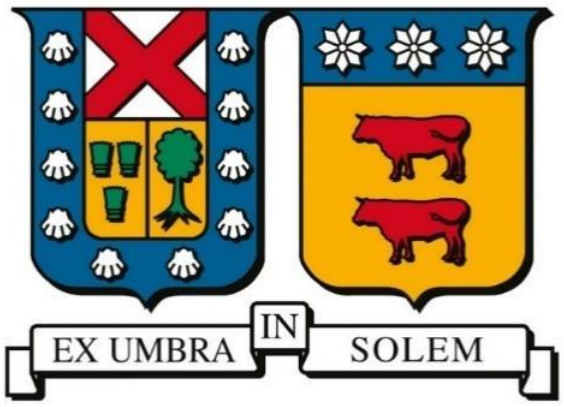
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

EN CONJUNTO A LA UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL DE LA UTFSM
Y DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO.





‘‘Puesta en marcha de serigrafiadora para construir celdas solares de perovskita con estructura de apilamiento triple mesoporoso y análisis de uso industrial”

Memoria de Titulación presentada por

RODRIGO ANDRÉS WITTWER SALINAS

Como requisito para optar al título de

INGENIERO CIVIL QUÍMICO

Profesor Guía: Daniel Ramírez Livingston

Profesor Correferente (Co-tutor): Dr. Daniel Ramírez Ruiz

Junio del 2023

Agradecimientos

Quiero hacer esta sección para expresar el profundo agradecimiento que siento por las personas que me han ayudado a salir adelante durante este largo proceso académico. Quiero agradecer a mi madre Eliana Salinas por ser un pilar fundamental en mi vida, como consejo y apoyo perpetuo en cada momento difícil, como una voz de paz y esperanza. A mi hermano Omar Wittwer, quien me ha guiado con su criterio y consejos para afrontar cada etapa de la vida tal como es, bajo una nueva perspectiva. A mis profesores Daniel Ramírez Livingstone y Daniel Ramírez Ruiz, quienes han tenido la paciencia para enseñarme durante todo este proceso y compartir su experiencia conmigo. A Patricia Díaz, Martín Faúndez y Renán Escalante por el constante apoyo y los consejos que me dieron tranquilidad y me ayudaron a tomar decisión durante el extenso trabajo que significó esta memoria de titulación. A mi familia, amigos y compañeros que se han hecho presente de muchas formas a lo largo de mi carrera para darme ánimos, regocijo y recordarme que disfrutar esta vida es más simple de lo que parece, que sólo depende de nuestra actitud y punto de vista. También quiero agradecer a mi padre, Alejandro Wittwer, quien me dio todo lo que tuvo en su poder para que pudiese salir adelante y convertirme en un gran profesional. Sé que ahora le llenaría de orgullo ver que cumplo la promesa que le hice antes de despedirnos por última vez. Los momentos que vivimos juntos jamás se borrarán de mi memoria, ni todo el sacrificio hecho, ni las palabras de sabiduría, ni los malos momentos ni mucho menos los bueno Sólo puedo sentir un enorme y profundo agradecimiento. Con el presente escrito culmina un largo período académico con el cual, además, cumplo la promesa hecha directamente a mi padre y a toda mi familia; sacar adelante mis estudios, convirtiéndome en una persona profesional que además es capaz de ayudar a forjar una sociedad mejor para la siguientes generaciones. Muchas gracias a todos ustedes.

También agradezco al proyecto FONDECYT/ANID N° 1200974 titulado: “ELECTROCHEMICALLY ASSISTED GROWN ELECTRON TRANSPORTING LAYERS, FULLY INORGANIC PEROVSKITE LAYERS AND HOLE TRANSPORTING LAYERS: ASSESSMENT OF PHOTOVOLTAIC AND PHOTOELECTROCHEMICAL PROPERTIES IN AQUEOUS ENVIRONMENTS”.

Resumen

En este trabajo se realizó un experimento de construcción de celdas de perovskita con estructura de apilamiento triple mesoporoso (m-CPSC), con el fin de poner en marcha un equipo de serigrafía semiautomático marca ATMA, modelo AT-25PA. Se utilizó como modelo base el dispositivo construido por un grupo de investigadores de la Universidad de Swansea, utilizando como perovskita el $CsPbBr_3$. Se determinaron los parámetros de operación, se probaron distintas condiciones de construcción de celdas y se hizo análisis de los resultados mediante técnicas de medición por difractometría de Rayos X (XRD y GIXRD), microscopía de barrido electrónico (FE-SEM) y la medición de parámetros fotovoltaicos por medio de curvas j-V (densidad de corriente – voltaje).

La celda fotovoltaica campeona de este trabajo resultó tener una eficiencia de conversión (PCE) de 2,55%, un fill factor (FF) de 0,51, un voltaje de circuito abierto (V_{OC}) de 1,25 [V] y una densidad de corriente (j_{SC}) igual a 3,99 [mA cm^{-2}], lo cual está por debajo de los parámetros fotovoltaicos utilizados de base; PCE de 8,19%, FF de 73,5, V_{OC} de 1,44 [V] y j_{SC} de 7,75 [mA cm^{-2}]. Los grosores de las capas analizadas por la técnica FE-SEM fueron levemente más altos que los presentados en la literatura, siendo los más cercanos los de la celda campeona. Además, el recuento atómico de Cs, Pb y Br de la muestra campeona es el único que cumple estequiométricamente con la perovskita infiltrada, razón 1:1:3. Se reporta también la detección de tres tipos posibles de estructura cristalina de la perovskita infiltrada, dos de tipo ortorrómbica y una de tipo tetragonal. Como complemento, las condiciones estándar de operación alcanzadas tras el ajuste del equipo de serigrafía fueron las que obtuvieron los mejores resultados, incluyendo a la celda campeona, comprobando la finalización de la puesta en marcha y la validación del protocolo generado para la utilización del equipo en la construcción de m-CPSC.

Adicionalmente se desarrolló una propuesta de producción a escala de laboratorio e industrial del proceso de serigrafía y recocido, alcanzando una productividad de 56 unidades por día y 40.320 unidades por día, respectivamente. Se calcularon los costos por celda de cada propuesta por medio de balances de masa y energía, llegando a una inversión de capital de 18.345 [USD], para la escala de laboratorio, y 146.619 [USD], para la escala industrial. Además, los costos fijos de la escala de laboratorio ascienden a 32.166 [USD/año], mientras que ascienden a

9.547.349 [USD/año] en la escala industrial, principalmente debido al costo de los sustratos, que forman un 91% de los costos totales de esta propuesta. Finalmente se calcula el costo por watt asociado a la construcción de dispositivos en ambas escalas, obteniendo un total de 41,3 y 100,1 [USD/W] en la propuesta industrial y de laboratorio, respectivamente. Estos valores superan con creces los 0,30-0,31 [USD/W] que cuestan los paneles de silicio monocristalino que predominan en el mercado nacional de generación eléctrica, por lo que se determina que el proceso propuesto no es capaz de escalar competitivamente la operación de serigrafía – recocido para la producción del tipo de m-CPCS seleccionado.

Índice

Agradecimientos 3

Resumen.....5

Índice.....7

Índice de Figuras.....9

Índice de Tablas 15

1 Antecedentes 18

1.1 Contexto Energético y Medioambiental.....18

1.1.1 Desarrollo Histórico del Sector Energético y Proyecciones.....18

1.1.2 Cambio Climático, Consecuencias y Riesgos. 22

1.1.3 Medidas Aplicadas para Combatir el Cambio Climático 27

1.2 Estrategias de Mitigación 29

1.2.1 Estrategias de Mitigación Convencionales.....30

1.2.2 Estrategias de Emisión Negativa 33

1.2.3 Estrategias de Geoingeniería de Forzamiento Radiactivo. 40

1.3 Tecnologías de Energía Solar.....41

1.4 Celdas Fotovoltaicas 43

1.4.1 Tipos de Celdas Fotovoltaicas 44

1.4.2 Celdas Fotovoltaicas de Perovskita (PSC) 49

1.5 Técnicas de Deposición de Capas Delgadas e Infiltración de Perovskita.....55

2 Definición del Problema y Objetivos.....58

3 Fundamentos Teóricos 60

3.1 Efecto Fotovoltaico y Band Gap. 60

3.2 Parámetros Fotovoltaicos 64

3.3 Técnicas de Medición.....65
4 Metodología Experimental.....68
4.1 Materiales y Procedimiento.....68
4.1.1 Prefase Experimental. 68
4.1.1 Fase Experimental con Serigrafiadora Puesta en Marcha.....76
4.2 Protocolo de Serigrafía.....85
4.2.1 RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD. 88
4.2.2 MATERIALES, ACCESORIOS Y UTENSILIOS. 90
4.2.3 PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN.....101
4.2.4 PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN.....120
4.2.5 PROCEDIMIENTO DE RECUPERACIÓN Y LIMPIEZA 122
4.2.6 DESACTIVACIÓN DEL EQUIPO.....125
4.2.7 SECCIÓN DE PASTA DE TITANIA.....127
4.2.8 SECCIÓN DE PASTA DE CIRCONIA.....128
4.2.9 SECCIÓN DE PASTA DE CARBONO.....131
4.3 Resultados y Discusión. 134
5 Aplicación Industrial.....159
5.1 Mercado de celdas solares.....159
5.2 Propuesta Industrial.....164
5.2.1 Propuesta Productiva a Escala de Laboratorio.....164
5.2.2 Propuesta Productiva a Escala Industrial 170
5.3 Balances de Masa y Energía.....174
5.4 Costos de las Propuestas 181
6 Conclusiones.....189

7 REFERENCIAS.....191

ANEXOS 204

ANEXO A: Ficha Técnica de las Mallas para Bastidores. 204

Índice de Figuras

Figura 1. Crecimiento Histórico del uso de Fuentes de Energía entre los años 1800 y 2000. Elaborado en base a [3].....19

Figura 2. Aporte Porcentual del total de las Distintas Fuentes Primarias de Energía disponibles en el año 2000. Elaborado en base a [3]. 20

Figura 3. Cambio de Temperatura Promedio del Planeta en los Últimos 40 años. Obtenido de [12].....24

Figura 4. Evolución de la Emisión Global de GHGs en [$GtCO_2eq$] del Sector Energético. Obtenido de [17]. 26

Figura 5. Participación Porcentual de Energías Renovables en la Potencia Global Generada por Año. Modificado desde [23]. 31

Figura 6. Tipos de Tecnologías Solares y Aplicación Tecnológica. Elaborado en base a [26]42

Figura 7. Resultados de PCE de Distintas Tecnologías Fotovoltaicas a Nivel de Laboratorio desde 1976 al Presente. Obtenido de [33].....45

Figura 8. Estructura Cristalina General de las Perovskitas. (a) Forma Atómica de la Estructura (b) Forma en Redes Cristalinas de la Estructura. Obtenido de [45] 49

Figura 9. Tipos de Perovskitas de Haluros Metálicos. (a) Estructura Estándar (b) Estructura Inversa (c) Estructura con Deformidad de Ángulo de Redes Cristalinas (d) Estructura de Vacante de Catión (e) Estructura con Distintos Cationes y Estado de Oxidación (f) Estructura de Distintos Cationes con Vacante de Catión. Obtenido de [45].....50

Figura 10. Esquema Estructural de una m-CPSC. Corte Transversal y mirada Interna del dispositivo. Obtenido y Modificado de [44]. 52

Figura 11. Esquema de Impresión por Serigrafía (a) Sustrato Plano Rígido (b) Sustrato Flexible. Obtenido de [53]. 57

Figura 12. Gráfico de Intensidad de Radiación en función de la Longitud de Onda de la luz incidente en la tierra. Obtenido de [56] 61

Figura 13. Esquemas de Bandas Prohibidas. (a) Estructura de bandas para un material semiconductor, obtenido de [57] (b) Estructura de bandas para un material conductor, semiconductor y aislante. 62

Figura 14. Diagramas de Bandas de m-CPSCs. (a) Se utiliza NiO como aislante entre el electrodo de carbono y la capa mesoporosa de titania. En esta figura se muestra cómo los pares electrón-hueco fluyen hacia direcciones distintas. (b) Se utiliza ZrO2 como aislante y se compara entre perovskita $MAPbI_3$ y $FAPbI_3$. Obtenido de [31], [42].....63

