripción del receptor solar para realizar el grabado de circuitos impresos	48
3.1.1. Diseño de detalle del prototipo	51
3.1.2. Metodología para grabar circuitos impresos mediante ESC.....	53
3.2. Modelo de la interacción entre haz solar y arreglo de materiales	59
3.2.1. Simulación del arreglo de materiales en el software COMSOL®.....	73
REFERENCIAS	76
CAPÍTULO 4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS	81

4.1. Exposición del arreglo al haz solar concentrado	81
4.1.1. Armado del circuito	84
4.2. Resultados experimentales	86
4.3. Resultados del modelo matemático	89
REFERENCIAS	94
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	95
5.1. Metodología para el grabado de circuitos impresos mediante ESC	95
5.2. Posibles causas del error entre resultados experimentales y simulación.....	95
5.3. Similitudes entre las uniones híbridas obtenidas y el estado de arte.....	97
5.4. Trabajo a futuro	98
REFERENCIAS	99
CONCLUSIONES	100
ANEXO A: LA POLI(ϵ -CAPROLACTONA) Y TRABAJO A FUTURO.....	102
Metodología para la creación de sustratos mediante ESC	107
Módulos funcionales	116
REFERENCIAS.....	120

OBJETIVO:

General:

Desarrollar un método y sistema, que emplee **E**nergía **S**olar **C**oncentrada (ESC), para realizar el grabado de sustratos y con ello obtener circuitos impresos. Mediante esto se innovará en las aplicaciones de la ESC, e incluirá a la energía solar y a los sistemas de concentración entre los diferentes métodos y dispositivos disponibles para el grabado de circuitos impresos.

Particulares:

- Determinar el método de grabado que mejor se ajuste a las características de los concentradores solares de imagen.
- Diseñar e implementar el receptor adecuado, con el cual llevar a cabo el grabado de sustratos y la obtención del circuito impreso.

HIPÓTESIS

Por medio de un haz solar concentrado y seleccionando el método de grabado más adecuado a las características de los concentradores solares de imagen, es posible el desarrollo de un sistema encargado de realizar el grabado de un sustrato para la obtención de circuitos impresos.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1. Breve descripción de los Circuitos Impresos

Desde que el ser humano entendió los principios que gobiernan a la electricidad y pudo darle aplicaciones útiles para su vida diaria, surgió la necesidad de elaborar circuitos eléctricos. Con el paso del tiempo y el surgimiento de la electrónica; las capacidades, funciones y tareas útiles de este tipo de dispositivos se vio aumentada.

El Embalaje Electrónico (*electronic packaging*) es la disciplina encargada del desarrollo de las diversas tecnologías que han permitido la miniaturización y fabricación de estos circuitos. Entre estas tecnologías se encuentran los circuitos impresos (PWB, *printed wiring board* o PCB, *printed circuit board*) que son los elementos que funcionan como la base que permite la interconexión entre los diferentes componentes que conforman al circuito electrónico (Coombs et al., 2008, p. 2.3; Nakahara, 2008, p. 5.1).

Los circuitos impresos corresponden al segundo nivel de embalaje electrónico; el primer nivel corresponde a los circuitos integrados y el tercer nivel corresponde a todo lo que supere los dos previos; por ejemplo, circuitos integrados unidos entre sí y montados sobre un circuito impreso (Ritchey, 2008, p. 13.9).

Existen diferentes tipos de PCB que, a su vez, se pueden clasificar bajo diferentes criterios, tal y como se observa en la Figura 1. Nakahara (2008) propone la siguiente a partir del proceso por el cual se obtuvieron las pistas que conforman al circuito (Macleod, 2002, p. 45 - 46; Nakahara, 2008, p. 5.1 - 5.2; Kikkert, 2013, p. 277):

- a) Substractiva: En este proceso se retira el cobre no deseado de la placa fenólica y se deja aquél que forma la pista de conexión deseada. Esto se lleva a cabo; por ejemplo, mediante ataque químico (*etching*), fresado con una máquina CNC o ablación directa mediante láser.
- b) Aditiva: En este proceso, se adhiere cobre o un material conductor a la placa en los sitios deseados. Existen varios mecanismos para llevar esto a cabo, entre ellos: revestimiento de cobre, cribado (*screening*) de pasta o plásticos conductores, técnicas de impresión mediante láser y tendido de alambre aislado.

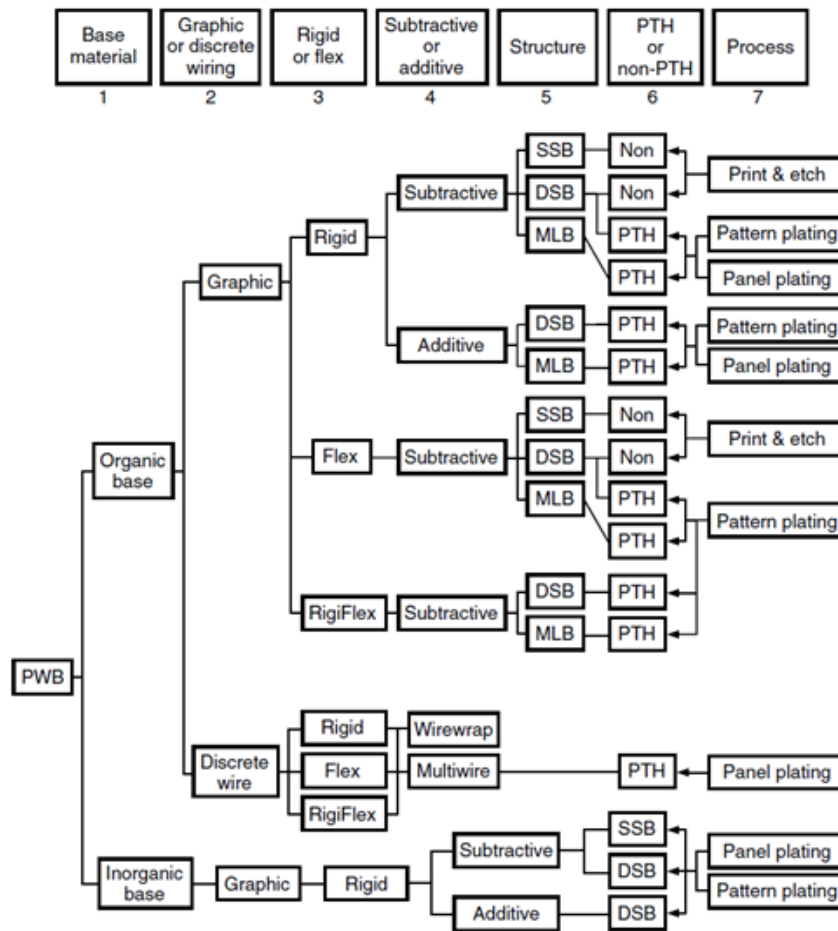


Figura 1. Clasificación de los circuitos impresos (Nakahara, 2008, p. 5.2). Significado de siglas: Single Sided Board (SSB), Double Sided Board (DSB), Multilayer Board (MLB), Plated-Through-Hole (PTH).

En el esquema de la Figura 1, se observa que existe una clasificación entre los PCB en cuanto a la forma de interconexión de sus componentes: discreto o gráfico. En los circuitos con interconexión discreta, se realiza la conexión entre los componentes mediante la adhesión de alambres de cobre aislados a un sustrato, uno por uno; el proceso no es adecuado para la producción en masa (Nakahara, 2008, p. 5.4).

Para el caso de los circuitos con interconexión gráfica, existen diferentes métodos para fabricarlos, en el más común de ellos, la fotolitografía, se crea una imagen del patrón del circuito en algún material fotosensible (llamada lámina foto-resistiva) adherido a una placa; por ejemplo, una tarjeta fenólica (Nakahara, 2008, p. 5.3 - 5.4). La mayoría de los PCB que se producen son de interconexión gráfica y existen de tres tipos (Nakahara, 2008, p. 5.6): placas de una sola cara, de dos caras y con multiplicidad de láminas conductoras.

Las placas con una sola cara se suelen denominar como “placas de imprimir y grabar” (*print-and-etch boards*), esto se debe a que se traslada el patrón a la placa mediante alguna técnica (*imaging*), dejando una impresión del patrón del circuito formada por tinta resistente al ataque químico para la remoción del cobre no deseado (Nakahara, 2008, p. 5.6).

La velocidad de la línea de producción de los PCB de una sola cara está en el intervalo de 30 hasta 45 pies/min (Nakahara, 2008, p. 5.7). Suelen usarse para circuitos que se producen en gran volumen y de complejidad relativamente baja, su proceso de fabricación es el siguiente (Nakahara, 2008, p. 5.6):

1. Corte de las placas de dimensiones estándar al tamaño requerido.
2. Colocación de las placas en el alimentador de la línea de producción.
3. Limpieza de la superficie de cobre de la placa.
4. Recubrimiento de la placa con tinta curable mediante luz ultravioleta y resistente al ataque químico (*photoresist*).
5. Curado de la tinta resistente al ataque químico (*imaging: expose and develop*).
6. Retiro del cobre expuesto mediante ataque químico (*etching*).
7. Limpieza de la superficie de la placa (*stripping*).
8. Aplicación de la película resistente a la soldadura.
9. Grabado de indicaciones y leyendas sobre la placa.
10. Barrenado de la placa mediante taladrado o punzado.
11. Pruebas para verificar que esté libre de falsos contactos o cortos circuitos.

El proceso de traslado de patrón (*imaging*) es aquel que permite darle un patrón a la superficie conductora de una tarjeta, para formar posteriormente al circuito (Conaghan, 2008, p. 26.1). Los materiales poliméricos foto-sensitivos usados en la industria son líquidos o películas secas formadas por una solución líquida. Funcionan, en un sentido fotográfico, en tono positivo o negativo; la diferencia entre ambos procesos son las reacciones químicas posteriores que se llevan a cabo para obtener al circuito (véase Figura 2) (Conaghan, 2008, p. 26.2).

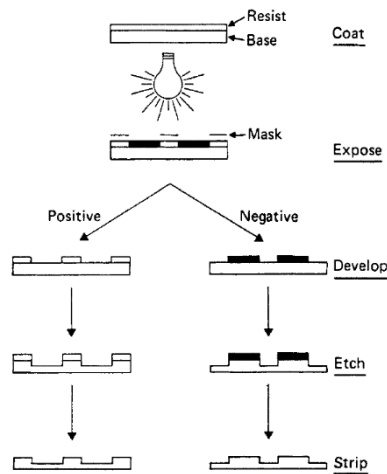


Figura 2. Secuencia del proceso de fotolitografía positiva y negativa para la obtención de un PCB. En ambos casos el proceso es sustractivo. (Conaghan, 2008, p. 26.2).

1.1.1. Los circuitos impresos y el medio ambiente

Actualmente, la industria electrónica, a pesar de que es posible que ésta sea sustentable, ha tenido un avance tal que ha propiciado un aumento del consumo de estos productos; requiriendo más recursos (tanto de materias primas como de energía) para cubrir la demanda, generando así más desechos y emisiones de gases contaminantes (Nägele et al., 2005, p. 26).

Se han realizado estudios para el reciclaje de circuitos impresos, evaluaciones del ciclo de vida de éstos y los productos que los emplean; pero pocos estudios se han llevado a cabo en aspectos de consumo de energía para su manufactura (Kanth et al., 2010; Bogdanski et al., 2012; Esfandyari et al., 2015, p. 305).

Se sabe que el proceso de serigrafiado (*screen-printing*) de los circuitos impresos produce tres flujos de desechos sobre la plantilla (Worhach et al., 1997; Esfandyari et al., 2015, p. 308): pasta de soldadura residual, soldadura y los solventes y agua usada para limpiar la plantilla.

Por otra parte, si se usa un proceso de impresión de tinta conductora para las interconexiones, se eliminan los pasos de retiro de cobre (*etching*) y limpieza de la placa (Kunnari et al., 2009; Esfandyari et al., 2015, p. 309). La ventaja de eliminación de pasos en la manufactura de los circuitos impresos también está presente en los métodos sustractivos de ablación directa (LDA), micro-maquinado con láser y de láser directo (LDI); y en casi todos los métodos aditivos.

Es necesario continuar las investigaciones y desarrollos vinculados a lograr que la industria electrónica se vuelva sustentable. Canal et al. (2013), han señalado que son necesarias nuevas investigaciones para encontrar alternativas a los procesos tradicionales de manufactura, materiales utilizados y tecnologías de los PCB; sin embargo, este tema no ha atraído la atención de los investigadores en el ramo, ni de la industria (2013, p. 304).

Motivado por este último señalamiento, se vislumbra como oportunidad buscar alternativas para el traslado del patrón a las placas (*imaging*), debido a que se han realizado pocos estudios en éste y otros aspectos suyos como su consumo de energía para manufactura, pero se sabe que algunos de los métodos existentes consumen mucha energía.

1.2. Métodos Sustractivos mediante Láser para la elaboración de circuitos impresos

El método estándar para el grabado de circuitos impresos en la industria es la fotolitografía; con auxilio de sustancias para el retiro del material no deseado de las tarjetas fenólicas (tanto de la capa foto-resistiva como de la placa de cobre de la tarjeta).

Además de los desechos que este método genera, se derivan ciertos problemas del proceso de *Registro* (que consiste en el acomodo preciso de las máscaras o foto-herramientas en los dispositivos de exposición); ejemplos de estos problemas son (Tachihara et al., 2002, p. 306; Sutter, 2005, p. 5 – 6; Conaghan, 2008, p. 26.16 – 26.20):

- Si se realiza un cambio en alguna parte o conexión del circuito, será necesario volver a fabricar la máscara en particular. Son delicadas placas rígidas de vidrio o polyester, que se diferencian entre ellas por propiedades ópticas, estabilidad dimensional y durabilidad. Requieren ser inspeccionadas para conocer si se han elaborado con suficiente precisión y si están libres de rayones o defectos.
- Derivado de los cambios en la temperatura ambiente o las que estén presentes durante el proceso, puede haber cambios en las dimensiones de las tarjetas fenólicas. Para solucionarlo se elaboran máscaras aumentadas o reducidas en un factor determinado por la expansión o encogimiento que puedan presentar las placas. Lo cual lleva a interrumpir el proceso para los cambios y ajustes necesarios, según ocurre este fenómeno durante el día.
- Se requieren espacio y mantenimiento para un almacenaje cuidadoso de las máscaras o foto-herramientas.

- Puede haber dispersión de luz sobre la máscara y extensión de pistas por falta de contacto entre la máscara y la película foto-resistiva, generando errores sobre el grabado del circuito.

Por estas razones se han investigado alternativas para llevar a cabo los procesos sustractivos de grabado, que no involucren el uso de foto-herramientas ni de sustancias o solventes en lo posible. Entre las soluciones ha surgido el Traslado de Patrón Digital (*Digital Imaging*), que son aquellas técnicas que crean una imagen compuesta por píxeles de valores discretos que se pueden leer, manipular y trasladar a la placa mediante un ordenador, y sin la intervención de una máscara o foto-herramienta (Sutter, 2005, p. 4).

Entre las principales técnicas que pertenecen a esta familia se pueden encontrar (Stampanoni, 2003, p. 14; Sutter, 2005, p. 4 - 5): La deposición de flujo guiado (*Flow-guided deposition*); impresión mediante tinta (*Ink-jet printing*); el traslado de patrón mediante acción térmica (*Thermal Direct Imaging, TDI*, el cual usa un líquido foto-resistivo curable con luz infrarroja de un diodo láser); Láser Directo (*Laser Direct Imaging, LDI*) y la Estructuración Directa mediante Láser (*Laser Direct Structuring, LDS*).

La técnica de **Láser directo** (*Laser Direct Imaging, LDI*) consiste en usar un láser como la luz de exposición para trazar el patrón del circuito directamente sobre la hoja foto-resistiva adherida a la placa (véase Figura 3), (Sutter, 2005, p. 4).

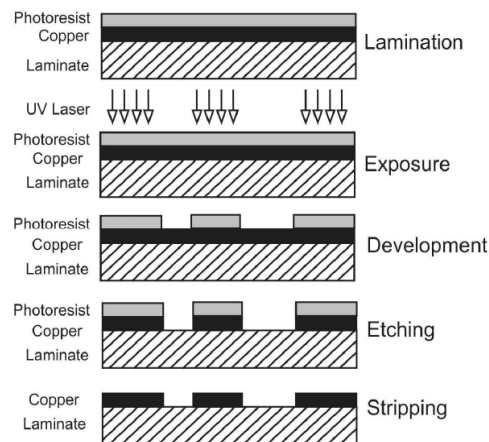


Figura 3. Esquema que ilustra el proceso de obtención del patrón del circuito mediante láser directo (LDI) (Süllau et al., 1999; Barbucha et al., 2005, p. 2).

Es importante decir que este método de exposición proporciona la mayor flexibilidad posible, debido a que no requiere foto-herramienta (o máscara). Se han usado láseres de Argón y de diodo, equipados con sistemas de espejos poligonales o dispositivos digitales de espejo (*digital mirror devices, DMD*), con longitudes de onda correspondientes a los rayos UV, para lograr anchos y espacios entre pistas de 50 μm , 25 μm y 8 μm (Barbucha et al., 2016, p. 43, 44; Barbucha et al., 2008, p. 1; Conaghan, 2008, p. 26.23 – 26.26).

Por otra parte, en la **Estructuración directa mediante láser** (*Laser Direct Structuring, LDS*), se emplea al láser para realizar los barrenos y el patrón sobre la placa de manera directa. Hasta el momento se usa para aplicaciones especializadas y a pequeña escala; cuenta con cuatro modalidades (Sutter, 2005, p. 5; Zhang et al., 2006, p. 818):

- **Mesoscale Technology.** Es una modalidad aditiva de LDS usado para el recubrimiento de barrenos y el trazo de patrones, donde un láser impulsa el material de recubrimiento colocado debajo de una placa transparente (*ribbon*), y ésta a su vez sobre y en contacto con el sustrato donde se depositará el material. Los materiales que se pueden depositar son variados, y requieren de un proceso posterior (por ejemplo, curado o sinterizado) para tener una adherencia permanente (Sutter, 2005, p. 5).
- **Sinterizado selectivo mediante láser** (*Selective Laser Sintering, SLS*) y **Fusión selectiva mediante láser** (*Selective Laser Melting, SLM*). Es una modalidad de LDS de tipo aditiva con posibilidad de cambio de fase; donde se usa un láser de alto poder para fusionar o fundir polvo de una cama sobre un sustrato. Es comúnmente empleada como una técnica de manufactura aditiva para la fabricación de prototipos en tres dimensiones, pero es capaz de realizar el trazo de un patrón de circuito sobre una tarjeta (Sutter, 2005, p. 5; Gu et al., 2012, p. 135; Nagarajan, et al., 2019, p. 703).
- **Ablación directa mediante láser** (*Laser Direct Ablation, LDA*). En esta modalidad se usa un láser para la ablación del material en un patrón. Se ha usado con éxito para el trazo de vías sobre placas de cobre de manera directa, placas de polímero óptico, máscaras de soldadura, recubrimientos de estaño sobre sustratos y capas foto-resistivas orgánicas (Sutter, 2005, p. 5; Zakariyah et al., 2009, p. 936).

Con esta modalidad se han obtenido anchos de pista de 50 μm , con espacios entre pistas de 25 μm , y una precisión de trazado de 2 μm , superando así la precisión obtenible en los procesos de grabado mediante ataque químico. Ya existen máquinas capaces de alcanzar velocidad suficiente para competir a nivel comercial, no requieren de químicos tóxicos para el proceso, pero si una gran cantidad de energía para el funcionamiento del láser (Kikkert, 2013, p. 284).

- **Micro-maquinado con láser** (*laser micromachining*). También se le conoce como estructurado de película resistiva mediante láser (*laser structuring of etch resist*) (Zhang et al., 2006, p. 818). Es una técnica intermedia entre dos ya mencionadas (LDI y LDA), que consiste en un proceso que ataca la película foto-resistiva, o alguna capa protectora del cobre, directamente; pero deja intacto al cobre del sustrato. En contraste con *láser directo* (LDI), esta técnica realiza el proceso de exposición y retiro de la fracción no curada de la película en un solo paso (*exposure and development*) (Nowak et al., 2013, p. 320).

Con esta técnica se han logrado obtener circuitos impresos con anchos y espacios entre pistas de 76 μm , incluso menores a 50 μm en algunos casos, con equipos láser cuyas longitudes de onda son de aproximadamente 1 μm ; el proceso se observa en la Figura 4 (Zhang et al., 2006, p. 818; Nowak et al., 2013, p. 323 - 324).

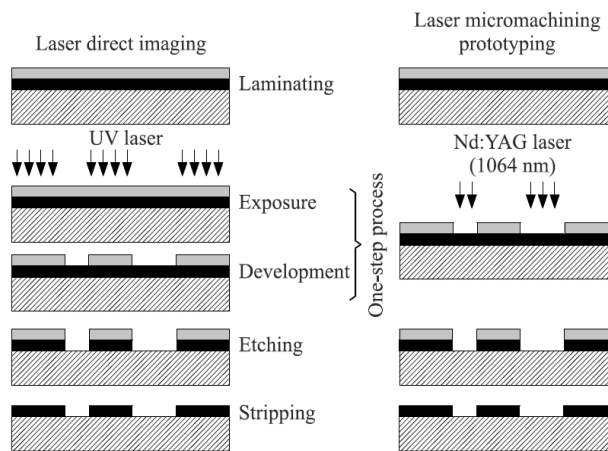


Figura 4. Comparación entre los procesos de grabado mediante láser directo (LDI) (a la izquierda) y micro-maquinado con láser (a la derecha) (Siüllau et al., 1999; Nowak et al., 2013, p. 321).

Entre los materiales que se han utilizado de capa protectora de cobre, o grabado mediante esta técnica, se encuentran (Srinivasan et al., 1989; Zhang et al., 2006, p. 818; Girardi et al., 2014; Criales et al., 2015; Contreras-Sáenz et al., 2017, p. 119): Polímeros orgánicos, metales (como películas de estaño), vidrio, cerámicas, tereftalato de polietileno (PET), poliimida, polimetilmetacrilato (PMMA), polidimetilsiloxano (PDMS), entre otros.

Adicionalmente, existe una variación de esta técnica donde se usa una impresora capaz de depositar tinta resistente al ataque químico, de manera selectiva, sobre la capa de cobre de la tarjeta fenólica; logrando con ello la reducción de pasos en el proceso de grabado como se ilustra en la Figura 5 (Scott, 2005, p. 35).

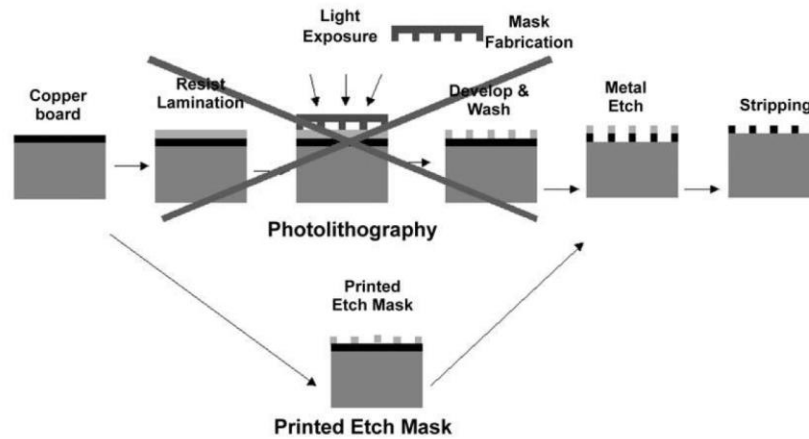


Figura 5. Comparación entre los pasos del proceso de grabado de circuitos impresos mediante fotolitografía (arriba), y los pasos eliminados mediante la impresión selectiva de la capa protectora (abajo) (Scott, 2005, p. 35).

Existen métodos alternativos, incluso “caseros”, para la obtención de un PCB, los cuales consisten en la adhesión de estampas sobre la tarjeta, usar un plumón de tinta permanente para pintar el patrón del circuito sobre la placa, la transferencia de la tinta de impresión que se hizo sobre un acetato (o cualquier material similar) a la placa o usar tinta conductora sobre alguna superficie que funcione como sustrato.

La mayoría de estos métodos realizan la misma tarea que la capa foto-resistiva después de la exposición, que es proteger las zonas de cobre que se quieren preservar durante el ataque químico sobre la placa. Otro tipo de método sustractivo, que es el fresado de tarjetas fenólicas para obtener circuitos impresos, mediante una máquina CNC, es usado para prototipos; y se debe de prestar atención en el tipo de sustrato de la tarjeta debido a que la fibra de vidrio que se usa en algunas es carcinógena (Kikkert, 2013, p. 279).

1.3. La Manufactura Aditiva y los circuitos impresos

La Manufactura Aditiva (AM), también conocida como impresión en 3D, es un conjunto de tecnologías y procesos que llevan a cabo la fabricación de una pieza mediante la adición sucesiva de las capas transversales que le conforman, partiendo de un modelo tridimensional, por ejemplo, el archivo CAD de la pieza (Gao et al., 2015, p. 65 - 66).

Esta rama de la manufactura tiene sus orígenes en la foto escultura (de la década de 1860) y en la topografía (de la década de 1890), cuya combinación dio por resultado la técnica de grabado mediante foto-glifos (patentada en 1951, otorgada en 1956) que consiste en la exposición a la luz, de manera sucesiva, de las capas transversales que conformaban a la pieza, utilizando una foto emulsión transparente (Munz, 1956; Gao et al., 2015, p. 66).

A su vez, las tecnologías asociadas a la manufactura aditiva cuentan con capacidades únicas (Gao et al., 2015, p. 67 - 68): Flexibilidad en el diseño, la complejidad geométrica no causa costos adicionales (no se requiere herramental ni operadores extra), precisión dimensional, se pueden producir conjuntos de piezas ya ensambladas entre ellas y eficiencia en tiempo y costo en un ciclo de producción (por ejemplo, una reducida producción de prototipos se puede iniciar de inmediato).

La Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales (*American Society for Testing of Materials, ASTM International*) tiene la siguiente clasificación para los principales procesos asociados a la manufactura aditiva (ASTM F2792, 2013; Gao et al., 2015, p. 69 -70):

- **Extrusión de Material (*Material Extrusion*):** Introducido por Scott Crump en 1988, consiste en la extrusión de algún material termoplástico fundido (por ejemplo, ABS o PLA) sobre un sustrato, de manera que se irá formando la pieza en particular a partir de las capas depositadas de este material. Ejemplos de tecnologías que usan este proceso son: Modelado por deposición fundida (FDM) y elaboración de contornos.
- **Cama de fusión de polvos (*Powder Bed Fusion*):** Para estos procesos se requiere de un rayo de energía (por ejemplo, un láser o haz de electrones) para sinterizar de manera selectiva el polvo que se encuentra en un contenedor. Para la elaboración de las capas subsecuentes, un mecanismo vuelve a distribuir una nueva capa de polvo sobre el contenedor, el cual se fundirá de manera selectiva y adherirá a la capa anterior.

Ejemplos de tecnologías asociadas a este proceso son (Ehmann et al., 2005, p. 57; Gao et al., 2015, p. 69 -70): Deposición de polvo basado en rodillo para micro sinterizado por láser (*roll-based powder deposition for the micro-laser sintering*), sinterización selectiva por láser (SLS), sinterización de metal por láser directo (DMLS), fusión selectiva con láser (SLM) y fusión mediante haz de electrones (EBM).

- **Tina de fotopolimerización (*Vat Photopolymerization*):** Introducido por Charles Hull en 1984, mediante el primer sistema comercial de manufactura aditiva basado en la tecnología Estereolitografía (SLA). Consiste en usar un láser ultravioleta para selectivamente polimerizar resinas curables mediante UV, de esta manera se irá construyendo capa a capa la pieza en particular (Cooper, 2001; Noorani, 2006; Gao et al., 2015, p. 70).
- **Propulsión de material (*Material Jetting*):** En este proceso se va depositando, gota a gota, sobre un sustrato el material que conformará a la pieza en desarrollo, de manera similar a una impresora; es posible depositar cera y/o fotopolímero (Le, 1998; Calvert, 2001; de Gans et al., 2004; Gao et al., 2015, p. 70).

Existe una variación, la manufactura por deposición de forma (*Shape Deposition Manufacturing, SDM*), la cual puede realizar maquinados, o remoción del material de soporte de la pieza, a la par (Ehmann et al., 2005, p. 58).

- **Propulsión de adhesivos (*Binder Jetting*):** El material propulsado es una sustancia adhesiva o aglomerador, el cual se deposita de manera selectiva sobre un contenedor de polvo. La pieza se formará a partir de la aglomeración de las capas sucesivas de polvo que se irán depositando, y requerirá procesos posteriores para adquirir propiedades mecánicas adecuadas.
- **Laminación de hojas (*Sheet Lamination*):** Las piezas se crean a partir de perfiles cortados sobre láminas, los cuales luego se apilan y unen entre sí.
- **Deposición dirigida de energía (*Directed Energy Deposition*):** Consiste en la alimentación directa de polvo o un alambre al punto focal de un rayo de energía para crear una alberca de material derretido. Si se usa un sistema de movimiento multi eje, el proceso se torna en una máquina de soldado en tres dimensiones (Griffith et al., 1996; Atwood et al., 1998; Schlienger et al., 1998; Gao et al., 2015, p. 70).

Este proceso se usa fundamentalmente para la reparación de piezas debido a la deposición selectiva del material restaurador (Wilson et al., 2014; Gao et al. 2015, p. 70). También tiene la capacidad para realizar recubrimientos sobre las superficies de las piezas (Kathuria, 1997; Zhong et al., 2001; Gedda et al., 2002; Tuominen et al., 2003; Wilson et al., 2013; Gao et al., 2015, p. 70).

Ejemplos de tecnologías vinculados a este proceso son la red conformadora por láser (LENS) y la soldadura por haz electrónico (EBW).

1.3.1. La manufactura aditiva y la escritura directa de circuitos impresos

Muchos investigadores han aprovechado las capacidades de la manufactura aditiva para combinarla con las tecnologías de Escritura Directa (*Direct Write, DW*), para llevar a cabo la elaboración de circuitos impresos (Gao et al., 2015, p. 71).

También conocida como Escritura Digital (*Digital Writing*), o Impresión Digital (*Digital Printing*), es una familia de tecnologías, y procesos flexibles multi escala, que permiten la deposición selectiva de materiales funcionales para el traslado de un patrón de pistas conductoras a un sustrato; sin la necesidad de máscaras o capa foto resistiva (Church et al., 2000; Hon et al., 2008, p. 601; Kim et al., 2010, p. 2; Gao, et al., 2015, p. 72).

Algunos métodos convencionales que se incluyen en esta categoría son (Abas et al., 2016, p. 1; Espera et al., 2019, p. 247): Deposición química a partir de la fase vapor (CVD), deposición física a partir de la fase vapor (PVD), pulverización catódica (*sputtering*), flexografía, impresión offset, impresión en huecograbado (*gravure printing*) y serigrafía (*screen printing*).

Existen diversas técnicas y tecnologías de Escritura Directa, pero la mayoría de éstas se pueden agrupar en alguna de las cuatro categorías siguientes (Zhang et al., 2009, p. 498 - 501):

- **Basada en goteo (*Droplet-based direct writing*):** Son aquellos métodos que utilizan la eyección de gotas o partículas de un material líquido a través de una o varias boquillas.

Los ejemplos principales de estos métodos son: la impresión mediante chorro de tinta (*inkjet printing*), aerosoles (*aerosol jet printing*) (Zhang et al., 2009, p. 498 – 499), escritura mediante deposición de micro dispensación (*microdispensing deposition write, MDDW*) y deposición de materiales mesoescala sin máscara (*maskless mesoscale materials deposition, M3D*) (Kim et al., 2010, p. 1 - 2).

- **Basado en filamento, flujo o depósito continuo (*Filament-based or Flow-based direct writing*):** En este método, la deposición del líquido funcional se hace de manera continua mediante un flujo; los materiales utilizados en éstos tienen una viscosidad mayor con respecto a los sistemas basados en goteo. Ejemplos de tecnologías dentro de esta categoría son: MicroPen y nScript.
- **Basado en punta (*Tip-based direct writing*):** Este método consiste en el uso de una punta para depositar material en un sustrato y está dirigido para aplicaciones nano escala.

A esta categoría pertenecen: Nano pluma fuente (*Nanofountain pen, NFP*) (Hon et al., 2008, p. 612), nano litografía mediante punta sumergida (*dip-pen nanolithography, DPN*), su versión compatible con fuente de calor (*thermal dip-pen nanolithography, tDPN*) y litografía mediante pluma de polímero (*Polymer pen lithography*) (Zhang et al., 2009, p. 500).

- **Basado en haces de energía concentrada (*Energy beam-based direct writing*):** La Escritura Directa mediante haces de energía es una rama de las tecnologías de Escritura Directa que engloba aquellas que involucran el uso de un láser (*Laser Direct Write, LDW*) o un rayo focalizado de iones para la modificación, substracción o adición de materiales directamente sobre sustratos, con el fin de crear el patrón sin la necesidad de máscaras ni litografía (Arnold et al., 2007, p.23; Hon et al., 2008, p. 606 – 610; Piqué et al., 2008, p. 2).

La interacción del láser con el sustrato, o la superficie de trabajo, resulta en la modificación del material (por ejemplo, fundición o sinterizado) o su remoción (denominada ablación) de manera selectiva; incluso es posible la combinación de ambos efectos; por ejemplo, para obtener un circuito con componentes embebidos (Piqué et al., 2005; Piqué et al., 2006; Piqué et al., 2008, p. 2).

Uno de sus pioneros, Peter Soszek, describió un sistema para producir circuitos impresos en el cual se esparcía sobre la placa un adhesivo sensible al calor y una capa de polvo conductor; posteriormente se calentarían mediante un láser, o cualquier otro haz concentrado, aquellas zonas que conformarían al circuito, y removiendo el polvo no utilizado para futuros usos (Soszek, 1989, p. 268).

Ejemplos de tecnologías que se basan en este método son:

Grabado químico asistido mediante láser (*laser assisted chemical etching*) (Nowak et al., 1994, p. 492), transferencia posterior inducida por láser (*Laser Induced Backward Transfer*), consolidación de películas delgadas mediante láser (*laser consolidation of thin film solids*), polimerización multi fotón (*multi-photon polymerization*), rayo focalizado de iones (*Focussed ion beam, FIB*) (Hon et al., 2008, p. 608 - 610), fresar y llenar (*mill and fill, M&F*) y sus variaciones (Bhattacharya et al., 2009, p. 1 – 2), sistema de láser para micro recubrimiento (*laser micro-cladding system, LMCs*) (Cao et al., 2009, p. 1990), deposición química de vapor mediante láser (*Laser Chemical Vapor Deposition LCVD*), recubrimiento electrolítico o recubrimiento químico (*electroless*) con asistencia de láser (*electroless plating or electroplating with laser assistance*), escritura directa por evaporación asistida mediante matriz e impulsada por láser (*matrix assisted pulsed laser evaporation direct write, MAPLE-DW*), transferencia frontal inducida por láser (*laser induced forward transfer, LIFT*), escritura directa guiada por láser (*Laser Guided Direct Write, LGDW*), escritura directa mediante flujo dirigido (*Flow-Guided Direct Write, FGDW*) (Zhang et al., 2009, p. 500 – 501), estructurado mediante láser (*láser structuring process*) (Amend et al., 2010, p. 563), sistema de impresión y curado directo (*Direct Print/Cure system, DPC*) (Vatani et al., 2015, p. 1375), micro sinterizado por láser, litografía-recubrimiento electrolítico-moldeado (*lithography, electroplating, and molding, LIGA*) (Teh, 2017, p. 492), entre otros.

1.3.2. Tintas, polímeros y otros materiales conductores usados en la escritura directa de circuitos impresos

En la elaboración de circuitos impresos, por los métodos aditivos de Escritura Directa descritos antes, se emplean diferentes sustancias conductoras, cada una con sus respectivas propiedades, características y procesos para su activación.

Las tintas conductoras para impresión se componen de un material conductor diluido en un vehículo líquido (acuoso u orgánico) y varios aditivos (modificadores de tensión superficial y reología, humectantes, enlaces y antiespumantes) necesarios para su correcto desempeño y aplicación (Kamyshny et al., 2011; Kamyshny et al., 2012; Kamyshny et al., 2014, p. 3516).

Los materiales conductores de estas tintas pueden ser nanopartículas, nanomateriales basados en carbono (grafeno y nanotubos de carbono), compuestos organometálicos o polímeros conductores (Nir, et al., 2009; Kamyshny et al., 2011; Cummins et al., 2012; Kamyshny et al., 2014, p. 3516).

Cabe mencionar que también se han utilizado otro tipo de sustancias con características y propiedades diferentes a las tintas de impresión descritas; por ejemplo: Polvos de metal o complejos metal orgánicos contenidos en matriz de polímero y activados mediante láser (Amend et al., 2010, p. 562 – 563), metal líquido EGaIn (Trlica et al., 2014, p. 3 – 5), pastas metálicas conductoras (Gao et al., 2015, p. 70), adhesivo conductor isotrópico (ICA) (Espera et al., 2019, p. 255), entre otros.

Las propiedades requeridas por el circuito impreso son las que determinan la selección del material o tinta conductora; las cuales pueden ser conductividad, transparencia óptica, resistencia a la flexión, adhesión al sustrato utilizado, propiedades fisicoquímicas de la tinta y compatibilidad con el resto del sistema (Kamyshny et al., 2014, p. 3516).

Debido a que la mayoría de las tintas y sustancias utilizadas en los métodos de Escritura Directa se conforman de partículas conductoras, suspendidas en varias sustancias necesarias para su manejo y aplicación, se requieren de procesos posteriores para su activación; por ejemplo, curado, recocido y sinterizado.

Cada tinta conductora posee su propia temperatura de sinterizado para alcanzar la mejor conductividad posible; en general, se requieren temperaturas desde 200°C hasta 350°C, durante 10 hasta 60 minutos; pero hay aquellas que pueden requerir hasta 900°C, y en contraste existen reportes de algunas tintas y sus temperaturas de sinterizado menores a 200°C (Caglar et al., 2008; Scandurra et al., 2010; Yung et al., 2010; Chiolerio et al., 2011, p. 2481; Kamyshny et al., 2014, p. 3523).

Por otra parte, es posible alterar esta temperatura aplicando procesos de compresión al patrón del circuito o combinando diferentes tecnologías de sinterizado (Kim et al., 2008; Chiolerio et al., 2011, p. 2481; Cummins et al., 2012, p. 195). También se ha encontrado que la temperatura para el curado de tintas conductoras está relacionada con el tiempo del proceso; tal que tiempos de curado más prolongados permiten procesos a temperaturas menores (Kim et al., 2001; Pudas et al., 2003, p. 324).

Cabe mencionar que hay algunas tintas de nano partículas sensibles a la oxidación de sus partículas conductoras (por ejemplo, aquellas basadas en cobre), cuyo óxido causa la disminución de la conductividad eléctrica de la pista, aumenta la temperatura de sinterizado y es posible que obligue al uso de un sistema para la deposición de la tinta al vacío (Jeong, et al., 2008; Joo et al., 2012, p. 2878; Adner et al., 2014, p. 143).