Figura 15. Curva de Densidad de Corriente - Voltaje (j-V). Obtenido de [58] 65

Figura 16. Estructura y Medidas de las Capas Serigrafiadas y del Sustrato. (a) Medidas del Sustrato de FTO Desnudo (b) Medidas de la Capa de Titania (c) Medidas de la Capa de Circonia (d) Medidas de la Capa de Carbono (e) Estructura Completa con Surco en Rojo.....70

Figura 17. Diseño de Impresión en Bastidores y Fotolitos. (a) Corresponde al diseño de impresión de pasta de Titania (b) Pasta de Circonia (c) Pasta de Carbono y (d) Diseño Triple Stack sobre una celda con surco, marcado con una línea roja. 70

Figura 18. Parámetros de Caracterización de una Malla para Bastidor. (a) Abertura de la Malla (b) Número de Hilos (c) Superficie Libre o Abierta (d) Diámetro Nominal del Hilo (e) Volumen Teórico de Tinta (f) Espesor de la Tela (g) Tipo de Ligamento de la Tela. Modificado de Anexo 4.....72

Figura 19. Muestras Preparadas en la Prefase Experimental. (a) y (d) Presentan el antes y el después de la puesta en marcha del equipo para la película de titania. (b) y (e) Compara la película de circonia. (c) y (f) Compara la película de Carbono. 75

Figura 20. Diagrama de Proceso del Método Experimental. 77

Figura 21. (a) Inscripción del número de serie sobre el surco en la muestra trabajada. (b) Imagen de una celda solar terminada y lista para su medición. 79

Figura 22. Montaje en Cámara Oscura para la Medición de Resultados. 84

Figura 23. Serigrafiadora Semi – Automática AT-25PA.....87

Figura 24. Mufla Nabertherm Modelo L(T) 24/11. 90

Figura 25. Configuración de Corte de la Hoja de Acetato.....101

Figura 26. Hoja de Acetato pegada al Bastidor. 102

Figura 27. (a) Fotolito con trozos gruesos de masking sin pegar al bastidor. (b) Fotolito pegado al bastidor con trozos delgados de masking en las esquinas.....103

Figura 28. (a) Soplido de la pistola sobre la base gris de trabajo. (b) Soplido de la pistola en el cabezal de impresión.....104

Figura 29.(a) Sujeción del Bastidor desde el Marco de Aluminio. (b) Bastidor montado en el Cabezal de impresión. 104

Figura 30. (a) Giro del tornillo de la Barra Negra de ajuste angular con Llave Allen. (b) Giro del Seguro y del Tornillo de Graduación del squeegee y la barredora. 106

Figura 31. (a) Enchufe de Circuito N°9. (b) Giro de Apertura de la Válvula de Globo del Compresor.....107

Figura 32. (a) Apertura de Válvula de Alimentación de Aire (azul) y Válvula de Regulación (negra) con manómetro. (b) Giro del Switch de Poder Principal y Lugar de Conexión del Pedal. 108

Figura 33. (a) Botón de Auto-calibración de la Serigrafiadora. (b) Panel en Menú Principal. 108

Figura 34. Selección del Modo Manual. 109

Figura 35. Utilización del Modo Manual. (a) Subir y Bajar el Bastidor, (b) Mover el Cabezal Hacia Izquierda y Derecha, (c) Bajar/Subir Barredora y Squeegee, (d) Fijar Posición de Impresión. 110

Figura 36. Fotolito Pegado a la base gris de trabajo. 110

Figura 37. (a) Montaje del Squeegee. (b) Montaje de la Barredora. 111

Figura 38. (a) Porta-muestras descubierto y en uso. (b) Porta-muestras protegido por techo protector de aluminio. 112

Figura 39. Manipulación Correcta del Sustrato. 112

Figura 40. (a) Primer paso de Pegado de los Vidrios del Escantillón. (b) Segundo paso de Pegado de los Vidrios del Escantillón. 114

Figura 41. Variables de Ajuste de Movimiento dentro del modo de Ajuste de Posición. 115

Figura 42. Manómetro del Cabezal cuando el Squeegee se encuentra abajo. 116

Figura 43. Procedimiento de los pasos 26 y 27. (a) Barredora abajo. (b) Squeegee abajo. (c) Cabezal en el lado izquierdo y ambas piezas abajo. (d) Piezas levantadas y visualización de las marcas. (e) Esparcimiento de la Pasta con Espátula. 117

Figura 44. (a) Modo de Función de Impresión. (b) Modo de Función: Esparcimiento ante de Imprimir. 118

Figura 45. (a) Botón de Modo Semiautomático. (b) Botón de Activación del Modo Semiautomático.....119

Figura 46. Modo Semiautomático Pausado. 121

Figura 47. (a) Recuperación de Pasta en Accesorios. (b) Devolución de la Pasta al Frasco. .122

Figura 48. Posición de Recuperación del Bastidor. 123

Figura 49. Bastidor sobre Contenedor Plástico para la limpieza. 123

Figura 50. Función de Trabajo con Pasta de Circonia. 129

Figura 51. (a) Posicionamiento de la Cinta 3M para retener la muestra. (b) Posicionamiento de la Cinta 3M para retirar la muestra. 130

Figura 52. (a) Recorte del grosor de la cinta masking para barredora. (b) Forma de pegado con la punta descubierta de la barredora.....131

Figura 53. Curvas j-V de los resultados obtenidos. (a) Curva j-V de Muestra Campeona C-10. (b) Curva j-V de las 10 Mejores Muestras. 135

Figura 54. Curva j-V de la Celda presentada por la Baker et al. De la Universidad de Swansea. Obtenido de [1]. 136

Figura 55. Imágenes a color obtenidas de la técnica FE-SEM para caracterizar elementos presentes en la estructura. (a) Mapa de todos los elementos detectados por el microscopio. (b) Mapa Individual del Carbono, (c) Oxígeno (d) Titanio (e) Bromo (f) Circonio (g) Estaño...139

Figura 56. Continuación de los Resultados del FE-SEM. (h) Cesio (i) Plomo. 140

Figura 57. Espesor de las Tres Capas Mesoporosas, la Capa Compacta de Titania y FTO. (a) F-8 (b) I-8 (c) H-8.....142

Figura 58. Grosor de Capas de Arquitectura de m-CPSCs e Imágenes SEM disponibles en Literatura. (a) Estructura y Grosores Estándar de m-CPSCs. (b) y (c) Imágenes SEM de Arquitecturas Similares de Capas Delgadas depositadas por Serigrafía. Modificado de [42], [49] 143

Figura 59. Perfil de Señales Teóricas del Equipo ante Materiales de Construcción de m-CPSCs. (a) Corresponde a FTO. (b) Carbono (c) Circonia Baddeleyita (d) Titania Anatasa (e) Perovskita Tetragonal tipo 2 (f) Perovskita Tetragonal tipo 1 (g) Perovskita Ortorrómbica tipo 2. Elaborado en base a la información de laboratorio externo, Uruguay. 145

Figura 60. Difractogramas Asignados hasta el Proceso de Serigrafía. (a): FTO, (b): (a) + c-TiO2, (c): (b) + m-TiO2, (d): (c) + m-ZrO2, (e): (d) + C. 147

Figura 61. Difractogramas Asignados en Muestras Infiltradas. (a) Perovskita infiltrada en muestra H – 6 (b) I – 6 (c) B – 7 (d) D – 7 (e) G – 7. 150

Figura 62. Difractogramas de Materiales Encontrados en Literatura, Titania Anatasa. (a) En rojo el patrón de titania anatasa, en negro y azul resultados de difractogramas (b): Resultados de difractograma de titania anatasa. Obtenido de [63], [64].....153

Figura 63. Difractogramas de Materiales Encontrados en Literatura (c) Carbono (d) FTO. Obtenidos de [64], [65].....154

Figura 64. Difractogramas de Materiales Encontrados en Literatura, Circonia Baddeleyita. (e) Resultado Empírico de Distintas combinaciones de Circonia (f) Patrón de Baddeleyita. Obtenido de [66], [67].....155

Figura 65. Difractogramas de Materiales Encontrados en Literatura, Perovskita $CsPbBr_3$. (g) Ortorrómbica bajo distintos medios de síntesis y patrón. (h) Ortorrómbica con y sin capa de ZnSe (i) Cúbica por Puntos Cuánticos. Obtenido de [52], [68], [69] 156

Figura 66. Comparación de Patrones de FTO y Titania Anatasa con Resultados de Difractogramas.....157

Figura 67. Cantidad de Proyectos Registrados por Sector en el SEA hasta Marzo del 2023. Obtenido de [88] 162

Figura 68. Diagrama de Proceso de Producción en Escala de Laboratorio. 165

Figura 69. Flujo de Caja de los Costos de Inversión Industriales y VAC. 188

Índice de Tablas

Tabla 1. Tabla de Suministro Energético Histórico y Proyectado según STEPS. Obtenido de [6] 21

Tabla 2. Descripción del Código de Mallas Utilizadas en los Bastidores. 71

Tabla 3. Tabla de Condiciones de Operación de la Serigrafiadora semiautomática, antes y después de la puesta en marcha. 74

Tabla 4. Tabla de Materiales e Instrumentos del procedimiento experimental. 77

Tabla 5. Tabla de Equipos Utilizados en el Procedimiento Experimental. 78

Tabla 6. Tabla de Muestras Enviadas a Análisis por Técnica XRD y FE-SEM.....85

Tabla 7. Tabla de Materiales de Serigrafía. 91

Tabla 8. Tabla de Accesorios de Serigrafía. 95

Tabla 9. Tabla de Utensilios de Serigrafía.....98

Tabla 10. Mejores Resultados Obtenidos en la Medición de Curvas j-V.....134

Tabla 11. Resultados y Condiciones de Construcción de la Serie 8.....137

Tabla 12. Resultados y Condiciones de Construcción de la Serie 9.....137

Tabla 13. Resultados y Condiciones de Construcción de la Serie 10.....137

Tabla 14. Composición de la Variedad Atómica encontrada en las Muestras. (a) F-8 (b) I-8 (c) H-8. 141

Tabla 15. Tabla de Compuestos Químicos Asignados en Análisis XRD. 144

Tabla 16. Capacidad Productiva de Empresas pertenecientes a la SMSL en 2021 y Predicción a Corto Plazo. Elaborada en base a [75]–[84].....161

Tabla 17. Proyectos de Generación Fotovoltaica de las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo. Obtenido de [89]–[108].....163

Tabla 18. Tabla de Productividad de Operaciones y Equipos en la Producción a Escala de Laboratorio.....166

Tabla 19. Planificación de Trabajo Semanal del Proceso Productivo en Escala de Laboratorio. 167

Tabla 20. Propiedades del Equipo de Recocido Industrial. 171

Tabla 21. Dimensiones Efectivas de Trabajo del Horno Continuo y Capacidad Calculada...172

Tabla 22. Volumen de Producción a Distintas Horas de Trabajo de la Configuración 1 y Configuración 2. 173

Tabla 23. Lista de Insumos de Limpieza y Consumo de Pasta (g_i) en Serigrafía.....174

Tabla 24. Consumo Total de Materias Primas y Potencia Eléctrica.....180

Tabla 25. Costos de Inversión de Equipos Requeridos por cada Propuesta. 181

Tabla 26. Costos de Implementos por cada Propuesta. 182

Tabla 27. Costos de Insumos por cada Propuesta.....183

Tabla 28. Costos de Materias Primas por cada Propuesta. 184

Tabla 29. Costos de Consumo Eléctrico y Mano de Obra por cada Propuesta. 185

Tabla 30. Total de Inversión Requerida por cada Propuesta. 185

Tabla 31. Costo [USD/W] para el Proceso de Serigrafía - Recocido por cada Propuesta.....186

Tabla 32. Depreciación de los Equipos Industriales.....187

Introducción

A través de su existencia, el ser humano ha desarrollado distintas herramientas y tecnologías para ejecutar sus labores diarias. Dentro de las escalas más notables en su historia, se encuentra el desarrollo del período industrial, marcado por la primera revolución industrial. Desde este momento hasta la actualidad, el desarrollo tecnológico e industrial de la humanidad ha sido explosivo, conllevando a alzas nunca vistas del requerimiento de suministro energético.