A continuación, se describen las principales tecnologías de sinterizado utilizadas para la activación de las sustancias conductoras (Cummins et al., 2012, p. 200 – 201):

- **Sinterizado térmico:** Involucra el uso de hornos convencionales (de convección o de plato caliente), tiempos mayores a 30 minutos y temperaturas mayores a 200°C (Cummins et al., 2012, p. 200; Tobjörk et al., 2012, p. 2950). Puede causar que el sustrato del circuito se encoja, deforme, agriete o emita gases.
- **Sinterizado Eléctrico:** Se emplea el Efecto Joule, por el cual se eleva la temperatura de un conductor al hacer pasar una corriente elevada a través de él. El valor de dicha corriente depende de las características y dimensiones de la pista en cuestión (Allen, et al., 2008; Cummins et al., 2012, p. 200).

Se aplica una diferencia de potencial a cada pista y trazo del circuito, lo cual causa el flujo de una corriente a través de la película de nanopartícula y el calor que se genera por el Efecto Joule. Dependiendo de la complejidad del trazo del circuito, los procesos de sinterizado son menores a un minuto, los daños en el sustrato son reducidos y es posible monitorizar el proceso mediante lecturas de la corriente.

- **Sinterizado Fotónico:** Consiste en la absorción de energía luminosa por el circuito impreso, lo cual causa calentamiento a través de la disipación de energía no radiante y reacciones exotérmicas fotoquímicas.

En esta categoría se incluyen láseres, lámparas de destello, lámparas incandescentes, lámparas infrarrojas (IR), lámparas o exposición a radiación UV y otras fuentes luminosas semejantes (Radivojevic et al., 2006, p. 134; Yun et al., 2008a; Yun et al., 2008b; Kang et al., 2011; Rapp et al., 2011; Cummins et al., 2012, p. 201; Tobjörk et al., 2012, p. 2950; Shrivastava et al., 2020, p. 6).

- **Sinterizado mediante microondas:** Este proceso involucra el uso de microondas de una frecuencia cercana a 2.54 GHz, cuya profundidad de penetración es de 2 μm aproximadamente, y se puede realizar en tiempos más cortos a comparación de los métodos térmicos convencionales (alrededor de 3 minutos) (Perelaer et al., 2006; Cummins et al., 2012, p. 201).
- **Sinterizado mediante plasma:** El sinterizado por este proceso se logra al exponer al circuito impreso a una fuente de plasma de argón a baja presión; las pistas se irán sinterizando desde su exterior, con dirección a la superficie en contacto con el sustrato (Kamyshny et al., 2014, p. 3524).

- **Sinterizado a temperatura ambiente por agentes químicos:** Son métodos de sinterizado, desarrollables a temperatura ambiente, en donde agentes químicos inician o permiten la coagulación de las nano partículas conductoras de la tinta (Kamyshny et al., 2014, p. 3524).
- **Sinterizado mediante sustrato construido (*Substrate-Fabricated Sintering, SUFS*):** De manera previa a la deposición de tinta, al sustrato se le da un recubrimiento específico capaz de reaccionar y remover la liga estabilizadora de la tinta con nanopartículas, facilitando que las partículas conductoras entren en contacto (Allen, 2011; Zhang et al., 2012, p. 316).

REFERENCIAS

- Abas, M., & Rahman, K. (2016). *Fabrication of flex sensors through direct ink write technique and its electrical characterization*. Applied Physics A, Vol. 122, Article number 972. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0507-8>
- Adner, D., Wolf, F., Möckel, S., Perelaer, J., Schubert, U., & Lang, H. (2014). *Copper(II) ethylene glycol carboxylates as precursors for inkjet printing of conductive copper patterns*. Thin Solid Films, Vol. 565, p. 143 – 148. 2020, March 11, from ScienceDirect Database.
- Allen, M., Aronniemi, M., Mattila, T., Alastalo, A., Ojanperä, K., Suhonen, M., & Seppä, H. (2008). *Electrical sintering of nanoparticle structures*. Nanotechnology, Vol. 19 Issue 17, p. 175201.
- Allen, M. (2011). *Nanoparticle sintering methods and applications for printed electronics*. (Dissertation for the Doctoral Degree). Espoo, Finland: Aalto University. Recovered from: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/5020>
- Amend, P., Pscherer, C., Rechtenwald, T., Frick, T., & Schmidt, M. (2010). *A fast and flexible method for manufacturing 3D molded interconnect devices by the use of a rapid prototyping technology*. Physics Procedia, Vol. 5, p. 561 - 572. 2020, May 14, from ScienceDirect Database.
- ASTM F2792-12a, *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (Withdrawn 2015)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org
- Arnold, C., Serra, P., & Piqué, A. (2007). *Laser Direct-Write Techniques for Printing of Complex Materials*. MRS Bulletin, Vol. 32 Issue 1, p. 23-31. doi:10.1557/mrs2007.11
- Atwood, C., Griffith, M., Harwell, L., Schlienger, E., Ensz, M., Smugeresky, J., Romero, T., Greene, D., & Reckaway, D. (1998). *Laser engineered net shaping (LENS (tm)): A tool for direct fabrication of metal parts*. Journal of Laser Applications.
- Barbucha, R., & Mizeraczyk, J. (2016). *Recent progress in direct exposure of interconnects on PCBs*. Circuit World, 42/1, p. 42 - 47. 2019, June 22, From Emerald Insight Database.
- Barbucha, R., Kocik, M., Mizeraczyk, J., Kociol, G., & Borecki, J. (2005). *Laser direct imaging of high-density interconnect patterns on PCB*. Proceedings of SPIE, Vol. 6157, p. 1 - 8. 2019, June 22, From SPIE Database.
- Barbucha, R., Tánski, M., Kocik, M., Mizeraczyk, J., & Koziol, G. (2008). *Laser prototype system for creating high density patterns on PCB*. Proceedings of SPIE, Vol. 7131, p. 1 - 6. 2019, June 22, From SPIE Database.
- Bhattacharya, S., & Marinov, V. (2009). *Simple, inexpensive, and reliable, high density interconnect technology for flexible electronics applications*. 2009 Flexible Electronics & Displays Conference and Exhibition, Phoenix, AZ, p. 1 – 6, doi: 10.1109/FEDC.2009.5069277.

- Bogdanski, G., Schönemann, M., Thiede, S., Andrew, A., & Herrmann, C. (2013). *An extended energy value stream approach applied on the electronics industry*. Int Emmanouilidis. Taisch, D. Kiritsis ed. APMS 2012, Part I, IFIP AICT 397. Springer, Heidelberg. pp. 65 – 72.
- Caglar, U., Kaija K., & Mansikkamaki, P. (2008) *Analysis of mechanical performance of silver inkjet-printed structures*. 2008 2nd IEEE International Nanoelectronics Conference, Shanghai, p. 851-856, doi: 10.1109/INEC.2008.4585617.
- Calvert, P. (2001). *Inkjet printing for materials and devices*. Chem Mater 2001, Vol. 13 Issue 10, pp. 3299 - 3305.
- Canal, A., Cabrera, J., & de Fraga, C. (2013). *Printed circuit boards: A review on the perspective of sustainability*. Journal of Environmental Management, 131, 298 - 306. 2019, June 15, From ScienceDirect Database.
- Cao, Y., Zhou, L., Wang, X., Li, X., & Zeng, X. (2009). *MicroPen direct-write deposition of polyimide*. Microelectronic Engineering. Vol. 86, p. 1989 – 1993. 2020, April 21, from ScienceDirect Database.
- Chiolerio, A., Maccioni, G., Martino, P., Cotto, M., Pandolfi, P., Rivolo, P., Ferrero, S., & Scaltrito, L. (2011). *Inkjet printing and low power laser annealing of silver nanoparticle traces for the realization of low resistivity lines for flexible electronics*. Microelectronic Engineering, Vol. 88, p. 2481 – 2483. 2020, March 11, from ScienceDirect Database.
- Church, K., Fore, C., & Feeley, T. (2000). *Commercial applications and review for direct write technologies*. MRS proceedings, Vol. 624. p. 3.
- Conaghan, B. F. (2008). *Imaging*. Coombs, Jr., C. F. ed. Printed circuits handbook. 6th ed. USA: McGraw-Hill Handbooks. (p. 26.1 -26.26).
- Contreras-Saenz, M., Vargas-Chacon, R. M., Rodriguez-Delgado, J. M., & Camacho-Leon, S. (2017). *PCB-MEMS: Fabrication of Active Microfluidic Devices by Laser Ablation*. Bellucci, C. ed. Laser Ablation. Mexico: Nova Science Publishers, Inc. (p. 115 - 150).
- Coombs, Jr., C. F., & Holden, H. T. (2008). *Electronic Packaging and High-Density Interconnectivity*. Coombs, Jr., C. F. ed. Printed circuits handbook. 6th ed. USA: McGraw-Hill Handbooks. (p. 2.3).
- Cooper, K. (2001). *Rapid prototyping technology: selection and application*. New York, USA: CRC press.
- Criales, L. E., Orozco, P. F., Medrano, A., Rodríguez, C. A., & Özel, T. (2015). *Effect of Fluence and Pulse Overlapping on Fabrication of Microchannels in PMMA/PDMS Via UV Laser Micromachining: Modeling and Experimentation*. Materials and Manufacturing Processes, Vol. 30, Issue 7, p. 890 – 901.

- Cummins, G., & Desmulliez, M. P. Y. (2012). *Inkjet printing of conductive materials: a review*. *Circuit World*, Vol. 38 Issue 4, p. 193 – 213. <https://doi.org/10.1108/03056121211280413>
- De Gans, B. J., Duineveld, P. C., & Schubert, U. S. (2004). *Inkjet Printing of Polymers: State of the Art and Future Developments*. *Advanced Materials*, Vol. 16 Issue 3, pp. 203 - 213.
- Ehmann, K., Bourell, D., Culpepper, M., Hodgson, T., Kurfess, T., Madou, M., Rajurkar, K., & DeVor, R. (2005). *International Assessment of Research and Development in Micromanufacturing*. Springer Netherlands, p. 57 - 58.
- Esfandyari, A., Härter, S., Javied, T., & Franke, J. (2015). *A lean based overview on sustainability of printed circuit board production assembly*. *Procedia CIRP*, Vol. 26, pp. 305 - 310. 2019, June 22, from ScienceDirect Database.
- Espera, A., Dizon, J., Chen, Q., & Advincula, R. (2019). *3D-printing and advanced manufacturing for electronics*. *Progress in Additive Manufacturing*. Vol. 4, p. 245 – 267. 2020, May 16, from SpringerLink Database.
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., Zhang, S., & Zavattieri, P. D. (2015). *The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering*. *Computer-Aided Design*, Vol. 69, pp. 65 - 89. 2020, April 19, from ScienceDirect Database.
- Gedda, H., Powell, J., Wahlsström, G., Li, W., Engström, H., & Magnusson, C. (2002). *Energy redistribution during CO2 laser cladding*. *Journal of Laser Applications*, Vol. 14, Issue 2. p. 78 – 82.
- Girardi, M. A., Peterson, K. A., Vianco, P. T., Grondin, R., & Wieliczka, D. (2014). *Laser Ablation of thin films on LTCC*. *International Symposium on Microelectronics*, Vol. 2014, Issue 1, p. 000677 – 000686.
- Griffith, M. Keicher, D., Atwood, C., Romero, J., Smugeresky, J., Harwell, L., & Greene, D. (1996). *Free form fabrication of metallic components using laser engineered net shaping (LENS)*. *Proceedings of the solid freeform symposium, University of Texas at Austin*. pp. 125 – 131.
- Gu, D. D., Meiners, W., Wissenbach, K., & Poprawe, R. (2012). *Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes, and mechanisms*. *International Materials Reviews*, Vol. 57, Issue 3, p. 133 – 164.
- Hon, K., Li, L., & Hutchings, I. (2008). *Direct writing technology – advances and developments*. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 57, Issue 2. p. 601 – 620. 2020, June 18, from ScienceDirect Database.
- Jeong, S., Woo, K., Kim, D., Lim, S., Kim, J.S., Shin, H., Xia, Y. & Moon, J. (2008). *Controlling the Thickness of the Surface Oxide Layer on Cu Nanoparticles for the Fabrication of Conductive Structures by Ink-Jet Printing*. *Advanced Functional Materials*, Vol. 18, p. 679 – 686. doi:10.1002/adfm.200700902

- Joo, M., Lee, B., Jeong, S., & Lee, M. (2012). *Comparative studies on thermal and laser sintering for highly conductive Cu films printable on plastic substrate*. *Thin Solid Films*, Vol. 520, p. 2878 – 2883. 2020, March 11, from ScienceDirect Database.
- Kamyshny, A., Steinke, J., & Magdassi, S. (2011). *Metal-based inkjet inks for Printed Electronics*. *The Open Applied Physics Journal*, Vol. 4, p. 19 – 36.
- Kamyshny, A., & Magdassi, S. (2012). *Inkjet ink formulations*. In: Korvink, J., Shin, D., & Smith, P. *Inkjet-based Micromanufacturing*. Wiley-VCH. pp. 173-189.
- Kamyshny, A., & Magdassi, S. (2014). *Conductive Nanomaterials for Printed Electronics*. *Small*, Vol. 10, Issue 17, p. 3515 – 3535. 2020, May 23, from Wiley Online Library Database.
- Kang, J., Ryu, J., Kim, H., & Hahn, H. (2011). *Sintering of inkjet-printed silver nanoparticles at room temperature using intense pulsed light*. *Journal of Electronic Materials*, Vol. 40 Issue 11, p. 2268 – 2277.
- Kanth R. K., Wan Q., Liljeberg, P., Zheng, L., & Tenhunen, H. (2010). *Comparative study for environmental assessment of printed and PCB technologies*. *Joukahaisenkatu. TUCS general publication series*. p. 952 – 978.
- Kathuria, Y. (1997). *Laser-cladding process: a study using stationary and scanning CO2 laser beams*. *Surface Coating Technologies*, Vol. 97, Issue. 1 – 3. p. 442 - 447
- Kikkert, C. J. (2013). *RF Electronics: Desing and Simulation*. Australia: James Cook University. (p. 277, 279, 284).
- Kim, H., & Shi, F. (2001). *Electrical reliability of electrically conductive adhesive joints: dependence on curing condition and current density*. *Microelectronics Journal*, Vol. 32, Issue 4, p. 315 – 321. [https://doi.org/10.1016/S0026-2692\(01\)00007-6](https://doi.org/10.1016/S0026-2692(01)00007-6)
- Kim, I., Song, Y., Jung, H., Joung, J., Ryu, S., & Kim, J. (2008). *Effect of Microstructural Development on Mechanical and Electrical Properties of Inkjet-Printed Ag Films*. *Journal of Electronic Materials* Vol. 37, p. 1863 - 1868. <https://doi.org/10.1007/s11664-008-0552-y>
- Kim, N., & Han, K. (2010). *Future direction of direct writing*. *Journal of Applied Physics*, Vol. 108, p. 1 – 6.
- Krause, J. (2000). *High-precision working*. *Printed Circuit Fabrication*, Vol. 23, Issue 3, p. 24 - 28.
- Kunnari, E., Valkama, J., Keskinen, M., & Mansikkamäki P. (2009). *Environmental evaluation of new technology: printed electronics case study*. *J. cleaner production* 2009; Vol. 17 Issue 9. pp. 791-799.
- Le, H. P. (1998). *Progress and trends in ink-jet printing technology*. *J Imaging Sci Technol*, Vol. 42 Issue 1, pp. 49-62.

- Macleod, P. (2002). *A Review of Flexible Circuit Technology and its Applications*. UK: PRIME Faraday Partnership. (p. 45 - 46).
- Munz, J. (1956). *Photo-glyph recording*. US2775758A
- Nagarajan, B., Hu, Z., Song, X., Zhai, W., & Wei, J. (2019). *Development of Micro Selective Laser Melting: The State of the Art and Future Perspectives*. *Engineering*, Vol. 5, p. 702 – 720.
- Nägele, H., Pfitzer J., Lehnberger, C., Landeck, H., Birkner, K., Viebahn, U., Scheel, W., Schmidt, R., Hagelüken, M., & Müller, J. (2005). *Renewable resources for use in printed circuit boards*, *Circuit World*, Vol. 31 Issue: 2, pp. 26 - 29. 2019, June 22, from Emerald Insight Database.
- Nakahara, H. (2008). *Types of Printed Wiring Boards*. Coombs, Jr., C. F. ed. *Printed circuits handbook*. 6th ed. USA: McGraw-Hill Handbooks. (p. 5.1 - 5.7).
- Nir, M. Zamir, D., Haymov, I., Ben-Asher, L., Cohen, O., Faulkner, B., & de la Vega, F. (2009). *Electrically Conductive Inks for Inkjet Printing*. In Ed. Magdassi, S. *The Chemistry of Inkjet Inks*, (p. 225 – 254). New Jersey, London, Singapore: World Scientific.
- Noorani, R. (2006). *Rapid prototyping: principles and applications*. Spain: John Wiley and Sons.
- Nowak, M. R., Antonczak, A. J., Koziol, P. E., & Abramski, K. M. (2013). *Laser prototyping of printed circuit boards*. *Opto-Electronics Review*, Vol. 21 Issue 3, p. 320 - 325. 2019, June 15, from Versita Database.
- Nowak, R., Metev, S., & Sepold G. (1994). *Laser Chemical Etching of Metals in Liquids*. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 9 Issue 3, p. 429-446, DOI: 10.1080/10426919408934916
- Perelaer, J., de Gans, B., & Schubert, U. (2006). *Ink-jet printing and microwave sintering of conductive silver tracks*. *Advanced Materials*, Vol. 18 Issue 16, p. 2101 – 2104.
- Piqué, A., Auyeung, R., Mekus, K., Kim, H., Mathews, S., Bailey, T., Chen, X., Young, L. (2008). *Laser Decal Transfer of Electronic Materials with Thin Film Characteristics*. *Proceedings of SPIE*. Vol. 6879, p. 1 – 8.
- Piqué, A., Pratap, B., Mathews, S., Karns, B., Auyeung, R., Kasser, M, Ollinger, M., Kim, H., Lakeou, S., & Arnold, C. (2005). *Laser-direct-write of embedded electronic components and circuits*. *Photon Processing in Microelectronics and Photonics IV*, eds. Fieret, J., Herman, P., Okada, T., Arnold, C., et al., International Society for Optical Engineering (SPIE), Vol. 5713, p. 223-230.
- Piqué, A., Mathews, S., Pratap, B., Auyeung, R., Karns, B., & Lakeou, S. (2006). *Embedding electronic circuits by laser direct-write*. *Microelectronic Engineering*. Vol. 83, Issue 11 – 12, p. 2527 - 2533. doi.org/10.1016/j.mee.2006.06.004

- Piqué, A., Raymond, C., Auyeung, R., Metkus, K., Kim, H., Mathews, S., Bailey, T., Chen, X., & Young, L. (2008). *Laser decal transfer of electronic materials with thin film characteristics*. Proceedings of SPIE, Vol. 6879, p. 1 - 8.
- Pudas, M., Hagberg, J., & Leppävuori, S. (2003). *Gravure offset printing of polymer inks for conductors*. Progress in Organic Coatings, Vol. 49, p. 324 – 335. 2020, March 3, from ScienceDirect Database.
- Radivojevic, Z., Andersson, K., Hashizume, K., Heino, M., Mantysalo, M., Mansikkamaki, P., Matsuba, Y., & Terada, N. (2006). *Optimised curing of silver ink jet based printed traces*. Proceedings of 12th Intl. Workshop on Thermal investigations of ICs, pp. 133-138, ISBN 2-916187-04-9, Nice, September 2006, TIMA Editions, Nice.
- Rapp, L., Ailuno, J., Alloncle, A., & Delaporte, P. (2011). *Pulsed-laser printing of silver nanoparticles ink: control of morphological properties*. Optics Express, Vol. 19 Issue 22, p. 21563 – 21574.
- Ritchey, L. W. (2008). *Physical Characteristics of the PCB*. Coombs, Jr., C. F. ed. Printed circuits handbook. 6th ed. USA: McGraw-Hill Handbooks. (p. 13.9).
- Scandurra, A., Indelli, G., Spartà, N., Galliano, F., Ravesi S., & Pignataro, S. (2010). *Low Temperature Sintered Conductive Silver Patterns by Ink-Jet Printing for Plastic Electronics*, Surf. Interface Anal. Vol. 42, p. 1163 – 1167, DOI 10.1002/sia.3229.
- Schlienger, E., Dimos, D., Griffith, M., Michael, J., Oliver, M., Romero, T., & Smugeresky, J. (1998). *Near net shape production of metal components using lens*. U. S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information.
- Scott, J. G. V. (2005). *Digital printing for printed circuit boards*. Circuit World, Vol. 31, Issue 4, p. 34 – 41. 2019, June 23, from Emerald Database.
- Shrivastava, K., Ghosale, A., Bajpai, P., Kant, T., Dewangan, K., & Shankar, R. (2020). *Advances in flexible electronics and electrochemical sensors using conducting nanomaterials: A review*. Microchemical Journal, Vol. 156, p. 104944. 2020, May 23, from ScienceDirect Database.
- Soszek, P. (1989). *Two novel additive processes to manufacture circuit boards: Direct laser Writing and Direct electrostatic transfer and deposition*. IEEE Transactions on components, hybrids, and manufacturing technology. Vol. 12 Issue 2, p. 267 – 272.
- Srinivasan, R., & Braren, B. (1989). *Ultraviolet laser ablation of organic polymers*. Chemical Reviews, I9SS, Vol. 8, Issue 9, p. 1303 – 1316.
- Stampanoni, M. (2003). *Sophisticated HDI flexible substrates for advanced applications*. Circuit World, 29 / 3, 14 - 17. 2019, June 22, From Emerald Insight Database.
- Süllau, A., & Wiemers, A. (1999). *Laser Direct Imaging*. ILFA Publications.

- Sutter, T. (2005). *An overview of digital printing for advanced interconnect applications*, Circuit World, Vol. 31 Issue: 3, pp. 4 - 9. 2019, June 22, from Emerald Insight Database.
- Tachihara, S., & Shimizu, S. (2002). *Development of Laser Direct Imager*. Proceedings of SPIE, Vol. 4902, p. 306 - 314. 2019, June 22, From SPIE Database.
- Teh, K. (2017). *Additive direct-write microfabrication for MEMS: a review*. Frontiers of Mechanical Engineering, Vol. 12, Issue 4, p. 490 – 509. 2020, May 5, from SpringerLink Database.
- Tobjörk, D., Aarnio, H., Pulkkinen, P., Bollström, R., Määttänen, A., Ihalainen, P., & Mäkelä, T. (2012). *IR-sintering of ink-jet printed metal-nanoparticles on paper*. Thin Solid Films, Vol. 520 Issue 7, p. 2949 – 2955.
- Trlica, C., Paresh, D., Panich, L., Ladd, C., & Dickey, M. (2014). *3-D printing of liquid metals for stretchable and flexible conductors*. Proceedings of SPIE 9083, Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications VI, 90831D (4 June 2014); doi: 10.1117/12.2050212
- Tuominen, J., Honkanen, M., Hovikorpi, J., Vihinen, J., Vuoristo, P., & Maentylae, T. (2003). *Corrosion resistant nickel superalloy coatings laser-clad with a 6 kW high power diode laser (hpdl)*. LAMP 2002: International congress on laser advanced materials processing. International Society for Optics and Photonics. p. 59 – 64.
- Vatani, M., Lu, Y., Engeberg, E., & Choi, J. (2015). *Combined 3D printing technologies and material for fabrication of tactile sensors*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 16, Issue 7, p. 1375 – 1382. 2020, July 6, from SpringerLink Database.
- Williams, E., Ayres, R., & Heller, M. (2002). *The 1.7 kilogram microchip: Energy and material use in the production of Semiconductor Devices*. Environmental Science and Technology. Vol 36, Issue 24, p. 5504 – 5510.
- Wilson, J., Jones, N., Jin, L., & Shin, Y. (2013). *Laser deposited coatings of CO-Cr-Mo onto ti-6al-4v and ss316l substrates for biomedical applications*. Journal of Biomedical Mater Res Part B, Vol. 101, Issue 7. p. 1124 - 1132.
- Wilson, J., Piya, C., Shin, Y., Zhao, F., & Ramani, K. (2014). *Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis*. Journal of Cleaner Production, Vol. 80. pp. 170 – 178.
- Worhach, P., & Sheng, P. (1997). *Integration of enviromental factors in process modeling for printed circuit board manufacturing*. I. Assembly. In Electronics and the Enviroment. IEEE Int. Sym 1997. pp. 218 – 225.
- Yun, J., Cho, K., Park, B., Kang, H., Ju, B., & Kim, S. (2008a). *Optical heating of ink-jet printable Ag and Ag-Cu nanoparticles*. Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 47 Issue 6, p. 5070 – 5075.

- Yun, J., Chang-Soo, H., Kim, J., Song, J., Shin, D., & Park, Y. (2008b). *Fabrication of carbon nanotube sensor device by inkjet printing*. 2008 3rd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, IEEE, Sanya, p. 506 – 509.
- Yung, K., Gu, X., Lee, C., & Choy, H. (2010). *Ink-jet printing and camera flash sintering of silver tracks on different substrates*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 210, Issue 15, p. 2268 - 2272, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.08.014>
- Zakariyah, S., Conway, P., Hutt, D., Selviah, D., Wang, K., Baghsiahi, H., Rygate, J., Calver, J., & Kandulski, W. (2009). *Polymer Optical Waveguide Fabrication using Laser Ablation*. 11 Electronics Packaging Technology Conference, Vol. 11, p. 936 - 941. 2019, June 22, from Crown Database.
- Zhang, B., & Yung, K. C. (2006). *Frequency-tripled Nd:YAG laser ablation in laser structuring process*. Optics and Lasers in Engineering, Vol. 44, p. 815 – 825. 2020, February 10, from ScienceDirect Database.
- Zhang, Y., Liu, C., Whalley, D. (2009). *Direct-write Techniques for Maskless Production of Microelectronics: A review of current State-of-the-art Technologies*. 2009 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, Beijing, 2009, pp. 497-503, doi: 10.1109/ICEPT.2009.5270702.
- Zhang, Q., Zheng, Y., & Liu, J. (2012). *Direct writing of electronics based on alloy and metal (DREAM) ink: A newly emerging area and its impact on energy, environment and health sciences*. Frontiers in Energy. Vol. 6, Issue 4, p. 311 – 340. 2020, March 3, from SpringerLink Database.
- Zhong, M., Yao, K., Liu, W., Goussain, J., Mayer, C., & Becker, A. (2001) *High power laser cladding satellite 6+ wc with various volume rates*. Journal of Laser Applications, Vol. 13, Issue 6. p. 247 – 251.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Investigaciones relevantes en torno al uso de la energía solar concentrada para la modificación superficial de materiales

Como se ha mostrado en las secciones anteriores, los láseres se están convirtiendo en la principal herramienta para hacer el grabado de circuitos impresos. Estas técnicas y métodos de grabado no requieren el uso de máscaras o foto herramientas, pueden adaptarse a los cambios dimensionales que se presentan en las tarjetas debido a la variación de la temperatura, son flexibles al momento de cambiar el patrón que se grabará en las tarjetas, entre otras ventajas.

Aunque la densidad energética que se obtiene a partir de un láser es de dos a tres veces la magnitud que se alcanza mediante los sistemas de concentración solar, estudios demuestran que los sistemas de concentración solar ofrecen oportunidades en los procesos de síntesis de materiales y transformaciones a altas temperaturas, desde el punto de vista técnico y económico (Flamant et al., 1999; Herranz et al., 2010, p. 145).

Por ejemplo, Flamant et al. (1999), señalan el latente potencial de los hornos solares que tienen la capacidad para hacer tratamientos térmicos y superficiales a temperaturas menores a 3000 K; ofreciendo energía de alto poder sobre grandes superficies en comparación a láseres convencionales, y la ausencia de interacción entre fuente energética y material que dificulta el proceso de control (Flamant et al., 1999, p. 118).

En la Tabla 1 se muestran algunos datos relevantes en torno a la comparación realizada entre las tres tecnologías mencionadas, y empleadas para el tratamiento térmico y superficial de materiales (Flamant et al., 1999, p. 118; Sierra et al., 2005a, p. 1340):

Tabla 1. Comparación entre láser, plasma y energía solar concentrada para el procesamiento de materiales (Flamant et al., 1999, p. 118; Sierra et al., 2005a, p. 1340).

Tecnología	Demanda de energía típica (kW)	Densidad del flujo energético (W/cm^2)	Área de superficie expuesta al flujo energético (cm^2)	Temperatura alcanzada en la superficie (K)	Eficiencia energética en general (%)
Láser de CO ₂	2 – 5	$10^3 - 10^6$ (en pulsos)	< 1	> 5000	≈ 2
Láser Nd-YAG	≈ 0.5	$10^5 - 10^9$ (en pulsos)	< 1	> 5000	
Plasma	10 – 2000	10^4	≈ 100	> 5000	25
Horno solar	≤ 1000	10^3	≈ 1000	≤ 3500	60
Lente de Fresnel (CENIM)*	0.05	260	0.20	≤ 1500	–

*CENIM: Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Madrid, España

Debido a que el fenómeno principal que tiene lugar en el grabado de circuitos impresos mediante métodos aditivos consiste en la modificación superficial del sustrato o tarjeta fenólica; entonces es conveniente presentar los experimentos y desarrollos más relevantes en cuanto al uso de la Energía Solar Concentrada (ESC) en la modificación superficial de materiales, entre otros.

Entre las diferentes aplicaciones, desarrollos y experimentos que se han realizado con ESC se encuentran (Siores, 1997, p. 1274; Flamant et al., 1999, p. 122 – 125; Stoynov et al., 2000, p. 333; Fernández-González et al., 2018, p. 521 – 525, 528 – 530, 532, 534 – 536):

Tratamientos térmicos y superficiales en aceros; soldado de piezas (e. g. acero, aluminio y aleaciones de titanio); procesos de unión (e. g. policarbonato, ABS y PMMA); cortado y curado de polímeros y polímeros en matrices compuestas; secado de películas de recubrimientos superficiales; elaboración de nanomateriales (e. g. Circonita o alúmina dopada con itria, nanofases de La (o Nd)_x $Sr_{1-x}MnO_{3-8}$ y $Nd_{2/3}Sr_{1/3}MnO_{3-8}$ peroskovitas); fundición de metales (e. g. acero, plata, aluminio, estaño, zinc); secado, fundición y obtención de cerámicas (e. g. adobe, porcelana, alúmina, óxido de cromo, zirconio, hafnio, torio, cordierita, carburo de calcio, nitruros de carbono, carburo de silicio, nitruro de silicio, carburo de titanio, carburo de tungsteno, carburo de tantalio, carburo de molibdeno); estudios de exposición de materiales a condiciones térmicas extremas (e. g. materiales con aplicaciones aéreo espaciales, impactos térmicos); procesamiento de minerales y compuestos para la extracción de metales y otras sustancias (e. g. silicio, aluminio, zinc, acero, hierro); elaboración de combustibles solares, aplicación de recubrimientos superficiales (e. g. recubrimientos de molibdeno, nitrurado), en reacciones de *síntesis auto – propagadas a alta temperatura* (*Self-propagating high temperature synthesis, SHS*), revestimiento de metales, producción de fullerenos y nanotubos de carbono, producción de cal, entre otros.

En la Tabla 2, se enlistan los experimentos más relevantes realizados, donde hubo síntesis, tratamiento, modificación y unión de materiales mediante ESC, y los concentradores utilizados en cada caso:

Tabla 2. Experimentos de síntesis, tratamiento, modificación y unión de materiales, mediante el uso de energía solar concentrada, más relevantes.

Título	Descripción	Concentrador utilizado	Referencia
<i>Fusión y fundición de aleaciones en un horno solar</i>	Utilizando dos concentradores parabólicos, de diferentes dimensiones, se logró la fundición de estaño, plomo y zinc de manera exitosa.	Hornos solares parabólicos	Suresh y Rohatgi, 1979.
<i>Uso de energía solar concentrada en la aplicación de recubrimientos en suspensión</i>	Mediante el uso de ESC, se realizaron recubrimientos delgados de las aleaciones TiCNiB y WCNiB sobre muestras cilíndricas de acero inoxidable. Se reportó evidencia de fusión del material de recubrimiento entre las interfaces resultantes.	SGU-5 helioapparatus y un concentrador de espejo parabólico	Korol', Korol', Kasich-Pilipenko, Verkhovodov, Dvernyakov, et al., 1983.
<i>Síntesis por vaporización-condensación y caracterización de nanofases de γ-Fe₂O₃, In₂O₃, SnO₂, ZnO y Zr_{1-x}Y_xO_{2-δ}</i>	Se realizaron pruebas con diferentes óxidos en polvos para producir nano fases. Esto a partir del proceso de vaporización - condensación, utilizando para ello un horno solar de imagen.	Horno Solar de imagen en Font-Romeu (Francia)	Rouanet, Solmon, Pichelin, Roucau, Sibieude, et al., 1995.
<i>Unión termoplástica mediante concentrador de energía solar</i>	Se realizaron experimentos con el fin de probar si es posible realizar procesos de unión entre ciertos materiales termoplásticos (PVC, PE, PP y PS) mediante el uso de ESC.	Lente parabólica con lente esférica acoplada	Siores, 1997.
<i>Revestimiento de polvos de superaleación de Ni sobre acero AISI 4140 con energía solar concentrada</i>	Por medio de un horno solar, se realizaron procesos de recubrimiento sobre barrenos de 2 mm de profundidad, rellenos con polvo de aleación base Ni, en piezas cilíndricas de acero.	Horno solar del PSA*	Fernández, López, Vázquez y Martínez, 1998.
<i>Análisis estadístico de Weibull del rendimiento de rotura por flexión de discos cerámicos de alúmina sinterizados mediante calentamiento por radiación solar</i>	Discos cerámicos de alúmina, obtenidos a partir de la sinterización de polvos del mismo material en un horno solar, se comparan contra discos obtenidos mediante un horno eléctrico. Se concluye que no hay una diferencia apreciable entre sus módulos de ruptura.	Horno solar de la Academia de Ciencias Uzbek (Tashkent, Uzbekistan).	Cruz, Amaral, Guerra y Shohoji, 2000.

Tabla 2. Experimentos de síntesis, tratamiento, modificación y unión de materiales, mediante el uso de energía solar concentrada, más relevantes (continuación).

<p><i>Un estudio de viabilidad sobre la unión de termoplásticos de ingeniería utilizando radiación solar concentrada</i></p>	<p>Consiste en una serie de experimentos para probar la posibilidad de usar ESC para la unión de materiales termoplásticos de interés ingenieril (ABS, PC y PMMA). Se describen los resultados obtenidos y comparan con uniones realizadas mediante procesos convencionales.</p>	<p>Telescopio de Cassegrain modificado</p>	<p>Stoynov, Yarlagadda y Yen, 2000.</p>
<p><i>Viabilidad del uso de la radiación solar concentrada al proceso de sinterización de cobre</i></p>	<p>A través de dos receptores con diferentes acomodos de alambres de cobre de 0.1 mm de diámetro, y un modelo matemático que emplea partículas ideales (esferas o cilindros), se examina la posibilidad de llevar a cabo procesos de sinterizado de cobre mediante ESC.</p>	<p>Horno solar del PSA*</p>	<p>Cañadas, Martínez, Rodríguez y Gallardo, 2005.</p>
<p><i>Sobre la investigación de la soldadura de aleación de aluminio 7075 utilizando energía solar concentrada</i></p>	<p>Es una descripción de los experimentos realizados, usando un horno solar y un receptor en forma de domo, para llevar a cabo la unión soldada entre diferentes arreglos de placas de aluminio mediante un haz solar concentrado.</p>	<p>Horno solar del laboratorio PROMES-CNRS *****</p>	<p>Karalis, Pantelis y Papazoglou, 2005.</p>
<p><i>Sinterización de cobre en horno solar mediante control difuso</i></p>	<p>Mediante la aplicación de Lógica Difusa, se desarrolla un control inteligente con el cual mover automáticamente el atenuador del horno solar del PSA. Se probó su efectividad mediante un experimento de sinterización de delgados cables de cobre.</p>	<p>Horno solar del PSA*</p>	<p>Lacasa, Berenguel, Yebra y Martínez, 2006.</p>
<p><i>Propiedades mecánicas de los discos densos de cordierita sinterizados mediante calentamiento por radiación solar</i></p>	<p>Utilizando un haz de ESC, se logró el sinterizado de una mezcla de polvos para la formación de discos de cordierita. Estos se equiparan en varios aspectos con discos obtenidos mediante el método convencional, pero en un ciclo de calentamiento más breve (60 min contra 24 h).</p>	<p>Horno solar del PSA-CIEMAT * **</p>	<p>Almeida, Guerra, Cruz, Rodríguez, Cañadas, et al., 2009.</p>
<p><i>Espumado de una aleación de aluminio y silicio mediante energía solar concentrada</i></p>	<p>Se emplea un horno solar como sistema de calentamiento para la obtención de espuma de aluminio, a partir de una aleación de precursores, formada por Al-Si, sintetizada mediante metalurgia de polvos.</p>	<p>Horno solar del PSA-CIEMAT * **</p>	<p>Cambronero, Cañadas, Martínez y Ruiz-Román, 2010.</p>

Tabla 2. Experimentos de síntesis, tratamiento, modificación y unión de materiales, mediante el uso de energía solar concentrada, más relevantes (continuación).

<i>Soldadura de metales de alto punto de fusión mediante energía solar concentrada</i>	Se examina la posibilidad de llevar a cabo uniones soldadas entre muestras de acero de herramienta H13 y acero inoxidable AISI 316L, utilizando como fuente energética un haz solar concentrado.	Horno solar del laboratorio PROMES-CNRS ****	Romero, García, Arenas, López y Vázquez 2013.
<i>Estructura soldada de espumas de aluminio unidas con energía solar concentrada</i>	Mediante el uso de energía solar concentrada y un precursor para la formación de espuma de aluminio, se realizó la unión soldada de varias placas de espuma de aluminio.	Horno solar del PSA*	Cambronero, Cañadas, Ruiz-Román, Cisneros y Corpas Iglesias, 2014.
<i>Películas gruesas nanoestructuradas de MgTiO₃ obtenidas por deposición electroforética a partir de nanopulvos preparados por PVD solar</i>	Utilizando una combinación entre deposición solar y física de vapor (solar PVD) y deposición electroforética, se logró sintetizar nano polvos de MgTiO ₃ , con comparables o mejores características a los que se obtienen mediante el proceso convencional. Estos polvos son de interés para el desarrollo de capacitores especiales y otros componentes electrónicos.	Horno solar parabólico del laboratorio PROMES-CNRS ****	Apostol, Mahajan, Monty y Saravanan, 2015.
<i>Aleación de titanio Ti6Al4V soldada con energía solar concentrada</i>	Se describen las diferentes pruebas realizadas para lograr una unión soldada de buena calidad entre dos placas de esta aleación de titanio. Se utilizó ESC como la fuente energética que llevaría a cabo el proceso.	Horno solar parabólico del laboratorio PROMES-CNRS ****	Romero, García, Arenas, López y Vázquez, 2015.
<i>Producción sostenible de espumas de titanio para aplicaciones biomédicas mediante sinterización de energía solar concentrada</i>	Mediante la sinterización solar de una mezcla de polvos de titanio, cloruro de sodio y aditivos, se logró sintetizar muestras de titanio poroso utilizado para la elaboración de prótesis que requieren de vascularización sanguínea del paciente.	Horno solar parabólico del laboratorio PROMES-CNRS ****	García, Gracia-Escosa, Bayod, Conde, Arenas, et al., 2016.
<i>Experimentos sobre soldadura de polímeros mediante energía solar concentrada</i>	Por medio de un concentrador solar de lente esférica, se realiza la unión de varias laminas o sustratos de PMMA. El arreglo consiste en una lámina transparente, con alta transmitancia al espectro visible, y una oscura, absorbente del espectro visible.	Concentrador solar con lente esférica	Alami y Aokal, 2017.