Las principales fuentes de energía que han sustentado este enorme desarrollo han sido, por casi 200 años, las fuentes primarias de energía, como el carbón, la biomasa, el petróleo y el gas natural, siendo el tipo de energías más eficientes en cumplir con esta labor. Sin embargo, existen grandes inconvenientes con el uso excesivo de las fuentes primarias, debido a que la combustión genera contaminantes medioambientales que amenazan el equilibrio del planeta y ha traído actualmente consecuencias preocupantes para la salud de la gran mayoría de las especies que lo habitan, incluyendo al ser humano. Se ha declarado un estado de crisis climática que ha llevado a las naciones de todo el mundo a crear instituciones y participar continuamente en convenciones, foros, acuerdos, protocolos y muchas más estrategias para desacelerar el calentamiento global y el cambio climático, mitigando los efectos negativos que provocan.

Dentro de las varias estrategias de mitigación del cambio climático se encuentra el uso de energías renovables, estrategia que ha sido vastamente estudiada y aplicada en el mundo industrial para reemplazar el uso de fuentes primarias de energía. La energía solar es la más abundante del mundo y existe toda una historia del desarrollo tecnológico para poder utilizarla, principalmente como fuente de energía eléctrica. La tecnología fotovoltaica es la que más resalta en este desarrollo, siendo la más utilizada a nivel mundial. Sin embargo, las tecnologías predominantes en la industria fotovoltaica corresponden a las celdas de silicio, cuyo proceso tiene serios perjuicios para el medioambiente. En vista de esto, se han buscado nuevos materiales y dado a luz nuevas generaciones de tecnología fotovoltaica, destacándose el uso de las perovskitas en la construcción de dispositivos, debido a su gran mejora en eficiencia dentro de un período corto de tiempo. Mientras este material presenta grandes posibilidades de desplazar al silicio en el mercado fotovoltaico, se sigue necesitando de mayores estudios para mejorar su rendimiento, razón que ha incentivado el desarrollo de este trabajo de titulación.

1 Antecedentes

El área de la tecnología de energía solar ha sido vastamente estudiada a lo largo del último siglo, alcanzando a tener hoy en día un impacto fundamental en la materia energética global. El desarrollo de esta tecnología no deja de ser interesante, incluso en estos días, pues ha permitido encontrar distintos métodos de abastecimiento de la demanda energética humana, mientras que aún continúan los descubrimientos para concretar este objetivo de manera más eficiente. La mejora en la eficiencia e innovación de las aplicaciones de la energía solar también apunta a ser una de las principales medidas de mitigación dentro de la problemática medioambiental, la cual está dentro de los principales focos de atención del ser humano en este siglo.

Para comprender el contenido y los conceptos que dan pie a este escrito, primero es necesario explicar el contexto en el cual se encuentra la humanidad hoy en día. A continuación, se presenta la evolución de la matriz energética de los últimos años, la evolución de la tecnología, los problemas que ha traído el desarrollo de la actividad industrial, la respuesta de entidades de carácter mundial, las estrategias de mitigación y las innovaciones en tecnología solar.

1.1 Contexto Energético y Medioambiental

1.1.1 Desarrollo Histórico del Sector Energético y Proyecciones

El ser humano ha requerido una fuente de energía para ejecutar sus actividades desde los inicios de su historia. El comienzo de la Revolución Industrial, que abarcó desde mediados del siglo XVIII hasta mediados del siglo XIX, marcó una época de cambios trascendentales en la industria, la producción y el transporte. Fue un período caracterizado por el tránsito de métodos de producción manuales a mecanizados, impulsado principalmente por avances en maquinaria y la aplicación de energía proveniente del vapor. Esta transformación permitió un crecimiento exponencial en la producción y el consumo de bienes. Durante la Revolución Industrial, la demanda de energía experimentó un incremento considerable de fuentes primarias, especialmente al llegar a la segunda guerra mundial. [2]

Hacia el año 1800, el consumo en millones de toneladas equivalentes a petróleo (Mtoe) de carbón y biomasa alcanzó los 7 [Mtoe] y los 298 [Mtoe], respectivamente. Para el año 1870, el consumo de estas materias primas asciende a 131 [Mtoe] y 476 [Mtoe], respectivamente, mientras que se integra el consumo de petróleo con 1 [Mtoe]. Para el año 1890 se incluyó el consumo de gas natural, con un total de 5 [Mtoe]. En 1910 se llega a utilizar 1 [Mtoe] de energía eléctrica, lo que corresponde a menos del 0,1% del aporte a la energía consumida total de ese año. Hacia el año 2000, el consumo de carbón, petróleo, gas natural, electricidad y biomasa ascendió a 2116, 3542, 2026, 465 y 1096 [Mtoe], respectivamente. En la **Figura 1** se puede ver el crecimiento del total de energía utilizada a lo largo del período de dos siglos entre 1800 y 2000. El aporte de la energía eléctrica sólo alcanzó cerca del 5% del total en este último año, permitiendo reconocer la dominancia de los combustibles fósiles dentro del sector energético en la apertura del nuevo milenio. La **Figura 2** muestra el aporte de las distintas fuentes de energía para el año 2000. [3]

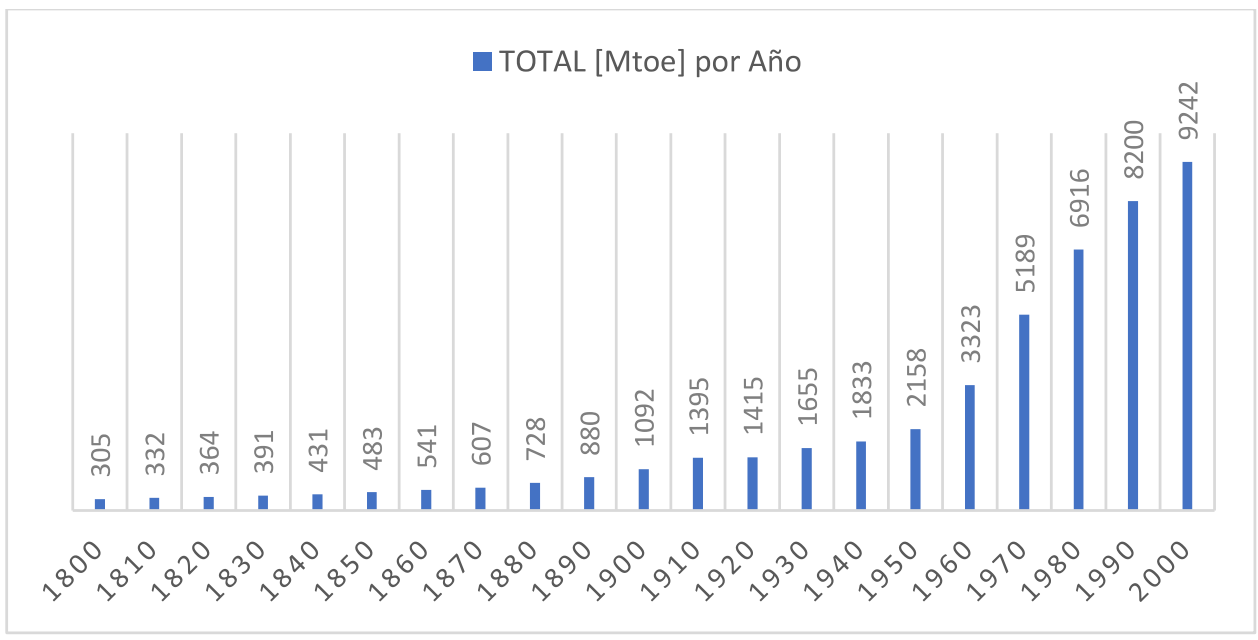


Figura 1. Crecimiento Histórico del uso de Fuentes de Energía entre los años 1800 y 2000. Elaborado en base a [3].

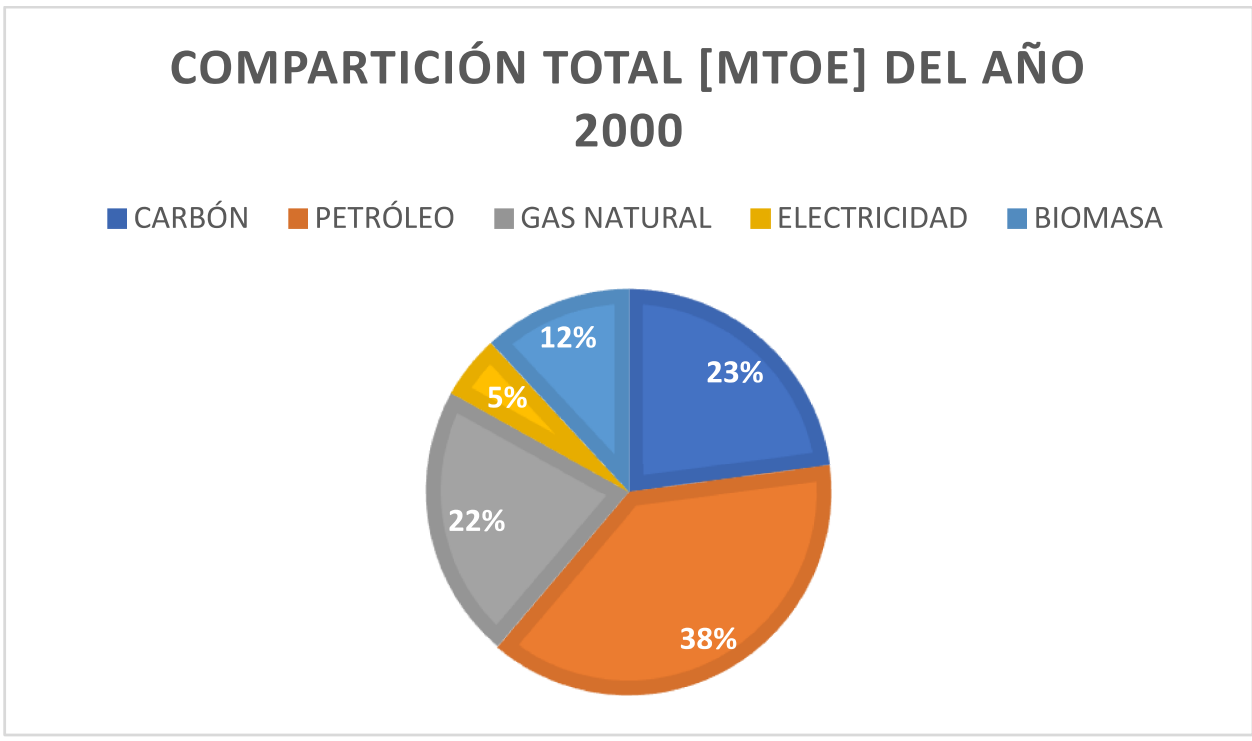


Figura 2. Aporte Porcentual del total de las Distintas Fuentes Primarias de Energía disponibles en el año 2000. Elaborado en base a [3].

La Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) es una organización internacional cuyo propósito es trabajar con las naciones y el sector industrial global para asegurar un futuro sostenible. Creada en 1974 para coordinar el suministro de petróleo entre las naciones, la IEA ha cambiado su rumbo para ayudar a dirigir y proyectar el desarrollo industrial en el mundo frente a al contexto energético y ambiental de las últimas décadas. En la actualidad está conformada por 31 naciones participantes, mientras que colaboran otras 9 naciones, agrupando gobiernos de gran relevancia en el tópico energético, como China, Estados Unidos, India, Japón y países varios de la unión europea, en donde destacan Alemania y Reino Unido. [4], [5] La principal función de esta organización es la recopilación de información del sector energético alrededor del mundo, el análisis de datos y la presentación de informes estadísticos y proyecciones a futuro. El último gran informe del sector energético emitido por la IEA es el World Energy Outlook 2022 (WEO 2022), el cual detalla toda la información relevante acerca del suministro y consumo de energía, junto su relación con otros sectores como el medioambiental, político y socioeconómico. [6] En la **Tabla 1** se presentan los aportes de las distintas fuentes de suministro energético en [EJ]. La tabla hace comparación entre lo reportado hasta el 2021 y lo proyectado hacia el 2050.