Tabla 2. Experimentos de síntesis, tratamiento, modificación y unión de materiales, mediante el uso de energía solar concentrada, más relevantes (continuación).

<p><i>Un intento de soldadura de aleación de aluminio 5083-H111 utilizando energía solar concentrada variable</i></p>	<p>A diferencia del proceso de exposición usual, de los materiales o receptores solares, a un haz concentrado directo y constante, en este estudio se describen varias pruebas de unión entre placas de aleaciones de aluminio utilizando un haz concentrado variable.</p>	<p>Horno solar del PSA*</p>	<p>Karalis, Pantelis, Daniolos, Bougiouri, Rodriguez, et al., 2017.</p>
<p><i>Soldadura de láminas delgadas de aleaciones de titanio con el uso de energía solar concentrada</i></p>	<p>Descripción de varias pruebas con láminas de diferentes aleaciones de titanio; soldadas entre ellas mediante la energía proporcionada por un haz solar concentrado.</p>	<p>Horno solar parabólico del laboratorio PROMES-CNRS****</p>	<p>Pantelis, Kazasidis y Karakizis, 2017.</p>
<p><i>Investigación experimental y numérica de la soldadura de placas delgadas AA6082-T6 utilizando energía solar concentrada (ESC)</i></p>	<p>En este estudio se describen varias pruebas de unión mediante soldadura, practicadas sobre placas delgadas de una aleación en particular de aluminio, utilizando un haz de ESC. Posteriormente se comparan los resultados experimentales con los obtenidos mediante un modelo matemático desarrollado para este caso.</p>	<p>Horno solar del PSA*</p>	<p>Pantelis, Karakizis, Kazasidis, Karalis y Rodriguez, 2017.</p>
<p><i>Energía solar concentrada utilizada para el tratamiento térmico de la aleación Ti6Al4V fabricada por fusión selectiva por láser</i></p>	<p>Por medio de un haz de ESC, se realiza un tratamiento térmico sobre piezas de aleación de titanio Ti6Al4V, obtenidas empleando la técnica de fusión selectiva mediante laser (<i>selective laser melting, SLM</i>).</p>	<p>Hornos solares (vertical y horizontal) del PSA*</p>	<p>Chicos, Zaharia, Lancea, Pop, Cañadas, et al., 2018.</p>
<p><i>Sinterización de espumas de Titanio en un horno solar parabólico</i></p>	<p>Se describe la sinterización de espumas de titanio empleando un horno solar parabólico de 2 kW, en un tiempo de tratamiento de 30 min (menor al convencional de 10 H), utilizando un receptor con atmósfera inerte de Argón.</p>	<p>Horno solar parabólico del laboratorio PROMES-CNRS****</p>	<p>Romero, Rodríguez, Conde, Damborenea, García, et al., 2018.</p>
<p><i>La influencia del flujo de energía solar concentrada en la estructura y las propiedades de las uniones soldadas de acero inoxidable</i></p>	<p>En esta investigación se llevó a cabo la unión de ensambles de acero inoxidable AISI 316L, utilizando la aleación basada en níquel Monel 400 y ESC para realizar la unión. Se incluyen las pruebas de tensión realizadas sobre los elementos unidos.</p>	<p>Horno solar SF40 del PSA*</p>	<p>Luca, Tierean, Pisu, Rodriguez y Croitoru, 2020.</p>

*PSA: Plataforma Solar de Almería (España)

**CIEMAT: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Madrid, España)

*** UCLM: Universidad de Castilla-La Mancha (España)

**** PROMES-CNRS: Laboratorio de Procesos, Materiales y Energía Solar (*PROcédés, Matériaux et Énergie Solaire*) del Centro Nacional de Investigaciones Científicas (Centre National de la Recherche Scientifique) (Odeillo, Francia)

*****CENIM-CSIC: Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas – Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Madrid, España).

Los concentradores con Lente de Fresnel, cuyas lentes planas contienen en su interior una serie de surcos concéntricos que conforman la superficie de una lente convexa, poseen como principal ventaja la eliminación del material interno de las lentes que no aporta a la refracción de la radiación incidente, adicionalmente se reduce el peso (Sierra et al., 2005a, p. 1339).

La lente de Fresnel fue ideada por George-Louis Leclerc, pero la primera fue construida hasta 1820 por el físico y matemático francés Augustin-Jean Fresnel, usando el diseño de Leclerc (Sierra et al., 2005a, p. 1339). Si se eligen lentes de Fresnel como los medios de concentración solar, se obtienen ventajas adicionales como la facilidad para hacer ajustes y cambios en el sistema, y la estructura del concentrador es sencilla (Herranz et al., 2010, p. 145).

Dependiendo de las características del proceso a desarrollar usando un concentrador con lente de Fresnel, se determina el rango de amplitudes de onda útiles y con ello el material de la lente; por ejemplo, las lentes de acrílico, vinil rígido o policarbonato son útiles para concentrar el rango de luz visible, mientras que hay lentes de cristal que pueden aprovechar un rango que parte de las amplitudes cercanas al infrarrojo, hasta parte de las amplitudes del ultravioleta (Sierra et al., 2005a, p. 1340).

Entre las principales investigaciones realizadas usando este tipo de concentradores, se encuentran:

Sinterizado de aleaciones metálicas, tratamientos térmicos y superficiales (templado de aceros y hierros fundidos, endurecimiento a través de fundición superficial de hierro fundido), nitrurado de acero mediante baño en sales, nitrurado gaseoso de aleaciones de titanio, recubrimiento de NiAl sobre acero a través de una reacción de *síntesis auto – propagada a alta temperatura* (*Self-propagating high temperature synthesis, SHS*) (Herranz et al., 2010, p. 147, 154, 156 – 159), aplicación de soldadura (e. g. carrete de estaño) (Fernández-González et al., 2018, p. 529), entre otros.

En la Tabla 3, se enlistan los experimentos más relevantes, usando concentradores con lente de Fresnel, donde hubo síntesis, tratamiento, modificación y unión de materiales mediante ESC:

Tabla 3. Experimentos de síntesis, tratamiento, modificación y unión de materiales, mediante el uso de concentradores solares con lente de Fresnel y ESC, más relevantes.

Título	Descripción	Referencia
<i>La viabilidad de unir metal utilizando un horno solar</i>	Se explora la posibilidad de realizar uniones soldadas entre metales, utilizando para las pruebas un haz de ESC, soldadura de plomo-estaño, cables, alambres y pequeñas placas de acero, latón y cobre.	<i>Kaddou y Abdul-Latif, 1969.</i>
<i>Síntesis de TiN con energía solar concentrada por una lente de Fresnel</i>	Se reporta por vez primera, el uso de un haz de ESC proveniente de un concentrador con lente de Fresnel para obtener películas de nitruro de titanio; mediante el calentamiento de muestras de este metal, inmersas en una atmósfera de nitrógeno.	<i>Sánchez Olías, García y Vázquez, 1999.</i>
<i>Recubrimientos de NiAl sobre acero al carbono mediante síntesis autopropagable a alta temperatura asistida con energía solar concentrada: influencia de la masa en la adherencia y la porosidad</i>	Se describe la realización de experimentos utilizando polvos de Ni y Al compactados sobre muestras cilíndricas de acero. Estas muestras se expusieron a un haz de ESC para comenzar una reacción de síntesis auto propagante a alta temperatura (SHS), para obtener recubrimientos de NiAl sobre una de las caras de los cilindros de acero.	<i>Sierra y Vázquez, 2005b.</i>
<i>Endurecimiento solar de aceros con un nuevo concentrador solar a pequeña escala</i>	Mediante un nuevo tipo de concentrador solar, se llevan a cabo varios experimentos de templado de aceros utilizando ESC para elevar su temperatura. El concentrador solar con lente de Fresnel usado pertenece al UCLM***.	<i>Llorente y Vázquez, 2009.</i>
<i>Comportamiento frente al desgaste de la aleación Ti6Al4V nitrurada con energía solar concentrada</i>	Estudio realizado para plantear la posibilidad del uso de ESC para la nitruración gaseosa a altas temperaturas, de la aleación de titanio Ti6Al4V; utilizando para ello una lente de Fresnel de 1 m de diámetro y un factor de concentración de 2644. Se utilizó el concentrador solar del UCLM*** en estos experimentos.	<i>Herranz, Rodríguez y Alonso, 2010.</i>
<i>Desarrollo de acero sinterizado de alta velocidad utilizando energía solar concentrada</i>	Se realizaron procesos de sinterizado de polvos de acero en un horno solar y un concentrador con lente de Fresnel, usando receptores con una atmósfera interna de N ₂ – H ₂ . Se utilizó para las pruebas el Horno solar del PSA-CIEMAT *** y el concentrador con lente de Fresnel del UCLM***.	<i>Herranz, Romero, de Castro y Rodríguez, 2013.</i>

Tabla 3. Experimentos de síntesis, tratamiento, modificación y unión de materiales, mediante el uso de concentradores solares con lente de Fresnel y ESC, más relevantes (continuación).

<p><i>Nitruración gaseosa y solar de aleación Ti6Al4V</i></p>	<p>Se describe un proceso de nitrurado sobre una muestra de aleación Ti6Al4V, empleando para ello un concentrador con lente de Fresnel. Posteriormente, se compara el resultado obtenido con el que se consigue mediante un horno tubular eléctrico.</p>	<p>Rodríguez, Herranz y Romero, 2013.</p>
<p><i>Procesamiento de acero rápido AISI M2 reforzado con carburo de vanadio mediante sinterización solar</i></p>	<p>Se lleva a cabo la sinterización de polvos de acero M2, reforzados con carburo de vanadio, sobre especímenes cilíndricos en receptores con atmósfera de N₂-5%H₂, en dos concentradores solares. Para el experimento se utilizó el Concentrador con Lente de Fresnel del UCLM*** y el horno solar del PROMES-CNRS****</p>	<p>Herranz, Romero, de Castro y Rodríguez, 2014.</p>
<p><i>Comportamiento mecánico de las piezas metálicas soldadas con simulante de regolito extraterrestre por el concentrador solar en aplicación ISRU e ISRF</i></p>	<p>Utilizando muestras simuladas de suelo lunar y marciano como elemento adhesivo, se realizaron varias pruebas para llevar a cabo uniones soldadas entre probetas de aleaciones de titanio y acero. La fuente de energía térmica utilizada para esta unión fue el haz solar concentrado proporcionado por una lente de Fresnel. El propósito del estudio es simular las condiciones in situ que afrontarían los exploradores de la Luna o Marte para llevar a cabo instalaciones o reparaciones de su equipo.</p>	<p>Zheng y Qiao, 2020.</p>
<p><i>Análisis térmico mediante inducción y radiación solar concentrada para el calentamiento de metales</i></p>	<p>Se describe el uso combinado de un horno de inducción, y el haz solar concentrado de una lente de Fresnel, para llevar a cabo el calentamiento de una probeta de metal. Se incluye el análisis de los alcances de cada método por separado y el satisfactorio desempeño al trabajar a la par.</p>	<p>Rojas-Morin, Flores-Salgado, Álvarez-Brito, Jaramillo-Mora y Barba-Pingarrón, 2022.</p>
<p><i>Caracterización de componentes de cobre puro producidos mediante fabricación aditiva por filamento fundido (FFF)</i></p>	<p>Se emplea un concentrador con lente de Fresnel para llevar a cabo el paso de sinterización de piezas de cobre puro, las cuales fueron obtenidas mediante un proceso de Fabricación por filamento fundido.</p>	<p>Cañadilla, Rodríguez, Romero y Caminero, 2022.</p>

Tabla 3. Experimentos de síntesis, tratamiento, modificación y unión de materiales, mediante el uso de concentradores solares con lente de Fresnel y ESC, más relevantes (continuación).

<p>PROCESAMIENTO DE PIEZAS DE ACERO DE HERRAMIENTAS MEDIANTE IMPRESIÓN CON FILAMENTO FUNDIDO Y SINTERIZACIÓN SOLAR</p>	<p>Se emplea energía solar concentrada para llevar a cabo el proceso de sinterizado de piezas de acero, obtenidas mediante el método de Deposición de Filamento Fundido (FFF).</p>	<p>Prado, García, Cañadilla, Romero, Rodríguez, et. al., 2022.</p>
---	--	---

*PSA: Plataforma Solar de Almería (España)

**CIEMAT: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Madrid, España)

*** UCLM: Universidad de Castilla-La Mancha (España)

**** PROMES-CNRS: Laboratorio de Procesos, Materiales y Energía Solar (*PROcédés, Matériaux et Énergie Solaire*) del Centro Nacional de Investigaciones Científicas (Centre National de la Recherche Scientifique) (Odeillo, Francia)

*****CENIM-CSIC: Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas – Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Madrid, España).

2.2. Patentes relevantes donde se usa la Energía Solar para el grabado de circuitos impresos

En esta sección se mencionan las patentes más relevantes donde se menciona el uso de energía solar para llevar a cabo el grabado de circuitos impresos, o alguno de los pasos de este proceso. Las patentes y su información relevante se enlistan en la Tabla 4:

Tabla 4. Patentes relevantes por el uso de la energía solar para el grabado de circuitos impresos, o en alguno de sus pasos intermedios.

No. de Patente y Referencia	Título	Año de publicación	Descripción
JPH0465185 Kondo y Maruyama, 1992.	<i>Método de formación del recubrimiento</i>	1992	Para mejorar la adherencia y características de la película foto resistiva aplicada a la tarjeta fenólica, previo a realizar el proceso de exposición de la tarjeta ante la máscara con el patrón del circuito, se irradia a la película con una fuente luminosa. Entre las opciones de fuentes luminosas aplicables, se menciona luz solar.

Tabla 4. Patentes relevantes por el uso de la energía solar para el grabado de circuitos impresos, o en alguno de sus pasos intermedios (continuación).

EP0557138 Grunwald, Gal, Hirsh y Mozel, 1993.	<i>Proceso de imagen directa para formar un patrón de resistencia en una superficie y su uso en la fabricación de placas de circuito impreso</i>	1993	Se describe el método y sus características para sustituir a la película foto resistiva del proceso de grabado, por una película termo resistiva. Esta última se puede usar para grabar circuitos impresos mediante imágenes positivas o negativas; y en lugar de emplear un dispositivo de exposición óptico, se usa un dispositivo de exposición térmico (p. ej. un láser cuyo haz está en la zona infrarroja).
JP1995231163 Hiroshi, 1995.	<i>Manufactura de tarjetas de circuitos impresos</i>	1995	Se describe el armado de un circuito impreso mediante la unión de diferentes capas, algunas de materiales poliméricos, las cuales se unen entre sí cuando los conectores de unión alcanzan la temperatura de transición vítrea o de plasticidad. Se aprovecha esta condición de las placas para que el material fluya entre ellas al compactarlas una contra la otra, realizando así la unión.
CN205539924 Hua, Wei, Wei, Hanwen y Ruzhi, 2016.	<i>Equipo de exposición de PCB que emplea luz solar y prismas</i>	2016	Es un equipo que realiza la exposición de PCB auxiliándose del uso de luz solar y prismas transparentes, con los cuales realiza un escaneo sobre las placas; permite la exposición de dos placas a la vez y de manera simétrica, o de una sola, pero con doble cara de cobre.
CN205507359 Xiongxiang, 2016.	<i>Máquina novedosa para realizar la exposición de circuitos impresos</i>	2016	El dispositivo cuenta con sistemas de control ON/OFF, banda de alimentación y fibra óptica; en la parte superior del dispositivo se hace la exposición mediante luz, y ésta es auxiliada por exposición inferior y cuya fuente luminosa es luz solar redirigida mediante lentes.
CN205507357 Zhanliang, Ming y Tao, 2016.	<i>Dispositivo para exposición de circuitos con doble cara</i>	2016	Es un marco para realizar la exposición de la película foto-resistiva de la tarjeta fenólica mediante el Sol, cuenta con conductos propios de ventilación y evita deformaciones en la placa.
CN206411418 Zhiwei, 2017.	<i>Equipo óptico de inversión que expone al Sol</i>	2017	Consiste en un equipo y sus múltiples sistemas (marco de exposición, mecanismo para alineación, estructura móvil, etc.) con el cual es posible llevar a cabo la exposición de la película foto-resistiva de las tarjetas, y obtener placas expuestas y listas para el grabado de circuitos impresos y semiconductores.
CN206877037 Bo, 2018.	<i>Dispositivo de exposición de luz paralela para la fabricación de PCB</i>	2018	Sistema de exposición para PCB que redirige la iluminación natural (o solar) del cuarto, a un receptor interior, para llevar a cabo el proceso; emplea un reflector elíptico y un espejo parabólico.
CN208013667 Dahong, Liang, Kai, Xueqin, Lin, et al. 2018.	<i>Máquina de exposición completamente automática</i>	2018	Consiste en un sistema que emplea la iluminación natural (solar) para llevar a cabo la exposición de tarjetas fenólicas. Se auxilia de varios mecanismos que lo alimentan con tarjetas sin exponer, las coloca en un marco de exposición (con su propio espacio de trabajo) y retira del mismo.

Tabla 4. Patentes relevantes por el uso de la energía solar para el grabado de circuitos impresos, o en alguno de sus pasos intermedios (continuación).

CN207181951 Juling, 2018.	<i>Máquina para exposición</i>	2018	Es una máquina de exposición de tarjetas fenólicas, con marco incluido, el cual realiza el proceso mediante la luz solar de un cuarto de iluminación. Cuenta con varios sistemas de regulación de la exposición, ventilación y temperatura.
CN207118093 Qionghuang, 2018.	<i>Dispositivo de localización óptica para PCB multicapa que expone al sol</i>	2018	Consiste en un marco sobre el cual se fijan y desplazan, a lo largo de un área de trabajo, a los circuitos impresos mientras se lleva a cabo el proceso de exposición de la película foto resistiva al Sol.
CN207965471 Xiaoliang, Xiaobin y Xuehui, 2018.	<i>Máquina de exposición usada para la preparación de PCB</i>	2018	Consiste en una máquina que realiza el paso de exposición de las placas mediante un marco conectado a un cuarto de luz, donde la fuente luminosa de dicho cuarto es la luz solar ambiental; el marco posee motores a pasos como actuadores y un sistema de atenuación.
CN208584305 Yong, Zhixin, Xinquan y Houwen, 2019.	<i>Aparato de procesamiento previo al recubrimiento de base del sustrato para la fabricación de placas de PCB</i>	2019	Aparato que lleva a cabo procesos previos al recubrimiento de la placa, cuenta con mecanismo de alimentación de material y un mecanismo que, entre sus funciones, pule, cepilla y retira el polvo de las placas; cuenta con un tanque de solución y un aparato solar con mecanismo de soporte.
CN208506494 Zhencai, 2019.	<i>Máquina para exposición con pedal de accionamiento</i>	2019	Es una máquina de exposición que cuenta con una sección superior donde está el marco de exposición del dispositivo, y se encuentra descubierta para que la luz solar se encargue de hacer el proceso. El sistema se acciona mediante un pedal, aunque cuenta a su vez con controles digitales y pantalla táctil.

2.3. Descripción de métodos de grabado de circuitos impresos relevantes al proyecto

El método de grabado de circuitos impresos denominado “fresar y llenar” (*Mill and Fill, M&F*) consiste en tratar químicamente al sustrato, grabar las trincheras que darán lugar a las pistas sobre la superficie tratada, deposición del material conductor (e g. una película de polímero conductor) sobre éstos y su posterior curado (Bhattacharya et al., 2009, p. 1).

Este método ha ofrecido una posible alternativa para el desarrollo de circuitos impresos con el empleo de Energía Solar Concentrada (ESC); a continuación, se incluye una tabla con los avances más importantes para esta tecnología en particular (véase Tabla 5):

Tabla 5. Patentes, desarrollos y avances relevantes para el método de grabado de circuitos impresos "Fresar y Llenar" (Mill & Fill).

Título	Año de publicación	Descripción	Referencia
US4417393 - Método de fabricación de circuitos electrónicos de alta densidad con conductores muy estrechos	1983	Descripción del método de grabado "fresar y llenar" (Mill & Fill). Consiste en el micro maquinado de trincheras sobre un sustrato, deposición de material conductor y su posterior encapsulado con una capa de material aislante.	Becker, 1983.
US6163957 – Sustratos laminados multicapa con interconexiones de alta densidad y sus métodos de fabricación	2000	Es un método para crear circuitos multicapa partiendo del maquinado mediante laser de cada nivel, conformado a su vez por un propio arreglo de capas. Es decir, sobre el sustrato se incluyen capas removibles y de adhesivos colocadas según el lugar que tendrá esta capa en el circuito completo, y se maquilan junto con ella.	Jiang, Massingill, McCormack y Lee, 2000.
Embebido de circuitos electrónicos mediante escritura directa mediante láser	2006	Utilizando diferentes configuraciones de un equipo láser, se logra la obtención de un circuito impreso embebido en el sustrato. Para obtenerlo, el equipo láser realizó un micro maquinado sobre el sustrato, trazando las trincheras que conformarían las pistas del circuito; para después llenarlas mediante un proceso aditivo de transferencia frontal mediante láser (<i>laser induced forward transfer, LIFT</i>).	Piqué, Mathews, Pratap, Auyeung, Karns, et al., 2006.
US7014727 – Método de formación de circuitos electrónicos de alta resolución sobre un sustrato	2006	Consiste en una mejora para este método de grabado, donde se lamina y maquina junto al sustrato una capa de sacrificio. El incluir esta capa permite, que al final del proceso, el material conductor esté ubicado únicamente en los sitios deseados debido a que se le contuvo durante el proceso de grabado.	Wargo, Kydd, Mathews, Duignan, Gordon, et al., 2006.
Tecnología de interconexión de alta densidad simple, económica y confiable para aplicaciones electrónicas flexibles	2009	En lugar de aplicar una capa de sacrificio, se realiza un procedimiento químico que vuelve hidrofóbicas las superficies del sustrato. De esta manera, la película gruesa de polímero conductor utilizada, no se adhiere excepto a las zonas desprovistas de la capa química hidrofóbica (que a su vez son las trincheras micro maquinadas anteriormente).	Bhattacharya y Marinov, 2009.

Tabla 5. Patentes, desarrollos y avances relevantes para el método de grabado de circuitos impresos "Fresar y Llenar" (Mill & Fill) (continuación).

<p>Multifuncionalidad de la impresión 3D: estructuras con electrónica</p>	<p>2014</p>	<p>Por medio del sistema multi^{3D}, conformado por dos sistemas de modelado mediante filamento fundido (<i>fused deposition modeling, FDM</i>) y un dispositivo CNC integrado, se realiza la fabricación de sustratos con sistemas electrónicos embebidos. Como parte del proceso, una vez se ha impreso parte del sustrato, el dispositivo CNC maquina los trazos que posteriormente se rellenan con tinta conductora o algún otro material similar.</p>	<p><i>Espalin, Muse, MacDonald y Wicker, 2014.</i></p>
<p>CN111148363 – Método para preparar una placa de circuito flexible mediante grabado: escribir material nanoconductor en la superficie de la membrana polimérica</p>	<p>2020</p>	<p>La invención consiste en un método para grabar circuitos impresos flexibles sobre membranas poliméricas, mediante un proceso de grabado y escritura usando un material nano conductor. En este caso se utiliza una punta para realizar el grabado, después un aditamento que emplea tanto la capilaridad como la gravedad va depositando el material conductor sobre las pistas grabadas.</p>	<p><i>Huoyong, Duanchao y Zhaofeng, 2020.</i></p>
<p>US2020260591 – Método para formar la estructura de metalización</p>	<p>2020</p>	<p>Empleando un sustrato con una película de óxido de grafeno, se maquina el patrón deseado sobre esta capa. Mediante un proceso químico y de enchapado, el material conductor se deposita sólo en las zonas previamente grabadas sobre el sustrato, las cuales conforman al circuito deseado.</p>	<p><i>Ming – Huei, 2020.</i></p>

2.4. Proyectos de Investigación relevantes

A continuación, se enlistan los proyectos de investigación más relevantes y similares al que se describe en este trabajo:

❖ Solar Sinter:

Proyecto desarrollado por Markus Kayser en el 2011, el cual consistió en utilizar un concentrador solar con lente de Fresnel, y una cama de arena, para realizar impresiones en 3D de diferentes piezas artísticas con vidrio sinterizado a partir de las sales dispersas en la arena (véase Figura 6 y 7) (Kayser, 2011).

Este proyecto ha servido de inspiración para el desarrollo de otros similares; por ejemplo, el desarrollo de un sistema de impresión en arena en 3D que también utiliza ESC, destinado a países en desarrollo como una alternativa para la manufactura de sus utensilios o productos (Rietema, 2013, p. 5).



Figura 6. Concentrador solar con Lente de Fresnel y cama de arena usados para la impresión en 3D de figuras de vidrio (Kayser, 2011).



Figura 7. Escultura de vidrio impresa mediante el concentrador solar y cama de arena de Markus Kayser (Kayser, 2011).

❖ **RegoLight Project:**

Es un proyecto, y otros similares derivados del mismo, donde se investiga la posibilidad de sinterizar el suelo lunar o marciano para obtener elementos de construcción y crear diversas estructuras, con el propósito de establecer bases fijas para los astronautas y exploradores espaciales (véase Figura 8) (Imhof et al., 2017, p. 1; Chicos et al., 2021, p. 2 - 3).

Usan para ello diversas configuraciones y equipo de concentración solar, entre ellos aquellos con lente de Fresnel, así como tecnologías de manufactura aditiva, como la impresión en 3D y sinterizado selectivo mediante ESC (Imhof et al., 2017, p. 6; Maurisse et al., 2018, p. 800; Anderson et al., 2021, p. 733).

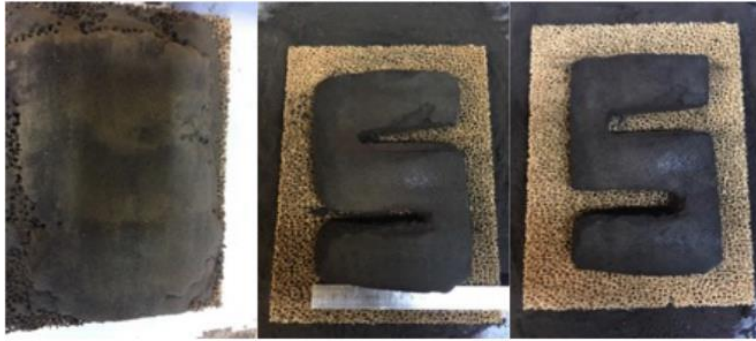


Figura 8. Figura en forma de S impresa mediante sinterizado solar en 3D (Imhof et al., 2017, p. 13).

❖ Solar tanning printer:

Es una impresora que utiliza la energía solar concentrada para realizar pequeñas quemaduras de manera selectiva sobre una hoja de papel, de esta forma logra imprimir imágenes y texto en blanco y negro (Seth, 2011). Esta impresora se caracteriza por el uso de energía solar concentrada, no requerir tinta, no necesita alimentación y es amigable con el medio ambiente (Seth, 2011) (véase Figura 9).



Figura 9. Impresora solar (solar tanning printer) (Seth, 2011).

REFERENCIAS

- Alami, A. H., & Aokal, K. (2017). *Experiments on polymer welding via concentrates solar energy*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 92, p. 3715 – 3724.
- Almeida, F., Guerra, L., Cruz, J., Rodríguez, J., Cañadas, I., Martínez, D., & Shohoji, N. (2009). *Mechanical Properties of Dense Cordierite Discs Sintered by Solar Radiation Heating*. Materials Transactions, Vol. 50, Issue 9, p. 2221 – 2228.
- Anderson, S. D., & Thangavelautham, J. (2021). *Solar-Powered Additive Manufacturing in Extraterrestrial Environments*. Earth and Space 2021: Space Exploration, Utilization, Engineering, and Construction in Extreme Environments - Selected Papers from the 17th Biennial International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments, p. 732 – 744.
- Apostol, I., Mahajan, A., Monty, C., J., A., & Saravanan, V. (2015). *Nanostructured MgTiO₃ thick films obtained by electrophoretic deposition from nanopowders prepared by solar PVD*. Applied Surface Science, Vol. 358, p. 641 – 646.
- Becker, C. A. (1983). *Method of fabricating high density electronic circuits having very narrow conductors*. US4417393
- Bhattacharya, S., & Marinov, V. (2009). *Simple, inexpensive, and reliable, high density interconnect technology for flexible electronics applications*. 2009 Flexible Electronics & Displays Conference and Exhibition, Phoenix, AZ, p. 1 – 6, doi: 10.1109/FEDC.2009.5069277.
- Bo, H. (2018). *A parallel light exposure device for PCB production*. CN206877037
- Cambronero, L. E. G., Cañadas, I., Martínez, D., & Ruiz-Román, J. M. (2010). *Foaming of aluminium-silicon alloy using concentrated solar energy*. Solar Energy, Vol. 84, p. 879 – 887.
- Cambronero, L. E. G., Cañadas, I., Ruiz-Román, J. M., Cisneros, M., & Corpas Iglesias, F. A. (2014). *Weld structure of joined aluminium foams with concentrated solar energy*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 214, p. 2637 – 2643.
- Cañadas, I., Martínez, D., Rodríguez, J., & Gallardo, J. M. (2005). *Viabilidad del uso de la radiación solar concentrada al proceso de sinterización de cobre*. Revista Metalurgia, Vol. Extr., p. 165 – 169.
- Cañadilla Sánchez, A., Rodríguez Donoso G.P., Romero Gutiérrez, A., Caminero Torija, M.A. (2022). *Caracterización de componentes de cobre puro producidos mediante fabricación aditiva por filamento fundido (FFF)*, XVI CNMAT22, Libro de Abstracts (ISBN 978-84-09-38118-0), 2022 (página 113)

- Chicos, L. A., Zaharia, S. M., Cempura, G., Kruk, A., Lech, S., Kryshtal, O., Zietara, M., Michta, G., Rodriguez, J., Cosnita, M., Pop, M. A., & Lancea, C. (2021). *Effect of concentrated solar energy on microstructure evolution of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, p. 1 – 26. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08136-6>
- Chicos, L. A., Zaharia, S. M., Lancea, C., Pop, M. A., Cañadas, I., Rodriguez, J., & Galindo, J. (2018). *Concentrated solar energy used for heat treatment of Ti6Al4V alloy manufactured by selective laser melting*. Solar Energy, Vol. 173, p. 76 – 88.
- Cruz, J., Amaral, P. M., Guerra, L., & Shohoji, N. (2000). *Weibull statistical analysis of flexure breaking performance for alumina ceramic disks sintered by solar radiation heating*. Ceramics International, Vol. 26, p. 203 – 206.
- Dahong, H., Liang, Z., Kai, S., Xueqin, L., Lin, R., Xiaorong, H., Xuelian, D., & Jiamin, L. (2018). *Full automatic exposure machine*. CN208013667
- Espalin, D., Muse, D. W., MacDonald, E., & Wicker, R. B. (2014). *3D Printing multifunctionality: structures with electronics*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 72, p. 963 – 978.
- Fernández, B. J., López, V., Vázquez, A. J., & Martínez, D. (1998). *Cladding of Ni superalloy powders on AISI 4140 steel with concentrated solar energy*. Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 53, p. 153 – 161.
- Fernández-González, D., Ruiz-Bustinza, I., González-Gasca, C., Piñuela, J., Mochón-Castaños, J., Sancho-Gorostiaga, J., & Verdeja, L. F. (2018). *Concentrated solar energy applications in materials science and metallurgy*. Solar Energy, Vol. 170, p. 520 – 540.
- Flamant, G., Ferriere, A., Laplaze, D., & Monty, C. (1999). *Solar processing of materials: Opportunities and new frontiers*. Solar Energy, Vol. 66, Issue 2, p. 117 – 132. 2020, July 3, from ScienceDirect Database.
- García, I., Gracia-Escosa, E., Bayod, M., Conde, A., Arenas, M. A., Damborenea, J., Romero, A., & Rodríguez, G. (2016). *Sustainable production of titanium foams for biomedical applications by Concentrated Solar Energy sintering*. Materials Letters, Vol. 185, p. 420 – 423.
- Grunwald, J., Gal, C., Hirsh, S., & Mozel, J. (1993). *Direct imaging process for forming resist pattern on a surface, and use thereof in fabricating printed circuit boards*. EP0557138
- Herranz, G., & Rodríguez, G. P. (2010). *Uses of Concentrated Solar Energy in Materials Science*. Rugescu, R. D., ed. Solar Energy. 1st ed. Croatia: INTECH. (p. 145 – 170).
- Herranz, G., Rodríguez, G. P., & Alonso R. (2010). *Comportamiento frente al desgaste de la aleación Ti6Al4V nitrurada con energía solar concentrada*. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Ciudad Real, España, p. 1 – 4.

- Herranz, G., Romero, A., de Castro, V., & Rodríguez, G. P. (2013). *Development of high speed steel sintered using concentrated solar energy*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 213, p. 2065 – 2073.
- Herranz, G., Romero, A., de Castro, V., & Rodríguez, G. P. (2014). *Processing of AISI M2 high speed steel reinforced with vanadium carbide by solar sintering*. Materials and Design, Vol. 54, p. 934 – 946.
- Hiroshi, O. (1995). *Manufacture of printing wiring board*. JP1995231163.
- Hua, Z., Wei, Z., Wei, X., Hanwen, W., & Ruzhi, M. (2016). *PCB that utilizes polygon prism scanning technique to go on exposing optical equipment that exposes to sun*. CN205539924
- Huoyong, Y., Duanchao, W., & Zhaofeng, O. (2020). *Method for preparing flexible circuit board by etching – writing nano conductive material on surface of polymeric membrane*. CN111148363
- Imhof, B., Urbina, D., Weiss, P., & Sperl, M. (2017). *Advancing Solar Sintering for Building a Base on the Moon*. 69^o International Astronautical Congress (IAC). Adelaide, Australia, p. 1 – 17.
- Jiang, H. H., Massingill, T., McCormack, M. T., & Lee, M. G. T. (2000). *Multilayer laminated substrates with high density interconnects and methods of making the same*. US6163957.
- Juling, F. (2018). *Exposure machine*. CN207181951
- Kaddou, A. F. K., & Abdul-Latif, A. (1969). *The Feasibility of Joining Metal Using a Solar Furnace*. Solar Energy, Vol. 12, p. 377 – 378.
- Karalis, D. G., Pantelis, D. I., & Papazoglou V. J. (2005). *On the investigation of 7075 aluminum alloy welding using concentrated solar energy*. Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 86, p. 145 – 163.
- Karalis, D. G., Pantelis, D. I., Daniolos, N. M., Bougiouri, V. D., Rodríguez, J., Karakizis, P. N., & Kazasidis, M. E. (2017). *An attempt of 5083–H111 aluminum alloy welding using variable concentrated solar energy*. In Proceedings of the 6th ICMEN International Conference, Tesseloniki, Greece, 5 – 6 October 2017, p. 1 – 10.
- Kayser, M. (2011). *Solar Sinter*. KAYSER WORKS. Recuperado en 1 de mayo, 2021, de: <https://kayserworks.com/798817030644>
- Kondo, T., & Maruyama, T. (1992). *Coating formation method*. JPH0465185
- Korol', A. A., Korol', E. A., Kasich-Pilipenko, I. E., Verkhovodov, P. A., Dvernyakov, V. S., & Kadyrov, V. Kh. (1983). *Use of concentrated solar energy in the application of slurry coatings*. Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol. 22, p. 276 – 279.

- Lacasa, D., Berenguel, M., Yebra, L., & Martínez, D. (2006). *Copper Sintering in a Solar Furnace through Fuzzy control*. Proceedings of the 2006 IEEE, International Conference on Control Applications, Munich, Germany, p. 2144 – 2149.
- Llorente, J., & Vázquez, A. J. (2009). *Solar hardening of steels with a new small scale solar concentrator*. Materials Chemistry and Physics, Vol. 118, p. 86 – 92.
- Luca, M. A., Tierean, M. H., Pisu, T. M., Rodriguez, J., & Croitoru, C. (2020). *The influence of concentrated solar energy flux on the structure and properties of stainless steel brazed joints*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 141, p. 1291 – 1304.
- Maurisse, A., Makaya, A., Willsch, C., & Sperl, M. (2018). *Solar 3D printing of lunar regolith*. Acta Astronautica, Vol. 152, p. 800 – 810.
- Ming – Huei, Y. (2020). *Method for forming metallization structure*. US2020260591.
- Pantelis, D. I., Karakizis, P. N., Kazasidis, M. E., Karalis, D. G., & Rodriguez, J. (2017). *Experimental and numerical investigation of AA6082-T6 thin plates welding using Concentrated Solar Energy (CSE)*. Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 171, p. 187 – 196.
- Pantelis, D. I., Kazasidis, M., & Karakizis, P. N. (2017). *Titanium Alloys Thin Sheet Welding with the Use of Concentrated Solar Energy*. Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 26, Issue 12, p. 5760 – 5768.
- Piqué, A., Mathews, S. A., Pratap, B., Auyeung, R. C. Y., Karns, B. J., & Lakeou, S. (2006). *Embedding electronic circuits by laser direct-write*. Microelectronic Engineering, Vol. 83, p. 2527 – 2533.
- Prado, L., García de la Camacha, A., Cañadilla Sánchez A., Romero Gutiérrez A, Rodríguez Donoso, G. P., Caminero Torija, M.A. (2022) Procesamiento de piezas de acero de herramientas mediante impresión con filamento fundido y sinterización solar, XVI CNMAT22, Libro de Abstracts (ISBN 978-84-09-38118-0), 2022 (p. 153)
- Qionghuang, H. (2018). *Multilayer printed wiring board optical locating device that exposes to sun*. CN207118093
- Rietema, M. J. (2013). *Design of a solar sand printer*. <https://essay.utwente.nl/69808/> (Accessed November 29, 2021).
- Rodriguez, G. P., Herranz, G., & Romero, A. (2013). *Solar gas nitriding of Ti6Al4V alloy*. Applied Surface Science, Vol. 283, p. 445 – 452.
- Rojas-Morín, A., Flores-Salgado, Y., Álvarez-Brito, O., Jaramillo-Mora, A., & Barba-Pingarrón A. (2022). *Thermal analysis using induction and concentrated solar radiation for the heating of metals*. Results in Engineering, Vol. 14, p. 1 – 12.

- Romero, A., García, I., Arenas, M. A., López, V., & Vázquez, A. (2013). *High melting point metals welding by concentrated solar energy*. Solar Energy, Vol. 95, p. 131 – 143.
- Romero, A., García, I., Arenas, M. A., López, V., & Vázquez, A. (2015). *Ti6Al4V titanium alloy welded using concentrated solar energy*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 223, p. 284 – 291.
- Romero, A., Rodríguez, G. P., Conde, A., de Damborenea, J. J., García, I., & Arenas, M. A. (2018). *Sinterización de espumas de titanio en un horno solar parabólico*. Material-ES, Vol. 2, Issue 2, p. 18 – 21.
- Rouanet, A., Solmon, H., Pichelin, G., Roucau, C., Sibieude, F., & Monty, C. (1995). *Synthesis by vaporization-condensation and characterization of γ -Fe₂O₃, In₂O₃, SnO₂, ZnO and Zr_{1-x}Y_xO_{2- δ} nanophases*. NanoStructured Materials, Vol. 6, p. 283 – 286.
- Sánchez Olías, J., García, I., & Vázquez, A. J. (1999). *Synthesis of TiN with solar energy concentrated by a Fresnel lens*. Materials Letters, Vol. 38, p. 379 – 385.
- Seth, R. (2011). *The art of solar printing*. Yanko Design. Recuperado en 2 de mayo, 2021, de: <https://www.yankodesign.com/2011/09/29/the-art-of-solar-printing/>
- Sierra, C., & Vázquez, A. J. (2005a). *High solar energy concentration with a Fresnel lens*. Journal of Materials Science, Vol. 40, p. 1339 – 1343.
- Sierra, C., & Vázquez, A. J. (2005b). *NiAl coatings on carbon steel by self-propagating high-temperature synthesis assisted with concentrated solar energy: mass influence in adherence and porosity*. Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 86, p. 33 – 42.
- Siores, E. (1997). *Thermoplastic joining using solar energy concentrator*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 37, Issue 9, p. 1273 – 1279.
- Solar sintering of pure copper parts manufactured via Fused Filament Fabrication (FFF), Antonio Cañadilla, Ana Romero, Gloria P. Rodríguez, Miguel Á. Caminero, Poster presentation, Junior Euromat 2022, Coimbra, Portugal, 19-22 Julio 2022.
- Stoynov, L. A., Yarlagadda, P. K. D. V., & Yen, W. C. (2000). *A feasibility study into joining of engineering thermoplastics utilizing concentrated beam solar radiation*. Renewable Energy, Vol. 21, p. 333 – 361.
- Suresh, D., & Rohatgi, P. K. (1979). *Melting and casting of alloys in a solar furnace*. Solar Energy, Vol. 23, p. 553 – 555.
- Wargo, C., Kydd, P., Mathews, S., Duignan, M., Gordon, S., Zhang, C., & Kegresse, T. A. (2006). *Method of forming high resolution electronic circuits on a substrate*. US7014727.
- Xiaoliang, W., Xiaobin, Z. & Xuehui, X. (2018). *Exposure machine is used in printed circuit board preparation*. CN207965471

Xiongxiang, C. (2016). *A novel exposure machine for circuit board is made*. CN205507359

Yong, C., Zhixin, C., Xinquan, L., & Houwen, C. (2019). *A processing apparatus before base plate inlayer for processing of PCB board*. CN208584305

Zhanliang, W., Ming, Z., & Tao, H. (2016). *Device of two -sided exposure*. CN205507357

Zhencai, C. (2019). *Exposure machine with foot switch*. CN208506494

Zheng, W., & Qiao, G. (2020). *Mechanical behavior of the metal parts welded with extraterrestrial regolith simulant by the solar concentrator in ISRU & ISRF application*. *Advances in Space Research*, Vol. 65, p. 2303 – 2314.

Zhiwei, F. (2017). *Inversion optical equipment that exposes to sun*. CN206411418

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE GRABADO ADITIVO CON ESC Y MODELO DEL FENÓMENO

3.1. Descripción del receptor solar para realizar el grabado de circuitos impresos

Con base en los diversos dispositivos, métodos de grabado y el Estado del Arte descrito antes, se encontró que los equipos para el grabado aditivo de circuitos impresos mediante láser, uno desarrollado por Eliot V. Cook (1990) y reportado en la patente *US4895735 (Radiation induced pattern deposition)*, y con modificaciones para realizar el grabado de sustratos en la cara posterior (*Laser-induced backward transfer*) presentado por Mir-Hosseini et al. (2005), resultaron ser los adecuados para realizar la tarea de grabado empleando ESC (p. 205).

De los dispositivos mencionados antes sólo se tomaron características como la configuración y la composición, debido a que el principio de funcionamiento es diferente al emplear ESC. El esquema del receptor se ilustra a continuación (véase Figura 10):

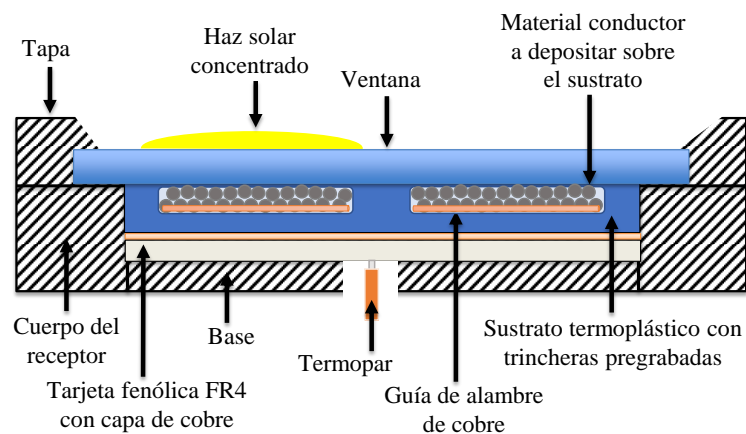


Figura 10. Esquema del prototipo para realizar el grabado de circuitos impresos mediante ESC.

El receptor está constituido por tres piezas principales:

- *Tapa con ventana.* La ventana ofrece una vía de acceso al haz solar concentrado al interior del receptor. Ésta tiene que ser de un material lo más transparente posible, de esta manera se buscan minimizar las pérdidas debido a la absorbanza o reflexión por su parte.

Hay que tener en cuenta la naturaleza del material de la ventana. Si se elige una ventana de acrílico transparente PMMA, deberá de reemplazarse después de varias exposiciones debido a que se deforma, no limita el movimiento del conductor eléctrico a depositar y causa distorsiones al haz concentrado que lo atraviesa en su camino a la pista en formación.

La frecuencia a la que se debe de reemplazar esta ventana depende de la complejidad de los circuitos expuestos, ya que entre mayor sea el número de pistas se requerirá de un mayor tiempo de exposición al haz. La ventana también ayuda a la formación de la pista al darle un límite superior al material conductor eléctrico; a su vez, mantiene aislado al arreglo de materiales, evitando pérdidas inmediatas de calor por convección.

La tapa, a su vez, cuenta con numerosos barrenos, alineados con otros presentes en la base. Estos permiten el ensamble y sujeción, mediante tornillos, entre las tres piezas que conforman al receptor.

- *Cuerpo contenedor de material a depositar y sustrato.* El material para depositar sobre el sustrato puede ser material conductor eléctrico (material conductor o conductor en lo sucesivo) que permita adaptarse a cualquiera que sea la forma que vayan a tener las pistas del circuito (e. g. *solder ball*) (Tönshoff et al., 1997, p. 192).

El sustrato utilizado es de termoplástico, el proceso de grabado es aditivo y requiere que el material a depositar sea conductor. Se han seleccionado estos sustratos debido a la capacidad de este tipo de materiales de suavizar su estructura con el aumento de la temperatura, sin quemarse o destruirse en el proceso (Stoynov et al. 2003, p. 68; Amancio-Filho et al., 2009, p. 1464).

El uso de este tipo de materiales como sustrato para circuitos impresos ha sido reportado con anterioridad por otros autores (Srinivasan et al., 1955; Criales et al., 2015; Contreras-Saenz et al., 2017, p. 119; Karnati et al., 2017, p. 1 - 4).

También se ha reportado el grabado de circuitos impresos usando soldadura de estaño plomo sobre sustratos termoplásticos. Dou et al. (2021) describen un sistema que emplea goteo por demanda (*drop-on-demand*) de metal fundido; en el cual gotas de aleación Sn60Pb40 se depositan sobre uno de estos sustratos, lo que causa que parcialmente se embeban en ella (2021, p. 1).

Por ahora, en el método de goteo por demanda de metal fundido los componentes electrónicos se han unido a las pistas del circuito mediante pasta conductora de plata; y tiene como ventajas adicionales la formación de estructuras en 3D y que el circuito impreso es reciclable al término de su ciclo de vida (Duo, et al., 2021, p. 1, 3).

En el sistema desarrollado aquí, los sustratos poseen trazos preexistentes de las pistas que conforman al circuito en particular. A estos trazos se les denomina trincheras, con ello el proceso de grabado es similar al método de “*fresar y llenar*” (*Mill & Fill, M&F*) (Piqué et al., 2006, p. 2528; Bhattacharya et al., 2009, p. 2; Espalin et al., 2014, p. 970).

En el fondo de cada trinchera se ha colocado un alambre de cobre (e. g. AWG 35), con el propósito de que la pista guarde continuidad eléctrica de extremo a extremo sin importar que el material conductor eléctrico, como causa del cambio de fase a líquido, sufra interrupciones. Esta idea fue tomada por los cables embebidos descritos en la patente US20160324009 A1 para la obtención de circuitos impresos (Wicker et al., 2016).

Durante el proceso de exposición de las pistas al haz concentrado, como consecuencia del aumento de temperatura del sustrato termoplástico y de un material conductor en esferas con huecos llenos de aire, aparecerán burbujas en el sustrato (tanto alrededor de la pista como en su proximidad) y en la pista conductora (como resultado del aire atrapado desplazándose hacia arriba aprovechando la reorganización del material durante el cambio de fase).

Las burbujas al interior del sustrato termoplástico ya han sido reportadas por múltiples autores en los procesos convencionales de uniones híbridas plástico – metal asistidas por láser (*LAMP, laser-assisted joining of metal-polymer*) (Kawahito et al., 2006, p. 378; Chen et al., 2016, p. 776; Hussein et al., 2017, p. 67).

Debido a lo anterior, los elementos involucrados presentarán desplazamientos que pueden afectar o interrumpir la continuidad de la pista. El alambre embebido, al fondo y de extremo a extremo de la pista, cobra su importancia al mantener la conexión a lo largo de la trayectoria.

En circuitos con pistas ramificadas, o que conectan más de dos puntos a lo largo de su trayecto, es preferible que el alambre embebido pase por todos esos puntos con el fin de asegurar la conexión a lo largo de toda la pista. Incluso se puede recurrir a varios alambres embebidos, los cuales se empalmen en algunos sitios a lo largo de la trayectoria.

Cuando ocurre el cambio de fase a líquido por parte del material conductor, es importante que el receptor se mantenga en posición horizontal para evitar que éste se salga o derrame fuera de la trinchera. Es preferible que el receptor se mantenga en esta posición a lo largo de todo el proceso; aun cuando cause que el foco del haz concentrado sobre el receptor sea elíptico.

Debajo del sustrato se coloca una tarjeta fenólica FR4 con capa de cobre, como medida de protección para la base del receptor. Al ubicarse entre el sustrato y la base, ayuda a reflejar el haz solar concentrado que pudiera llegar a traspasar al material conductor, o porque éste no se encontraba en ese sitio en particular del sustrato.

Debido a que el cobre es un buen conductor y disipador de calor, impide que el sustrato se queme, dañe o se adhiera a la base. La capa inferior de baquelita de la tarjeta fenólica funciona como aislante térmico. Esto permite dar un freno a la transferencia de calor iniciada por el haz concentrado incidente en el receptor, y que ya ha atravesado todo el anterior arreglo de materiales de interés.

- *Base.* La base del receptor es removible y permite acceso por la parte posterior. Cuenta con numerosos barrenos, alineados con los ubicados en la tapa, y cuya función es permitir el ensamble entre las piezas principales del receptor mediante tornillería.

Posee al menos un barreno que le atraviesa desde la cara posterior hasta la frontal. Este barreno permite la colocación de un termopar con el cual se podrá medir la temperatura de la tarjeta fenólica FR4 a lo largo del experimento. El número y ubicación de los barrenos para termopares dependerán del circuito en particular del que se trate y el interés por conocer la distribución de temperatura por zonas.

La sujeción mediante tornillería, ayudada por la geometría de la pieza, permite que se pueda ejercer presión entre los elementos contenidos; sobre todo, entre sustrato y el conductor a depositar.

3.1.1. Diseño de detalle del prototipo

Con base en el diseño conceptual descrito, se procede a generar las piezas que conforman al receptor solar mediante un software de CAD. En la Figura 11 se muestran las tres piezas principales que conforman al receptor (tapa, cuerpo y base); y en la Figura 12 se muestra la simulación de ensamble donde estas piezas se involucran:

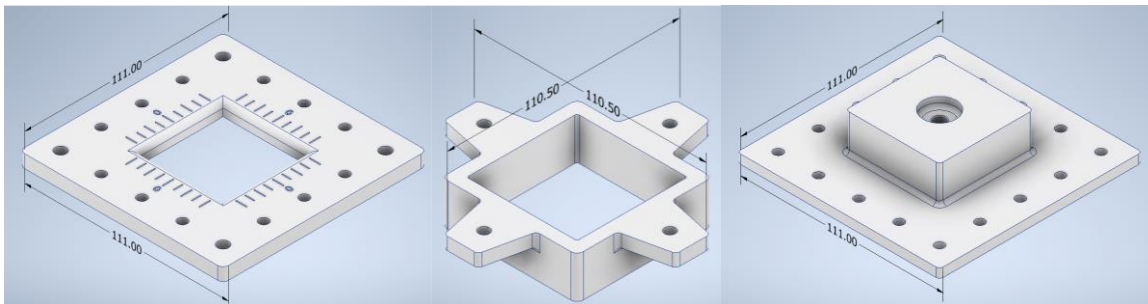


Figura 11. Piezas desarrolladas mediante software de CAD que conforman al receptor solar. De izquierda a derecha, las piezas son la tapa, cuerpo y base del receptor.

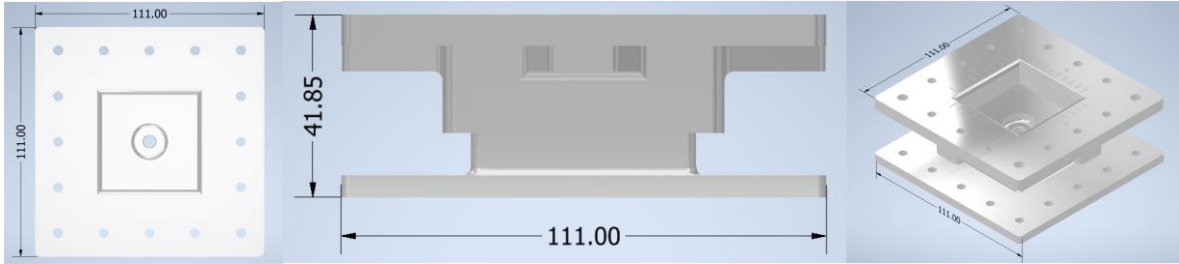


Figura 12. Ensamble de las piezas que conforman al receptor solar.

A partir de la información de las piezas obtenidas mediante el software de CAD, se obtienen los archivos STL necesarios para manufacturarlas mediante impresión en 3D. En la Figura 13 se muestran las piezas resultantes, junto con los tornillos, tuercas y roldanas necesarios para su ensamble. En la Figura 14 se muestra la secuencia de ensamble de las piezas previo al paso de colocación del arreglo de materiales para el grabado del circuito.

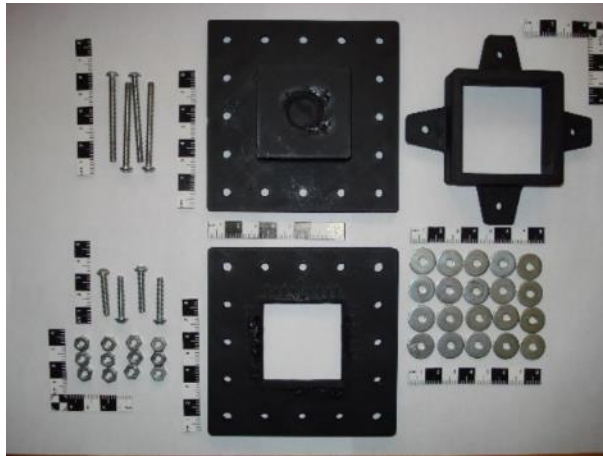


Figura 13. Total de piezas involucradas en el ensamble del receptor solar

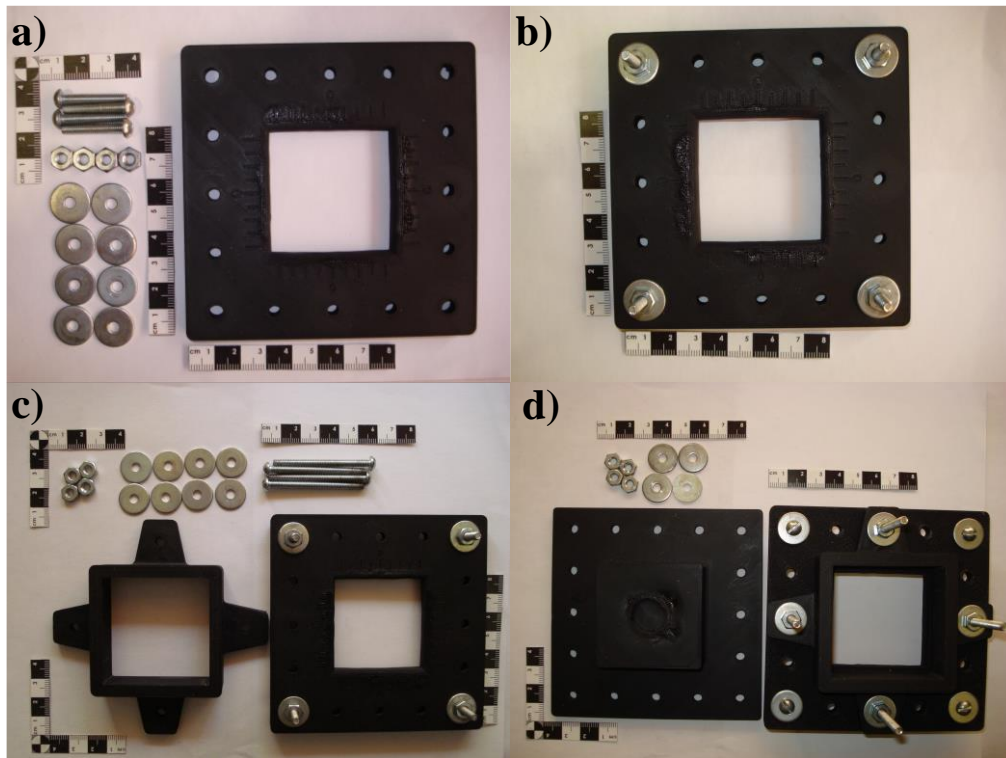


Figura 14. Secuencia del ensamble de las piezas que conforman al receptor solar: a) se muestran la tapa y su tornillería, b) el ensamble de éstas, c) se muestran las piezas que conforman el ensamble cuerpo y tapa, d) se observan unidos el cuerpo y la tapa, así como la base y elementos restantes. Estos últimos se usarán para el ensamble final una vez que el arreglo de materiales se encuentre en posición.

3.1.2. Metodología para grabar circuitos impresos mediante ESC

Paso 1. Preparación del arreglo de Materiales

Para llevar a cabo el grabado de un circuito impreso, de manera aditiva mediante ESC, es necesario preparar el arreglo de materiales que se alojan al interior del receptor. En la Figura 15 se muestran los materiales involucrados, los cuales son:

- a. una ventana de PMMA transparente de 50 mm por lado y 3 mm de espesor,
- b. un sustrato de PETG calibre 80 (50 mm por lado y 2 mm de espesor),
- c. una tarjeta fenólica FR4 con capa de cobre con 50 mm por lado,
- d. alambre de cobre delgado (e. g. AWG 35, la cantidad de alambre varía según el número, forma y dimensiones de las pistas de cada circuito en particular)

- e. *solder ball* en cantidad suficiente para cubrir todas las trincheras grabadas en el sustrato (e. g. *solder ball* aleación Sn63Pb37 de 0.5 mm de diámetro, A1, Profound Material Technology).

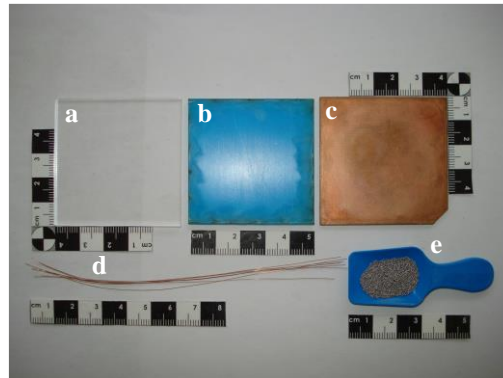


Figura 15. Materiales involucrados en el arreglo alojado al interior del receptor

Paso 2. Grabado de trincheras sobre el sustrato

Utilizando cualquier software de simulación de circuitos eléctricos y generador de PCB, se imprime una imagen que sirve de guía para el trazo de las trincheras sobre el sustrato. Mediante una navaja de corte se hace el primer trazo de las trincheras sobre el sustrato.

Se repite cada trazo del patrón auxiliándose de un Dremel 3000 equipado con una fresa para grabar de 0.8 mm (105), hasta obtener un milímetro de profundidad en todos ellos; esto se realiza auxiliándose a su vez de un escariador cilíndrico con 1/16 de pulgada de diámetro (113) de Dremel. Los elementos involucrados y el resultado obtenido se pueden observar en la Figura 16:

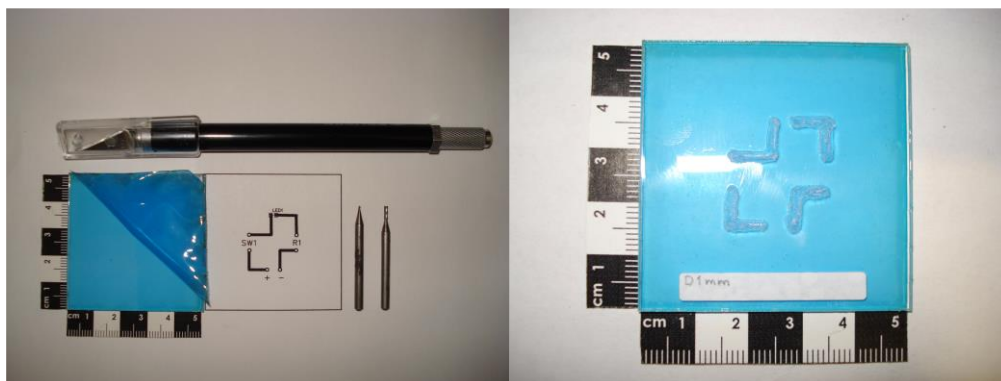


Figura 16. Elementos para realizar el grabado de las trincheras sobre el sustrato (izquierda) y los resultados del proceso para un circuito en particular (derecha).

El paso siguiente es la colocación de alambre embebido al interior de cada trinchera grabada sobre el sustrato. Debe cuidarse que el alambre recorra de extremo a extremo cada pista; si ésta cuenta con ramificaciones, se recurre a utilizar más de uno; no importa que en alguna sección de la pista se tenga un empalme de alambres.

Paso 3. Colocación del arreglo de materiales en el receptor solar

Se procede a colocar la tarjeta fenólica FR4 sobre la base, seguida por el sustrato PETG con las pistas grabadas orientadas hacia arriba. En la Figura 17 se muestra la secuencia de los pasos descritos, mientras que en la Figura 18 se muestra el resultado obtenido:

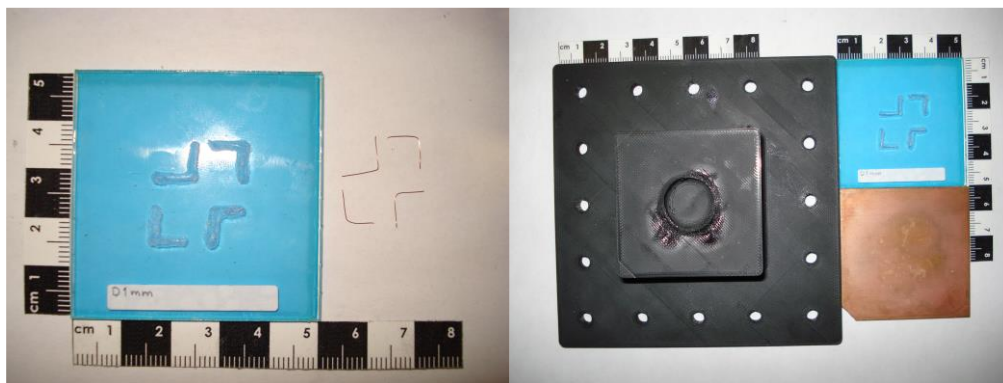


Figura 17. Sustrato PETG y sus alambres respectivos para cada trinchera (izquierda). Base del receptor, sustrato de PETG y tarjeta fenólica FR4 (derecha).

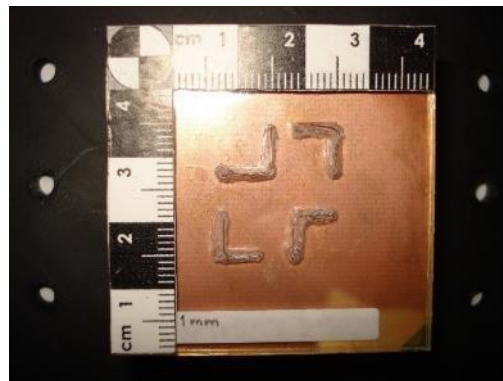
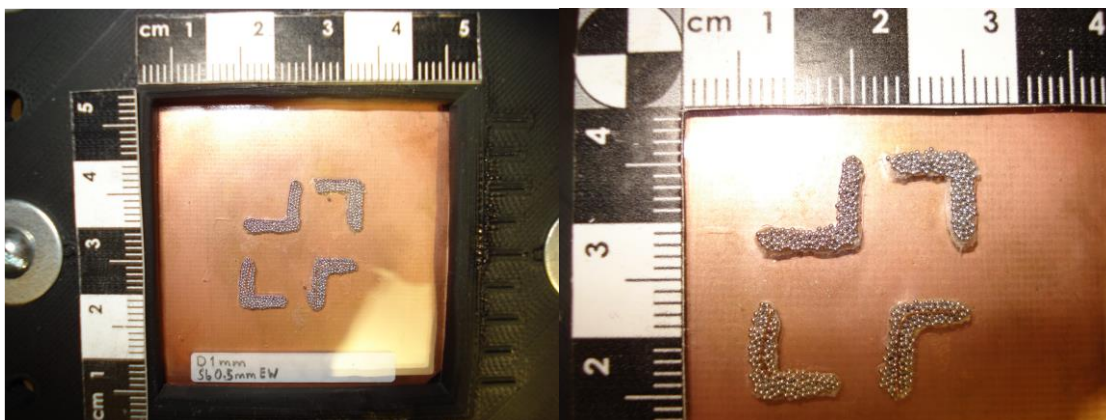


Figura 18. Sustrato de PETG con alambres colocados, seguido por una tarjeta fenólica FR4, en posición sobre la base del receptor.

Se rellena cada trinchera con *solder ball* (para este caso, aleación Sn63Pb37 de 0.5 mm de diámetro). Debido a las dimensiones de la trinchera y del material conductor depositado, el acomodo del material no queda uniformemente distribuido al interior de cada trazo. Para evitar que falte material conductor, a cada trinchera se coloca un nivel adicional de material sobre cada pista que equivale cerca del 20 al 25% del que le corresponde al trazo en particular.

Por medio de la ventana de PMMA transparente, se aplica una presión uniforme de aproximadamente 50 kPa sobre todo el arreglo de materiales. Esta presión empuja al material conductor al interior de la trinchera y causa una distribución más uniforme de éste. Se cierra y ajusta todo el arreglo de materiales al colocarle la tapa y cuerpo del receptor sobre la base. El ajuste se realiza mediante la tornillería disponible en el ensamble del receptor y debe quedar firme. La nueva presión que se ejerce sobre el arreglo ya no es importante.

El verdadero propósito del ajuste es evitar el movimiento del material conductor debido a la manipulación del receptor. La presión resultante entre la ventana del receptor y el arreglo son únicamente para confinar al material conductor. En la Figura 19 se observa la condición final del arreglo de materiales, el cual se encuentra listo para el paso de exposición al haz de ESC.



*Figura 19. Arreglo de materiales alojado al interior del receptor solar, listo para su exposición a ESC (izquierda).
Detalle de las pistas grabadas sobre el sustrato de PETG con alambre embebido y material conductor colocados (derecha).*

Paso 4. Obtención del foco solar y exposición del circuito

Debido a que el propósito es que se irradie lo mejor posible cada pista del circuito con un haz suficientemente concentrado para causar los cambios deseados (fusión del material conductor y adherencia al sustrato), se busca determinar mediante pruebas la distancia a la lente que da por resultado el foco requerido.

Se emplean sustitutos del arreglo de materiales con una simulación del circuito de interés. El sustituto consiste en una tarjeta de MDF con las mismas dimensiones del arreglo (50 mm por lado), colocado al interior del receptor junto con la ventana de PMMA. En la Figura 20 se observan los sustitutos empleados, así como la colocación de uno al interior del receptor. En la Figura 21 se observan los focos obtenidos al exponer a los sustitutos al foco que se obtiene a 140 mm de la lente de Fresnel.

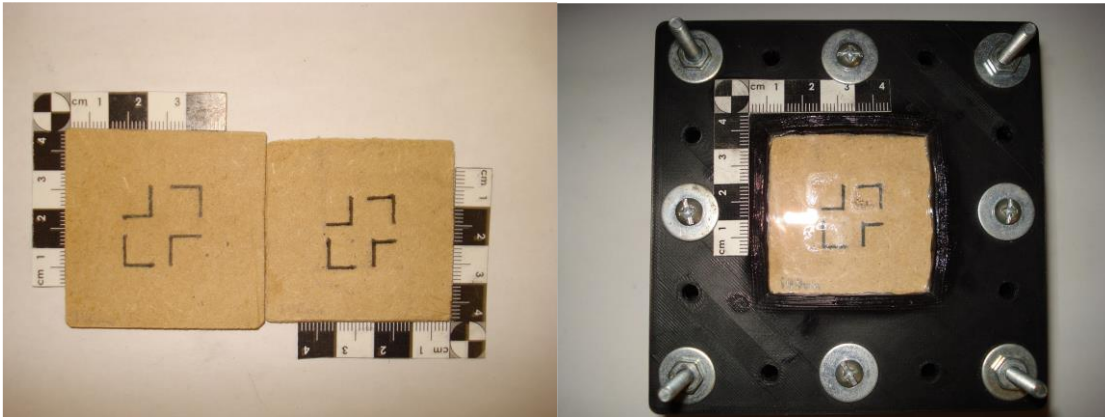


Figura 20. Sustitos del arreglo de materiales con una simulación del circuito de interés (izquierda). Montaje del sustituto al interior del receptor solar (derecha).

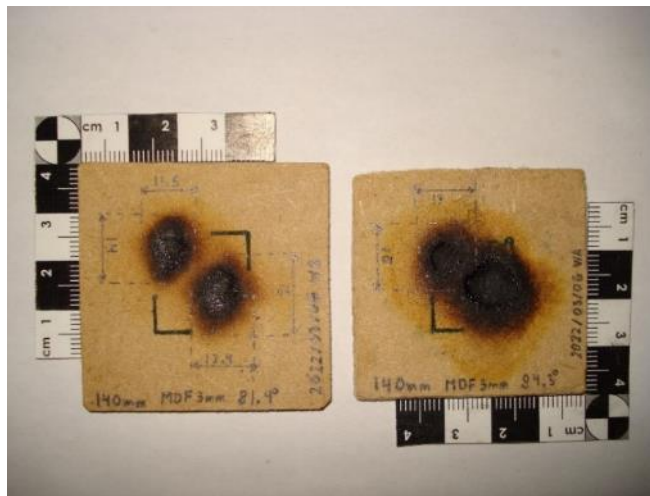


Figura 21. Focos resultantes de la exposición del sustituto al haz solar concentrado a 140 mm de la lente de Fresnel.

Se puede observar en la Figura 21 que el foco que se obtiene a 140 mm de la lente es suficiente para cubrir toda la zona donde se ubica la pista de interés. Sólo se realizan las exposiciones de las pistas en las esquinas para visualizar mejor los resultados. Aun así, no se está exento de que las marcas sobre el sustituto se deformen debido a la proximidad con otra zona previamente expuesta.

En la Figura 22 se muestra un bosquejo con las dimensiones de las pistas expuestas y los focos utilizados, ubicados de manera aproximada a la exposición real. Los focos corresponden a una exposición a 140 mm de distancia a la lente de Fresnel y dos ángulos de elevación (84.3° ilustrado en rojo, y 81.4° ilustrado en verde):

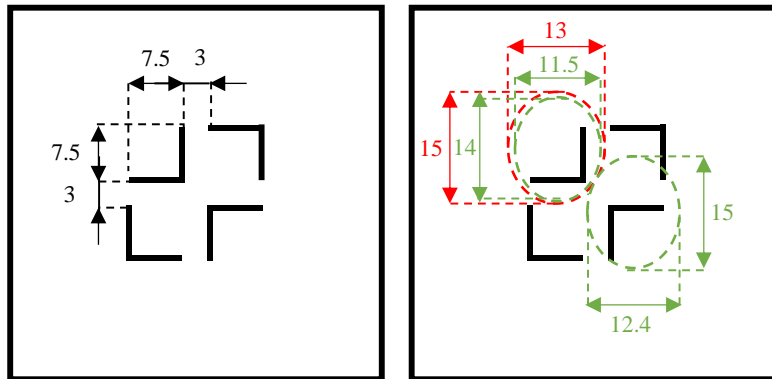


Figura 22. Bosquejo de las dimensiones de las pistas del circuito de prueba (izquierda) e ilustración de los focos elípticos obtenidos a 140 mm de distancia a la lente de Fresnel (derecha, a 84.3° en color rojo y 81.4° en color verde, de elevación). Medidas en mm.

Cada equipo de concentración solar de imagen es diferente, así que estos ajustes se realizan tomando en cuenta las características del equipo en particular. En este caso se está empleando una lente de Fresnel de 30 cm por lado como el equipo óptico de concentración. El cual implica una distancia a la lente de 140 mm, y una eficiencia general de 18%, para buscar garantizar un haz solar concentrado de 8000 kWm^{-2} , idealmente.

Dependiendo de las características del concentrador solar de imagen utilizado, para garantizar un foco de intensidad aproximada al mencionado, tal vez no le es posible hacer una exposición global de sustrato porque las dimensiones del foco resultante no lo permiten. Entonces, se debe de optar por idear una trayectoria o secuencia de exposición del circuito, a la vez sujeto a la configuración, número y geometría de las pistas distribuidas a lo largo del sustrato.

En este caso se seguirá describiendo la ruta de desarrollo sobre el circuito de muestra descrito en la Figura 16, junto con las condiciones de operación resultantes y características para el tipo de concentrador de imagen disponible y descrito en el Capítulo 4. A su vez, para este caso se requirió de una secuencia de exposición, la cual es particular para el circuito de prueba elegido, dicha secuencia se encuentra descrita en la Figura 24.

Cuando el circuito se encuentre listo para la exposición al haz solar concentrado, lo que implica su correspondiente montaje al concentrador y afinar todos los detalles ya mencionados, la exposición consiste en usar el haz solar concentrado sobre la pista en particular sobre la cual se está trabajando y mantenerlo así hasta conseguir el cambio de fase del material conductor eléctrico utilizado.

Logrado este paso, se debe de cambiar de blanco, o cesar la exposición si se trataba de la última pista. No se debe de mantener el haz solar sobre una pista que ya alcanzó su cambio de fase, debido a que se corre el riesgo de que el material conductor en fase líquida se derrame fuera de la trinchera o se sobre exponga la pista, causándole deformaciones.

Una vez que se logra el cambio de fase del conductor utilizado, se espera que el sustrato haya alcanzado la temperatura de transición vítrea (esto depende del par de materiales elegidos para conformar el arreglo, es decir, el sustrato termoplástico y el material conductor elegidos), la cual permite que la pista conductora se aloje sobre la superficie del sustrato y quede incrustada en él. Para el circuito en particular aquí descrito, esta secuencia de exposición se encuentra ilustrada en la Figura 30.

Para garantizar que el par de materiales elegido para la realización del circuito (material conductor y sustrato termoplástico) se unan mediante la unión híbrida esperada tras el paso de exposición, se hace referencia al apartado 3.2, en el cual se describe el modelo de interacción entre haz solar y arreglo de materiales.

Antes de probar cualquier par de materiales elegido, se recomienda haber realizado una simulación preliminar donde se compruebe que los materiales alcancen sus respectivas temperaturas deseadas bajo las condiciones de operación conocidas del equipo de concentración (es decir temperatura de fusión del material conductor y de transición vítrea del sustrato termoplástico). Un ejemplo de esto se encuentra detalladamente descrito en el apartado 3.3.1 de este trabajo.

Una vez que se ha concluido la exposición de todas las pistas en el circuito sobre el cual se está trabajando, se retira el receptor solar del concentrador y se deja enfriar por medio de convección libre a temperatura ambiente. Una vez que se encuentre en equilibrio con el ambiente, es posible desensamblar el receptor y retirar de su interior el circuito resultante, tal como se muestra en la Figura 31.

3.2. Modelo de la interacción entre haz solar y arreglo de materiales

Este apartado contiene al modelo empleado para describir las variables principales involucradas y el desarrollo del proceso de grabado de circuitos impresos mediante el uso de ESC. El interés por este modelo está en que es de suma importancia el control de la morfología de las pistas, su estabilidad y adhesión al sustrato; sin embargo, escasea este tipo de investigaciones en torno a estos temas (Kim et al., 2006, p. 1; Smith et al., 2006, p. 4153; Berg et al., 2007, p. 677; Perelaer et al., 2010, p. 272).

El Sol, nuestro astro más cercano, con un diámetro de 1.39×10^9 m y ubicado a una distancia media de 1.5×10^8 km con respecto a la Tierra, emite alrededor de 3.8×10^{20} MW de energía radiante en todas direcciones, de la cual llega al planeta cerca de 1.7×10^{14} kW (Kalogirou, 2009, p. 49).

De la radiación emitida por el astro y captada por la Tierra, aquella con longitud de onda entre 0.15 a 3.0 μm , es decir, radiación dentro de las regiones ultravioleta, visible e infrarrojo con efectos principalmente térmicos sobre los receptores, es la que interesa para aplicaciones con energía solar (Kalogirou, 2009, p. 72 – 73, 89). Para una ubicación geográfica en particular, la energía captada por los colectores solares ahí ubicados se le llama *insolación* (Kalogirou, 2009, p. 91 – 92).

La insolación recibida sobre un área en particular sobre la superficie terrestre se compone de *radiación directa*, la cual es energía radiante que atraviesa directamente la atmósfera, y *radiación difusa*, la cual tiene origen en la interacción atmosférica y del entorno con la radiación solar (energía radiante que fue absorbida, dispersa o reflejada) (Kalogirou, 2009, p. 91 – 92).

La energía solar en cualquier punto sobre la Tierra depende de lo siguiente (Kalogirou, 2009, p. 92):

- El grueso de la capa de ozono
- La distancia que recorrió la energía radiante a través de la atmósfera para llegar a ese punto
- La cantidad presente en el aire de neblina, polvo, vapor de agua, etc.
- La cantidad de nubosidad presente

Los dispositivos utilizados para la medición de la energía solar que llega a un sitio en particular son el pirheliómetro y el piranómetro. El primero se usa para medir la *irradiación solar directa* (bloquean la radiación difusa presente); mientras que el segundo mide la radiación total (directa y difusa) sobre su campo de visión hemisférico (Kalogirou, 2009, p. 104).

El concentrador elegido emplea una lente de Fresnel, debido a que es un concentrador de imagen que permite observar al foco del haz concentrado sobre la superficie receptora colocada a cierta distancia de la lente. A su vez, la forma y funcionamiento particular de este tipo de concentradores, permite el montaje de mecanismos, ajustes e inclusión de otros sistemas; sin intervenir en la función principal de la lente, la concentración de energía solar.