Tabla 1. Tabla de Suministro Energético Histórico y Proyectado según STEPS. Obtenido de [6]

Fuentes de Suministro Energético	Suministro Histórico [EJ]			Suministro STEPS [EJ]		
	2010	2020	2021	2030	2040	2050
Suministro Energético Total	542	592	624	673	708	740
Renovables	45	69	74	116	169	215
Uso Tradicional de Biomasa	25	24	24	20	19	18
Nuclear	30	29	30	37	43	46
Gas Natural	116	141	148	152	150	152
Petróleo	173	172	183	197	198	197
Carbón	153	157	165	151	129	112

Mientras que se espera que el suministro de energía siga aumentando en el futuro, acorde al crecimiento demográfico e industrial de las naciones, algunas fuentes primarias no siguen este patrón de crecimiento. Las energías renovables y el gas natural presentaron el mayor incremento entre el año 2010 y 2021, sin embargo, queda en claro que los combustibles fósiles, específicamente el gas natural, petróleo y carbón siguen siendo las más utilizadas, lo cual no cambia desde el año 2000. [3], [6] El escenario es distinto en el camino hacia el año 2050, en donde se espera un incremento de casi tres veces el suministro actual de energías renovables, mientras que los combustibles fósiles anteriormente nombrados estancan su crecimiento, a excepción del carbón, el cual disminuye.

Dentro del WEO 2022 se caracterizan tres principales proyecciones sobre la evolución del sector energético. La primera proyección corresponde al Escenario de Políticas Establecidas (STEPS, por sus siglas en inglés), el cual analiza el cambio futuro en función de las políticas actuales que tienen los gobiernos. La segunda proyección consta del análisis en base al supuesto de que todos los gobiernos alcanzarán las metas propuestas en sus agendas energéticas, es por esto por lo que se le llama Escenario de Promesas Anunciadas (APS, por sus siglas en inglés). La última proyección se basa en objetivo definido por las naciones de todo el mundo para enfrentar la crisis climática, el llamado Escenario de Cero Emisiones (NZE, por sus siglas en inglés). Este último escenario consta de reducir a 0 las emisiones de contaminantes generados por el uso de combustibles fósiles, estableciendo un acceso energético limpio en todo el mundo para el año 2050. [6], [7]

El escenario APS también es interesante, puesto que los supuestos están basados en compromisos concretos. Bajo este escenario, los suministros de energía alcanzados son

menores, en vista del supuesto esfuerzo que han adquirido las naciones para reducir las emisiones globales. Para el año 2030 se proyecta un suministro total de energía de 636 [EJ] aproximadamente, 37 [EJ] menos que en el STEPS. Para el 2050, esta diferencia es aún más drástica, ya que el suministro se proyecta por debajo del año 2030 en el APS, llegando a ser de 629 [EJ], 111 [EJ] menos que en el STEPS. [6]

Además, el escenario APS propone que en el año 2030 el aporte de energías renovables será de 141 [EJ], aproximadamente un 22% mayor que en el STEPS. El porcentaje de diferencia es aún mayor en el 2050, llegando a ser un 48% más grande con un total de 319 [EJ] de suministro. Al mismo tiempo, combustibles como el petróleo, el gas natural y el carbón reducen su suministro en un 44%, 39% y 58% para el año 2050, respectivamente. [6]

La realidad histórica y las proyecciones basadas en ella dejan en claro que, aunque los gobiernos de casi todo el mundo están tomando medidas activas en sus políticas e industrias para reducir la energía requerida y el uso de combustibles fósiles, aún en el escenario APS sigue existiendo un gran uso de estas fuentes primarias de energía.

1.1.2 Cambio Climático, Consecuencias y Riesgos.

Pese a que la evolución del consumo energético mundial ha crecido enormemente respecto al inicio en el año 1800, existe un gran problema con las fuentes primarias que han sustentado este crecimiento. El problema consiste en la utilización misma de la materia prima, los combustibles fósiles, los cuales liberan compuestos perjudiciales para el medioambiente llamados gases de efecto invernadero (GHG por sus siglas en inglés). [8] Los GHGs son capaces de atrapar el calor de la tierra dentro de la atmósfera, incrementando paulatinamente la temperatura de todo lo que está dentro de ella, como la corteza terrestre sobre la cual habita una gran cantidad de especies, como el ser humano. La prolongada actividad humana ha provocado grandes cambios en la concentración atmosférica de estos gases a través del desarrollo industrial.

Particularmente, los GHGs como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O) son los principales responsables de uno de los problemas más grandes que enfrenta la humanidad en el siglo XXI; el calentamiento global. [9] El calentamiento global es

un fenómeno de gran importancia debido a las consecuencias que puede traer, pero el verdadero foco del problema no es precisamente este, sino uno que depende directamente del ser humano; la aceleración del cambio climático. El cambio climático puede ser definido como el cambio significativo y progresivo del clima en el planeta, identificándose como una variación persistente y duradera que, usualmente, tiene décadas o más años de duración. Existen tres principales causas del cambio climático; el origen interno, proveniente de cambios naturales por los cuales pasa la tierra a través de ciclos; fuerzas externas, que son factores que afectan el clima, pero no son constantes ni propias del mismo clima, sino que más bien eventuales como una erupción volcánica; y finalmente, el origen antropogénico, debido a la actividad del ser humano en los suelos, bosques, océanos y otros sectores del medioambiente. [8]

Lo realmente alarmante sobre este proceso es el efecto que tiene sobre los distintos ecosistemas y seres vivos que mantienen el equilibrio del planeta como lo conocemos. Ecosistemas como bosques, herbazales, tundras, humedales, ríos, lagos y océanos corren peligro de sufrir cambios irreversibles, dentro de lo cual se incluye la misma atmósfera que los rodea. La evidencia de la rapidez con la que ha actuado el cambio climático ha sido reportada en alzas del nivel del mar, incremento de la temperatura global promedio, calentamiento y acidificación de los océanos, derretimiento de los glaciales marinos y de capas de glaciales terrestres. [8]–[11]

Sin embargo, esto es sólo el comienzo de los verdaderos inconvenientes para la vida en el planeta, pues estos cambios conllevan escenarios perjudiciales para la salud de animales, incluyendo a los humanos, por la baja calidad del aire, sequía, calidad deficiente de distintas fuentes de agua potable como ríos y lagos, escasez de alimentos por falta de recursos naturales, períodos de crecimiento y reproducción retardados por temporadas prolongadas, eutrofización de aguas y proliferación de microorganismos dañinos, cambios en la geomorfología fluvial por ciclos de lluvia interrumpidos, inundaciones y proliferación de enfermedades infecciosas. [8], [10], [11] Para el 2022, el cambio climático presenta un panorama sombrío del futuro de la vida en la Tierra, caracterizado por el colapso de los ecosistemas, la extinción de especies y peligros climáticos como olas de calor e inundaciones. [11] Una extensa literatura respalda los cambios provocados por el cambio climático y existe el consenso de contribuir para evitar que la temperatura del planeta incremente más de 1,5 [°C], desde su temperatura en el período preindustrial. La **Figura 3** evidencia el cambio de temperatura promedio de la Tierra a través

de las últimas décadas, evidenciando que los últimos años han sido los más calurosos desde el período pre-industrial, entre 1880 y 1900.[12]

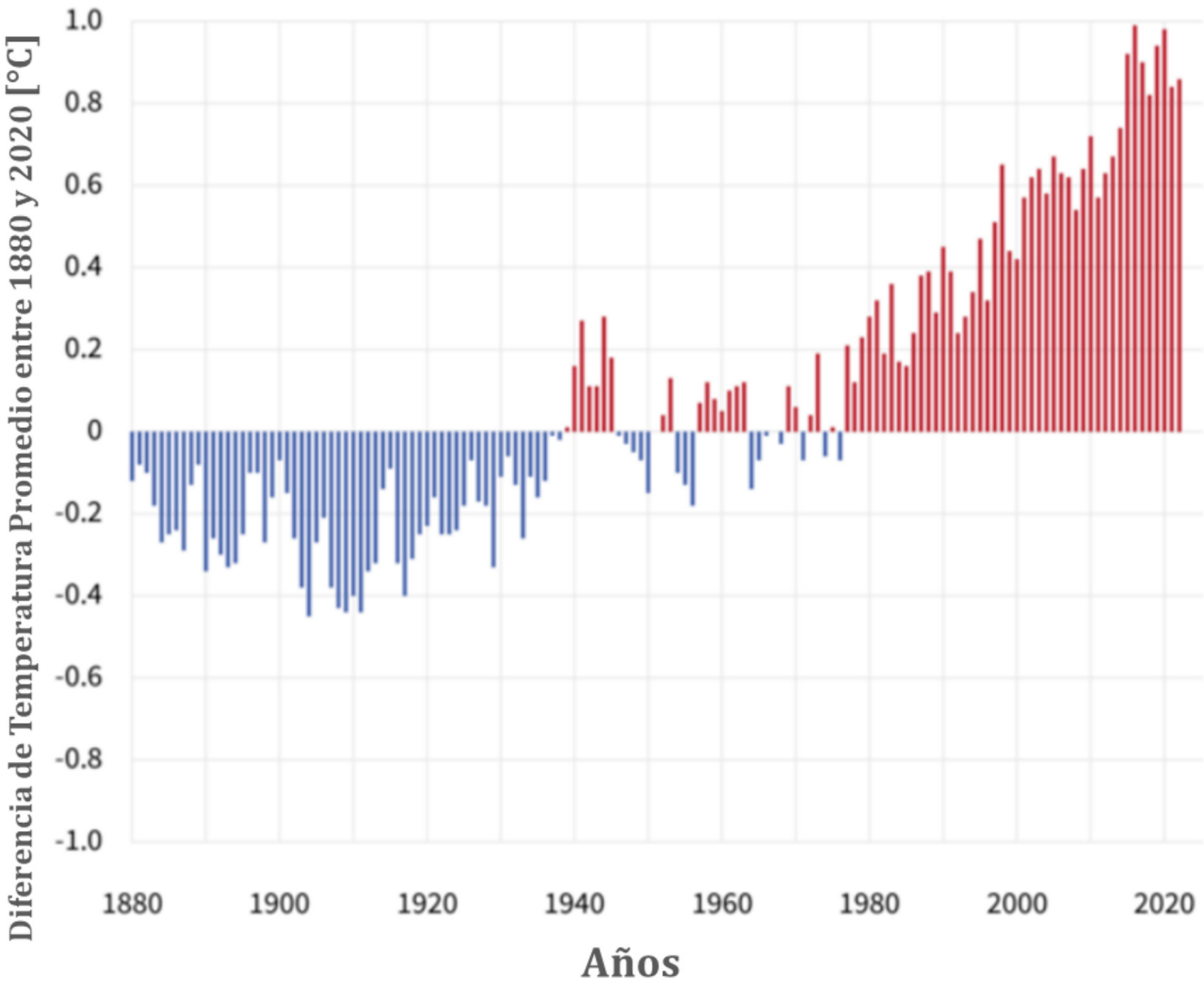


Figura 3. Cambio de Temperatura Promedio del Planeta en los Últimos 40 años. Obtenido de [12]

La acción antropogénica ha causado casi 1,0 [°C] de elevación en la temperatura. Cruzar la barrera de los 1,5 [°C] implicaría una agudización seria de los problemas anteriormente mencionados, teniendo que tomar decisiones drásticas para adaptarse al clima, sin embargo, la situación es aún más delicada si se continúa subiendo, puesto que los efectos podrían tener un crecimiento exponencial entre los 1,5 y 2,0 [°C]. Más aún, si se superan los 2 [°C], la situación del planeta por las duras condiciones climáticas sería inmanejable. [11]–[14]

Debido a esto, es imperativo tener control sobre las emisiones de contaminantes. El nivel de impacto de cada GHG es comparado mediante un índice de potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés), el cual permiten determinar cuantitativamente el efecto de cada gas en la atmósfera bajo una regla común para los distintos compuestos. Este índice funciona analógicamente con el índice de potencial de agotamiento del ozono (ODP por sus siglas en inglés). Para poder hacer una comparación directa entre los distintos GHGs y sus potenciales contaminantes, se utiliza como base el índice de contaminación del CO_2, por lo que se habla de un equivalente proporcional a la masa emitida de este compuesto o, en otras palabras, kilotoneladas de CO_2 equivalente ([kt $CO_{2\text{-eq}}$]). De esta manera, las emisiones globales totales pueden ser medida en términos de emisiones de CO_2. [8], [15]

En el año 2001 se reportó que, entre los años 1750 y 2000, hubo un incremento de un 31%, 151% y 17% en el nivel atmosférico de dióxido de carbono, gas metano y óxidos nitroso, respectivamente. [8] En el año 2015, los principales emisores de GHGs fueron China, Estados Unidos, la Unión Europea, India, Rusia y Japón, con una emisión final de 13.068, 6.444, 4.500, 3.347, 2.234 y 1.360 [Mt $CO_{2\text{-eq}}$], respectivamente. En el año 2019, la unión europea reportó un total de 4.065 [Mt $CO_{2\text{-eq}}$] emitidos, de los cuales un 77% corresponde al sector energético, un 11% a la agricultura y un 9% al sector industrial y sus productos derivados, mientras que el 3% restante corresponde a otras actividades, como la gestión de residuos. [16]