Si las lentes de Fresnel fueran ideales, sin pérdida energética alguna entre la radiación incidente sobre su superficie y el haz concentrado presente en el foco, sería suficiente dato el factor de concentración para conocer la magnitud de la irradiación incidente sobre el receptor. Puesto que esto último no ocurre, es necesario incluir una estimación de la eficiencia de la lente. La eficiencia se ve afectada por dos grupos de fenómenos; Victoria et al. (2016) propone la siguiente clasificación (p. 407) (véase Figura 23):

- *Eficiencia óptica efectiva.* Son aquellos que disminuyen la magnitud del poder radiante a la salida (absorción por parte del material de la lente, reflexiones en cualquier de las caras de la lente, pérdidas debidas al número de surcos y los ángulos de los trazos, dispersión lambertiana debido a ángulos grandes en las interfaces, etc.).
- *Factor de concentración efectiva.* Aquellos que afectan la distribución espectral y espacial de la irradiación presente en el foco (aberración cromática, el ancho de los surcos de la lente, dispersión a ángulos bajos debido a la calidad de la superficie, presencia de curvatura en la lente, errores de manufactura y efectos debidos a la temperatura).

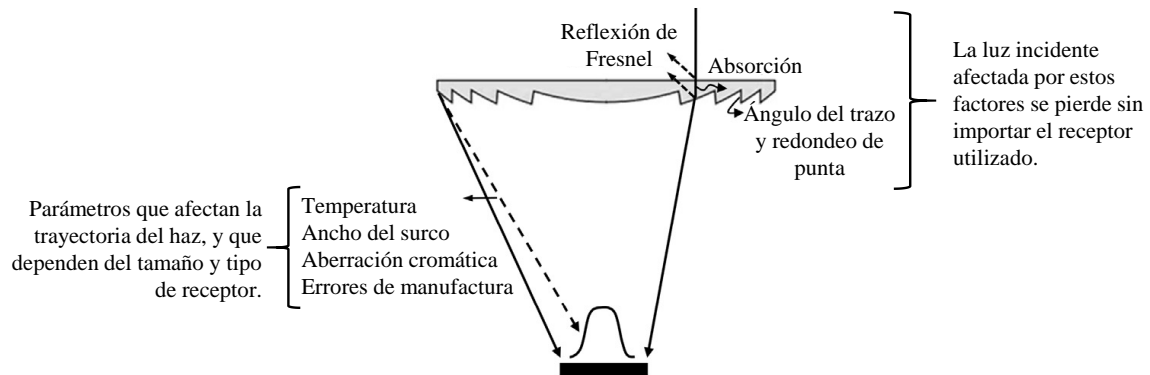


Figura 23. Esquema y resumen de los factores principales que afectan la eficiencia de la lente de Fresnel (Victoria et al., 2016, p. 408).

La eficiencia general η_g de una lente iluminada por una fuente de luz, se define como el cociente del poder radiante presente a su salida P_{out} , entre el presente en la abertura de entrada P_{in} (Antón et al., 2003; Victoria et al., 2016, p. 408). Ésta se puede expresar en función de G_{in} , la irradiación promedio en la apertura de entrada de la lente; G_{out} , la irradiación promedio a la salida y presente en el foco de la lente; A_{in} , el área de entrada de la lente y A_{out} , el área del foco a la salida (Victoria et al., 2016, p. 408):

$$\eta_g = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{G_{out}A_{out}}{G_{in}A_{in}} \quad (1)$$

La expresión (1) es intuitiva pero realmente útil para estimar la eficiencia de lentes utilizadas en sistemas de concentración fotovoltaica (Victoria et al., 2016, p. 408). Esta expresión se reescribe de la siguiente manera, y considerando que se posee algún dato de la eficiencia general de la lente utilizada, es posible estimar la energía concentrada incidente sobre el receptor:

$$G_{out} = \frac{\eta_g G_{in} A_{in}}{A_{out}} \quad (2)$$

No se están tomando en cuenta las pérdidas debidas a la convección que pueden ocurrir en el aire presente entre la lente y el receptor. Existen diversos sistemas de concentración que construyen un cono que parte de la lente hasta el receptor para minimizar esta pérdida. Si el interior de este cono esta al vacío, las pérdidas disminuyen aún más y la precisión de la anterior aproximación aumenta.

Teniendo conocida o aproximada la magnitud de la energía concentrada incidente sobre el receptor, es momento de describir el proceso de absorción de esta energía por los materiales participantes y las interacciones que ocurrirán entre ellos. La suma y consecuencia final de estas interacciones deben de resultar en el trazado de las pistas sobre un sustrato que conformarán al circuito impreso deseado.

Las tecnologías usadas para realizar uniones híbridas termoplástico – metal, sin uso de materiales de aporte (e. g. adhesivos) o elementos utilizados para la sujeción mecánica entre éstos, se denominan *uniones térmicas (thermal joining)* (Schricker et al., 2020, p. 1565).

El proceso de unión mediante el método convencional, también conocido como uniones LAMP (*laser-assisted joining of metal-polymer*), consiste en colocar dos láminas de estos materiales en contacto, una interpuesta sobre la otra, y con el auxilio de un láser, se calienta la lámina de metal mientras que el polímero se funde debido a la transferencia de calor entre ambos materiales en contacto (Schricker et al., 2020, p. 1565).

La unión entre éstos se logra debido al enclavamiento mecánico y a las interacciones fisicoquímicas que tienen lugar en la interface de estos materiales; éstas se forman conforme el termoplástico “suavizado” recubre la superficie de la lámina metálica en contacto, para posteriormente solidificarse con él (Schricker et al., 2020, p. 1565).

Existen dos configuraciones para realizar este tipo de uniones (Hussein et al., 2013; Hussein, et al., 2017, p. 64):

- Unión mediante transmisión láser (*laser transmission joining, LTJ*). En esta configuración se coloca la lámina de termoplástico transparente en la parte superior, y la metálica en la inferior. El haz del láser atraviesa la lámina de polímero y calienta únicamente la superficie metálica en contacto con el termoplástico. La unión se forma debido a la transferencia de calor entre las superficies de las láminas en contacto.

- Unión mediante conducción láser (*laser conduction joining, CJ*). En esta configuración la lámina de metal va en la parte superior, y la de termoplástico por debajo. El haz del láser calienta la superficie metálica en la parte superior, y la unión se forma debido a la transferencia de calor que hay desde la lámina metálica hacia la de termoplástico.

Para ambas configuraciones, la lámina de metal es la que recibe al haz proveniente del láser. Esto se debe a que el metal es un material absorbente de la radiación utilizada por estos dispositivos, mientras que las láminas de termoplástico son transparentes a la misma. Adicionalmente, se calienta únicamente la zona de contacto, la cual es de interés para realizar la unión (Bauernhuber et al., 2016, p. 1095).

Los parámetros clave para llevar a cabo una unión híbrida termoplástico – metal mediante láser son los siguientes (Wang et al., 2012, p. 657, 660 - 661):

- ❖ **Potencia del láser** (*laser power*). Su control es vital para llevar a cabo la unión, debido a que la fuerza de ésta aumenta con el aumento de la potencia suministrada, pero sólo hasta cierto punto. Si la energía suministrada por el láser es excesiva, se crean burbujas en gran cantidad en la interface, las cuales son un defecto en la unión y por consiguiente la debilita (Chen et al., 2016, p. 776).
- ❖ **Velocidad de la unión** (*joining speed*). Para una determinada potencia del láser utilizada, si la velocidad a la cual pasa el haz sobre las láminas en contacto es demasiado alta, y no suministra suficiente calor para que el termoplástico alcance su *temperatura de transición vítrea*, entonces la unión será débil.
- ❖ **Distancia al receptor** (*stand-off-distance*). La fuerza de la unión aumenta conforme se aleja al láser del receptor, puesto que crea un área de radiación mayor; pero sólo hasta cierto punto, ya que, si la distancia es demasiado grande, decaerá la energía suministrada a las placas y por consiguiente la fuerza de la unión.

Los termoplásticos tienen la propiedad de cambiar de una fase rígida o vidriosa, a una suave y flexible al exponerlos a una fuente térmica (Brydson, 1989; Stoynov et al., 2000, p. 341). Este cambio en su estructura y comportamiento, donde se desenrollan y relajan los enlaces moleculares de las largas cadenas de estos polímeros, ocurre cuando el material alcanza la *temperatura de transición vítrea* (Brydson, 1989; Stoynov et al., 2000, p. 341).

La *temperatura de transición vítrea* varía en cada termoplástico y con la velocidad a la que se calienta la muestra; si el calentamiento ocurre lentamente, esta temperatura de transición es menor debido a que el material tiene la oportunidad de desenrollarse poco a poco, en cambio, si el calentamiento es muy rápido, la temperatura de transición es más alta debido a que el material no ha tenido la oportunidad de desenrollar y relajar sus enlaces moleculares (Brydson, 1989; Stoynov et al., 2000, p. 341).

La importancia de conocer este dato para el proceso de unión híbrida termoplástico – metal, está en que el objetivo debe de ser calentar el conjunto de materiales hasta alcanzar esta temperatura de transición. Con ello se logra que el sustrato se relaje, dando oportunidad al material conductor de adherirse a la superficie del sustrato.

Sin embargo, también se debe de considerar que los materiales conductores en esferas no son buenos conduciendo electricidad hasta que ocurre un proceso de fusión entre ellas. Esto ocurre así porque las esferas no tienen suficiente contacto entre ellas como para permitir que un flujo de electrones viaje por ahí.

La fusión de estas esferas permite que se unan y tengan un mayor contacto; por consiguiente, puede viajar un flujo de electrones a través. Cada material conductor tiene su propia temperatura de fusión, la cual debe tomarse en cuenta para el proceso de grabado de pistas como la temperatura de transición vítrea de los sustratos termoplásticos.

Cabe recordar cuáles son los elementos principales dentro del sistema de estudio, así como describir la manera en la que se plantea abordar el análisis. Los materiales principales, su acomodo al interior del receptor y la secuencia de exposición se ilustran en la Figura 24:

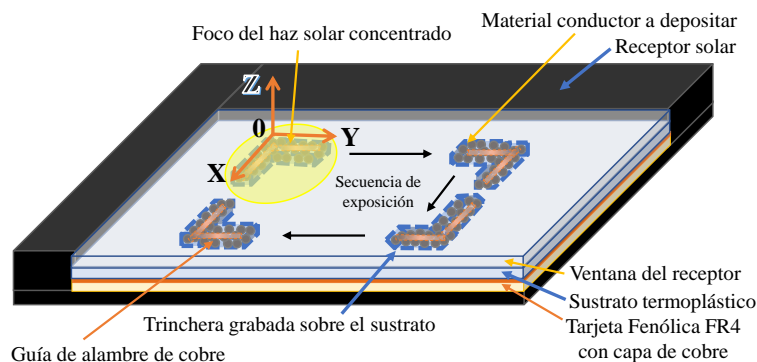


Figura 24. Esquema completo de los materiales, componentes y secuencia de grabado de circuitos impresos mediante ESC.

En la Figura 24 se observa la secuencia en la cual se realiza la exposición del circuito al haz concentrado. El objetivo es que el foco del haz incida lo mejor posible sobre la pista completa, sin importar la forma, ubicación u orientación en el circuito. Ahí permanecerá hasta haber logrado los efectos deseados sobre esa zona (fusión del material conductor y adhesión al sustrato); hecho esto se desplazará entonces a la siguiente zona de exposición.

Circuitos con mayor número de pistas al mostrado en la Figura 24, con trayectorias más elaboradas o con dimensiones mayores a las del foco; causan que la secuencia de exposición se tenga que alterar para adaptarse a las condiciones del circuito en particular. Se debe de cuidar no sobreexponer ninguno de los materiales del arreglo. De otra forma se puede causar su deterioro o destrucción.

El modelo de transferencia de calor se propone que sea de dos dimensiones; y se asume que existe homogeneidad e isotropía en los materiales utilizados. La distribución de temperatura, a lo largo del arreglo de materiales, se describirá por medio de la ecuación de transferencia de calor por conducción. Se emplean las direcciones X y Z, debido a que los gradientes de interés se encuentran en estas direcciones, y en régimen transitorio (véase Figura 25).

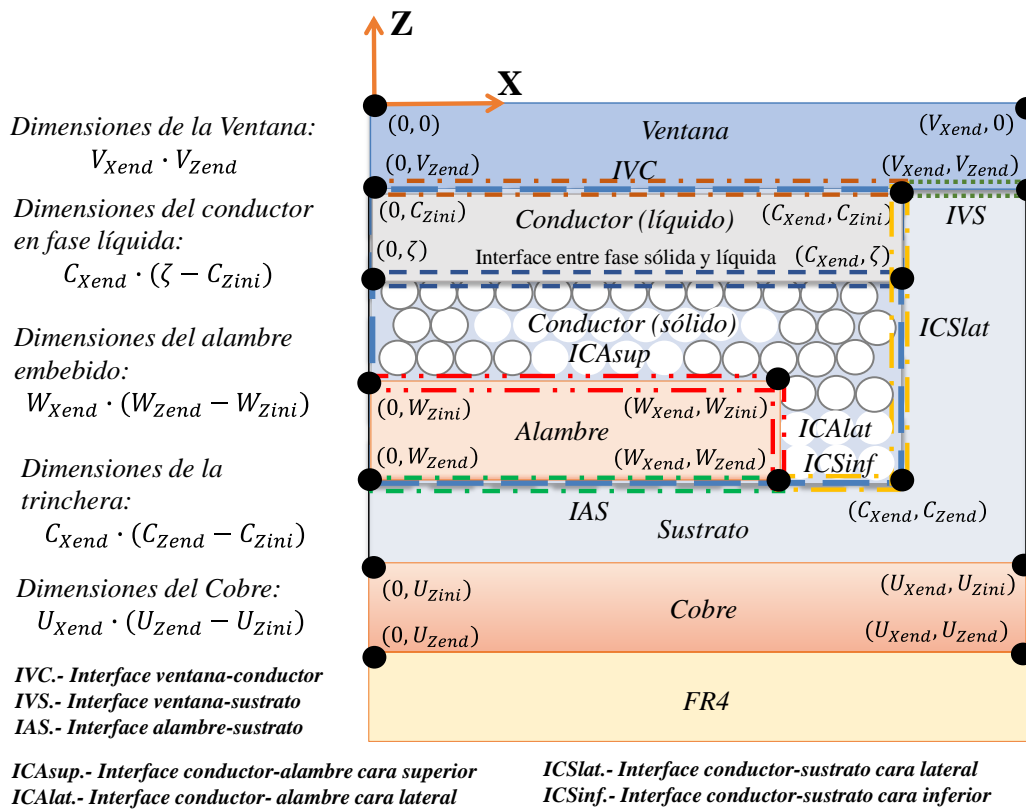
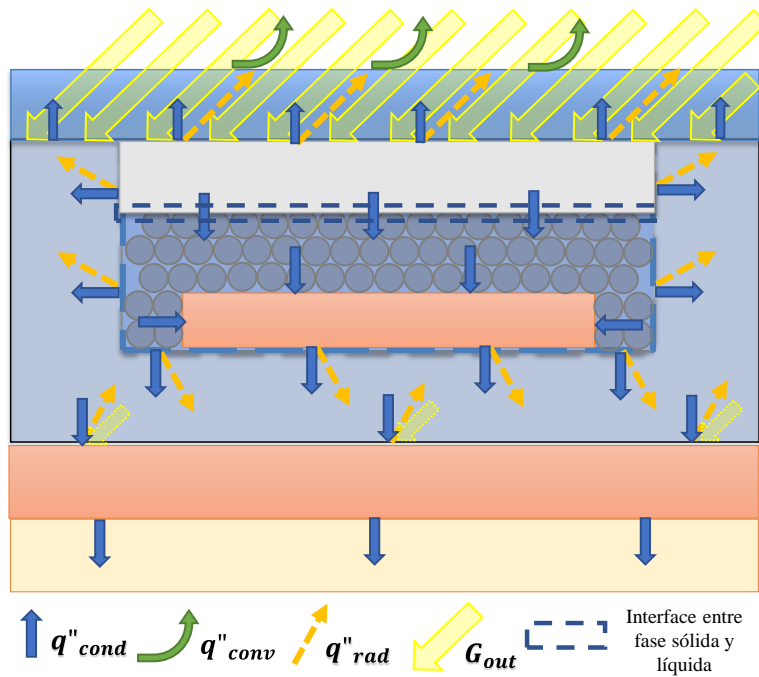


Figura 25. Esquema para la definición de dominios, interacciones de calor, dimensiones e interfaces de cada uno de los elementos del arreglo de materiales

Describiendo las interacciones y condiciones de los materiales dentro del arreglo, desde arriba hacia abajo, el primer material es la ventana del receptor. Su ecuación de transferencia de calor por conducción es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{WIN} \frac{\partial T_{WIN}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{WIN} \frac{\partial T_{WIN}}{\partial z} \right) = \rho_{WIN} \cdot c_{pWIN} \cdot \frac{\partial T_{WIN}}{\partial t} \quad (3)$$

Donde intervienen k_{WIN} que es la conductividad térmica, ρ_{WIN} la densidad y c_{pWIN} el calor específico de la ventana del receptor. Sus condiciones de frontera son las siguientes:

- Para la superficie expuesta al exterior, donde se considera que existe convección y se absorbe la fracción correspondiente al haz solar concentrado:

$$-k_{WIN} \frac{\partial T_{WIN}}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_{WIN} \cdot G_{out} - h_{WIN} (T_{VZ0} - T_{amb}) \quad (4)$$

Donde se presentan α_{WIN} la absorptividad de la ventana del receptor, h_{WIN} el coeficiente de transferencia de calor por convección, T_{VZ0} la temperatura superficial en la cara exterior de la ventana y T_{amb} la temperatura ambiente.

- Para la fracción de la cara interior de la ventana que se encuentra en contacto con el sustrato termoplástico, se considera un caso de conducción:

$$-k_{WIN} \frac{\partial T_{WIN}}{\partial z} \Big|_{IVS} = -k_{SUB} \frac{\partial T_{SUB}}{\partial z} \Big|_{IVS} \quad (5)$$

Donde:

$$IVS = \{(x, z) | x \in (C_{xend}, V_{xend}), z = V_{zend}\} \quad (6)$$

Tal que IVS es el conjunto de puntos en la interface ventana-sustrato, y participa k_{SUB} el coeficiente de conductividad térmica del sustrato termoplástico.

- Para la fracción de la cara interior de la ventana que se encuentra en contacto con el material conductor a depositar se considera conducción entre los elementos:

$$-k_{WIN} \frac{\partial T_{WIN}}{\partial z} \Big|_{IVC} = -k_{CON} \frac{\partial T_{CON}}{\partial z} \Big|_{IVC} \quad (7)$$

Donde:

$$IVC = \{(x, z) | x \in [0, C_{xend}], z = V_{zend}\} \quad (8)$$

En este caso se emplean los puntos de *IVC*, la interface ventana-conductor. A su vez interviene k_{CON} , la conductividad térmica del material conductor.

El siguiente material en el arreglo es el material conductor por depositar, el cual se encuentra conformado por esferas lo suficientemente pequeñas como para adaptarse a la forma de la pista grabada sobre el sustrato. Su ecuación de transferencia de calor por conducción es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{CON} \frac{\partial T_{CON}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{CON} \frac{\partial T_{CON}}{\partial z} \right) = \rho_{CON} \cdot c_{pCON} \cdot \frac{\partial T_{CON}}{\partial t} \quad (9)$$

Donde aparecen ρ_{CON} , la densidad y c_{pCON} , la capacidad térmica específica del material conductor por depositar. Debido a que este material presentará un cambio de fase cuando alcance su temperatura de fusión, se requiere de otra ecuación para cuando se alcance esa condición:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{CONl} \frac{\partial T_{CON}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{CONl} \frac{\partial T_{CON}}{\partial z} \right) = \rho_{CONl} \cdot c_{pCONl} \cdot \frac{\partial T_{CON}}{\partial t} \quad (10)$$

Donde la *l* minúscula agregada a cada uno de los términos participantes indica que los valores a utilizar corresponden a los del material conductor en fase líquida. En cuanto a la mezcla presente durante el cambio fase, se utiliza la siguiente expresión (Alexiades et al., 1993):

$$-k_{CONl} \frac{\partial T_{CON}}{\partial z} \Big|_{z=\zeta} - \rho_{CON} \cdot L_{CON} \cdot \frac{d\zeta}{dt} = -k_{CON} \frac{\partial T_{CON}}{\partial z} \Big|_{z=\zeta} \quad (11)$$

La cual es función de L_{CON} calor latente de fusión del material conductor y $\zeta(t)$, un frente o límite que separa las fases sólida y líquida durante la transición. Para las condiciones de frontera del material conductor se utilizarán las siguientes expresiones:

- ◆ Para la cara superior en contacto con la ventana del receptor, la cual recibe al haz concentrado:

$$-k_{CON} \frac{\partial T_{CON}}{\partial z} \Big|_{IVC} = k_{WIN} \frac{\partial T_{WIN}}{\partial z} \Big|_{IVC} + G_{CON} - \varepsilon_{CON} \sigma (T_{CZini}^4 - T_{amb}^4) \quad (12)$$

Donde:

$$G_{CON} = \alpha_{CON} \cdot \tau_{WIN} \cdot G_{out} \quad (13)$$

Estas expresiones están en función de G_{CON} la irradiación solar promedio absorbida por el conductor, ε_{CON} la emisividad del material conductor, σ la constante de Stefan Boltzmann, T_{CZini} la temperatura superficial en la cara superior de la pista, α_{CON} la absorptividad del material conductor y τ_{WIN} la transmisibilidad de la ventana del receptor.

Cuando el haz concentrado llega al receptor, antes de ser absorbido por el conductor, sufre de pérdidas debido a que atravesó la ventana y la reflexión del haz por parte del mismo conductor. Aunque el conductor a depositar se encuentra en forma de esferas, se supondrá que las propiedades ópticas (absorbancia, transmitancia y reflectividad) de este material se aproximan a las que tendría si se tratara de una pieza sólida.

El término que involucra una pérdida de energía debido a radiación emitida por la misma pista se debe a que la ventana es un material transparente. Al contrario de los materiales opacos donde la energía radiada es absorbida, esta radiación emitida por el conductor resulta ser una pérdida de calor a considerar.

- ◆ Para las caras laterales e inferior de la pista en las cuales el material conductor está en contacto con el sustrato, se emplean las siguientes expresiones:

$$-k_{CON} \frac{\partial T_{CON}}{\partial x} \Big|_{ICSlat} = -k_{SUB} \frac{\partial T_{SUB}}{\partial x} \Big|_{ICSlat} - \varepsilon_{CON} \sigma (T_{CXend}^4 - T_{amb}^4) \quad (14)$$

$$-k_{CON} \frac{\partial T_{CON}}{\partial z} \Big|_{ICSinf} = -k_{SUB} \frac{\partial T_{SUB}}{\partial z} \Big|_{ICSinf} - \varepsilon_{CON} \sigma (T_{CZend}^4 - T_{amb}^4) \quad (15)$$

Donde:

$$ICSlat = \{(x, z) | x = C_{Xend}, z \in [C_{Zini}, C_{Zend}]\} \quad (16)$$

$$ICSinf = \{(x, z) | x \in [W_{Xend}, C_{Xend}], z = C_{Zend}\} \quad (17)$$

En las cuales intervienen los puntos que conforman a $ICSlat$, la interface conductor-sustrato para la cara lateral, e $ICSinf$, la interface conductor sustrato para la cara inferior de la pista.

La variable T_{CXend} se refiere a la temperatura superficial que se presenta en la pared de la trinchera. Para el caso de la cara inferior se requiere de T_{CZend} , la cual es la temperatura superficial en el fondo de la pista en la fracción correspondiente al conductor.

- ◆ Y para las caras del conductor que se encuentren en contacto con la guía de alambre, se emplean las siguientes expresiones:

$$-k_{CON} \frac{\partial T_{CON}}{\partial x} \Big|_{ICALat} = -k_{WIRE} \frac{\partial T_{WIRE}}{\partial x} \Big|_{ICALat} \quad (18)$$

$$-k_{CON} \frac{\partial T_{CON}}{\partial z} \Big|_{ICASup} = -k_{WIRE} \frac{\partial T_{WIRE}}{\partial z} \Big|_{ICASup} \quad (19)$$

Donde:

$$ICALat = \{(x, z) | x = W_{Xend}, z \in [W_{Zini}, W_{Zend}]\} \quad (20)$$

$$ICASup = \{(x, z) | x \in [0, W_{Xend}], z = W_{Zini}\} \quad (21)$$

Que involucran a los puntos pertenecientes a $ICALat$, interface conductor-alambre en las caras laterales, e $ICASup$, interface conductor-alambre en la cara superior; así como k_{WIRE} , la conductividad térmica del alambre embebido.

El siguiente elemento en el arreglo se trata de la guía de alambre que se coloca en el fondo de cada pista y a lo largo de toda su trayectoria. La ecuación de transferencia de calor por conducción correspondiente a este elemento es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{WIRE} \frac{\partial T_{WIRE}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{WIRE} \frac{\partial T_{WIRE}}{\partial z} \right) = \rho_{WIRE} \cdot c_{pWIRE} \cdot \frac{\partial T_{WIRE}}{\partial t} \quad (22)$$

En esta expresión participan ρ_{WIRE} y c_{pWIRE} , que son la densidad y calor específico respectivamente del alambre embebido. Las condiciones de frontera quedan representadas por las siguientes ecuaciones:

- ❖ Para las superficies en contacto con el material conductor, se emplean las expresiones (18) y (19).
- ❖ Para la superficie en contacto con el sustrato, se utiliza:

$$-k_{WIRE} \frac{\partial T_{WIRE}}{\partial z} \Big|_{IAS} = -k_{SUB} \frac{\partial T_{SUB}}{\partial z} \Big|_{IAS} - \varepsilon_{WIRE} \sigma (T_{WZend}^4 - T_{amb}^4) \quad (23)$$

$$IAS = \{(x, z) | x \in [0, W_{xend}], z = W_{zend}\} \quad (24)$$

Donde intervienen ε_{WIRE} y T_{WZend} , la emisividad y la temperatura superficial en la cara inferior del alambre embebido respectivamente. La expresión (23) es válida en los puntos de IAS , la interface alambre-sustrato.

El sustrato termoplástico da alojamiento tanto al material conductor por depositar como a la guía de alambre por medio de las trincheras grabadas en ella. Se trata de un material transparente que también está en contacto con la ventana del receptor y el fondo conformado por una tarjeta fenólica FR4 con capa de cobre. Su ecuación correspondiente es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{SUB} \frac{\partial T_{SUB}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{SUB} \frac{\partial T_{SUB}}{\partial z} \right) = \rho_{SUB} \cdot c_{pSUB} \cdot \frac{\partial T_{SUB}}{\partial t} \quad (25)$$

Donde participan ρ_{SUB} y c_{pSUB} , la densidad y calor específico del sustrato termoplástico respectivamente. Las condiciones de frontera dependen de la fracción de su superficie que se encuentre en contacto con cada elemento en particular:

- ❖ Para la fracción en contacto con la ventana del receptor y que recibe parte del haz solar concentrado:

$$-k_{SUB} \frac{\partial T_{SUB}}{\partial z} \Big|_{IVS} = -k_{WIN} \frac{\partial T_{WIN}}{\partial z} \Big|_{IVS} + \alpha_{SUS} \cdot \tau_{WIN} \cdot G_{out} \quad (26)$$

Donde hace su aparición α_{SUS} , la absorptividad del sustrato termoplástico.

- ❖ Para las fracciones en contacto con el material conductor se emplean:

$$-k_{SUB} \frac{\partial T_{SUB}}{\partial x} \Big|_{ICStat} = -k_{CON} \frac{\partial T_{CON}}{\partial x} \Big|_{ICStat} \quad (27)$$

$$-k_{SUB} \frac{\partial T_{SUB}}{\partial z} \Big|_{ICInf} = -k_{CON} \frac{\partial T_{CON}}{\partial z} \Big|_{ICInf} \quad (28)$$

- ❖ Para la fracción en contacto con el alambre embebido:

$$-k_{SUB} \frac{\partial T_{SUB}}{\partial Z} \Big|_{IAS} = -k_{WIRE} \frac{\partial T_{WIRE}}{\partial Z} \Big|_{IAS} \quad (29)$$

- ❖ Para la cara en contacto con la capa de cobre perteneciente a la tarjeta fenólica colocada al fondo del arreglo:

$$-k_{SUB} \frac{\partial T_{SUB}}{\partial Z} \Big|_{z=UZini} = -k_{Cu} \frac{\partial T_{Cu}}{\partial Z} \Big|_{z=UZini} \quad (30)$$

En la cual aparece k_{Cu} , la conductividad térmica de la capa de cobre perteneciente a la tarjeta fenólica FR4.

Al fondo del arreglo de materiales se encuentra la tarjeta fenólica FR4 con capa de cobre. Ésta se encuentra descrita por la siguiente ecuación de transferencia de calor por conducción:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{Cu} \frac{\partial T_{Cu}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{Cu} \frac{\partial T_{Cu}}{\partial z} \right) = \rho_{Cu} \cdot c_{pCu} \cdot \frac{\partial T_{Cu}}{\partial t} \quad (31)$$

En la cual participan ρ_{Cu} y c_{pCu} , la densidad y calor específico de la capa de cobre perteneciente a la tarjeta fenólica, respectivamente. En cuanto a las condiciones de frontera de la capa de cobre, se tienen las siguientes expresiones:

- Para la superficie superior de la capa de cobre, en contacto con el sustrato y que a su vez recibe parte del haz solar concentrado:

$$-k_{Cu} \frac{\partial T_{Cu}}{\partial Z} \Big|_{z=UZini} = -k_{SUB} \frac{\partial T_{SUB}}{\partial Z} \Big|_{z=UZini} + G_{Cu} - \varepsilon_{Cu} \sigma (T_{UZini}^4 - T_{amb}^4) \quad (32)$$

Donde:

$$G_{Cu} = \alpha_{Cu} \cdot \tau_{SUB} \cdot \tau_{WIN} \cdot G_{out} \quad (33)$$

En donde participan α_{Cu} y ε_{Cu} , la absorbancia y emisividad del cobre respectivamente; τ_{SUB} , la transmitancia del sustrato; T_{UZini} , la temperatura superficial de la cara superior del cobre y G_{Cu} , la irradiación solar promedio presente sobre la capa de cobre.

- Para la superficie inferior se considera que hay conducción con la baquelita, o sustrato de FR4, presente en las tarjetas fenólicas.

Todo el sistema se encuentra a temperatura ambiente al momento de realizar la exposición del circuito al haz solar concentrado. Las condiciones iniciales quedan expresadas de la siguiente forma:

$$T(x, z, 0) = T_{amb} \quad (34)$$

3.2.1. Simulación del arreglo de materiales en el software COMSOL®

Utilizando el modelo descrito y con ayuda del software COMSOL Multiphysics®, se pudieron realizar las simulaciones que describen la transferencia de calor ocurrida entre los diferentes elementos del arreglo, durante el paso de exposición al haz solar concentrado.

Entre las múltiples herramientas disponibles en el software de simulación COMSOL®, está la posibilidad de exportar archivos CAD de otros softwares de diseño; por ejemplo, Autodesk Inventor. Este software fue el empleado para generar un archivo de pieza (.ipt) para cada elemento del arreglo, y posteriormente unirlos en un archivo de ensamble (.iam).

Las dimensiones propuestas para el arreglo de materiales corresponden a las de un foco de 15×13 mm, tal como se observa en la Figura 22. Se propuso una pista sólida (sin los huecos causados por las esferas de *solder ball*) en forma de L con dimensiones de 8.35 mm por lado, grosor de 1.7 mm y profundidad de 1 mm. El ensamble del arreglo de materiales se muestra en la Figura 26, y los datos alimentados a la simulación se muestran en las Tablas 6 y 7:

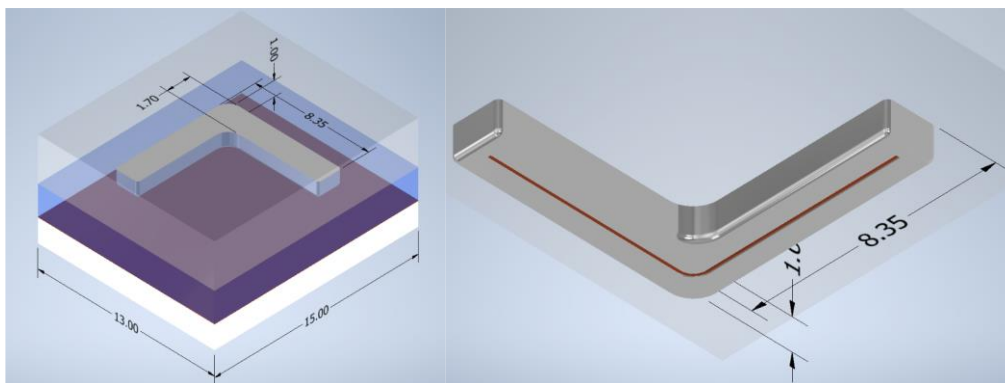


Figura 26. Ensamble del arreglo de materiales para un foco de 15x13 mm y una pista en forma de L, con 1 mm de profundidad (izquierda). El alambre embebido al fondo de la pista, rodeado por el material conductor (derecha).

Tabla 6. Resumen de los parámetros, valores y ecuaciones utilizadas para la simulación.

Parámetros		
Nombre	Expresión o valor	Descripción
G_{in}	(variable)	Irradiación solar directa medida por el pirheliómetro [W/m ²]
A_{in}	0.08775842	Área de captación de la lente de Fresnel [m ²]
η_g	(variable)	Eficiencia general del sistema de concentración
r_A	0.0075	Radio A de la elipse del foco [m]
r_B	0.0065	Radio B de la elipse del foco [m]
A_{out}	$(3.14159) \cdot r_A \cdot r_B$	Área del foco solar sobre el receptor [m ²]
G_{out}	$\frac{\eta_g \cdot G_{in} \cdot A_{in}}{A_{out}}$	Irradiación concentrada presente en el foco [W/m ²]
T_{amb}	(variable)	Temperatura ambiente [K]
P_{atm}	(variable)	Presión atmosférica [atm]
A_{WIN}	0.0025	Área de la ventana del receptor [m ²]
P_{WIN}	0.2	Perímetro de la ventana del receptor [m]
L	$\frac{A_{WIN}}{P_{WIN}}$	Longitud característica [m]
$\Delta T_{1 \rightarrow 2}$	10	Intervalo de transición entre fase 1 y fase 2 [K]

Tabla 7. Componentes del arreglo y disponibles en la biblioteca de materiales en COMSOL®, junto a los datos agregados manualmente y sus referencias.

Materiales del arreglo		
Nombre	Datos agregados	Referencia
FR4 (Circuit board)	-	-
Copper [solid, residual resistivity ratio of 30]	Emisividad del cobre pulido: $\epsilon_{Cu} = 0.01$	Fluke Corporation, 2007.
	Absortividad del cobre pulido: $\alpha_{Cu} = 0.18$	FIUBA
PET (polyethylene terephthalate or Mylar) [solid]	Capacidad térmica específica a presión constante: $C_{pSUS} = 1100 \frac{J}{kg \cdot K}$	Arteplástica, 2021, p. 2.
	Relación de Poisson: $\nu_{SUS} = 0.4$	Guessasma, et al., 2019, p. 4
	Absortividad del sustrato: $\alpha_{SUS} = 0.1$	Paszkwicz, et al., 2017, p. 41749
	Transmitancia del sustrato: $\tau_{SUS} = 0.88$	Arteplástica, 2021, p. 2.
63 Sn – 37 Pb [solid, 0.1/s strain rate]	Emisividad del conductor: $\epsilon_{CON} = 0.08$	Du, et al., 2019, p. 2.
	Absortividad del conductor: $\alpha_{CON} = 0.66$	Greenstein, 1989, p. 4598
63 Sn – 37 Pb [liquid]	Conductividad térmica: $k_{CONl} = 23.13752 \frac{W}{m \cdot K}$	Viswanath, et al., 1972, p. 1771.
	Capacidad térmica específica a presión constante (aleación Sn60Pb40): $C_{pCONl} = 180 \frac{J}{kg \cdot K}$	Dou, et al., 2021, p. 3.
	Temperatura de fusión: $T_{CONPC} = 456.15 K$	Fang, et al., 2016, p. 118
	Calor latente de fusión: $L_{CON} = 48000 \frac{J}{kg}$	Fang, et al., 2016, p. 118.
PMMA – Polymethyl methacrylate	Absortividad de la ventana: $\alpha_{WIN} = 0.05$	Nassier, et al., 2022, p. 1661
	Transmitancia de la ventana: $\tau_{WIN} = 0.8$	Najeeb, et al., 2014, p. 51.

REFERENCIAS

- Alexiades, V., Solomon, A. D., 1993. "Mathematical Modeling Of Melting And Freezing Processes" (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203749449>
- Amancio-Filho, S. T., & dos Santos, J. F. (2009). *Joining of Polymers and Polymer-Metal Hybrid Structures: Recent Developments and Trends*. Polymer Engineering and Science. Vol. 49, p. 1461 – 1476. <https://doi.org/10.1002/pen.21424>
- Antón, I., Pachón, D., & Sala, G. (2003). *Characterization of optical collectors for concentration photovoltaic applications*. Progress in Photovoltaics Res. Appl., Vol. 11, p. 387 – 405. <https://doi.org/10.1002/pip.502>
- Arteplásitca. (2021). *PETG*. Octubre 15, 2021, de Arteplástica Sitio web: <https://arteplastica.es/petg/>
- Askins, S., Victoria, M., Herrero, R., Domínguez, C., Antón, I., & Sala, G. (2011). *Effects of temperature on hybrid lens performance*. AIP Conference Proceedings 1407, p. 57 – 60. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3658294>
- Bauernhuner, A., Markovits, T., & Takács, J. (2016). *Investigating the Pulse Mode Laser Joining of Overlapped Plastic and Metal Sheets*. Physics Procedia, Vol. 83, p 1094 – 1101. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.115>
- Berg, A. M. J., Laat, A. W. M., Smith, P. J., Perelaer, J., & Schubert, U. S. (2007). *Geometric control of inkjet printed features using a gelating polymer*. Journal of Materials Chemistry, Vol. 17, p. 677 – 683.
- Bhattacharya, S., & Marinov, V. (2009). *Simple, inexpensive, and reliable, high density interconnect technology for flexible electronics applications*. 2009 Flexible Electronics & Displays Conference and Exhibition, Phoenix, AZ, p. 1 – 6, doi: 10.1109/FEDC.2009.5069277.
- Brydson, J. A. (1989). *Plastics Materials*. United Kingdom: Butterworth-Heinemann.
- Chen, Y. J., Yue, T. M., & Guo, Z. N. (2016). *A new laser joining technology for direct-bonding of metals and plastics*. Materials and Design. Vol. 110, p. 775 – 781.
- Contreras-Saenz, M., Vargas-Chacon, R. M., Rodriguez-Delgado, J. M., & Camacho-Leon, S. (2017). *PCB-MEMS: Fabrication of Active Microfluidic Devices by Laser Ablation*. Bellucci, C. ed. Laser Ablation. Mexico: Nova Science Publishers, Inc. (p. 115 - 150).
- Cook, E. (1990). *Radiation induced pattern deposition*. US4895735

- Criales, L. E., Orozco, P. F., Medrano, A., Rodríguez, C. A., & Özel, T. (2015). *Effect of Fluence and Pulse Overlapping on Fabrication of Microchannels in PMMA/PDMS Via UV Laser Micromachining: Modeling and Experimentation*. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 30, Issue 7, p. 890 – 901.
- Cruz, J., Amaral, P. M., Guerra, L., & Shohoji, N. (2000). *Weibull statistical analysis of flexure breaking performance for alumina ceramic disks sintered by solar radiation heating*. *Ceramics International*, Vol. 26, p. 203 – 206.
- Dou, Y., Luo, J., Qi, L., Lian, H., & Huang, J. (2021). *Drop-on-demand printing of recyclable circuits by partially embedding molten metal droplets in plastic substrates*. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 297, p. 1 – 8.
- Du, J., Wei, Z., Zhang, Y., & Zhou, S. (2019). *Numerical simulation and experimental research on fused-coating additive manufacturing of Sn63Pb37 thin-walled structures*. *Applied Physics A Materials Science & Processing*, Vol. 125, Issue 875, p. 1 – 10.
- Espalin, D., Muse, D. W., MacDonald, E., & Wicker, R. B. (2014). *3D Printing multifunctionality: structures with electronics*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 72, p. 963 – 978.
- Fang, X., Du, J., Wei, Z., Wang, X., He, P., Bai, H., Wang, B., Chen, J., Geng, R., & Lu, B. (2016). *Study on Metal Deposit in the Fused-coating Based Additive Manufacturing*. *Procedia CIRP*, Vol. 55, p. 115 – 121.
- Fernández, B. J., López, V., Vázquez, A. J., & Martínez, D. (1998). *Cladding of Ni superalloy powders on AISI 4140 steel with concentrated solar energy*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 53, p. 153 – 161.
- FIUBA. (...). *Absortividad solar de superficies*. Mayo, 21, 2022, de Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería. Sitio web: <http://materias.fi.uba.ar/6731/Tablas/Tabla3.pdf>
- Fluke Corporation. (2007). *Emissivity values of common materials*. May 21, 2022, from BERG Engineering & Sales Company, Inc. Web site: <https://www.bergeng.com/mm5/downloads/fluke/Emissivity-Values-of-Common-Materials-Chart.pdf>
- Greenstein, M. (1989). *Optical absorption aspects of laser soldering for high density interconnects*. *Applied Optics*, Vol. 28, Issue 21, p. 4595 - 4603.
- Guessasma, S., Belhabib, S., & Nouri, H. (2019). *Printability and Tensile Performance of 3D Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Using Fused Deposition Modelling*. *Polymers*, Vol. 11, Issue 1220, p. 1 – 16.

- Hornung, T., Bachmaier, A., Nitz, P., Gombert, A., Bett, A. W., & Dimroth, F. (2010). *Temperature dependent measurement and simulation of Fresnel lenses for concentrating photovoltaics*. AIP Conference Proceedings. Presented at the CPV- 6, Freiburg, Germany, p. 85 – 88. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3509239>
- Hussein, F. I., Akman, E., Oztoprak, B. G., Gunes, M., Gundogdu, O., Kacar, E., Hajim, K. I., & Demir, A. (2013). *Evaluation of PMMA joining to stainless steel 304 using pulsed ND:YAG laser*. Optics & Laser Technology, Vol. 49, p. 143 – 152.
- Hussein, F. I., Salloomi, K. N., Akman, E., Hajim, K. I., & Demir, A. (2017). *Finite element thermal analysis for PMMA/st.st.304 laser direct joining*. Optics & Laser Technology, Vol. 87, p. 64 – 71.
- Kalogirou, S. (2009). *Solar energy engineering: processes and systems*. USA: ELSEVIER.
- Karnati, C., Aguilar, R., Arrowood, C., Ross, J., & Rajaraman, S. (2017). *Micromachining on and of Transparent Polymers for Patterning Electrodes and Growing Electrically Active Cells for Biosensor Applications*. Micromachines, Vol. 8, Issue 8, 250, p. 1 – 22. <https://doi.org/10.3390/mi8080250>
- Kawahito, Y., Tange, A., Kubota, S., & Katayama, S. (2006). “*Development of direct laser joining for metal and plastic*”. ICALEO, Vol. 604, p. 376 – 382. <https://doi.org/10.2351/1.5060840>
- Kim, D., Jeong, S., Park, B. K., & Moon, J. (2006). *Direct writing of silver conductive patterns: Improvement of film morphology and conductance by controlling solvent compositions*. Applied Physics Letters, Vol. 89, p. 1 – 3.
- Miller, D. C., & Kurtz, S. R. (2011). *Durability of Fresnel lenses: A review specific to the concentrating photovoltaic application*. Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 95, p. 2037 – 2068.
- Mir-Hosseini, N., Schmidt, M., & Li, L. (2005). *Growth of patterned thin metal oxide films on glass substrates from metallic bulk sources using a Q-switched YAG laser*. Applied Surface Science, Vol. 248, p. 204 – 208.
- Najeeb, H. N., Balakit, A. A., Wahab, G., A., & Kodeary, A. K. (2014). *Study of the optical properties of Poly (Methyl methacrylate) (PMMA) doped with a new diarylethene compound*. Academic Research International, Vol. 5, Issue. 1, p. 48 – 56.
- Nassier, L. F., & Shinen, M. H. (2022). *Study of the optical properties of poly(methyl methacrylate) (PMMA) by using spin coating method*. Materials Today: Proceedings, Vol. 60, p. 1660 – 1664.
- Paszkievicz, S., Szymczyk A., Pawlikowska, D., Irska, I., Taraghi, I., Pilawka, R., Gu, J., Li., X., Tu, Y., & Piesowicz, E. (2017). *Synthesis and characterization of poly(ethylene terephthalate-co-1,4-cyclohexanedimethylene terephthalate)-block-poly(tetramethylene oxide) copolymers*. RSC Advances, Vol. 7, p. 41745 – 41754.

- Perelaer, J., & Schubert, U. S. (2010). *Inkjet Printing and Alternative Sintering of Narrow Conductive Tracks on Flexible Substrates for Plastic Electronic Applications*, Radio Frequency Identification Fundamentals and Applications Design Methods and Solutions, Cristina Turcu, IntechOpen, DOI: 10.5772/7983. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/8470>
- Piqué, A., Mathews, S. A., Pratap, B., Auyeung, R. C. Y., Karns, B. J., & Lakeou, S. (2006). *Embedding electronic circuits by laser direct-write*. *Microelectronic Engineering*, Vol. 83, p. 2527 – 2533.
- Rumyantsev, V. D., Davidyuk, N. Y., Ionova, E. A., Pokrovskiy, P. V., Sadchikov, N. A., & Andreev, V. M. (2010). *Thermal regimes of Fresnel lenses and cells in “All-Glass” HCPV modules*. *AIP Conference Proceedings* 1277, p. 89–92. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3509240>
- Schricker, K., Ganss, M., Könke, C., & Bergmann, J. P. (2020). *Feasibility study of using integrated fiber optical sensors to monitor laser-assisted metal-polymer joining*. *Welding in the World*, Vol. 64, p. 1565 – 1578. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00942-y>
- Smith, P. J., Shin, D. Y., Stringer, J. E., & Derby, B. (2006). *Direct ink-jet printing and low temperature conversion of conductive silver patterns*. *Journal of Materials Science*, Vol. 41, p. 4153 – 4158.
- Soszek, P. (1989). *Two Novel Additive Processes to Manufacture Circuit Boards: Direct Laser Writing and Direct Electrostatic Transfer and Deposition*. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*. Vol. 12, Issue 2, p. 267 – 272.
- Srinivasan, R., & Braren, B. (1955). *Ultraviolet Laser Ablation of Organic Polymers*. *Chemical Reviews*, Vol. 8, Issue 9, p. 1303 – 1316.
- Stoynov, L. A., & Yarlagadda, P. K. D. V. (2003). *Joining of engineering thermoplastics by concentrated beam insolation – a feasibility study*. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 138, p. 67 – 74.
- Stoynov, L. A., & Yarlagadda, P. K. D. V., & Yen, W. C. (2000). *A feasibility study into joining of engineering thermoplastics utilizing concentrated beam solar radiation*. *Renewable Energy*, Vol. 21, p. 333 – 361.
- Tönshoff, H. K., von Alvensleben, F., Kappel, H., & Heekenjann, P. B. (1997). *Micromachining of microelectronic materials with deep-UV lasers*. *Proceedings of SPIE 2991, Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing II*, San Jose, USA, p. 183 – 193.
- Victoria, M., Askins, S., Herrero, R., Antón, I., & Sala, G. (2016). *Assessment of the optical efficiency of a primary lens to be used in a CPV system*. *Solar Energy*, Vol. 134, p. 406 – 415.
- Viswanath, D. S., & Mathur, B. C. (1972). *Thermal Conductivity of Liquid Metals and Alloys*. *Metallurgical Transactions*. Vol. 3, p. 1769 – 1772.

Wang, X., Song, X., Jiang, M., Li, P., Hu., Y., Wang, K., & Liu, H. (2012). *Modeling and optimization of laser transmission joining process between PET and 316L stainless steel using response surface methodology*. Optics & Laser Technology, Vol. 44, p. 656 – 663.

Wicker, R. B., Medina, F., MacDonald, E., & Muse, D. W. (2016). *Methods for connecting inter-layer conductors and components in 3D structures*. US20160324009 A1

CAPÍTULO 4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

4.1. Exposición del arreglo al haz solar concentrado

Para este caso de estudio, se usa un concentrador solar ubicado en el Centro de Ingeniería Avanzada (CIA) perteneciente a la Facultad de Ingeniería, UNAM (19° 19' 34.28" N, 99° 10' 55.13" W), Ciudad de México, México; el cual recibe irradiación directa y difusa. Sin embargo, se menosprecia la radiación difusa dentro del modelo debido a que su aportación al fenómeno se considera minúscula en magnitud. Siendo entonces la lectura de irradiación solar directa, proveniente de un pirheliómetro, el dato de consideración inicial.

El concentrador solar cuenta con dos grados de libertad (acimutal y elevación), equipado con una lente de Fresnel de aproximadamente 30 cm por lado. En las Figuras 27 a 29 se muestran las imágenes del concentrador, diagrama de instrumentación y sus características principales:

- a. Pirheliómetro DR01 – 05 Hukseflux ($\pm 0.08 \times 10^{-6} \text{ Vm}^2\text{W}^{-1}$)
- b. Adquisidor de datos / unidad de interruptores Keysight Agilent 34972A LXI, equipado con un multiplexor de 16 canales Agilent 34902A
- c. Lente de Fresnel de PMMA transparente de área cuadrada con 300 mm por lado, pero con esquinas en diagonal (área de recepción de 0.08775842 m^2), 4 mm de grueso, y distancia focal principal de 167 mm con un diámetro focal de 6 mm, 18% de eficiencia general en promedio.
- d. Cubierta de plástico transparente para prevenir o atenuar cualquier corriente de aire al interior de la zona del receptor
- e. Cortina protectora de la lente de Fresnel
- f. Riel para el desplazamiento vertical del marco cartesiano (distancia a la lente)
- g. Nivel digital e inclinómetro, 935DAG Klein Tools ($\pm 0.2^\circ$)
- h. Soporte para la cámara fotográfica digital
- i. Marco cartesiano y sujetador de receptor solar
- j. Nivel de burbuja
- k. Estación meteorológica digital e inalámbrica Taylor 1733, con barómetro y reloj ($\pm 1^\circ\text{C}$)
- l. Cámara Termográfica TI250 Klein Tools ($\pm 3^\circ$ o 3%, considerar el que resulte mayor)
- m. Termopar Adafruit tipo K con trenzado de vidrio aislante.

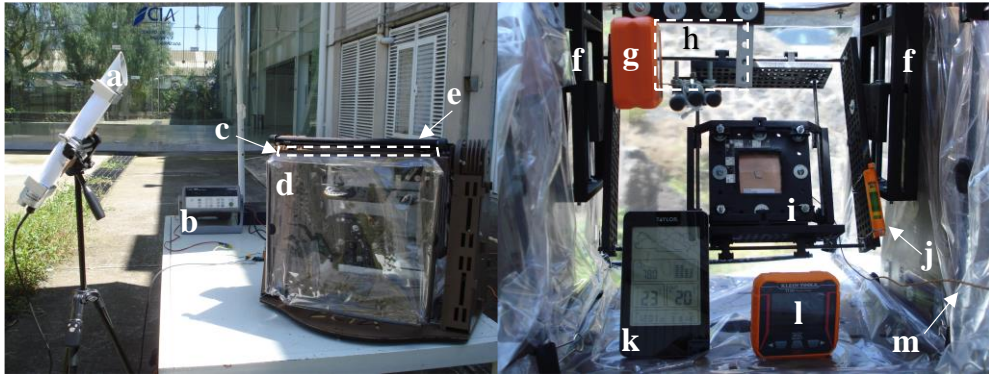


Figura 27. Concentrador solar con Lente de Fresnel y equipo usado para la experimentación (izquierda). Detalle de los diferentes instrumentos utilizados (derecha).

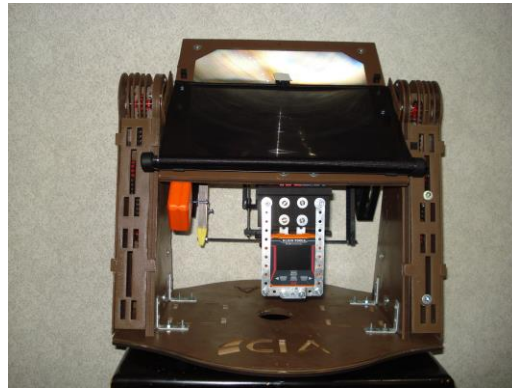


Figura 28. Configuración alternativa de los instrumentos

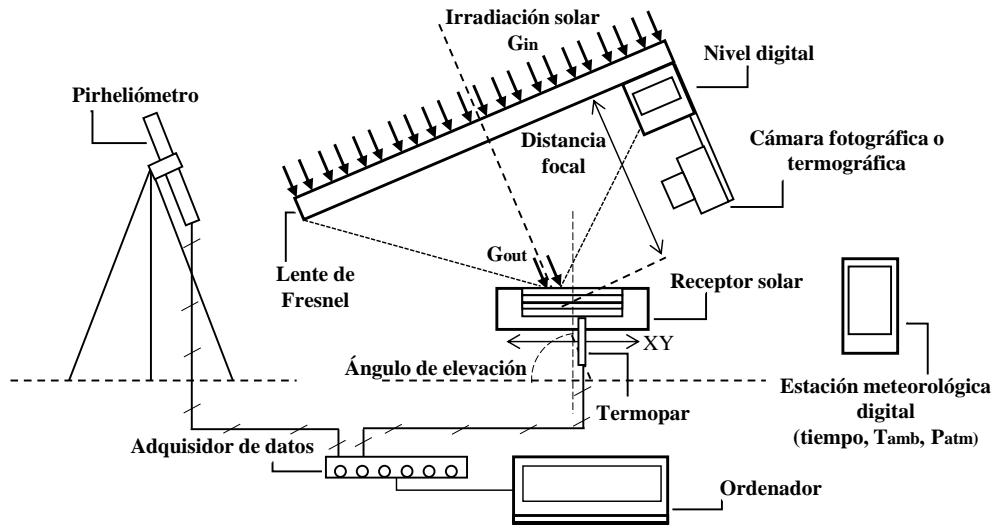


Figura 29. Diagrama de instrumentación

Con la información de los focos que irradian de la mejor forma posible cada pista (véase Figura 22), se procede a realizar la exposición al haz solar concentrado. La secuencia de exposición de las pistas es como se ha descrito en la Figura 12. En la Figura 30 se observa la exposición paso a paso del circuito muestra, acompañado por las imágenes de la distribución de temperaturas proporcionadas por la cámara termográfica:

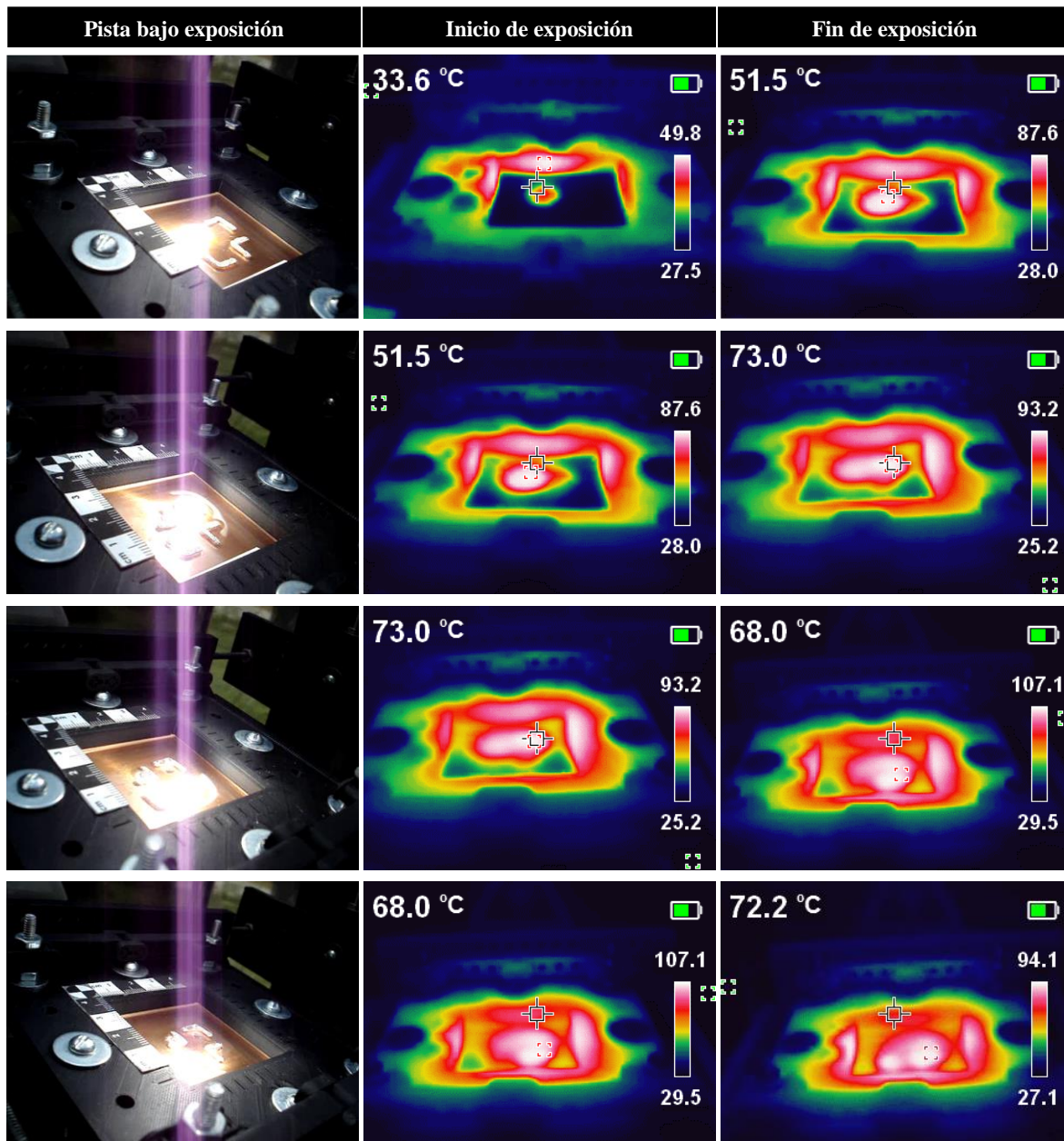


Figura 30. Secuencia de exposición del circuito al haz solar concentrado

En la Figura 30 se observa cómo va ocurriendo el proceso de exposición para el circuito elegido. La primera pista es la única que parte con condiciones iniciales a temperatura ambiente, debido a que, en adelante, el arreglo de materiales no pierde la energía recibida por el paso previo.

Para determinar el momento en el que se debe de cambiar de pista, se emplea el examen visual sobre la que se encuentra en exposición. Si se observa que ya ha cambiado de fase de extremo a extremo, es momento de cambiar de blanco para continuar con el proceso y evitar la sobre exposición de la pista. Si esto no se realiza en el momento adecuado, la pista bajo el haz quedará inutilizable, con muchas interrupciones y distorsiones a lo largo de su trayectoria.

El circuito mostrado tuvo un tiempo de exposición de 186 s; registró una radiación solar directa promedio de 750.33 Wm^{-2} , una temperatura ambiente de 22°C , 781 hPa de presión atmosférica, una temperatura máxima de 70.58°C en la parte inferior del FR4 y un ángulo de elevación de 87.1° . Las pistas obtenidas poseen una resistencia eléctrica de 0.1Ω (medida desde sus extremos por un multímetro Astro AI DM6000AR True RMS de 6000 cuentas).

Las temperaturas y todos los datos registrados para este circuito de muestra son sólo con fines ilustrativos. Estos varían dependiendo del número, longitud, distancia entre pistas, trayectoria de exposición, irradiación solar actual y muchos otros factores de cada circuito y prueba. El enfriamiento del arreglo de materiales ocurre a través de convección libre. El único paso que se realiza es retirarlo del interior del receptor una vez que ha alcanzado la temperatura ambiente.

4.1.1. Armado del circuito

Concluido el proceso de exposición, se obtiene un sustrato con pistas conductoras adheridas a ella. Esto significa que se cuenta con un circuito impreso con grabado aditivo impulsado por ESC. En la Figura 31 se muestra el circuito impreso obtenido mediante el proceso de exposición descrito en la Figura 30:



Figura 31. Circuito impreso obtenido mediante grabado aditivo impulsado por ESC.

Para este circuito se han seleccionado elementos de montaje superficial, los cuales se unen a las pistas por medio de tinta conductiva de plata INKCU, la cual puede ser utilizada como soldadura en frío.

La tinta a su vez completa las pistas depositadas en los casos en los que alguna de ellas sufra alguna interrupción a lo largo de su trayectoria; o bien, para permitir el contacto entre el componente electrónico y las pistas en los casos en donde el espacio designado resulta mayor al del componente utilizado. El curado de la tinta se realiza a temperatura ambiente.

En la Figura 32 se muestran los elementos unidos al circuito y prueba de su funcionamiento. En la Figura 33 se muestran otros circuitos elaborados mediante el mismo procedimiento.

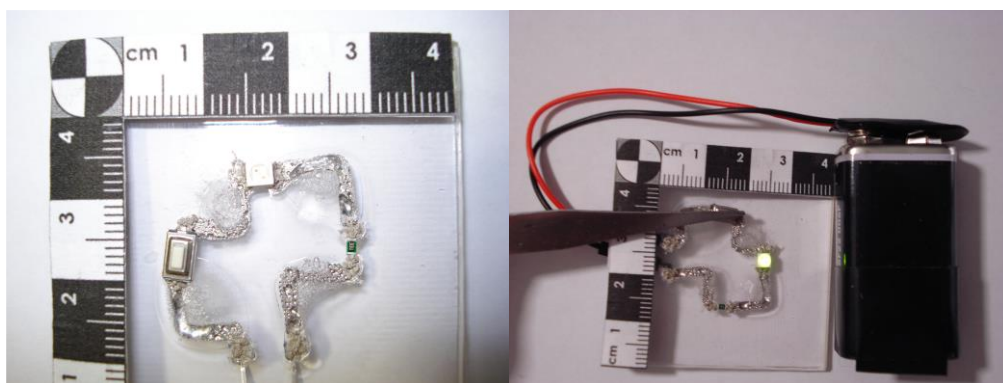


Figura 32. Elementos de montaje superficial montados sobre el circuito de prueba (izquierda) y prueba de funcionamiento (derecha).

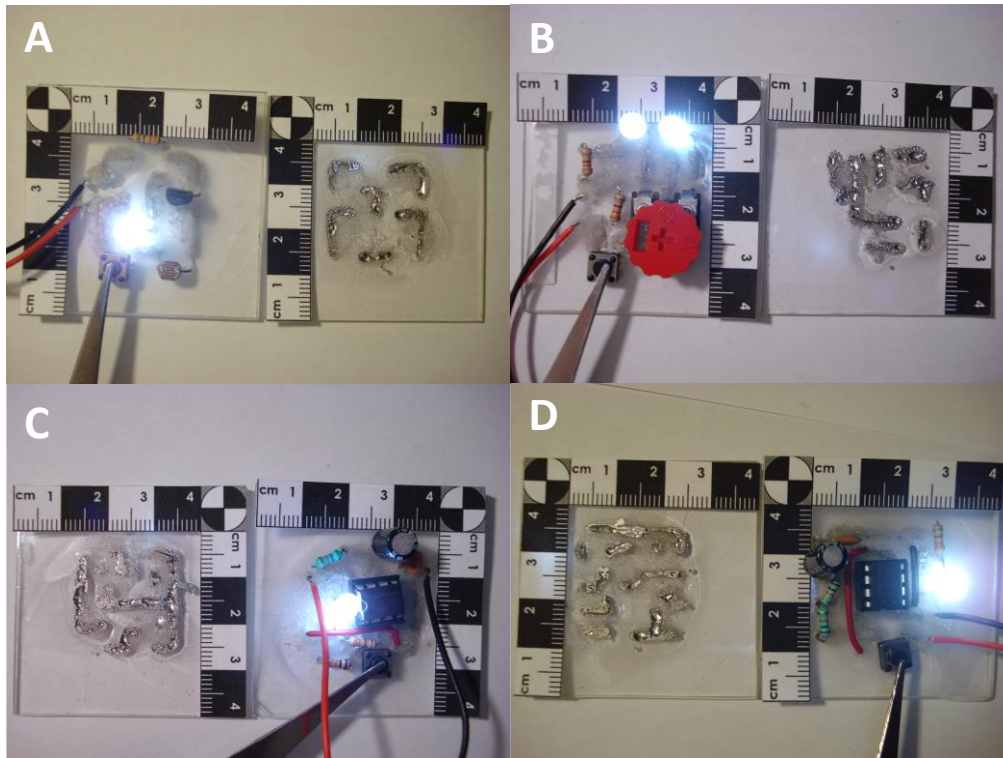


Figura 33. Otros circuitos elaborados mediante el mismo procedimiento, se muestran tanto circuito impreso obtenido como prueba de funcionamiento: A) se observa un circuito donde la luminosidad del LED depende de la iluminación presente sobre la fotorresistencia, B) se muestra un circuito cuyo potenciómetro se encarga de repartir la energía entre los LEDs' conectados, C) y D) muestran circuitos con temporizadores 555, C) está en configuración monoestable y D) en astable.

También es posible utilizar elementos de montaje convencional sobre estos circuitos, para ello es necesario barrenar sobre las pistas o en las proximidades a ella para poder insertar al componente de interés. Las pistas obtenidas por este proceso han demostrado tener la suficiente adherencia al sustrato para no verse afectadas por la realización de los barrenos.

4.2. Resultados experimentales

Debido a que solo la primera pista expuesta al haz solar concentrado comenzó con condiciones de temperatura ambiente, los experimentos consistieron en exponer una pista con forma de L, que hace referencia al circuito de muestra ilustrado antes. Se realizaron un total de 20 pruebas en diferentes días a lo largo del mes de agosto de 2022 cuando las condiciones climáticas estaban despejadas (ver Figura 34). La Tabla 8 muestra un resumen de las variables medidas en cada una de estas pruebas:



Figura 34. Imagen de las veinte pruebas realizadas de una pista en forma de L

Tabla 8. Resumen de las variables medidas a lo largo de la serie de experimentos y sus valores más representativos

	Tiempo de exposición [s]	Irradiación solar directa promedio [Wm ⁻²]	Temperatura ambiente [K]	Presión atmosférica [hPa]	Temperatura máxima en la ventana [K]	Temperatura máxima en la tarjeta FR4 [K]	Ángulo de elevación [°]	Resistencia eléctrica de la pista [Ω]
Mínimo	40	554.2852	295.15	777	320.85	312.341	83	0.1
Máximo	131	934.5883	299.15	780	371.75	360.641	89.7	0.2
Promedio	58.15	802.79602	296.3	779.35	348.07	333.0752	87.585	0.135
Desviación estándar	20.1136	101.3030	1.1367	0.9333	13.5036	13.7305	1.7394	0.0489

Partiendo de las pistas obtenidas a lo largo de la experimentación, se pueden enlistar las siguientes observaciones realizadas:

1. Ocurrió el desplazamiento del material conductor durante su fase líquida. Esto causó que a lo largo de pista se formaran huecos, o que éste se saliera y derramara fuera de la pista.
2. En el sustrato se formó una prominencia que hace sobresalir a la pista con respecto al resto. Se pueden observar la presencia de burbujas alrededor de la pista, principalmente en el doblez interno de la pista y debajo de ella.
3. Algunos de los sustratos presentan huecos o daños en alguna de sus caras, de manera cercana o sobre la pista.
4. La unión entre sustrato y material conductor se debe al enclavamiento mecánico ocurrido a lo largo de la interface en donde están en contacto.

La Figura 35 muestra las imágenes obtenidas usando un microscopio digital Motic DM143 sistema NTSC de Thomas Scientific, en las cuales las observaciones anteriores se pueden corroborar:

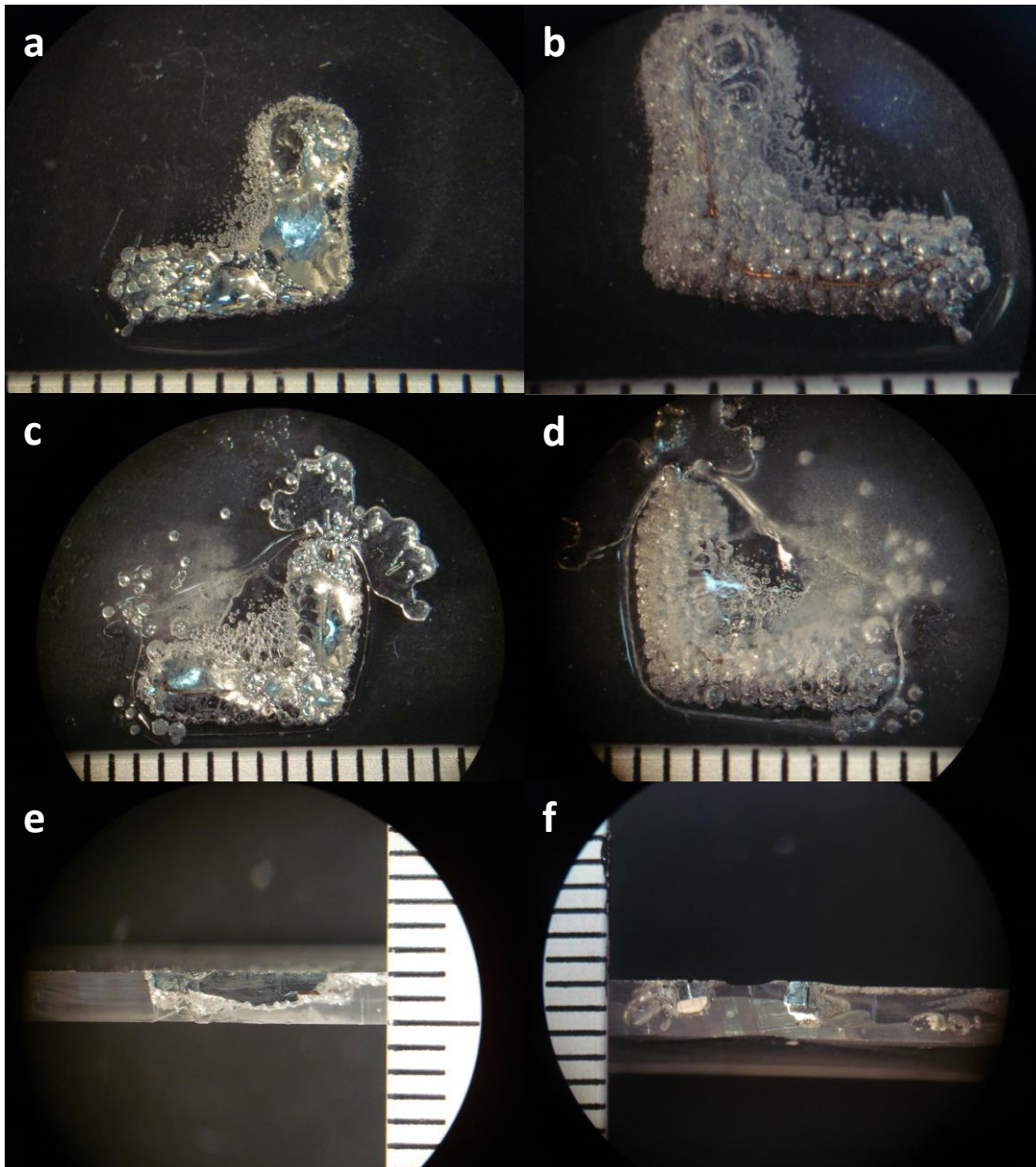


Figura 35. Imágenes de algunos de los resultados experimentales: a) y b) son de la prueba 03E (vista frontal y posterior), c) y d) son de la prueba 04B (vista frontal y posterior) y e) y f) que muestran cortes a lo largo de las pistas pertenecientes a pruebas con circuitos completos. Escala en mm.

4.3. Resultados del modelo matemático

La única variable por determinar es la eficiencia general del sistema. Se considera el valor de cada variable medida en cada prueba; sin embargo, la radiación solar directa promedio y el tiempo de exposición para que ocurra el cambio de fase se consideran los más significativos.

Esto se debe a que ambas variables (radiación solar directa media y tiempo de exposición) son las que varían significativamente en cada caso, en comparación con la ligera variación de las otras a lo largo de toda la serie de experimentos. Mientras que la resistencia eléctrica de las pistas resultantes, y las temperaturas registradas en la ventana del receptor y la placa FR4, son consecuencia o resultado de las otras variables.

Para este caso de estudio, se espera que la eficiencia general del sistema varíe en cada prueba debido a la relación de concentración efectiva (Victoria, et al., 2016, p. 407). Esta relación asociada con la distribución espectral y espacial de la irradiación presente en el foco se ve afectada por la aberración cromática, el ancho de los perfiles de la lente, la dispersión de ángulo bajo debido a la calidad de la superficie, la presencia de curvatura en la lente, los errores de fabricación y los efectos de la temperatura (Victoria, et al., 2016, p. 407). Esta relación también se ve afectada por el tamaño y el tipo de receptor utilizado.

Debido a la restricción de mantener el receptor en posición horizontal para evitar el derrame del material conductor y que no está en su distancia focal principal, siempre se obtuvo un foco solar elíptico y no paralelo a la lente. Se esperaba que la eficiencia general cambiara en cada prueba debido a los ajustes realizados.

Utilizando el hecho de que la exposición de la pista al haz solar concentrado termina cuando se logra el cambio de fase, la simulación se realiza ajustando el valor de la eficiencia general hasta obtener una temperatura final en el material conductor apenas superior a su punto de fusión (para aleación Sn63Pb37 es 456.15 K, eutéctico).

En todos los casos, se verificó que esta temperatura existía en todo el interior de la pista, lo que indica un cambio de fase completo del material conductor dentro de la trinchera. Esto va de acuerdo con lo que se ha encontrado experimentalmente, como se ve en la Figura 35. Para comparar las temperaturas máximas obtenidas a través de la simulación y las obtenidas experimentalmente, se selecciona una temperatura del centro del arreglo de materiales simulado.

En el software COMSOL®, se puede dar un valor de temperatura a cada punto dentro del sistema en estudio. Sin embargo, la cámara termográfica detecta una temperatura media sobre la zona bajo observación. Además, la irradiación incidente simulada sobre el arreglo de materiales se representa con una distribución uniforme, pero experimentalmente es una campana gaussiana inclinada con un foco elíptico.

Una estimación de la radiación solar media en la mancha solar puede obtenerse utilizando la información de la Tablas 6, 8 y la Ec. (2). El error relativo se calculó entre las temperaturas obtenidas experimentalmente contra las obtenidas por simulación. Los resultados se pueden ver en la Tabla 9, mostrando sus valores más representativos.

Tabla 9. Resumen de la eficiencia general del sistema y comparación entre las temperaturas del arreglo de materiales obtenidas mediante experimentación y mediante simulación.

	Eficiencia general del sistema [%]	Radiación solar promedio sobre el foco [kWm^{-2}]	Temperatura máxima en la ventana (simulación) [K]	Temperatura máxima sobre la tarjeta FR4 (simulación) [K]	Error relativo en la temperatura máxima de la ventana [%]	Error relativo en la temperatura máxima de la tarjeta FR4 [%]
Mínimo	13.000	4128.962	392.000	386.000	8.272	9.527
Máximo	24.000	10678.955	412.000	425.000	22.176	27.012
Promedio	17.850	8201.763	400.200	398.700	15.116	19.892
Desviación Estandar	2.889	1510.330	4.873	9.149	3.941	5.510

La Figura 36 muestra las imágenes con las simulaciones realizadas con los valores promedio de las Tablas 8 y 9. Ambas simulaciones se implementaron para cada prueba. El primero con los dominios fraccionados permite conocer la condición dentro del arreglo y determinar la eficiencia general del sistema. La segunda simulación permitió la selección de temperaturas representativas del mismo arreglo.

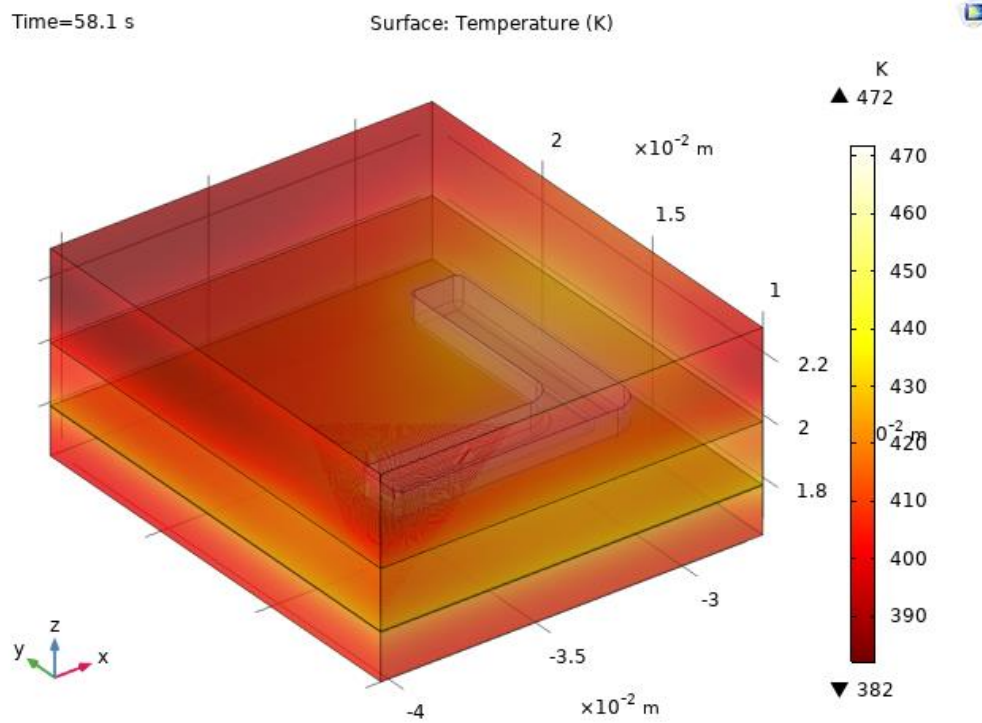
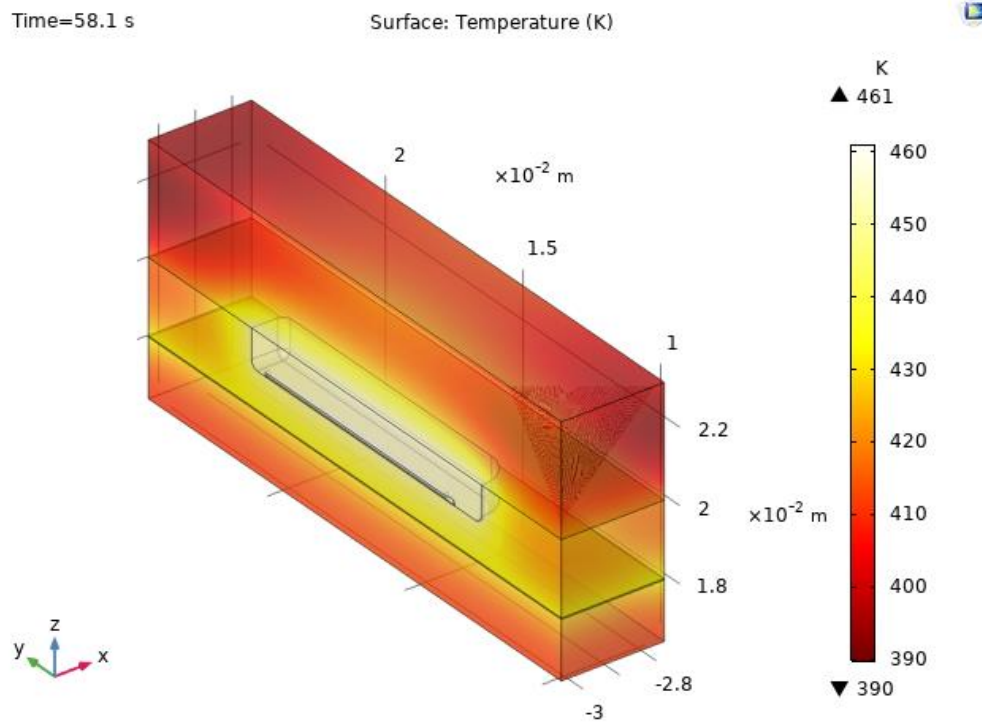


Figura 36. Simulaciones del arreglo de materiales realizadas mediante el software COMSOL Multiphysics®. La imagen superior muestra el interior de la pista, mientras que la inferior muestra el arreglo de materiales completo.