El reporte global de emisiones de CO_2 del año 2022 de la IEA trajo una serie de noticias relevantes respecto a la generación de GHGs relacionadas con la gestión de energía. La **Figura 4** muestra las emisiones del sector energético de distintas fuentes. Se reportó un total de 41,5 [Gt $CO_{2\text{-eq}}$] de emisiones generadas a finales del 2022, un punto récord en la historia. Se experimentó un aumento del 0,96%, cerca de 400 [Mt $CO_{2\text{-eq}}$], en las emisiones globales de CO2 con respecto al año 2021. Después de dos años de fluctuaciones en el consumo de energía y las emisiones generadas, debido en parte a la pandemia de Covid-19, las emisiones del año 2020 fueron en descenso, en comparación con el año 2021 y 2022, llegando a 38,6 [Gt $CO_{2\text{-eq}}$] emitidos. Las alzas volvieron a presentarse inmediatamente después, seguidas por la recuperación de la industria y el comercio global. [17]

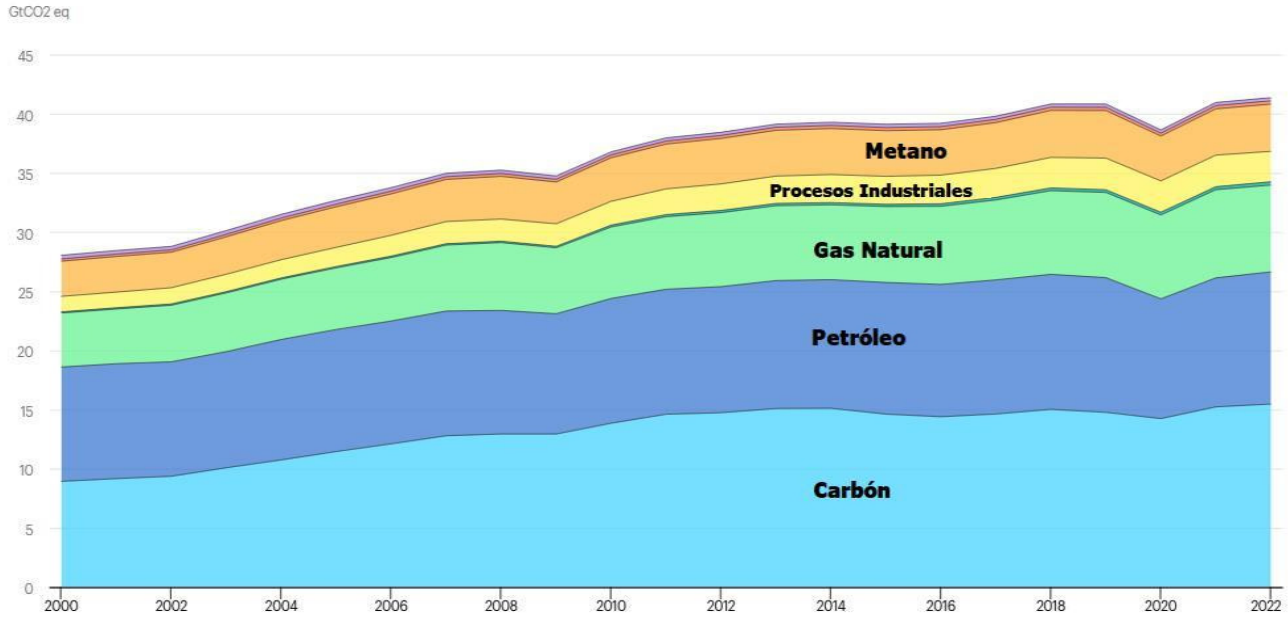


Figura 4. Evolución de la Emisión Global de GHGs en [$GtCO_2eq$] del Sector Energético. Obtenido de [17].

En la actualización que otorga este reporte se destacan las emisiones de las fuentes más relevantes, como el carbón, el petróleo, gas natural, metano y procesos industriales. Otras fuentes menores como el N_2O, combustión de CO_2 y la gestión de residuos apenas alcanzan a sumar poco menos de 1 [Gt $CO_{2\text{-}eq}$], es decir, cerca del 0,02% de las emisiones en 2022. Las emisiones de gas natural experimentaron una caída de un 1,6%, equivalente a 118 [Mt $CO_{2\text{-}eq}$], como consecuencia del continuo endurecimiento del suministro, empeorado por la invasión de Ucrania por parte de Rusia. En Europa, las reducciones en las emisiones de gas fueron especialmente notables, alcanzando un significativo 13,5% de disminución. Por otro lado, la región de Asia Pacífico también registró reducciones sin precedentes en sus emisiones de gas, con un descenso del 1,8%. El aumento de las emisiones de carbón compensó las reducciones provenientes del gas natural. En medio de una ola de transición del gas al carbón durante la crisis energética global, las emisiones de CO2 provenientes del carbón aumentaron en un 1,6%, equivalente a 243 [Mt $CO_{2\text{-}eq}$], superando ampliamente la tasa de crecimiento promedio de la última década y alcanzando un nuevo máximo histórico de casi 15,5 [Gt $CO_{2\text{-}eq}$]. Las emisiones derivadas del petróleo aumentaron aún más que las emisiones provenientes del carbón, incrementándose en un 2,5%, equivalente a 268 [Mt $CO_{2\text{-}eq}$], alcanzando un total de 11,2 [Gt $CO_{2\text{-}eq}$]. Aproximadamente la mitad de este aumento se atribuye a la aviación, ya que los viajes aéreos continuaron recuperándose de los niveles mínimos registrados durante la pandemia,

llegando a aproximadamente el 80% de los niveles emitidos del 2019. Sin embargo, este aumento se vio atenuado por el creciente impulso de los vehículos eléctricos en 2022, con más de 10 millones de automóviles vendidos, lo que representa más del 14% de las ventas de automóviles a nivel mundial. [17]

Es importante notar que, además, los efectos de esta problemática no sólo se quedan en la naturaleza, ya que la economía global y la sociedad también se ven gravemente afectadas.[8] Los problemas medioambientales suponen un déficit en la producción que afecta la oferta de bienes en el mercado, incluyendo alimentos, tecnología y múltiples bienes comerciales actuales. En general, las industrias también se ven severamente afectadas por el cambio climático, ya que basan sus actividades en la explotación de recursos naturales, cualquiera sea el nivel de explotación en que se encuentren los recursos. Algunos ejemplos de las industrias más afectadas son la industria agrícola, ganadera y pesqueras. Estos sectores ven severamente afectados porque dependen de la calidad del agua disponible, ya sea para beber, alimentar cultivos o para la sanidad de las personas y otras especies. La calidad del aire atmosférico y del alimento que se obtiene desde el mismo suelo también se ve afectada, desembocando en problemas de crecimiento y crianza de animales. Además, las limitaciones generan una competencia entre las industrias la utilización de terrenos, agua y otros recursos ambientales de disponibilidad limitada, lo que afecta su productividad y termina en un impacto económico y escasez de productos de consumo diario. [8], [10], [13], [15]

La evidencia del contexto medioambiental actual es un tema urgente y las naciones de todo el mundo son conscientes de que se necesitan esfuerzos adicionales y constantes para mitigar los efectos del cambio climático.

1.1.3 Medidas Aplicadas para Combatir el Cambio Climático

Debido a la gravedad del problema medioambiental, muchos países y organizaciones alrededor del mundo se han unido para enfrentarse a esta crisis, consiguiendo generar instantes de discusión para proponer distintas estrategias de contención del cambio climático, de las cuales muchas son complementarias entre ellas.

En vista de los riesgos que corre el medioambiente, se han realizado fuertes campañas y asambleas medioambientales alrededor del mundo a través de los años. Existe conciencia sobre el cambio climático y el calentamiento global desde que la primera conferencia mundial fue celebrada en 1979, en Ginebra. Por primera vez se vio un esfuerzo internacional por proteger la salud y el medioambiente ante la creciente contaminación que la humanidad había dejado como rastro en su desarrollo.[9] Hoy en día, iniciativas importantes se han efectuado, como la conformación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés), el Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP, por sus siglas en inglés) y el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés).[8] También existen acuerdos importantes, como el de Paris del 2015, realizado en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre El Cambio Climático (COP) en su versión número 23. Este acuerdo comprometió a las naciones participantes a la meta de no sobrepasar los 1,5 [°C] ni los 2,0 [°C] de incremento en la temperatura promedio del planeta. [13], [14] Además, existe el protocolo de Kyoto, el cual es una herramienta para reducir las emisiones de GHGs en el desarrollo industrial global. Pese a que su vigencia data del año 2005, ya se han visto resultados de su aplicación por parte de los países desarrollados. [18]

Para combatir este gran problema que afecta a múltiples especies y pone en riesgo la mayoría de la vida tal como se conoce hasta ahora, el ser humano ha concentrado sus esfuerzos en crear alianzas e instituciones internacionales para discutir y decidir los objetivos que se deben alcanzar, junto con los procedimientos necesarios para conseguirlos. Entre estas institucione destaca el IPCC, creado en 1988 para facilitar evaluaciones integrales y todo conocimiento científico, técnico y socioeconómico referente al cambio climático. [19] El IPCC se ha encargado en los últimos 25 años de preparar informes en donde se explican las causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta disponibles para mitigar el cambio climático a nivel mundial, al mismo tiempo que analizan el estado actual del planeta en base a la evidencia científica recolectada. Esta organización forma parte de las principales fuentes de datos disponibles para comprender el estado actual en el que se encuentra el marco medioambiental y socioeconómico global. [19]

Las discusiones han concluido que estos objetivos no podrán alcanzarse sin la cooperación de los principales países que emiten GHGs, como Estados Unidos, Rusia, China, la Unión

Europea, Japón e India. Además, se ha establecido como un prerrequisito la transferencia tecnológica de países desarrollados a otros en vías de desarrollo, con el fin de ampliar el alcance de las medidas necesarias para cumplir con este objetivo.[8], [9], [11] Dentro de este marco han surgido propuestas como la de cero crecimiento de la economía global, la cual propone detener el desarrollo económico con el fin de eliminar las emisiones de GHGs sin embargo, esto no representa una verdadera solución, puesto que compensa la restauración medioambiental, pero en desmedro del desarrollo económico global deseado.[8]

A través de años de discusión y propuestas de objetivos, se ha concluido que la manera más efectiva de combatir el cambio climático es encontrar una forma de producción limpia, socialmente aceptable y económicamente viable, es decir, llevar a cabo un desarrollo sustentable.[8]–[10] Para seguir progresando sin comprometer la vida en la Tierra ni poner en riesgo a las siguientes generaciones con condiciones medioambientales extremas, es necesario enfrentar el dilema de la sustentabilidad.[8] Es bajo este contexto en el cual las naciones se han unido para colaborar en el desarrollo de estrategias de mitigación, las cuales permitirán alcanzar la sustentabilidad de la actividad humana.

También han surgido ideas para reducir las emisiones desde un incentivo económico. El impuesto al carbono es la más reconocida y consiste en cobrar un impuesto por las emisiones de dióxido de carbono, directas o equivalentes, y así reducir el incentivo a generar contaminantes dentro de los GHGs.[20]–[22] Además, a diferencia de otras políticas climáticas, los impuestos al carbono también producen ingresos, creando diversas oportunidades para reducir otros impuestos dañinos, generando así beneficios ambientales y económicos de forma paralela. Esta estrategia ha tenido resultados positivos en la reducción de emisiones de GHGs en países como Estados Unidos, China y Australia, sin embargo, se necesitan estrategias complementarias que ayuden a mitigar los efectos del cambio climático.[20]–[22]

1.2 Estrategias de Mitigación

En base a esto nacen diversas formas de combatir la crisis medioambiental. A estas formas de combatir el cambio climático se les denomina “estrategias de mitigación”, de las cuales muchas

han sido estudiadas por años, mientras que otras se presentan como ideas innovadoras que podrían representar una solución complementaria a la crisis climática actual.

A través de los distintos concilios internacionales se han concluido varias maneras de adaptarse y mitigar los efectos del cambio climático, como el secuestro de carbono, mecanismos de desarrollo limpio, métodos combinados de mitigación y, sobre todo, el uso de fuentes de energía renovable, como la eólica, geotérmica y solar, entre otras. Dentro de estas estrategias existen tres principales grupos que son explicados a continuación.