Conociendo la eficiencia global para cada prueba, se estudia la relación entre estos datos, el tiempo de exposición y la radiación solar directa promedio. Las Figuras 37 y 38 muestran los gráficos resultantes con estas relaciones y permiten las siguientes observaciones:

- Es imposible identificar cualquier tendencia cuando solo se analizan dos de las tres variables. Sin embargo, cuando se analizan conjuntamente, se puede señalar que a medida que se dispone de cantidades más significativas de radiación solar directa y se utilizan adecuadamente (lo que significa que con eficiencias generales más considerables), se obtienen tiempos de exposición más cortos.
- Se requieren más experimentos para establecer la tendencia descrita. Hasta ahora, ese comportamiento existe cualitativamente entre las variables a través de una superficie ajustada, que no necesariamente pasa por todos los puntos.

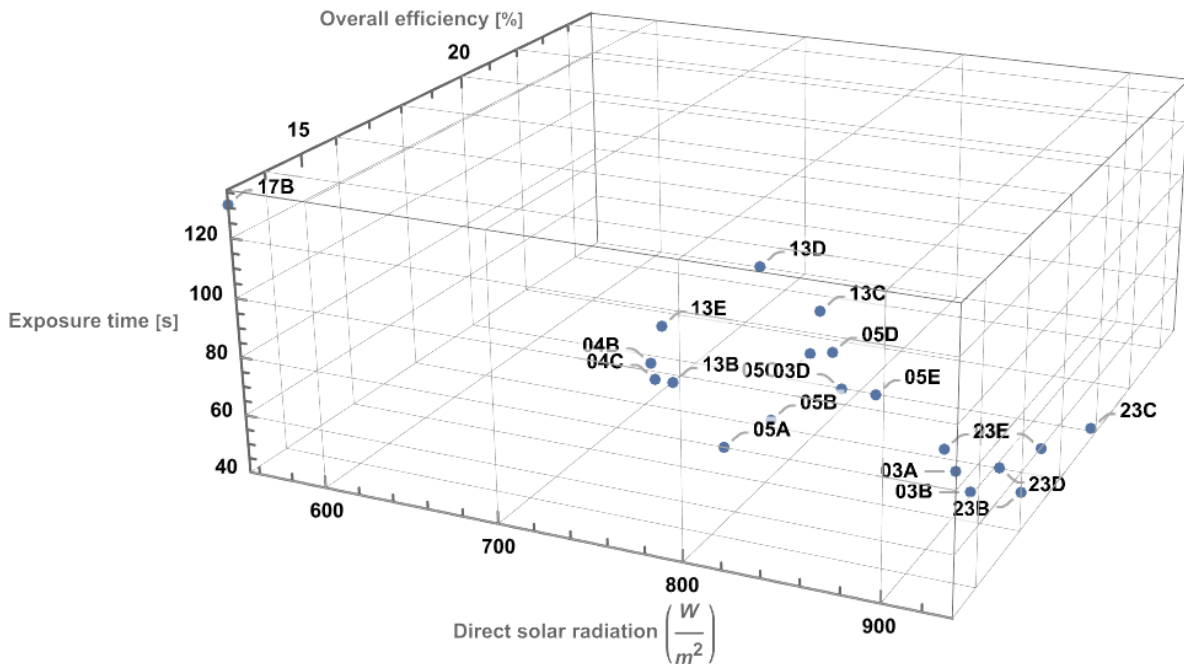


Figura 37. Diagrama mostrando la relación entre la eficiencia general del sistema, la radiación solar directa y el tiempo de exposición de cada prueba. Cada punto representa uno de los experimentos llevados a cabo bajo sus condiciones particulares de irradiación, tiempo de exposición y eficiencia general del sistema.

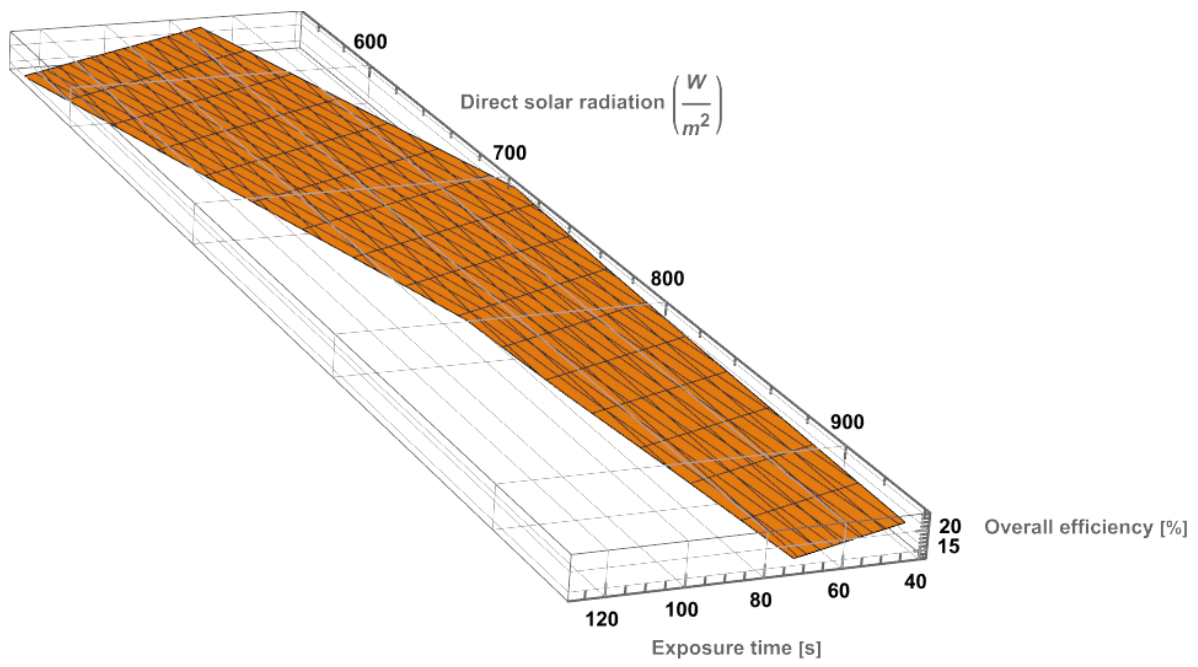


Figura 38. Superficie ajustada a los puntos experimentales llevado a cabo. La relación entre la radiación solar directa, la eficiencia general y el tiempo de exposición se puede observar.

REFERENCIAS

Victoria, M., Askins, S., Herrero, R., Antón, I., & Sala, G. (2016). *Assessment of the optical efficiency of a primary lens to be used in a CPV system*. Solar Energy, Vol. 134, p. 406 – 415.

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Metodología para el grabado de circuitos impresos mediante ESC

A partir de los resultados obtenidos y mostrados anteriormente, se posee evidencia suficiente para declarar que la metodología propuesta en el Capítulo 3 es capaz de generar circuitos impresos funcionales. Aunque hasta este momento, el circuito más complejo que se ha podido elaborar son los circuitos 555 en ambas configuraciones (monoestable y astable), no hay un impedimento para realizar circuitos con pistas más delgadas y con un mayor número de ellas.

Esto conlleva a que se involucren componentes electrónicos más elaborados y un mayor número de ellos, aumentando las capacidades y funciones que puedan realizar los circuitos obtenidos mediante esta metodología. Hasta este momento no existe una clara limitación que impida la manufactura de circuitos más grandes y elaborados.

Un sistema cuyo receptor permita alojar un arreglo de materiales de mayores dimensiones, debe de dar por resultado circuitos de mayor complejidad y funcionalidad. Parte del trabajo a futuro se centra en encontrar una forma de construir un sistema de exposición continua que permita la elaboración de circuitos de todos los tamaños, números de pistas o configuración. Que a su vez aprovecha una energía no convencional y renovable, marcando una ventaja sobre su competencia con sistemas convencionales que emplean láseres.

5.2. Posibles causas del error entre resultados experimentales y simulación

Este primer modelo capaz de describir el proceso de unión híbrida entre una pista conductora y un sustrato termoplástico ayudará a futuras investigaciones a predecir las mejores condiciones en las que puede ocurrir y los resultados alcanzables del proceso. Además de que permite experimentar con los materiales elegidos para un arreglo en particular, y conocer si se alcanzarán las dos temperaturas clave para asegurar la obtención de resultados funcionales.

Es decir, la temperatura de fusión del material conductor y la temperatura de transición vítrea del sustrato termoplástico. Estas temperaturas son clave debido a que permite la formación y habilita la conducción de electricidad a lo largo de la pista; mientras que la segunda permite la inclusión del material conductor sobre el sustrato, conformando una base sobre la cual se podrán unir los componentes electrónicos necesarios para el funcionamiento del circuito. Con futuras mejoras sobre este modelo, se podrían obtener mejores circuitos.

Las causas de error entre este modelo y el sistema experimental se enumeran a continuación. Este análisis es crucial porque se presta para conocer las principales características que rigen este novedoso procedimiento aditivo.

1. No se consideran las pérdidas de energía que pueden ocurrir entre la lente de Fresnel y el receptor. Por ejemplo, la convección entre estos elementos a lo largo de la trayectoria del haz solar.
2. Sólo una fracción del arreglo de materiales, rodeada por condiciones ficticias de aislamiento térmico, se considera para la simulación. El sistema comprende un arreglo de 50 mm por lado con un receptor que también se calienta durante la exposición.
3. El haz solar concentrado está representado por una distribución uniforme cuando, de hecho, tiene una forma de campana gaussiana inclinada. Además, los valores de las propiedades del material conductor son válidos si fuera una pieza sólida, pero consiste en esferas no conectadas. Esto es importante porque una matriz porosa afecta las propiedades como la absorción, la densidad, la conductividad térmica, entre otras. Estas propiedades tienen múltiples efectos secundarios, como una mejor absorción solar por parte de la matriz (Wang, et al., 2020; Song, et al., 2021). Se necesitan valores efectivos para todas sus propiedades.
4. Las propiedades ópticas (absortividad y transmitancia), y sus valores correspondientes para cada material y caso, son válidas para el espectro visible. Sin embargo, el espectro solar contiene frecuencias infrarrojas y ultravioletas para las cuales los valores no son válidos.

Esto significa que hay fracciones de energía radiada que pueden reflejarse, absorberse o transmitirse de manera diferente a lo que se considera en la simulación. La caracterización óptica de todos los materiales involucrados en todo el espectro solar es necesaria para obtener valores efectivos de absorbancia, transmitancia y reflectividad.

Reemplazar estos valores efectivos en la simulación actual ayudará a brindar simulaciones y eficiencias generales del sistema más precisas. Además, se necesita un espectrorradiómetro para conocer la naturaleza del haz solar concentrado en el receptor, sus frecuencias dentro del espectro electromagnético y su magnitud.

Esto se recomienda debido al efecto de fotoactivación que el rango UV-vis tiene sobre los materiales metálicos, como han señalado otros investigadores (Herranz et al., 2013; Álvarez et al., 2018).

5.3. Similitudes entre las uniones híbridas obtenidas y el estado de arte

Las similitudes entre las uniones híbridas plástico y metal durante la obtención de los circuitos impresos y lo que se informa sobre el estado del arte se presentan a continuación:

1. La presencia de lo que se supone que son burbujas se puede observar, en gran cantidad, en la cara posterior del sustrato, en la parte inferior de las trazas conductoras y alrededor de ellas (ver Figura 35). Esto indica que podría haber una unión entre plástico y metal, como las descritas por otros autores, mientras se utiliza el método LAMP (Kawahito et al., 2006; Katayama et al., 2008; Chen et al., 2016; Hussein, et al., 2017).
2. Debido a la transferencia de calor por conducción entre el material conductor y el sustrato termoplástico, este último alcanzó una temperatura superior a su temperatura de transición vítrea (para PETG es 348.15 K). Esto hizo que el sustrato termoplástico adquiriera un comportamiento suave y flexible, permitiendo que el material conductor se alojara en él y resultando en la unión entre estos materiales.
3. En ambos casos, la lámina o pista de metal se calienta mientras el polímero se funde debido a la transferencia de calor por conducción (Schricker et al., 2020). La unión entre estos materiales se obtiene debido al enclavamiento mecánico (ver Figura 35) y las interacciones fisicoquímicas en la interfase. Estos se forman a medida que el termoplástico ablandado cubre la superficie de la lámina de metal en contacto para solidificarse con ella posteriormente (Niwa et al., 2007; Schricker et al., 2020).
4. Experimentalmente, el cambio de fase en la pista ocurre de manera desigual debido a la forma de campana gaussiana del foco solar. Sin embargo, este cambio ocurre en cuestión de momentos (entre 2 y 3 s), y se requieren maniobras rápidas para evitar que el material conductor se derrame fuera de la trinchera. Esta es la razón principal para considerar solo la conducción entre el arreglo de materiales, ya que la fase líquida no dura más de un par de segundos.
5. Se necesitan más estudios para describir completamente la naturaleza de las uniones conseguidas con energía solar concentrada, se puede afirmar que ambos tipos comparten comportamientos similares a pesar de las diferencias en sus métodos de obtención (láser o energía solar), como se describe en la sección de resultados.

Además, en la misma sección, se pueden observar los valores de resistencia eléctrica, dando evidencia del éxito de los experimentos.

5.4. Trabajo a futuro

Para trabajo a futuro, se pueden destacar los siguientes puntos:

- La posibilidad de variar los materiales utilizados dentro del arreglo, ampliando el mapa de opciones con sus resultados, alcance, calidad y características de los circuitos impresos obtenibles. Se está desarrollando un nuevo sistema con cambios en su configuración, lo que permitirá diferentes resultados.
- La última serie de experimentos mostró que es imperativo implementar sistemas de control con reacciones lo más breves posibles y más instrumentación. A su vez, abordar más experimentos para encontrar las relaciones entre las variables descritas en este trabajo sólo a nivel cualitativo.
- Es necesario encontrar el flujo solar en la longitud de exposición y reemplazar la distribución uniforme en el modelo por una campana gaussiana precisa. Se necesita una caracterización eléctrica completa de las pistas obtenidas, además de mejorar la morfología de cada una.

REFERENCIAS

- Álvarez, O., Rojas, A., Barba, A., Arancibia, C.A., Álvarez, J., Melo, D.V., Arreola, C.E. (2018). *Effects of concentrated solar irradiation on allotropic transformations of AISI 316 stainless steel*. Rev. Metal. 54(4): e133. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.133>
- Chen, Y., Yue, T., and Guo, Z. (2016). *A new laser joining technology for direct-bonding of metals and plastics*. Materials Design, 110, pp. 775–781. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.08.018>.
- Herranz, G., Romero, A., de Castro, V., and Rodríguez, G. (2013). *Development of high speed steel sintered using concentrated solar energy*. Journal of Materials Processing Technology, 213(12), pp. 2065–2073. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.06.002>
- Hussein, F. I., Salloomi, K. N., Akman, E., Hajim, K., and Demir, A. (2017). *Finite element thermal analysis for pmma/st.st.304 laser direct joining*. Optics Laser Technology, 87, pp. 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.07.017>.
- Katayama, S., and Kawahito, Y. (2008). *Laser direct joining of metal and plastic*. Scripta Materialia, 59(12), pp. 1247–1250. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.08.026>.
- Kawahito, Y., Tange, A., Kubota, S., and Katayama, S. (2006). *Development of direct laser joining for metal and plastic*. International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 2006(1), p. 604. DOI: 10.2351/1.5060840.
- Niwa, Y., Kawahito, Y., Kubota, S., and Katayama, S., 2007. *Development and improvement in laser direct joining of metal and plastic*. International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 2007(1), p. 902. DOI: 10.2351/1.5061099.
- Schricker, K., Ganß, M., Könke, C., and Bergmann, J. (2020). *Feasibility study of using integrated fiber optical sensors to monitor laser-assisted metal–polymer joining*. Weld World, 64, p. 1565–1578. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00942-y>.
- Song, C., Liu, X., Xuan, Y., Zheng, H., Gao, K., Teng, L., Da, Y., Li, C., Li., Y., and Ding, Y. (2021). *Granular porous calcium carbonate particles for scalable and high-performance solar-driven thermochemical heat storage*. Sci. China Technol. Sci. 64, 2142–2152. <https://doi.org/10.1007/s11431-021-1854-4>
- Victoria, M., Askins, S., Herrero, R., Antón, I., & Sala, G. (2016). *Assessment of the optical efficiency of a primary lens to be used in a CPV system*. Solar Energy, Vol. 134, p. 406 – 415.
- Wang, X., Hsieh, M.-L., Bur, J.A., Lin, S.-Y. Lin, and Narayanan, S. (2020). *Capillary-driven solar-thermal water desalination using a porous selective absorber*. Materials Today Energy, 17, p. 100453 <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2020.100453>

CONCLUSIONES

Este proyecto describe la primera metodología funcional para obtener circuitos impresos utilizando energía solar concentrada, construyendo un puente entre ambos campos de estudio. La naturaleza y cómo ocurre este proceso se han descrito a través de un modelo de transferencia de calor y la evidencia recopilada a través de fotografías de microscopía.

A partir del modelo de transferencia de calor que describe la obtención de las pistas del circuito mediante Energía Solar Concentrada, cabe resaltar:

- El modelo descrito en este trabajo es útil para que en futuras investigaciones predigan la unión híbrida entre la pista conductora y el sustrato que podría ocurrir, según el par de materiales (conductor y sustrato) elegidos, así como la irradiación solar disponible en el sitio donde se lleve a cabo el grabado. Los futuros modelos que tomen éste como base permitirán mejorar la calidad de las pistas obtenidas tras el proceso de exposición o mejorar el propio proceso.
- Este modelo da errores relativos de alrededor del 15% al 19% (dependiendo del lugar donde se realizaron las mediciones dentro del arreglo de materiales) y se debe principalmente a la naturaleza porosa de la matriz formada por las esferas de soldadura y el efecto fotoactivador de la UV-vis sobre el material metálico. Obtener los datos asociados para una mejor aproximación es imperativo.
- Esta metodología y su modelo son relevantes por las nuevas posibilidades que abre en torno al uso de la energía solar concentrada en aplicaciones de fabricación aditiva, en este caso, en la obtención de circuitos impresos. Es posible proponer nuevas configuraciones con las que se obtendrán nuevas experiencias y variaciones en la calidad de las pistas grabadas, buscando así mejores circuitos y mayor complejidad.

En cuanto a la información experimental recabada, cabe resaltar:

- Los resultados conseguidos de la investigación fueron los primeros circuitos funcionales utilizando la metodología. Se muestra la importancia de un control adecuado para la posición y orientación del receptor, y con ello evitar que el conductor se derrame fuera de la trinchera.

A su vez, se requiere implementar un sistema de control y un sistema de atenuación de la irradiación incidente sobre la lente, para evitar sobreexposición de las pistas o algún otro tipo de daño derivado de alguna momentánea ubicación incorrecta del foco solar.

- Este trabajo proporciona los detalles necesarios para seguir estudiando el potencial de la energía solar concentrada para obtener circuitos impresos. Además, se suma a la evidencia previamente existente de que la energía solar concentrada se puede utilizar en procesos de manufactura.

- También se obtuvieron uniones híbridas plástico metal, las cuales originalmente se habían reportado y obtenido mediante equipos láser. Este logro permite comenzar a dar indicios de que las uniones de tal clase tienen comportamientos similares sin importar la fuente de calor utilizada, y será posible plantear en un futuro una teoría general para las mismas.
- Por medio del equipo descrito y utilizado en este trabajo, se encontró que es posible llevar a cabo el proceso de grabado con un tiempo promedio de 58 s de exposición al haz solar concentrado por pista.

Esto ocurre partiendo del supuesto de que se cuenta con un equipo de concentración con una eficiencia general del 18%, y la radiación directa del día en particular se encuentre en aproximadamente 800 Wm^{-2} (resultando a su vez en un foco solar concentrado de 8000 kWm^{-2} , distribuidos en un área de $1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$). Las pistas obtenidas tienen una resistencia eléctrica promedio de 0.135Ω .

En cuanto a productos de la investigación realizada, se pueden señalar los siguientes:

- Escritura del artículo de investigación titulado: “*A proposal for additively manufacturing printed circuits by employing concentrated solar energy*”. Publicado en la revista *Results in Engineering*, de la editorial Elsevier (<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101172>). En este artículo se describe la metodología y el modelo de transferencia de calor que describe el proceso de grabado de circuitos y unión híbrida entre la pista de metal y un sustrato termoplástico.
- El contenido de este artículo fue abordado durante la conferencia “*Energía Solar Concentrada para la elaboración de Circuitos impresos*”, que formó parte de los Seminarios del CENISA en Ciudad Universitaria, CDMX, el 6 de junio de 2023.
- Como producto de la investigación se generó un sistema para llevar a cabo el proceso descrito en este trabajo, el cual se encuentra en proceso de protección bajo el modo de Modelo de Utilidad, con el título: “Concentrador y receptor solar para el grabado de circuitos impresos mediante el uso de energía solar concentrada”
- Por último, se concluye con una nueva propuesta que permite la fabricación de circuitos a partir de su sustrato y el depósito de pistas funcionales embebidas al interior, resultando en módulos con funciones específicas.

Esta propuesta, descrita en el anexo A, también emplea el uso de la energía solar concentrada bajo otra configuración, siendo evidencia de que existen múltiples vías para obtener este tipo de sistemas empleando la misma fuente de energía. Adicionalmente se encuentra en elaboración su correspondiente artículo de investigación, en el cual se describirá con detalle la nueva metodología y modelo que describe su naturaleza y desarrollo del proceso.

ANEXO A: LA POLI(ϵ -CAPROLACTONA) Y TRABAJO A FUTURO

Se muestra un nuevo método para el grabado de circuitos impresos auxiliado mediante ESC. Nació como el producto de la investigación descrita aquí al quererla llevar a un paso más adelante, en donde esta energía tendría su participación en la conformación del sustrato del circuito, pero no en las pistas.

Con anterioridad se han hecho esfuerzos por reemplazar los sustratos usados de manera convencional, debido a que en su mayoría están elaborados por fibra de vidrio, el cual en algunos casos su polvo es carcinógeno.

Materiales bio-basados, por ejemplo, en los sustratos, podrían alojar los requerimientos de la electrónica embebida. Esta suele ser flexible, ligera, imprimible y de bajo costo, al mismo tiempo que pueden ser biodegradables y disminuir la materia y energía necesarios para la producción de circuitos impresos (Nassajfar et al., 2021, p. 2).

Entre estos esfuerzos se encuentran:

- El proyecto “Desarrollo de componentes electrónicos en circuitos impresos elaborados con recursos renovables” (*Development of electronic components on wiring boards made of renewable resources*) se inició en Alemania con el objetivo de desarrollar PCB (*printed circuit board*) con recursos renovables; un ejemplo de sus avances está en el material termoplástico ARBOFORM, usado para sustituir el sustrato de las tarjetas fenólicas y cuya matriz consiste en lignina, un producto del proceso de elaboración de pulpa a partir de celulosa (Nägele et al., 2005, p. 27).
- Soluboard (WO2018234801 Composite Structure): Consiste en una estructura compuesta por capas alternadas por otras adhesivas, en conjunto solubles en agua. Está compuesto por materiales reciclables, es biodegradable y no tóxico (Herring, 2018).
- Se han investigado el uso de otros materiales como sustitutos de los actuales sustratos como sería el caso de epoxidados de aceite de linaza obtenidos de las plantas de lino, sustratos de papel en multicapa, otros elaborados a partir de ácido poliláctico (PLA), polietileno tereftalato (PET), Poliimida (PI), Polietileno Naftalato (PEN), Poliuretano Termoplástico (TPU) o polidimetilsiloxane (PDMS) (Nassajfar, et al., 2021 p.2; Sakalys et al., 2022, p. 3).

- Poli(ϵ -caprolactona) (PCL): Es un polímero sintético biodegradable que puede ser degradado por microorganismos. Es un poliéster alifático que se compone de monómeros de hexanoato, puede alcanzar un grado de cristalinidad alto y es categorizado como un polímero semicristalino (Puentes, 2020, p. 9 -10).

Aunque sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas dependen de su peso molecular y grado de cristalinidad, se ha generalizado que posee una densidad de 1.07 a 1.2 g/cm³, temperatura de transición vítrea entre -65 a -60°C, temperatura de fusión de entre 56 a 65°C y temperatura de descomposición de 350°C (Puentes, 2020, p. 10).

Adicionalmente posee miscibilidad y compatibilidad mecánica con otros polímeros, presenta degradación lenta (de 2 a 3 años en condiciones adecuadas), de toxicidad baja y compatible con tejidos humanos (Ramanath et al., 2008, p. 2541; Puentes, 2020, p. 10-11).

Ya se han desarrollado estudios para identificar las variables principales y simulaciones numéricas para explicar los fenómenos presentes en la deposición del material en los métodos modelado o fabricación mediante filamento fundido (*FDM, fused deposition modelling; FFF, Filament Fused Fabrication*) (Ortega et al., 2016; Rashid et al., 2021; Mallikarjuna et al., 2023).

Ramanath et al. (2008) ya cuentan con un modelo que es capaz de describir las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo el proceso de deposición de PCL usando el método de deposición mediante filamento fundido bajo diversas condiciones.

Se desarrolló un nuevo Estado del Arte basado en estos métodos de modelado o fabricación mediante filamento fundido (*FDM, FFF*), las cuales ya han tenido varias participaciones en la manufactura aditiva de diferentes objetos mediante ESC, pero no circuitos impresos. Las nuevas inclusiones al Estado del Arte se enlistan en la Tabla 10:

Tabla 10. Investigaciones más importantes asociadas a la obtención de circuitos impresos mediante modelado o fabricación de filamento fundido.

Título	Descripción	Referencia
<i>Multifuncionalidad de la impresión 3D: estructuras con electrónica</i>	Por medio del sistema multi ^{3D} , conformado por dos sistemas de modelado mediante filamento fundido (<i>fused deposition modeling, FDM</i>) y un dispositivo CNC integrado, se realiza la fabricación de sustratos con sistemas electrónicos embebidos. Como parte del proceso, una vez se ha impreso parte del sustrato, el dispositivo CNC maquina los trazos que posteriormente se rellenan con tinta conductora o algún otro material similar.	Espalin, Muse, MacDonald y Wicker, 2014.
<i>Impresoras 3D ultraportátiles alimentadas por energía solar para la fabricación in situ de recursos médicos</i>	Consiste en un sistema de modelado por deposición fundida que obtiene energía por medio de un sistema de paneles solares. La intención es que puede fabricar equipo médico y especializado en sitios inhóspitos como el desierto.	Wong, 2015.
<i>Estudio sobre el depósito de metal en la fabricación aditiva basada en recubrimiento por fusión</i>	Se trata de un sistema de modelado mediante deposición fundida que puede manufacturar piezas completas con geometrías elaboradas. A diferencia de los sistemas usuales, este inyecta una aleación de SnPb.	Fang, Du, Wei, Wang, He, Bai, Wang, Chen, Geng, y Lu, 2016.
<i>Impresión solar 3D de regolito lunar</i>	Se demostró la posibilidad de sinterizar regolito lunar capa a capa mediante equipos de concentración solar, los cuales servirán para construir la infraestructura básica de los exploradores espaciales.	Maurisse, Makaya, Willsch y Sperl, 2018.
<i>La aplicación de un colector cilindro-parabólico solar para la fusión de residuos plásticos</i>	Se diseñan y construyen dos concentradores de perfil parabólico para poder examinar la posibilidad de llevar a cabo el reciclaje de plásticos por medio su fundición mediante ESC.	Mewes y Sujessy, 2019.
<i>El reciclaje de plásticos ABS E-Waste mediante extrusión por fusión e impresión 3D utilizando dispositivos alimentados por energía solar como herramienta transformadora para la ayuda humanitaria</i>	Se describe un sistema que puede operar con un arreglo de celdas fotovoltaicas o baterías recargables, capaz de realizar el reciclado del plástico ABS molido proveniente de sistemas ya desechados.	Mohammed, Wilson, Gomez-Kervin, Vidler, Rosson, et al., 2020.

Tabla 10. Investigaciones más importantes asociadas a la obtención de circuitos impresos mediante modelado o fabricación de filamento fundido (continuación).

<p><i>Fabricación aditiva alimentada por energía solar en entornos extraterrestres</i></p>	<p>Consiste en un concentrador con lente de Fresnel que es capaz de tomar la energía del Sol para sinterizar arena capa a capa. La idea es usar este tipo de dispositivo para la construcción de bases lunares e infraestructura con los materiales in-situ.</p>	<p><i>Anderson y Thangavelautham, 2021.</i></p>
<p><i>Caracterización de componentes de cobre puro producidos mediante fabricación aditiva por filamento fundido (FFF)</i></p>	<p>Se emplea un concentrador con lente de Fresnel para llevar a cabo el paso de sinterización de piezas de cobre puro, las cuales fueron obtenidas mediante un proceso de Fabricación por filamento fundido.</p>	<p><i>Cañadilla, Rodríguez, Romero y Caminero, 2022.</i></p>
<p><i>La influencia de la sinterización solar en las piezas de intercambiadores de calor de cobre con morfología impresa en 3D controlada</i></p>	<p>Por medio de una técnica que combina piezas impresas en plástico y mediante polvo metalúrgico en 3D, se obtienen piezas que presentan huecos funcionales. El resultado se sinteriza mediante energía solar.</p>	<p><i>Pop, Croitoru, Bedo, Geaman, Radomir, et al., 2022.</i></p>
<p>PROCESAMIENTO DE PIEZAS DE ACERO DE HERRAMIENTAS MEDIANTE IMPRESIÓN CON FILAMENTO FUNDIDO Y SINTERIZACIÓN SOLAR</p>	<p>Se emplea energía solar concentrada para llevar a cabo el proceso de sinterizado de piezas de acero, obtenidas mediante el método de Deposición de Filamento Fundido (FFF).</p>	<p><i>Prado, García, Cañadilla, Romero, Rodríguez, et al., 2022.</i></p>

A continuación, se muestran las patentes más relevantes para la formación de circuitos mediante modelado de filamento fundido (Tabla 11):

Tabla 11. Patentes relevantes por el uso de la energía solar para el modelado o fabricación por deposición fundida, o en alguno de sus pasos intermedios.

No. de Patente y Referencia	Título	Año de publicación	Descripción
CN205668394 KERAN, 2016	<i>3D (tri-dimensional) pluma impresora</i>	2016	Consiste en una pluma para imprimir en 3D, la cual tiene una boquilla giratoria, luz integrada al extremo y una celda solar que contribuye a la energía que requiere el sistema.
CN208068892 Xiaohuai, 2018	<i>Bolígrafo de impresión 3D multicolor mediante energía solar</i>	2018	El modelo de utilidad describe una pluma con capacidad para inyectar diferentes colores de plástico para realizar impresiones 3D multicolor. Cuenta con un juego de celdas fotovoltaicas como medio adicional de alimentación.
CN206703230 SHENGGUI, NAN, XINDIAN, WEI y BINGHENG. 2017	<i>Impresora 3D de fotocurado de cerámica bajo fórmula que expone al sol</i>	2017	Este modelo de utilidad consiste en una fórmula y sistema que permite la creación de cerámicas y vasijas mediante una impresora en 3D que expone al Sol. La fórmula tiene características para el fotocurado.
CN206484897 YANJUN y YURAN, 2017	<i>Dispositivo portátil de impresión 3D</i>	2017	Consiste en una impresora en 3D que tiene entre sus varias funciones y capacidades, el almacenar energía solar a partir de celdas solares colocadas a su alrededor.
CN208855052 ZHENYA, YAN y WENMING, 2019	<i>Bolígrafo de impresión 3D con carga conveniente</i>	2019	Es un modelo de utilidad que describe una pluma en 3D que resuelve el problema de personas que necesitan hacer una impresión en algún sitio fuera de una zona de carga. Esta pluma tiene como característica principal contar con una celda fotovoltaica curva que subsana esa falta de sitios de conexión a energía convencional.
CN111823571 JIMIN, 2020	<i>Dispositivo de impresión 3D manual, solar y multicolor</i>	2020	La invención consiste en un dispositivo para imprimir en 3D dirigido manualmente. Cuenta con una celda fotovoltaica que le da energía al sistema completo. Las diferentes plumas para la deposición de material son independientes y pueden imprimir en colores diferentes.
CN112643845 CHAO, WEI, GUANG y XIAOCHEN, 2021.	<i>Dispositivo de impresión 3D de suelo lunar basado en la recolección, transporte y alimentación electrostática de polvo y fusión por condensación</i>	2021	Consiste en un dispositivo que atrae el polvo lunar mediante fuerza electrostática. Este polvo luego es alimentado a un horno el cual recibe energía solar para fundirse y consolidarse en una fracción de una construcción lunar.

Tabla 11. Patentes relevantes por el uso de la energía solar para el modelado o fabricación por deposición fundida, o en alguno de sus pasos intermedios (continuación).

<p>CN114474717</p> <p>GUOFU, RUI y WEI, 2022</p>	<p><i>Dispositivo y método de fabricación aditiva de revestimiento de lecho de polvo para la construcción de bases interestelares</i></p>	<p>2022</p>	<p>Este sistema de manufactura aditiva parte del revestimiento por lecho de polvo, con la ventaja de que ha sido diseñado para la construcción de bases espaciales y tareas similares, impulsado por energía solar concentrada.</p>
<p>CN114311220</p> <p>GUOGU, RUI y WEI, 2022</p>	<p><i>Dispositivo y método de fabricación aditiva por deposición fundida para la construcción de bases interestelares</i></p>	<p>2022</p>	<p>Este sistema de manufactura aditiva parte del modelado por deposición fundida del material del entorno para la fabricación de bases. El objetivo es la fabricación de bases espaciales utilizando este tipo de equipos y los materiales in situ.</p>

Hasta donde se sabe, el modelado por deposición fundida, auxiliada por ESC, no ha tenido participación en la creación de circuitos impresos. Esto se observa en el Estado del Arte expuesto antes.

Metodología para la creación de sustratos mediante ESC

A diferencia del primer método, aquí se trata de construir el sustrato como paso inicial, para proseguir con la formación de las pistas, enfriamiento y obtención del circuito impreso. A continuación, se muestran imágenes del primer prototipo del “extrusor” de plástico PCL (poli(ϵ -caprolactona)) con una temperatura de fusión de 60°C (Figura 39):

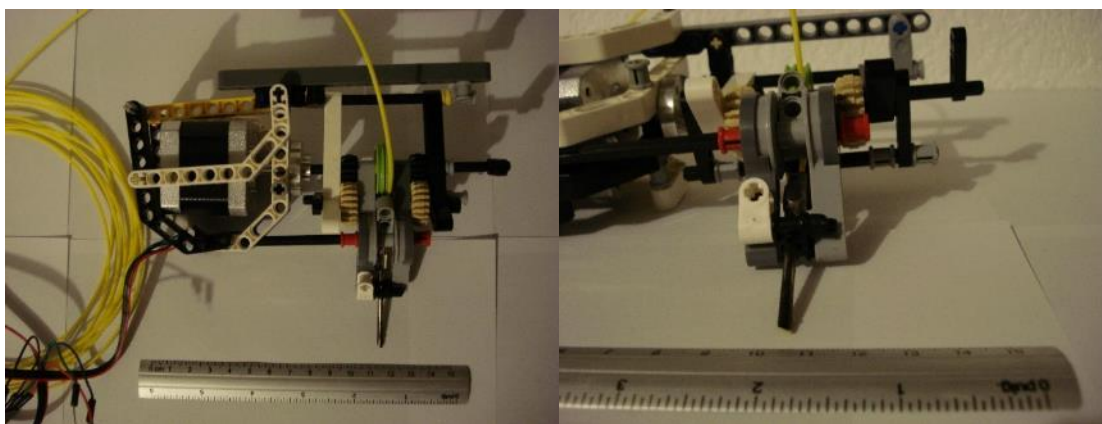


Figura 39. Inyector de PCL auxiliado mediante ESC.

Mediante experimentación continua, se logró obtener sustratos que sean capaces de albergar un circuito impreso en su interior. Después de la obtención de los primeros sustratos, se procedió a la obtención de unos con pistas conductoras albergadas. El camino que se optó fue por agregar directamente las pistas conductoras sobre un sustrato recalentado mediante el haz concentrado en las zonas de interés (Figura 40):

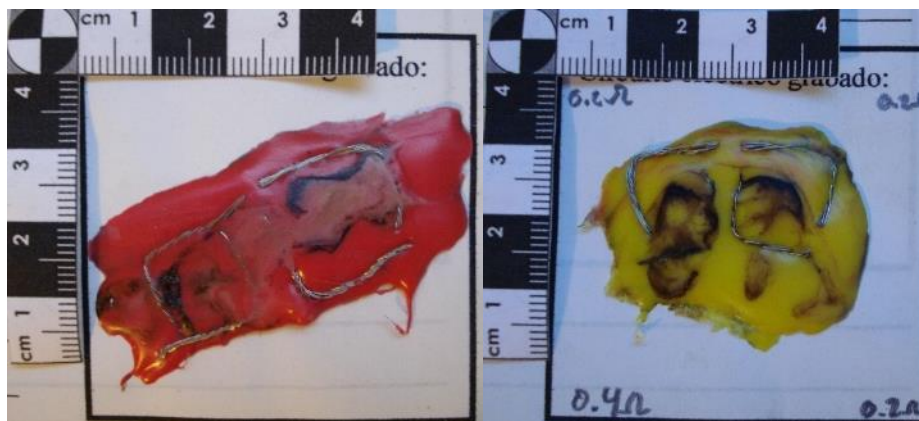


Figura 40. Sustratos con pistas conductoras alojadas.