1.2.1 Estrategias de Mitigación Convencionales

Energía Renovable: La energía renovable ha sido investigada desde finales del siglo XIX y las mejoras tecnológicas que se han hecho alrededor de ella la han llevado a tomar un rol fundamental, llegando a posicionarse como una de las estrategias clave para permitir la continuidad del desarrollo económico e industrial en plena crisis ambiental. Desde el año 2011, el porcentaje compartido de producción de potencia eléctrica global que alcanzó la energía renovable ha sido mayor al 20%, alcanzando el año 2021 un 28,7%, como se puede apreciar en la **Figura 5**. [23] Las tecnologías de energías renovables más prominentes son la solar fotovoltaica, concentración solar, solar térmica, eólica, hidroeléctrica, mareomotriz, geotérmica, biomasa y biocombustibles. Dentro de estas tecnologías destacan la eólica y la fotovoltaica las más destacadas, ya que han representado el 90% de crecimiento de este método de producción energética en el año 2021, alcanzando un total de generación eléctrica renovable de 3.200 [GW] al año. [9], [23]

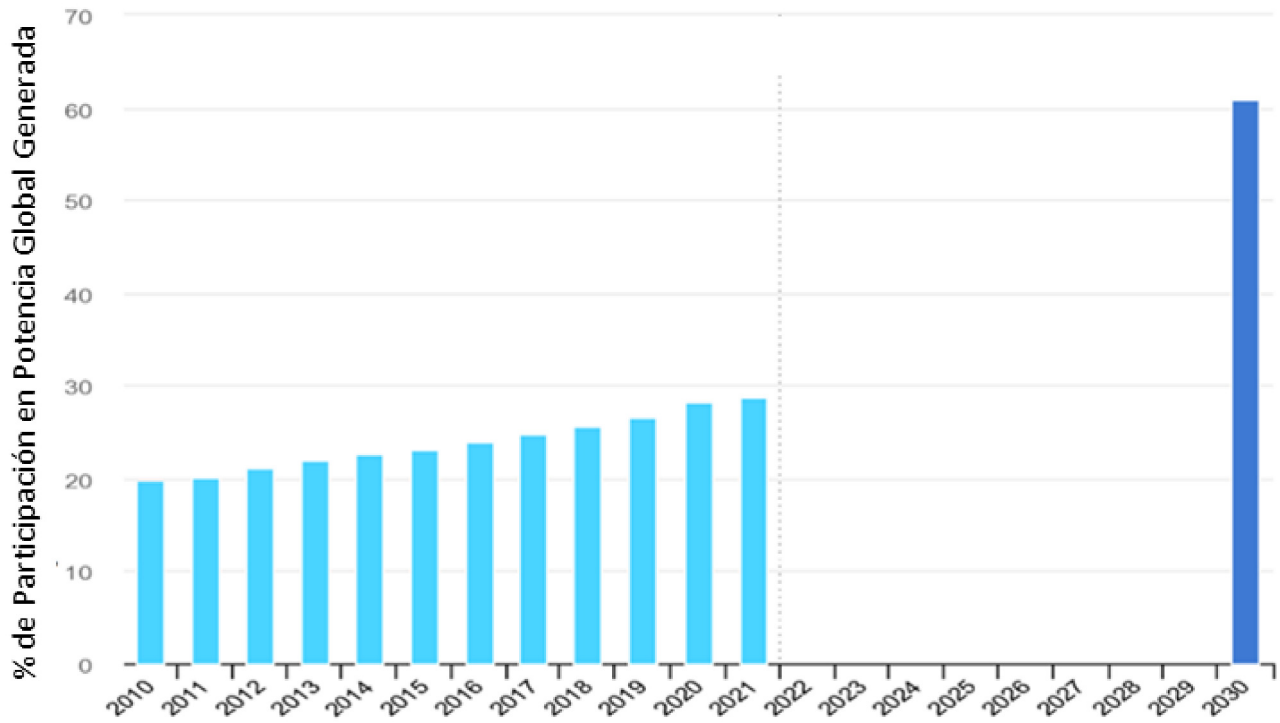


Figura 5. Participación Porcentual de Energías Renovables en la Potencia Global Generada por Año. Modificado desde [23].

Aún, pese a todo el progreso que se ha logrado en los últimos años, se necesita que este tipo de generación de potencia eléctrica alcance una taza de producción mucho mayor si es que se quiere cumplir con el escenario acordado de cero emisiones de carbono para el año 2050. Se estima que, entre los años 2022 y 2030, su crecimiento debe ser de un 12% anual para llegar a una taza de producción del 60% para 2030 y eventual cero emisiones del año 2050.[23]

Energía Nuclear: La energía nuclear se obtiene de la transformación de la materia en energía a través de la fusión, fisión y del decaimiento radioactivo. En su uso práctico, la energía nuclear es producida en plantas de fisión nuclear, las cuales ejecutan un bombardeo de neutrones para provocar la fisión del núcleo de los átomos, mientras que estos su vez liberan elementos más ligeros que, bajo el bombardeo, reaccionan en cadena hasta producir una cantidad de calor deseada. El calor generado calienta agua, generando un vapor de alta presión y temperatura que es llevado a una turbina acoplada a un generador eléctrico. El giro de esta turbina, producido por el vapor de agua, es capaz de generar electricidad. Una planta termoeléctrica nuclear grande es capaz de generar, en promedio, 1 [GW] de energía. [24], [25]

El elemento más utilizado como materia prima para la fisión nuclear es el Uranio, específicamente el isótopo del Uranio, el U-235. Esto es debido a la facilidad que tiene su núcleo para dividirse y provocar una fisión nuclear en cadena. Debido a que el isótopo de este metal no es tan común y debe ser minado y procesado para su uso como combustible, es que se considera que la energía nuclear es una fuente de energía no renovable. [25]

Secuestro, Almacenamiento y Utilización de Carbono: Este método de mitigación es propuesta como una forma de acople a los sectores de producción eléctrica e industrial, disminuyendo directamente las emisiones de los procesos productivos en el mismo momento en que son generadas. La clave de esta tecnología de descarbonización está separar el CO_2 de los gases producidos por utilización de combustibles fósiles y capturarlos mediante membranas adsorbentes. Una vez que se dispone del gas capturado, este es liquidificado y transportado, por tuberías o barcos, a reservas geológicas por largos períodos de tiempo, evitando que la concentración atmosférica de CO_2 incremente. [8], [9]

Algunas de las reservas utilizadas para el almacenamiento prolongado del CO_2 son depósitos agotados de petróleo y gas metano, capas de carbón y acuíferos salinos subterráneos no utilizados como fuente de agua potable. Algunos depósitos de dióxido de carbono también son artificiales y están especialmente construidos para almacenar CO_2. Pese a que este método sirve para reducir las emisiones de las plantas productivas, existe el riesgo latente de fuga del gas desde los depósitos deficientemente cerrados, provocando grandes problemas en el ambiente del sector hacia el que escapan, como la contaminación del suelo y del agua, sin mencionar los perjuicios a la salud de los seres vivos que habitan en la zona. Esto lleva, muchas veces, a generar otro problema para la ejecución de este método; la aceptación social del procedimiento, debido a que la inseguridad sobre el éxito en el almacenamiento geológico lleva a la población de las cercanías a presentar quejas y evitar que se desarrollen los proyectos en las zonas disponibles. [9]

Además del almacenamiento, el carbono capturado desde el sector energético e industrial puede ser reincorporado a la cadena productiva, transportando el CO_2 y utilizándolo como materia prima para la producción de químicos, combustibles, desarrollo de microalgas, material de construcción de hormigón e incluso para la recuperación mejorada de petróleo. [8], [9]

1.2.2 Estrategias de Emisión Negativa

Captura y Almacenamiento de Carbon Bioenergético: Este método de mitigación negativa se destaca por combinar las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono, presentadas en las estrategias de mitigación convencionales, con la capacidad metabólica de la biomasa para absorber CO_2. La biomasa capaz de hacer fotosíntesis captura el CO_2 atmosférico como parte de su metabolismo, almacenando naturalmente el contaminante durante su crecimiento. Una vez crecida, la biomasa puede ser utilizada como combustible para producir energía, momento en el que se integran las tecnologías que retienen las emisiones de CO_2 para luego almacenarlas en una reserva geológica. [8], [9]

El principal problema que presenta esta estrategia es que, para convertirse en una alternativa efectiva de mitigación, requiere una vasta cantidad de biomasa, a la cual se asocian costos por mantención de campos de cultivos especializados y la competencia directa con la industria alimentaria por el uso de los suelos, el agua y otros recursos necesitados para mantener a los organismos que se utilizan en el proceso. Además, competir con este sector por el uso de la tierra puede significar un retroceso en cuanto sustentabilidad, especialmente por los problemas medioambientales y sociales que implican cambiar el uso de suelos de cultivo y bosques por una reserva de descarbonización. [9]

Se estima que, para el año 2050, el potencial de reducción de CO_2 que tendrá esta tecnología estará entre los 0,5-5 [$GtCO_2$/año], mientras que la literatura presenta una capacidad de almacenamiento global actual de gran variación, entre 200-50.000 [$GtCO_2$]. Los costos de aplicación de esta tecnología se estiman entre 100–200 [$/$tCO_2$]. [9]

Forestación y Reforestación: La forestación se refiere al uso del suelo para la creación de cubiertas forestales en donde antes no las había, mientras que la reforestación consiste en hacer lo mismo sobre suelos que recientemente poseían estas cubiertas. El crecimiento de los árboles permite capturar CO_2 de la atmósfera y almacenarlo en biomasa viva, materia orgánica muerta

y suelos. Dependiendo de las especies de árboles, una vez establecidos los bosques, la absorción de CO_2 puede durar de 20 a 100 años hasta que los árboles alcancen la madurez, momento en el que las tasas de secuestro disminuyen significativamente. En esta etapa, se pueden cosechar y utilizar productos forestales. [8], [9]

Se argumenta también que las actividades y prácticas de manejo forestal tienen un impacto ambiental y deben planificarse cuidadosamente. En general, el almacenamiento biogénico tiene una vida útil mucho más corta que el almacenamiento en formaciones geológicas, como en el caso de la captura y almacenamiento de carbono de la bioenergía. Un problema relacionado con la forestación es la necesidad de suelo, así como la competencia con otros usos de la tierra en la industria. Se requieren cantidades significativas de suelo para lograr resultados de mitigación efectivos. se estima que un área total de 500 millones de hectáreas es adecuada para la implementación de la forestación. Esto permitiría un potencial mundial de eliminación de dióxido de carbono de 0.5 a 3.6 [$GtCO_2$/año] para el 2050. Los costos de eliminación se estiman entre 5 y 50 [$/$tCO_2$]. [9]

Producción de Carbón Vegetal: El carbón vegetal ha sido reconocido recientemente como un enfoque viable para la captura y almacenamiento permanente de carbono, y se considera una de las tecnologías de emisiones negativas más prometedoras. Se produce a partir de biomasa, como cultivos específicos, residuos agrícolas y residuos forestales, utilizando un proceso de conversión termoquímica. Este proceso implica la pirólisis, que consiste en calentar la biomasa en ausencia de oxígeno, así como la gasificación y la carbonización hidrotérmica. El carbono capturado por la biomasa durante el crecimiento de las plantas a través de la absorción de CO_2 se convierte en un carbón vegetal que puede ser aplicado al suelo durante largos períodos. Este proceso de conversión permite almacenar el carbono de la biomasa en una forma altamente estable y resistente a la descomposición. La estabilidad en los suelos es una de las características más importantes del carbón vegetal, lo que lo convierte en una tecnología sólida para la eliminación del carbono. [10]

Aunque se considera más estable que el carbono orgánico presente en el suelo, existen incertidumbres respecto a las tasas de descomposición de diferentes tipos de carbón vegetal, las cuales dependen de la materia prima utilizada y las condiciones del proceso. En términos de

recursos, la producción de carbón vegetal necesitaría grandes extensiones de tierra para lograr un impacto efectivo en los niveles de concentración de gases de efecto invernadero. [8], [9] Se requiere tierra tanto para el cultivo de la materia prima como para la dispersión, que actúa como un reservorio de carbono. Aunque asignar tierras para el cultivo de biomasa dedicada puede generar problemas de competencia con la agricultura y otros sectores de uso de la tierra, al igual que ocurre con la captura y almacenamiento de carbono de la bioenergía, no habría problemas en cuanto a las áreas necesarias para la dispersión del carbón vegetal. [9]

El potencial de remoción de carbono de esta tecnología varía según la materia prima utilizada, y se estima que puede eliminar entre 2.1 y 4.8 toneladas de CO_2 por cada tonelada de carbón vegetal. Según estimaciones, para el año 2050, el potencial global de reducción de carbono alcanzado mediante el uso de esta estrategia puede oscilar entre 0.3 y 2 [$GtCO_2$/año], con costos que van desde 90 hasta 120 [$/$tCO_2$].[9]

Secuestro de Carbono Terrestre: La captura de carbono es un método para atrapar el CO_2 atmosférico mediante cambios en las prácticas de gestión de la tierra para incrementar el contenido de carbono en el suelo. El nivel de concentración de carbono en el suelo se determina mediante el equilibrio entre los elementos que se incorporan, como residuos, restos de plantas, raíces y estiércol, y las pérdidas de carbono que se producen a través de la respiración, que está principalmente influenciada por la perturbación del suelo. Las prácticas que aumentan los elementos incorporados y/o reducen las pérdidas promueven la captura de carbono en el suelo. [8], [9]

En la literatura se destacan los beneficios en la fertilidad, salud y rendimiento de los suelos, promovidos por la captura de carbono en ellos. Diversas prácticas de manejo de tierras promueven la captura de carbono en el suelo, las cuales incluyen la intensidad y rotación de los sistemas de cultivo, la labranza cero y las prácticas de conservación del suelo, la gestión de nutrientes, el acolchado y el uso de residuos de cultivos y estiércol, la incorporación de carbón vegetal, el uso de fertilizantes orgánicos y la gestión del agua. Sin embargo, existen problemas relacionados con esta estrategia que giran en torno a la permanencia, la saturación del suelo y el impacto en otras emisiones de gases de efecto invernadero. [9]

El potencial de remoción de dióxido de carbono discutido en la literatura estima que, para el año 2050, se alcanzará a remover entre 2.3 y 5.3 [$GtCO_2$/año], con costos que oscilan entre 0 y 100 [$/$tCO_2$]. [9]

Captura Directa de Carbono Atmosférico y Almacenamiento: Esta estrategia está surgiendo como una potencial tecnología sintética de remoción de CO_2. A través del uso de compuestos químicos selectivos se captura el CO_2 de la atmósfera, el cual luego es almacenado en depósitos geológicos para luego ser extraído y utilizado en la producción de compuestos químicos y minerales, entre otros usos. Los absorbentes se limpian al aplicar calor o agua, desprendiéndose así el gas contaminante y regenerándose el absorbente para prolongar su uso. Hay principalmente dos procesos mediante los cuales los absorbentes funcionan: primero a través de la absorción, donde el CO_2 se disuelve en el material absorbente, típicamente utilizando absorbentes líquidos como hidróxido de potasio o hidróxido de sodio; segundo, a través de la adsorción, donde el CO_2 se adhiere al compuesto selectivo, generalmente utilizando materiales sólidos como aminas. Aunque ambos procesos necesitan energía para limpiar el compuesto que captura al contaminante, es importante destacar que se requiere menos energía en el proceso de adsorción. [8], [9]

El potencial de remoción que se estima en literatura para esta estrategia es, para el año 2050, de 0,5 – 5 [$GtCO_2$/año], lo que podría aumentar hasta 40 [$GtCO_2$/año] si es que se superan los desafíos de aplicación de esta estrategia, que consisten principalmente en el alto requerimiento energético para su aplicación. Los costos de remoción se estiman entre 600 – 1000 [$/$tCO_2$] inicialmente, con la capacidad de bajar hasta 100 – 300 [$/$tCO_2$] a medida que la tecnología madure. [9]

Fertilización Oceánica: El principio de funcionamiento de esta estrategia es promover la actividad biológica de la superficie marina, mediante la adición de nutrientes como fósforo, nitratos y hierro. El fitoplancton es un microorganismo que se encuentra en la capa superficial de los océanos y es un importante contribuyente a la captura de carbono oceánico. Al igual que

las plantas terrestres, el fitoplancton utiliza la luz, el CO_2 y los nutrientes disponibles en el mar para crecer, sin embargo, estos nutrientes son limitados debido a que provienen principalmente de la muerte y descomposición de la vida marina. Así, la idea detrás de la fertilización oceánica es introducir nutrientes adicionales para aumentar la magnitud de la producción biológica, lo que a su vez incrementa la tasa de captura de CO_2 en comparación con la tasa natural de respiración, creando un equilibrio atmosférico negativo de carbono. [8]–[10]

Efectos secundarios de esta opción para combatir el cambio climático son la acidificación del océano, disminución o agotamiento del oxígeno en aguas profundas y medias, aumento en la producción de otros gases de efecto invernadero, impacto impredecible en los ciclos alimentarios, formación de proliferaciones de algas tóxicas, así como efectos mixtos en los ecosistemas del lecho marino y del océano superior. Esto sin mencionar los efectos ambientales, económicos y sociales que son asociados a la producción y gestión de los nutrientes para fertilizar el océano. Por último, el mayor inconveniente sobre esta tecnología es la incertidumbre sobre la permanencia de sus efectos, la cual depende de si el carbono orgánico secuestrado permanece en movimiento y disuelto a través de las distintas capas del océano, o sí efectivamente logra sedimentar hacia las capas más profundas y mantenerse allí durante períodos prolongados. [9]

La literatura existente sobre esta estrategia reporta estimaciones de un secuestro de CO_2 potencial de, aproximadamente, 3,7 [$GtCO_2$/año] para el año 2100. La capacidad global máxima de secuestro está entre los 70 – 300 [$GtCO_2$]. Los costos de aplicación de la estrategia estarían entre el amplio rango de 2 – 457 [$/$tCO_2$]. [9]

Mejora de Meteorización Terrestre: En la naturaleza ocurre un proceso llamado meteorización en el que las rocas silíceas. Esto es mediante una reacción química que tiene la capacidad de absorber el CO_2 atmosférico y liberar iones metálicos, así como iones de carbonato y/o bicarbonato. Estos iones disueltos son transportados a través de corrientes de agua subterránea hasta llegar a los ríos y finalmente al océano, donde se almacenan como alcalinos, o se precipitan en forma de minerales de carbonato en el sistema terrestre. La meteorización mejorada es una estrategia que acelera este proceso para aumentar la captura de CO_2 en un período de tiempo más corto. Consiste en moler rocas silíceas para aumentar el área de reacción

y así mejorar la velocidad de disolución del mineral. Luego, el material molido puede ser aplicado en los cultivos, generando un beneficio extra además del secuestro del contaminante. De esta manera, se aplican dos métodos de secuestro del carbono; el inorgánico, producto de la reacción química de las rocas con la atmósfera; y el orgánico, producto del secuestro que se origina por el crecimiento de plantas que absorben CO_2 en su metabolismo. [9]

Además del beneficio que representa esta estrategia en cuanto a secuestro de CO2 y nutrición de cultivos, la literatura reporta una serie de otros beneficios secundarios interesantes, como una mejora en las propiedades hidrológicas del suelo, incremento del pH marino, mejoras en la salud de los suelos, incremento en la producción de biomasa y la oportunidad de reducir la dependencia actual en los pesticidas convencionales. [9]

A diferencia de otras estrategias, esta opción puede ser aplicada en la actualidad debido a que la tecnología necesaria para ejecutarla ya está desarrollada. El verdadero inconveniente de la aplicación es la cantidad de energía que requiere el proceso de producción, molienda y transporte. Además, otro inconvenientes son el potencial riesgo a la salud debido a partículas volátiles finas y la incertidumbre sobre el impacto en la biodiversidad microbiana y marina. [9]

La duración del secuestro de CO2 en esta estrategia puede alcanzar una gran magnitud, extendiéndose hasta el orden de los 10^6 años. Para el año 2050, se estima que se podría alcanzar una tasa de secuestro de 2 – 4 [$GtCO_2$], con un costo de 50 – 200 [$/$tCO_2$]. [9]

Mejora de Alcalinidad Oceánica: Como se ha discutido anteriormente, el mar contribuye en gran medida al secuestro de CO_2 de forma natural, lo cual se realiza por dos medios; la transferencia de materia del CO_2 hacia el mar, debido a la diferencia entre las presiones de vapor parciales entre la atmósfera y el océano; y a la actividad de microorganismos, principalmente el metabolismo del fitoplancton. Al entrar en contacto con el agua de mar, el CO_2 reacciona formando ácido carbónico, bicarbonato e iones carbonatos que mantienen el carbono disuelto y almacenado en las capas marinas. [8], [9]

Además de la alcalinización del mar mediante el método de meteorización mejorada discutido anteriormente, la alcalinidad del océano puede ser mejorada añadiendo directamente rocas de silicatos al mar, incrementando así la captura y retención de CO_2 en este medio, el cual retiene actualmente 140.000 [$GtCO_2$]. Dependiendo de los cambios químicos del océano, este podría llegar a almacenar CO2 en el orden de las trillones de toneladas y mantenerlo disuelto allí por período del orden de los 10^4 años. Los costos de aplicación de esta estrategia se estiman entre 10 – 190 [$/$tCO_2$], lo que varía según el tipo de procedimiento que se utilice para ejecutarla. Pese a la información existente, se necesita de un desarrollo de pruebas de campo más avanzado antes de poder aplicar la estrategia a gran escala. [9]

Restauración y Construcción de Humedales: Esta estrategia es propuesta en torno a la preservación, restauración y construcción de nuevos hábitats naturales que son capaces de almacenar una gran cantidad de carbono biológico. Los manglares, turberas, marismas y prados de hierbas marinas constituyen en su mayoría los hábitats conocidos como humedales, de los cuales se calcula que contienen entre el 44 y 71% del carbono biológico terrestre en el planeta. Sin embargo, pese a su gran capacidad de almacenamiento de CO_2, los humedales se ven limitados por su fragilidad como ecosistemas, el cual es deteriorado tanto por desastres naturales como por acción humana. [8], [9]

Una gran desventaja de esta estrategia es que estos ecosistemas emiten una significativa emisión de otros GHGs distintos del CO_2, como el CH_4 y el N_2O. Este importante hecho hace que sean necesarios estudios para calcular la equivalencia, en CO_2, de las emisiones de los hábitats en cada proyecto de restauración o instalación de un humedal en un sector determinado. [9]

Dependiendo del tipo de humedal, se estima que la tasa de secuestro de carbono que es capaz de ejercer un humedal varía entre -0,5 y 16,5 [$GtCO_2$/año] por hectárea, mientras que en la actualidad ya se acumulan cerca de 2477 [$GtCO_2$] por hectárea de este ecosistema. Los costos de aplicación se estiman entre los valores de 10 – 100 [$/$tCO_2$], lo que lo hace una alternativa interesante, pero aún inmadura por la escasez de políticas favorables para fomentar la estrategia a gran escala. [9]

1.2.3 Estrategias de Geoingeniería de Forzamiento Radiactivo.

Inyección Estratosférica de Aerosol: Esta estrategia se basa en el uso de aerosoles, principalmente SO2, a altos niveles atmosféricos para inducir una reflexión en los rayos solares incidentes a la tierra y así disminuir su temperatura. Pese a que este método puede ser efectivo para disminuir la temperatura de la superficie terráquea, aún necesita mayor desarrollo y estudio, puesto que desventajas como los costos de su aplicación, estimados en alrededor de 1500, y los posibles efectos secundarios en el ciclo del agua y la capa de ozono tras su aplicación, disminuyen enormemente las posibilidades de aplicar esta estrategia de mitigación. [9]

Aumento de Reflectividad del Cielo Marino: La clave de esta estrategia está en aumentar la reflexión de los rayos solares en las nubes de la atmósfera, lo cual puede ser efectuado por la acción de partículas de agua de mar o por compuestos químicos. Cuando el agua de mar es dispersada en las nubes, esta se evapora rápidamente, dejando suspendidos cristales de sal en el cuerpo gaseoso. Estos cristales ayudan a reflejar la luz solar y a enfriar la superficie cubierta por las nubes que los contienen. Aunque esta estrategia parece ser ambientalmente amigable, presenta desventajas importantes como la falta de una tecnología que permita obtener un tamaño de gota apto para generar el efecto deseado, sin mencionar la incertidumbre y variabilidad sobre el cuerpo gaseoso que puede afectar también en el fenómeno que se busca aplicar. [9]