Para mejorar la apariencia de los resultados, se optó por usar moldes que limitaran el movimiento del PCL cuando se encuentra en fase líquida o semi-líquida (alrededor de los 60°C). Se muestran los moldes ideados para tal fin, los cuales se colocarían encima de una tarjeta fenólica FR4 con el fin de que funcione como una plancha (Figura 41).

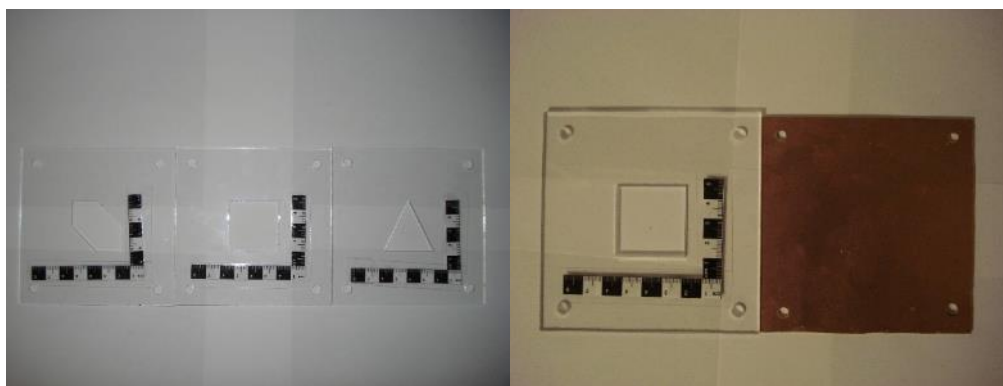


Figura 41. Moldes para el depósito del material termoplástico (izquierda), molde con tarjeta fenólica o plancha (derecha).

Se muestra el depósito de material sobre un molde cuadrado y la secuencia necesaria (Figura 42):

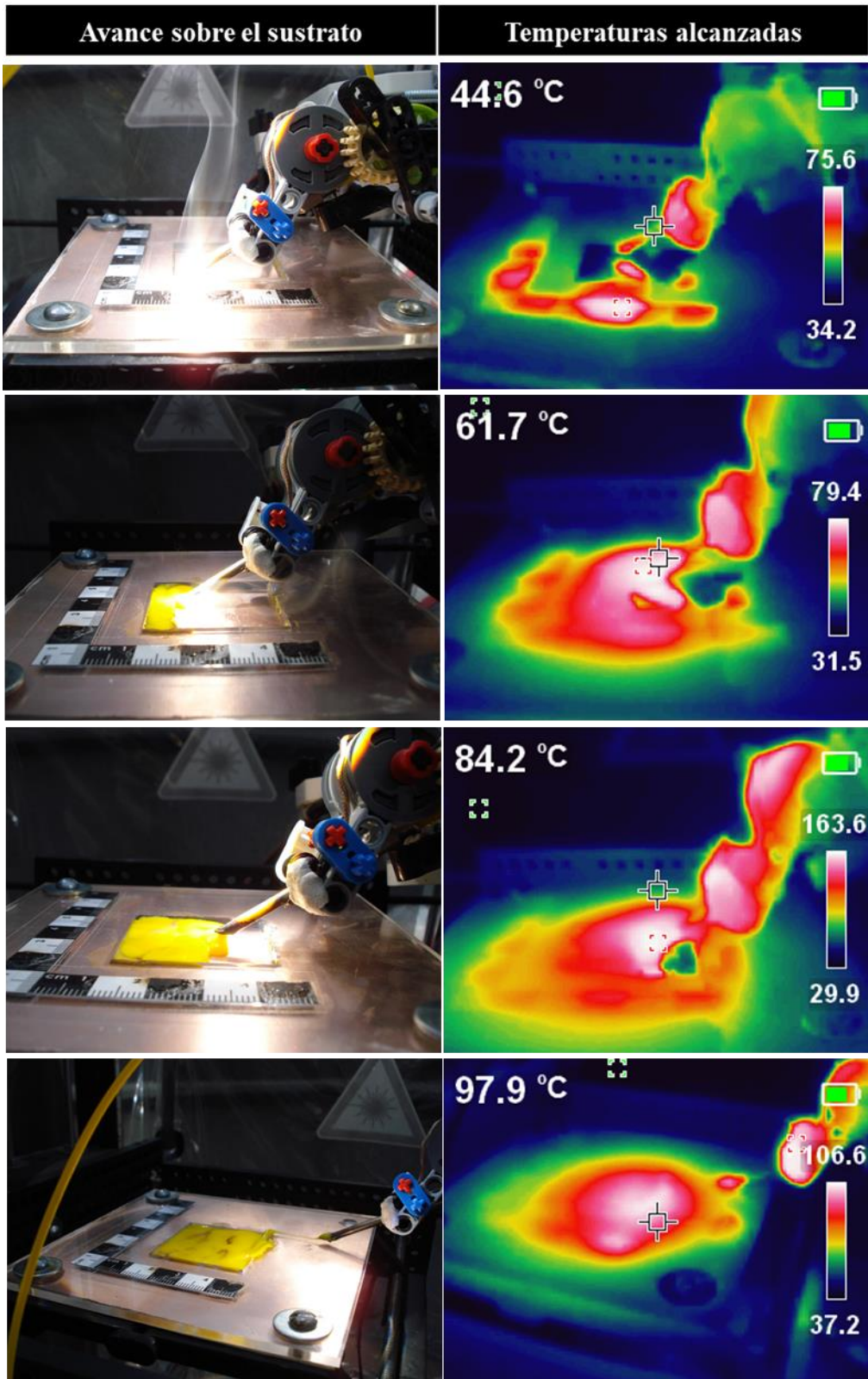


Figura 42. Secuencia para la deposición de PCL sobre el molde cuadrado.

Lo que se observa en la Figura 42 es la secuencia en la que el extrusor de la Figura 39, al estar expuesto al haz solar concentrado sobre su punta, éste eleva la temperatura del PCL que está en su interior. Al ocurrir esto, el PCL cambia de fase sólida a una semi-líquida (*rubbery*), la cual permite que el PCL pueda moldearse como sea necesario.

El equipo de extrusión presiona el PCL que ya está caliente en su punta y en fase semi-líquida por medio de su propio filamento que aún está en estado sólido. Conforme ocurre la extrusión, el PCL en fase semi-líquida va rellendo el molde colocado. La Figura 42 muestra el avance de llenado del molde a lo largo del experimento, acompañado por una imagen de la cámara termográfica en ese momento, lo cual permite apreciar las temperaturas de los elementos involucrados.

A lo largo de la secuencia, se puede apreciar no sólo el llenado del molde, sino que el material que se está extruyendo y del cual se conforma el sustrato en formación, está por encima de su temperatura de fusión. Esto ocurre en algunos plásticos, los cuales después de su temperatura de fusión, experimentan la mencionada fase semi-líquida (fácilmente moldeable), antes de convertirse en un líquido viscoso. Se incluye una gráfica que describe la temperatura de la boquilla expuesta al haz de ESC (Figura 43 y 44).

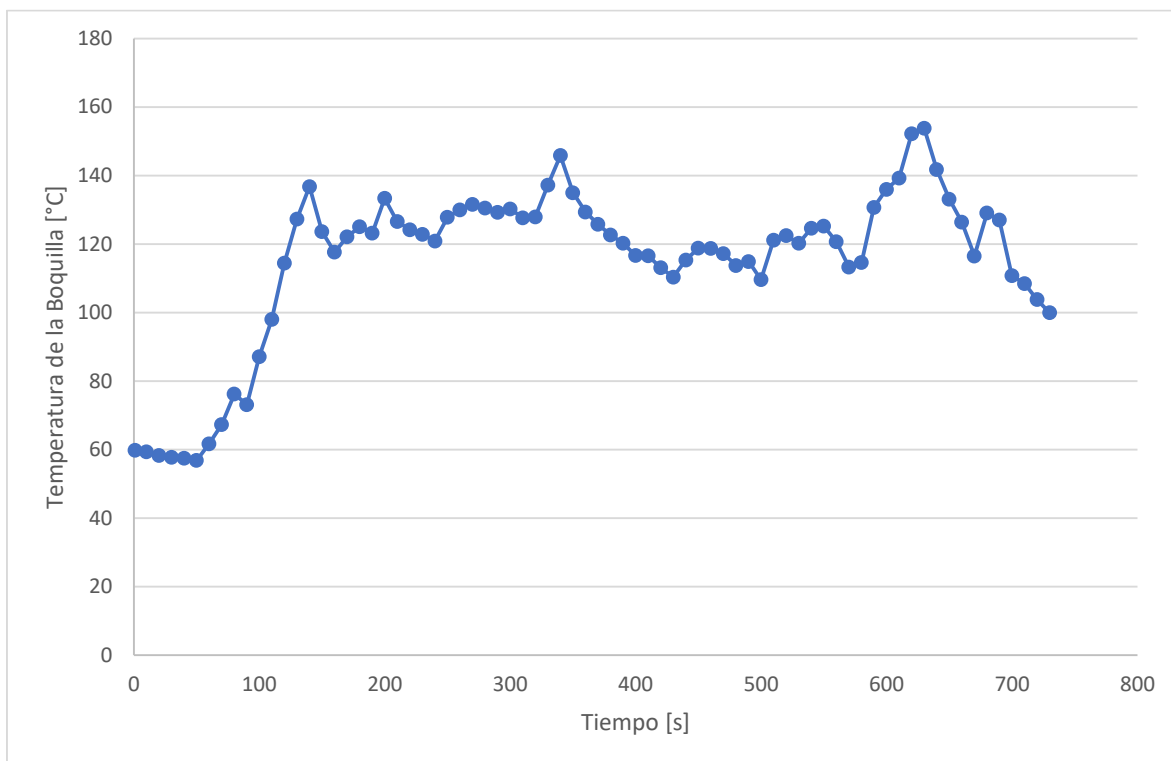


Figura 43. Temperatura de la boquilla a lo largo del depósito de material sobre un molde cuadrado.

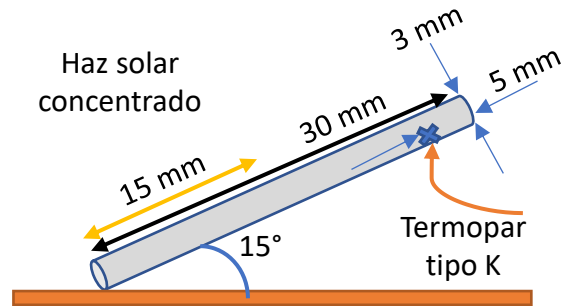
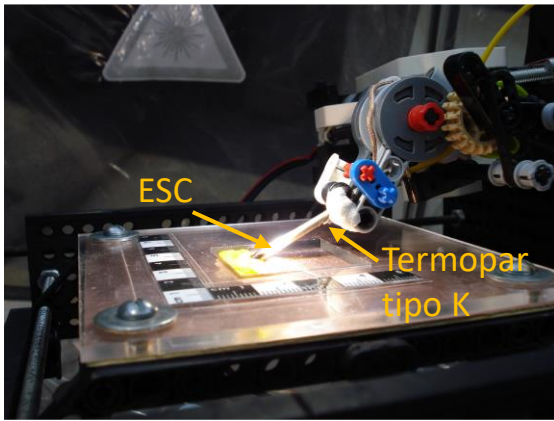


Figura 44. Ubicación del equipo de medición y esquema del sistema.

Después de dejar que el sustrato de PCL alcanzara la temperatura ambiente, se procedía a exponerlo al haz de ESC nuevamente, para que se reblandeciera sólo en los sitios para el depósito de pistas electrónicas (Figura 45).

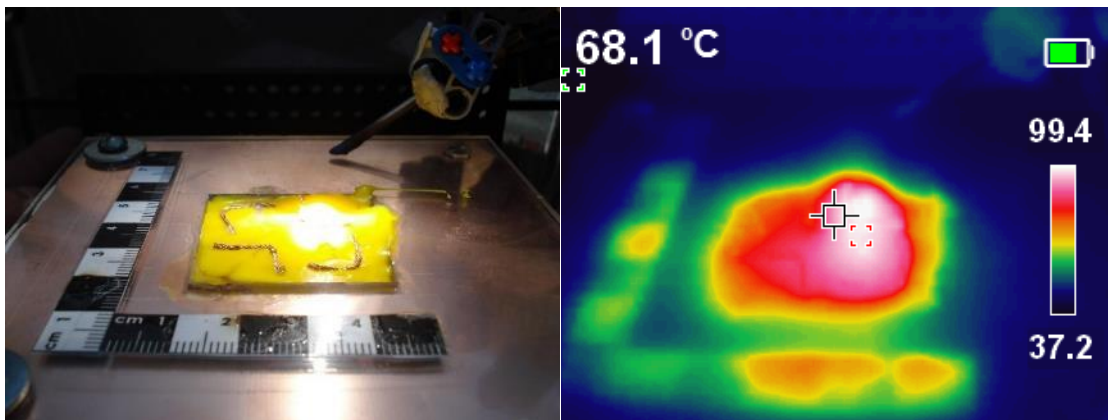


Figura 45. Depósito de las pistas conductoras sobre el sustrato cuadrado de PCL.

Los resultados obtenidos son los siguientes (Figuras 46 a 48):



Figura 46. Sustratos de PCL obtenidos a través de fabricación mediante filamento fundido auxiliado mediante ESC.

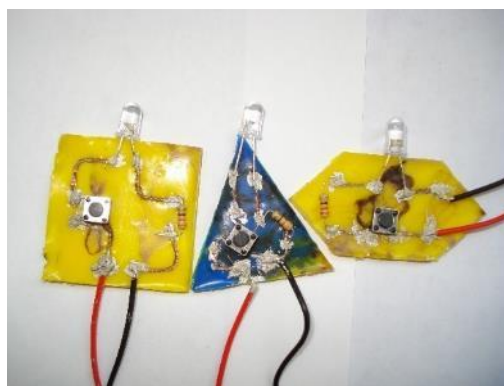


Figura 47. Circuitos obtenidos a partir de los sustratos de PCL.



Figura 48. Prueba de funcionamiento de cada uno de los circuitos obtenidos a través de fabricación mediante filamento fundido de PCL auxiliado por ESC.

El siguiente paso fue comprobar si es posible la construcción de circuitos de múltiples pisos que pudieran llevar pistas embebidas a secciones distintas y permitir conexiones cruzadas, sin contacto entre ellas, en un mismo sustrato. Se muestran en la Figura 49 el proceso para llevar a cabo dichos circuitos:

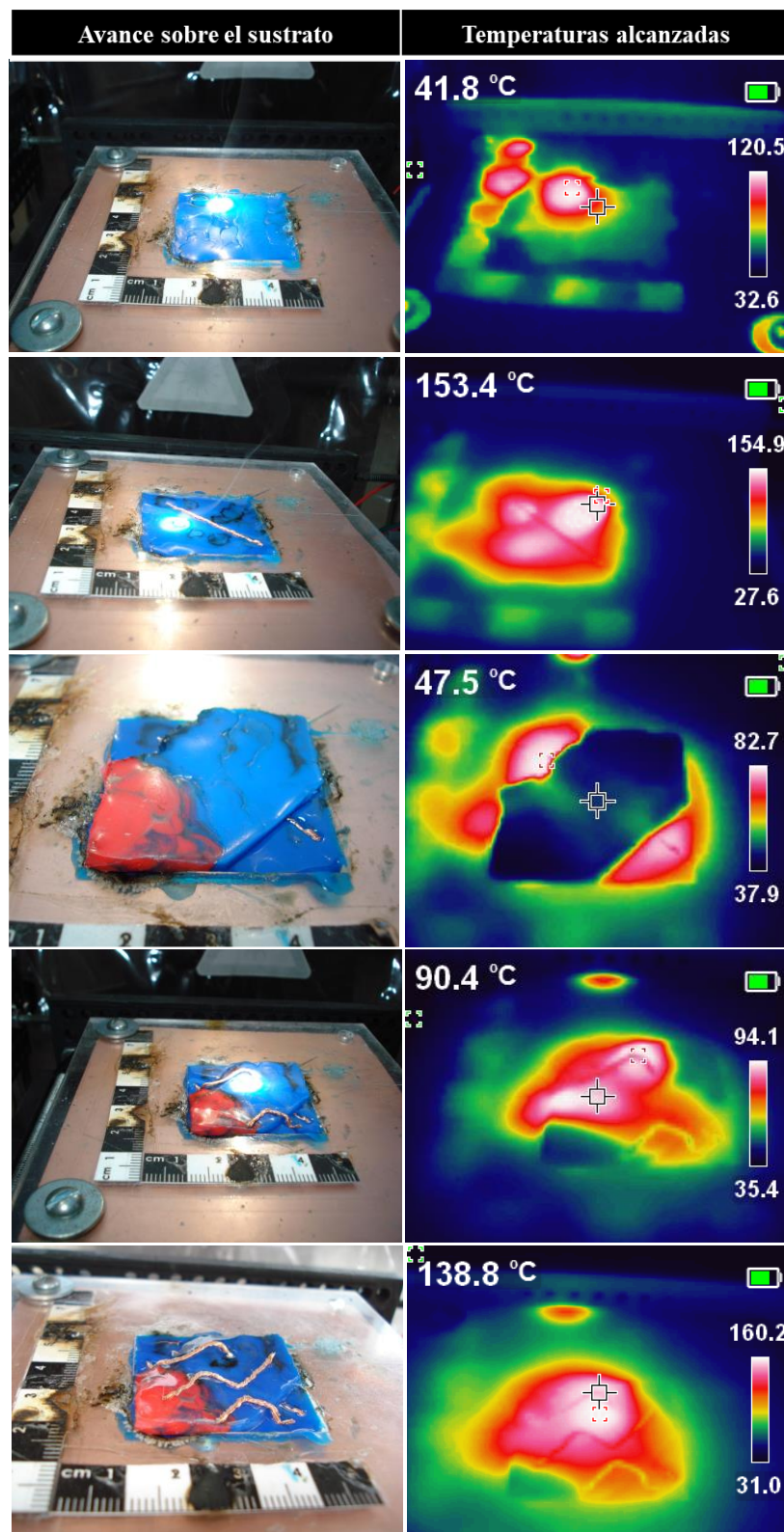


Figura 49. Proceso de inclusión de pistas embebidos sobre un sustrato base y la colocación de un segundo sustrato y pistas correspondientes.

Este experimento se repitió con la finalidad de contar con un circuito ejemplo y una prueba de funcionamiento. En las siguientes figuras se muestran ambos casos (Figura 50):

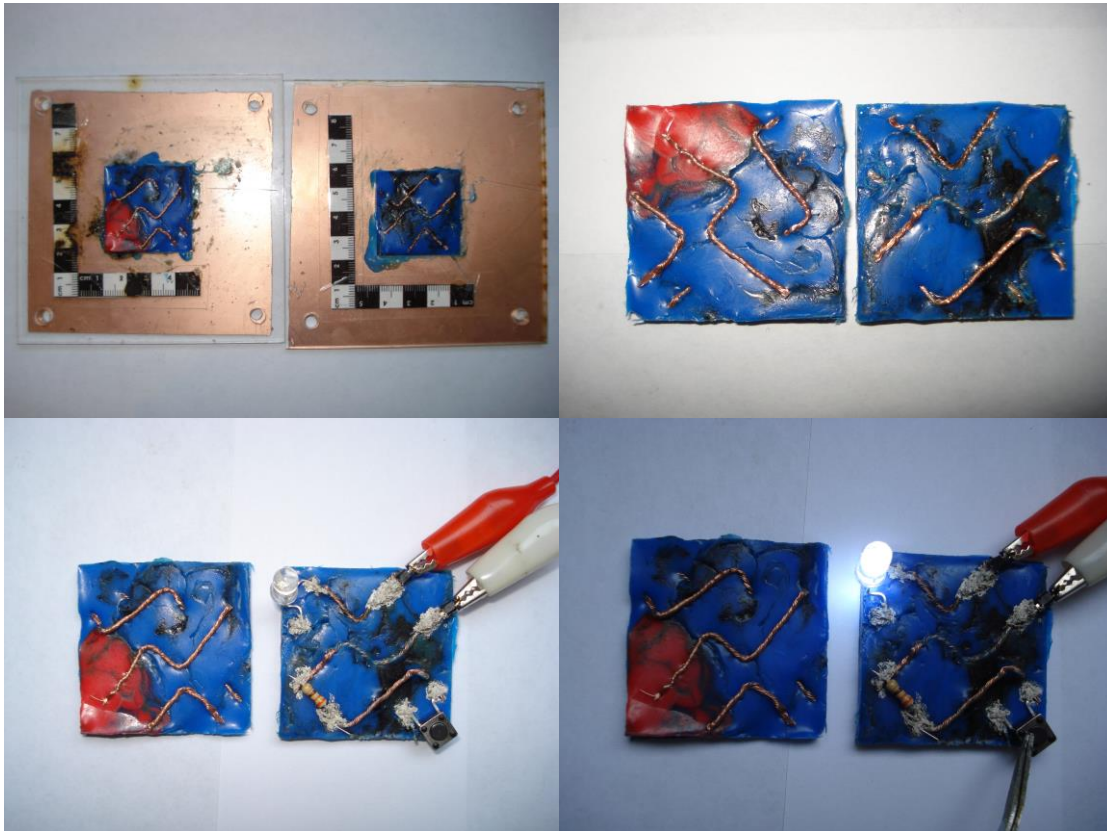


Figura 50. Circuitos de dos pisos y pistas embebidas de poli(ϵ -caprolactona). Se muestra un circuito sin elementos y otro con elementos y mostrando prueba de funcionamiento.

Módulos funcionales

Con todo el conocimiento y experiencia adquirida de los pasos anteriores, se optó por llevar estos sistemas a un último paso hacia adelante. Y se diseñó un sistema capaz de crear circuitos con la futura intención de la conformación de módulos. A diferencia de los anteriores, no llevaría los elementos soldados, sino headers que sobresaldrían hasta el nivel de la superficie del sustrato y permitiría la conexión del elemento correspondiente mediante simple inserción.

Entre las ventajas de este nuevo diseño están que los componentes dañados se pueden reemplazar con mucha facilidad (sólo se reemplaza el elemento dañado mediante un intercambio e inserción), las pistas están completamente embebidas, se permite la escritura de indicaciones sobre la misma superficie, así como indicar sus conexiones embebidas de ser necesario.

Se muestran las imágenes que ilustran la conformación de uno de estos sistemas, así como sus resultados (Figuras 51 a 54):

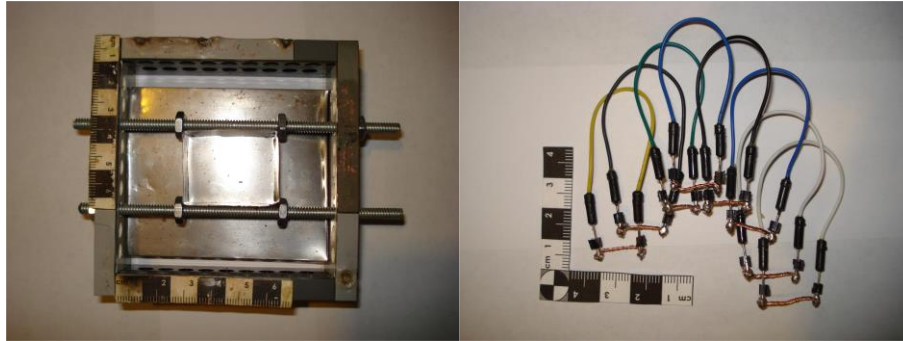


Figura 51. Nuevo diseño de receptor solar con sujetador de moldes (izquierda) y pistas embebidas para la conformación de circuitos insertados a jumpers (derecha).

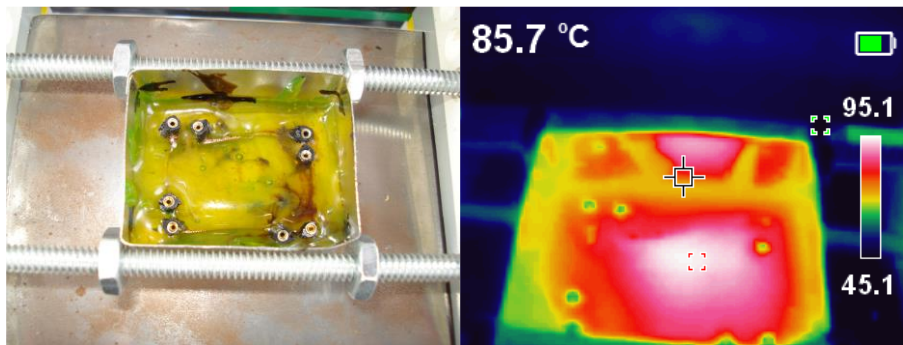


Figura 52. Se recalentó el sustrato en las zonas donde se ubicarían pistas del circuito deseado. A la izquierda se pueden observar las pistas insertadas, y a la derecha se observan los gradientes de temperatura presentes en el proceso.



Figura 53. Circuito eléctrico listo para usarse (izquierda), prueba de operación (derecha).

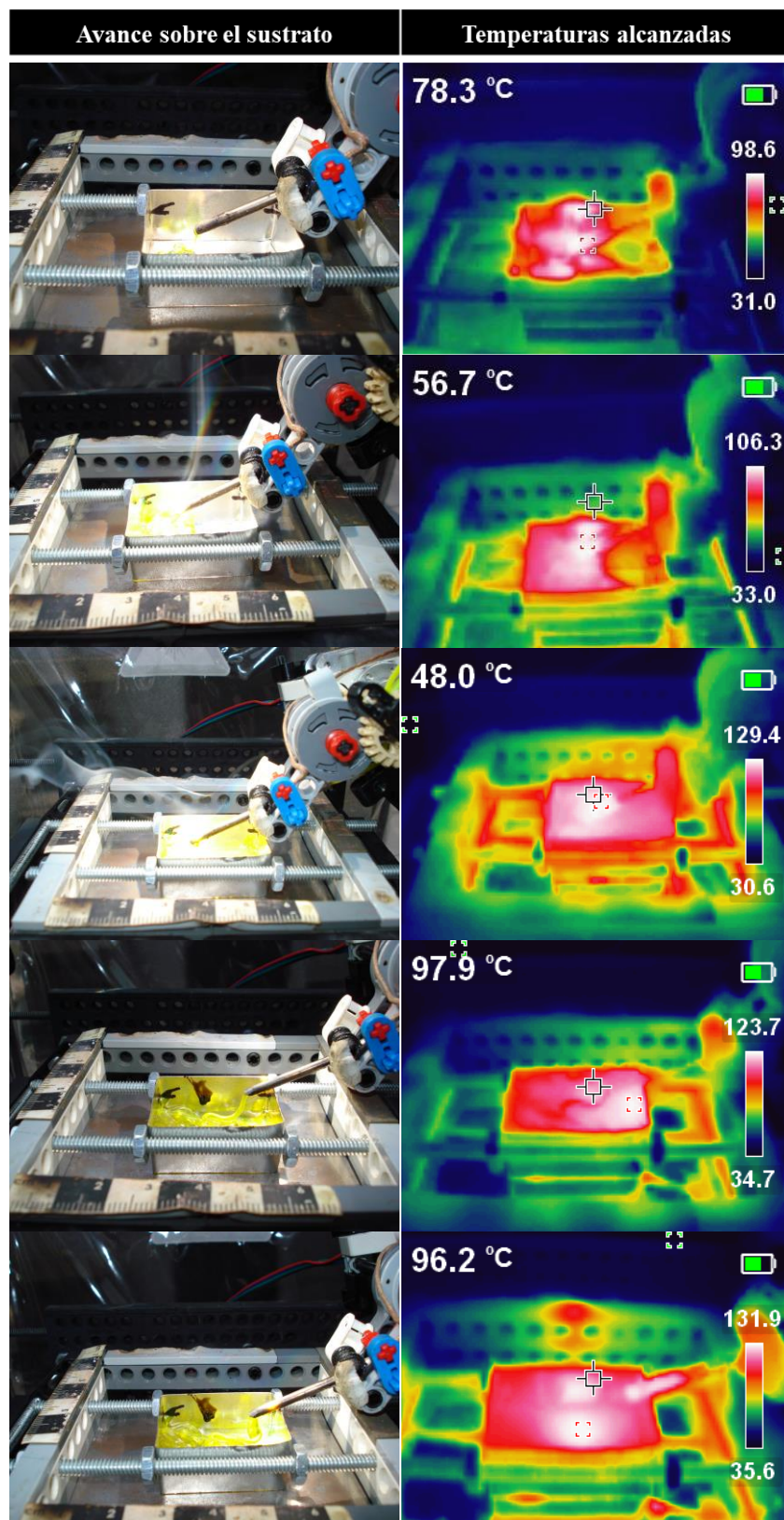


Figura 54. Proceso de obtención del sustrato del circuito mostrado.

Utilizando el mismo método, ya se han obtenido una variedad de circuitos con diferentes funciones. Incluso un par de ellos se interconectan entre ellos, abriendo la posibilidad a circuitos comunicados y ampliando sus capacidades (Figura 55).

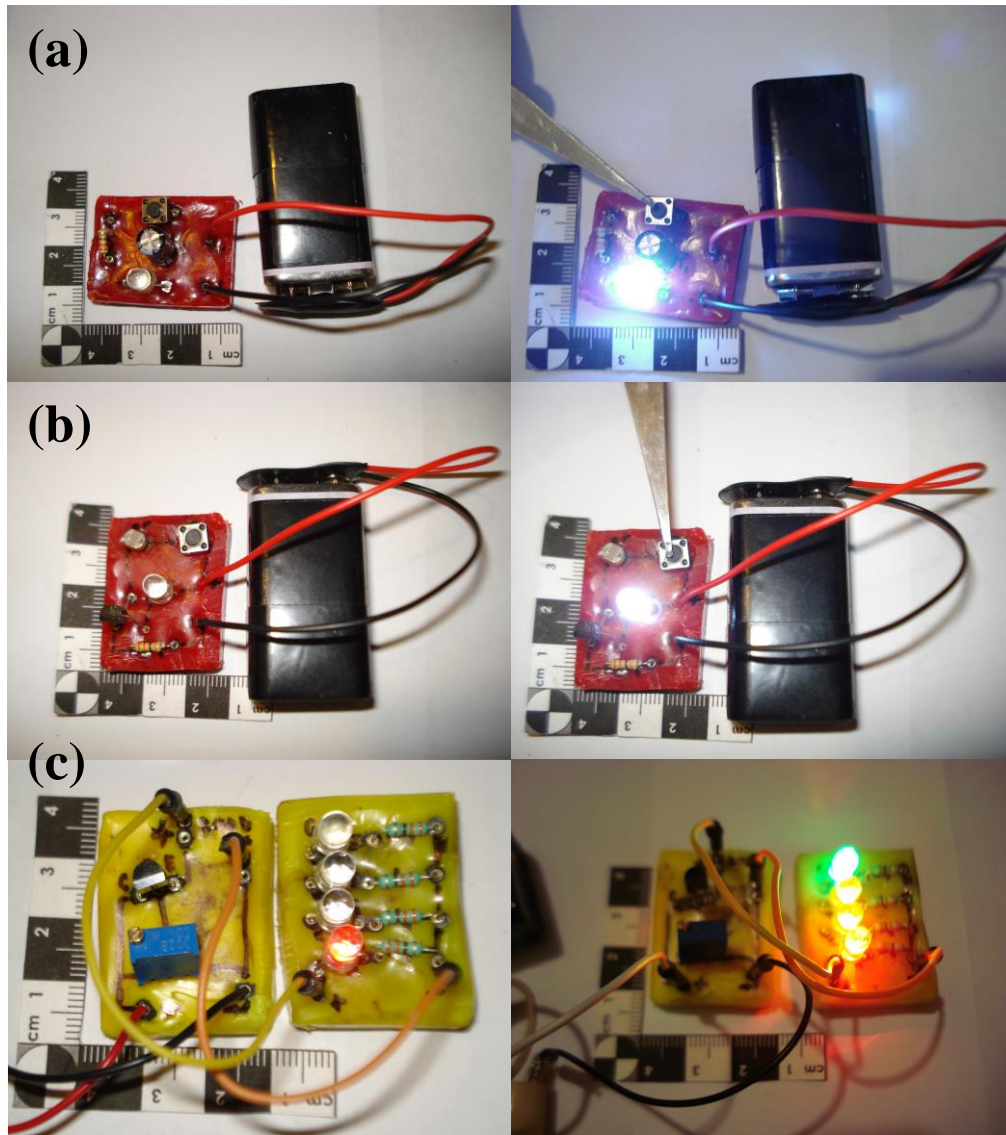


Figura 55. Otros circuitos obtenidos usando la misma técnica, se muestra cada uno con su prueba de funcionamiento. (a) Circuito con apagado retardado, (b) Circuito con transistor y LDR, (c) Control de voltaje para motores de DC y circuito que indica la potencia suministrada.

REFERENCIAS

- Anderson, S. D., & Thangavelautham, J. (2021). *Solar-Powered Additive Manufacturing in Extraterrestrial Environments*. Earth and Space 2021: Space Exploration, Utilization, Engineering, and Construction in Extreme Environments - Selected Papers from the 17th Biennial International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments, p. 732 – 744.
- Cañadilla Sánchez, A., Rodríguez Donoso G.P., Romero Gutiérrez, A., Caminero Torija, M.A. (2022). *Caracterización de componentes de cobre puro producidos mediante fabricación aditiva por filamento fundido (FFF)*, XVI CNMAT22, Libro de Abstracts (ISBN 978-84-09-38118-0), 2022 (página 113)
- Chao, W., Wei, Y., Guang, Z., & Xiaochen, L. (2021). *Lunar soil 3D printing device based on electrostatic collecting, transporting and powder feeding and condensation melting*. CN112643845
- Espalin, D., Muse, D. W., MacDonald, E., & Wicker, R. B. (2014). *3D Printing multifunctionality: structures with electronics*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 72, p. 963 – 978.
- Fang, X., Du, J., Wei, Z., Wang, X., He, P., Bai, H., Wang, B., Chen, J., Geng, R., & Lu, B. (2016). *Study on Metal Deposit in the Fused-coating Based Additive Manufacturing*. Procedia CIRP 55. P 115-121
- Guofu, Q., Rui, W. & Wei, Z. (2022). *Fused deposition additive manufacturing device and method for interstellar base construction*. CN114311220
- Guofu, Q., Rui, W. & Wei, Z. (2022). *Powder bed cladding additive manufacturing device and method for interstellar construction*. CN114474717
- Herring, J. (2018). *Composite Structure*. WO2018234801.
- Jimin, C. (2020). *Multi-color solar manual 3D printing device*. CN111823571
- Keran, C. (2016). *3D (Three dimensional) Printing pen*. CN205668394
- Mallikarjuna, B., Bhargav, P., Hiremath, S., Jayachristiyan, K. G., & Jayanth, N. (2023). *A review on the melt extrusion-based fused deposition modeling (FDM): background, materials, process parameters and military applications*. Int J Interact Des Manuf. <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01354-0>
- Maurisse, A., Makaya, A., Willsch, C., & Sperl, M. (2018). *Solar 3D printing of lunar regolith*. Acta Astronautica, Vol. 152, p. 800 – 810.

- Mewes, D., & Sujessy, L. (2019). *The application of a Solar Parabolic Trough Collector for the melting of Plastic Waste*. In: Alalouch, C., Abdalla, H., Bozonnet, E., Elvin, G., Carracedo, O. (eds) *Advanced Studies in Energy Efficiency and Built Environment for Developing Countries*. *Advances in Science, Technology & Innovation*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10856-4_17
- Mohammed, M., Wilson, D., Gomez-Kerin, E., Vidler, C., Rosson, L., & Long., J. (2020). *The recycling of E-Waste ABS plastics by melt extrusion and 3D printing using solar powered devices as a transformative tool for humanitarian aid*. *Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual international Solid Freeform Fabrication Symposium- An Additive Manufacturing Conference*. https://core.ac.uk/display/327067488?utm_source=pdf&utm_medium=banner&utm_campaign=pdf-decoration-v1
- Nägele, H., Pfitzer J., Lehnberger, C., Landeck, H., Birkner, K., Viebahn, U., Scheel, W., Schmidt, R., Hagelüken, M., & Müller, J. (2005). *Renewable resources for use in printed circuit boards*, *Circuit World*, Vol. 31 Issue: 2, pp. 26 - 29. 2019, June 22, from Emerald Insight Database.
- Nassajfar, M. N., Deviatkin, I., Leminen, V., & Horttanainen, M. (2021). *Alternative Materials for Printed Circuit Board Production: An Environmental Perspective*. *Sustainability*, Vol. 13, 12126. <https://doi.org/10.3390/su132112126>
- Ortega, Z., Alemán, M. E., Benítez, A. N., & Monzón, M. D. (2016). *Theoretical-experimental evaluation of different biomaterials for parts obtaining by fused deposition modeling*. *Measurement*, Vol. 89, p. 137-144. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.03.061>
- Pop, M. A., Croitoru, C., Bedo, T., Geaman, V., Rdamor, I., Crisan, A., Guillot, E., Milosan, I., Zaharia, S. M., Chicos, L. A. (2022) *The influence of Solar Sintering on Copper Heat Exchanger Parts with Controlled 3d-Printed Morphology*. *Materials*, Vol. 15, 3324. <https://doi.org/10.3390/ma15093324>
- Puentes Tapia, M. C., (2020). *Propiedades, métodos de síntesis y aplicaciones de la poli(ϵ -caprolactona)*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias. Colombia.
- Prado, L., García de la Camacha, A., Cañadilla Sánchez A., Romero Gutiérrez A, Rodríguez Donoso, G. P., Caminero Torija, M.A. (2022) *Procesamiento de piezas de acero de herramientas mediante impresión con filamento fundido y sinterización solar*, XVI CNMAT22, Libro de Abstracts (ISBN 978-84-09-38118-0), 2022 (p. 153)
- Rashid, A. A.; Koç, M. (2021). *Fused Filament Fabrication Process: A Review of Numerical Simulation Techniques*. *Polymers*, 13, 3534. <https://doi.org/10.3390/polym13203534>
- Ramanath, H. S., Chua, C. k., Leong, K. F., & Shah, K. D. (2008). *Melt flow behaviour of poly- ϵ -caprolactone in fused deposition modelling*. *J Mater Sci: Mater Med*, 19, p. 2541 – 2550. DOI 10.1007/s10856-007-3203-6

- Shenggui, C., Nan, L., Xindian, K., Wei, W., Bingheng, L. (2017). *Under formula pottery photocuring 3D printer that exposes to sun*. CN206703230
- Sakalys, R., Mohammadlou, B. S., & Raghavendra, R. (2022). *Fabrication of multi-material electronic components applying non-contact printing technologies: A review*. Results in Engineering, Vol. 15, 100578. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100578>
- Wong JY. (2015). *Ultra-portable solar-powered 3D printers for onsite manufacturing of medical resources*. Aerosp Med Hum Perform. 86(9): 830 – 834.
- Xiaohuai, M. (2018). *Solar Energy polychrome 3D print pen*. CN208068892
- YanJun, Z., & Yuran, G. (2017). *Portable 3D printing device*. CN206484897
- Zhenya, Y., Yan, L., & Wenming, Z. (2019) *3D Printing pen convenient to charge*. CN208855052