Espejos Espaciales: Esta es una estrategia cuya aplicación ocurre fuera del planeta y consiste en reflejar parte de la luz incidente a la tierra para reducir su temperatura. Esta alternativa posee una capacidad importante de reducción de temperatura, sin embargo, los costos asociados al transporte de materiales al espacio exterior del planeta hacen que sea muy difícil de aplicar, sin mencionar los avances tecnológicos necesarios para mantener estable su funcionamiento. Se estima que los costos de transporte se deben reducir de 10.000 [$/kg] a tan solo 100 [$/kg] para hacer económicamente viable esta propuesta, por lo que su estado de desarrollo aún es prematuro. [9]

Aumento de la Reflectividad Terrestre: La esencia de esta estrategia yace en la aplicación de distintas medidas para reflejar la luz solar incidente en la superficie terrestre. Entre estas

medidas se encuentran opciones como pintar las superficies de edificios y calles de un tono blanco, cubrir zonas geográficas como desiertos y glaciares con sábanas plásticas reflectivas de gran extensión e instalar paneles reflectantes sobre superficies acuáticas. No sólo la capacidad de enfriamiento terrestre de esta estrategia es limitada, sino que también posee fuertes efectos secundarios sobre el medioambiente, lo que la deja un poco atrás en comparación a otras alternativas forzamiento radiactivo. [9]

Adelgazamiento de Cirros: Los cirros son nubes de hielo que se encuentran a una gran altura, las cuales juegan un rol muy importante en la radiación emitida desde la tierra al espacio. Esto ocurre debido a que los cirros son capaces de absorber la radiación incidente en ellos, tanto la que proviene de la tierra como la del sol. El problema con este tipo de nubes es que, generalmente, terminan generando un efecto de calentamiento del planeta, razón por la cual se propone esta estrategia, que consiste en inyectar aerosoles a los cirros para reducir su espesor y tiempo de vida. Problemas como el mecanismo de transporte e inyección de los aerosoles e, incluso, la determinación del mismo aerosol que cumpla con la efectividad y bajo índice de contaminación son todavía motivo de investigación para la factibilidad de esta alternativa de mitigación. [9]

1.3 Tecnologías de Energía Solar

El sol es una fuente de energía natural que ha existido desde mucho antes de los orígenes de la humanidad y se le considera como la fuente de energía más abundante. Por millones de años el sol ha proporcionado energía en forma de radiación a la Tierra, debido a las reacciones de fusión y fisión nuclear que ocurren en él, alcanzando los 120×10^{15} [W] de radiación total en la superficie terrestre. [26], [27] A través de los años, el ser humano ha desarrollado distintos métodos para aprovechar la energía del sol, lo que ha culminado en una serie de inventos tecnológicos diseñados para obtener la máxima eficiencia de extracción energética de la radiación solar.

Dentro de las distintas tecnologías de conversión de la energía solar, principalmente se encuentran las que utilizan un método de conversión basado en la concentración solar y los que

no la utilizan. [26], [28] En la **Figura 6** se puede apreciar el tipo de tecnología y el uso final en el que se aplica.

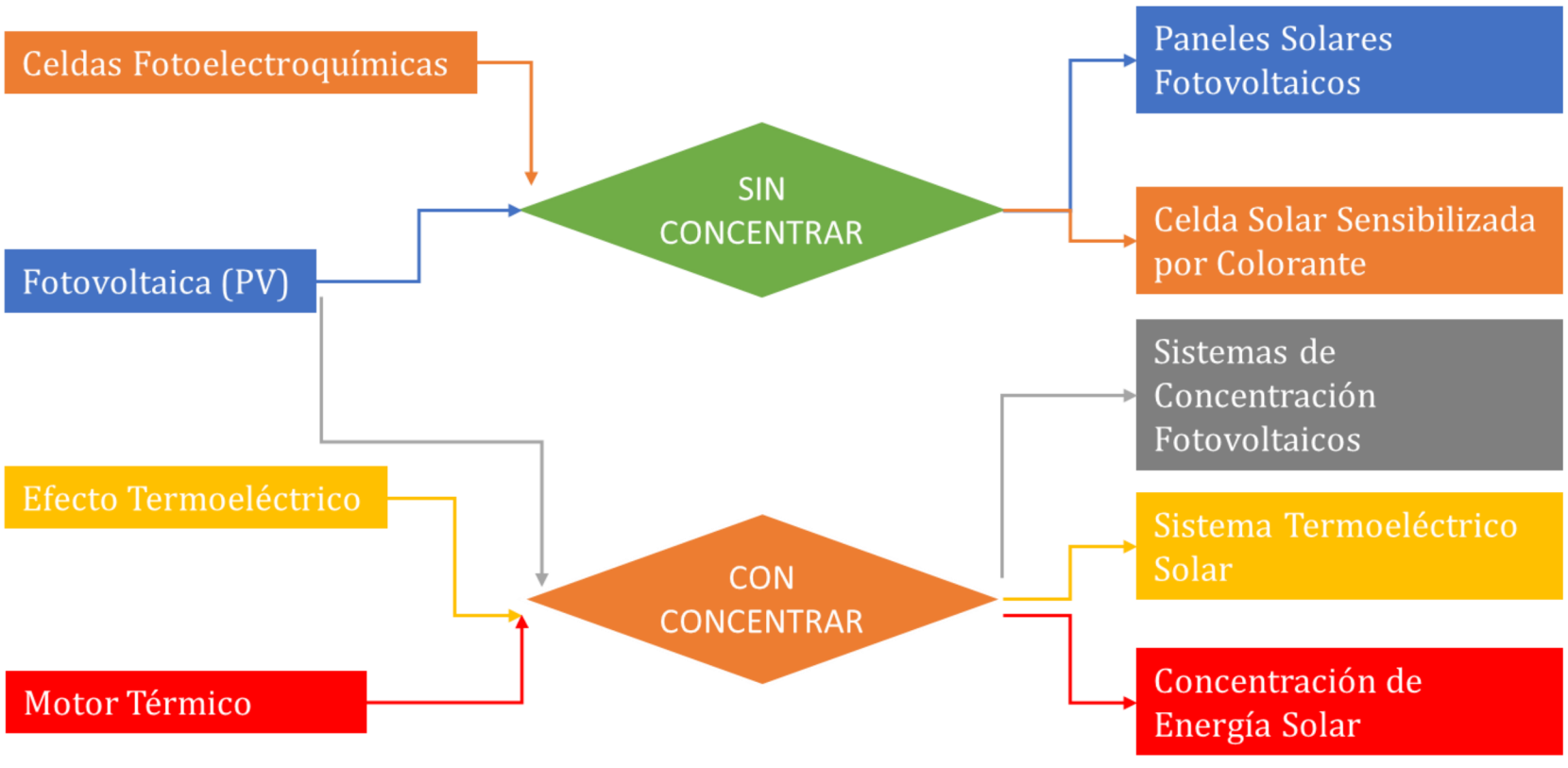


Figura 6. Tipos de Tecnologías Solares y Aplicación Tecnológica. Elaborado en base a [26]

Las tecnologías que utilizan la concentración solar consisten en la aplicación de un método de concentración, como discos parabólicos, espejos o lentes, que redirecciona y captura los rayos solares hacia un punto en específico, en donde se transforma la energía calórica concentrada de la radiación en energía eléctrica mediante el uso de semiconductores o materiales afines, o simplemente se utiliza como calefacción de manera directa. [26], [28]–[30] La aplicación usual de este tipo de tecnologías solares va desde la generación de potencia eléctrica, en el efecto termoeléctrico y sistemas de concentración fotovoltaicos, hasta la calefacción, refrigeración y la adaptación del aire acondicionado, siendo una excelente opción para realizar lo último. [26], [29]

Las tecnologías que funcionan sin el uso de un concentrador solar son las celdas fotoelectroquímicas y las celdas fotovoltaicas, las cuales terminan siendo utilizadas como celdas solares sensibilizadas por colorantes (DSSC, por sus siglas en inglés) y paneles solares

fotovoltaicos, respectivamente. [26], [28] Las celdas fotoelectroquímicas consisten en la generación de electricidad por medio de la incidencia de la radiación solar, la que reacciona con la tinta puesta sobre un semiconductor, inyectando electrones en la banda de conducción de este último, creando un flujo eléctrico que puede ser aprovechado como potencia. [26] Respecto a las celdas fotovoltaicas, el enfoque de este trabajo está especialmente direccionado en esta tecnología, de la cual se especifican detalles a continuación.

1.4 Celdas Fotovoltaicas

Las celdas fotovoltaicas son dispositivos capaces de convertir la luz solar directamente en energía eléctrica por medio del efecto fotovoltaico, que es explicado con detalle más adelante, en la sección de fundamentos teóricos. Cuando los fotones provenientes de los rayos solares alcanzan la superficie de las celdas fotovoltaicas (o PVs, por sus siglas en inglés), una parte de la luz es reflejada, otra es absorbida y la otra atraviesa la celda. Una parte de la energía absorbida se pierde como calor y el resto se distribuye en los componentes internos del dispositivo, los cuales están construidos de materiales semiconductores cuya particularidad es conducir la electricidad mejor que un aislante eléctrico, pero no tanto como un súper conductor, como lo son los metales. La energía de la luz incidente es transferida hacia los electrones, excitándolos y permitiéndoles transitar a través estructura, generando así la energía eléctrica que es retirada por los componentes metálicos de la celda fotovoltaica y derivada a otros dispositivos para un uso determinado. [26], [28], [30], [31]

La eficiencia de una celda solar es medida en base a la comparación de la potencia eléctrica que es capaz de generar con la energía de la luz que llega en su superficie, es decir, la eficiencia de conversión de potencia (PCE, por sus siglas en inglés). Esta eficiencia depende de múltiples factores que caracterizan al dispositivo, como la temperatura, la recombinación de par electrón-hueco, la reflexión de la superficie y, especialmente, la brecha energética de los materiales de construcción, mejor conocida como “band-gap” (en inglés), o banda prohibida. [26], [28], [30], [31] Esta brecha determina la longitud de onda de la luz que es capaz de provocar una excitación en los electrones del material para pasar de la banda de valencia a la banda de conductividad, definiendo el tipo de luz ante la que la celda es capaz de generar corriente eléctrica. [30] Debido

a esto, la selección de materiales para la construcción de celdas solares es uno de los principales criterios que se consideran, puesto que deben ser capaces de utilizar la energía absorbida de la longitud de onda que llevan los fotones de la luz solar.

Los materiales de construcción y tipos de arquitecturas de celdas fotovoltaicas generadas a partir de ellos han tenido cambios importantes, dentro de estos, el más utilizado es el silicio como material semiconductor. [26], [28], [30]–[32] Desde el primer modelo de una celda de silicio monocristalino, creado en 1953 por el laboratorio Bell y con un PCE de apenas 4%, la tecnología evolucionó hasta llegar a un 24% de PCE para celdas de silicio. Para el año 2007, las celdas fotovoltaicas de silicio modernas alcanzaron un PCE récord de un 28%. [28]

Sin embargo, aunque el silicio es un material ampliamente utilizado y el más popular en la construcción de celdas fotovoltaicas en el mundo, las investigaciones hechas por distintos científicos han traído una serie de descubrimientos de materiales novedosos para la construcción de nuevos tipos, arquitecturas y arreglos de celdas fotovoltaicas que traen consigo una serie de beneficios explicados a continuación.

1.4.1 Tipos de Celdas Fotovoltaicas

Existen ciertos criterios para seleccionar materiales de construcción. Como ya se mencionó anteriormente, el band-gap es uno de los principales. Las celdas fotovoltaicas deben cumplir con ciertos estándares para ser atractivas comercialmente. En general, las características ideales de una celda fotovoltaica son un band-gap entre 1,1 – 1,7 [eV], materiales de construcción de baja toxicidad y fácilmente acceso, una estructura de banda prohibida directa y, por supuesto, un PCE alto. [31] Actualmente, existe un grupo de arquitecturas y materiales de construcción estudiados y comúnmente utilizados en la industria fotovoltaica, como el silicio, mientras que existen otros grupos que permanecen en desarrollo y han sido el foco de atención por su impresionante mejora en rendimiento en los últimos años. [30], [31], [33] La **Figura 7** muestra las eficiencias de las celdas fotovoltaicas obtenidas desde el año 1976 hasta el presente.

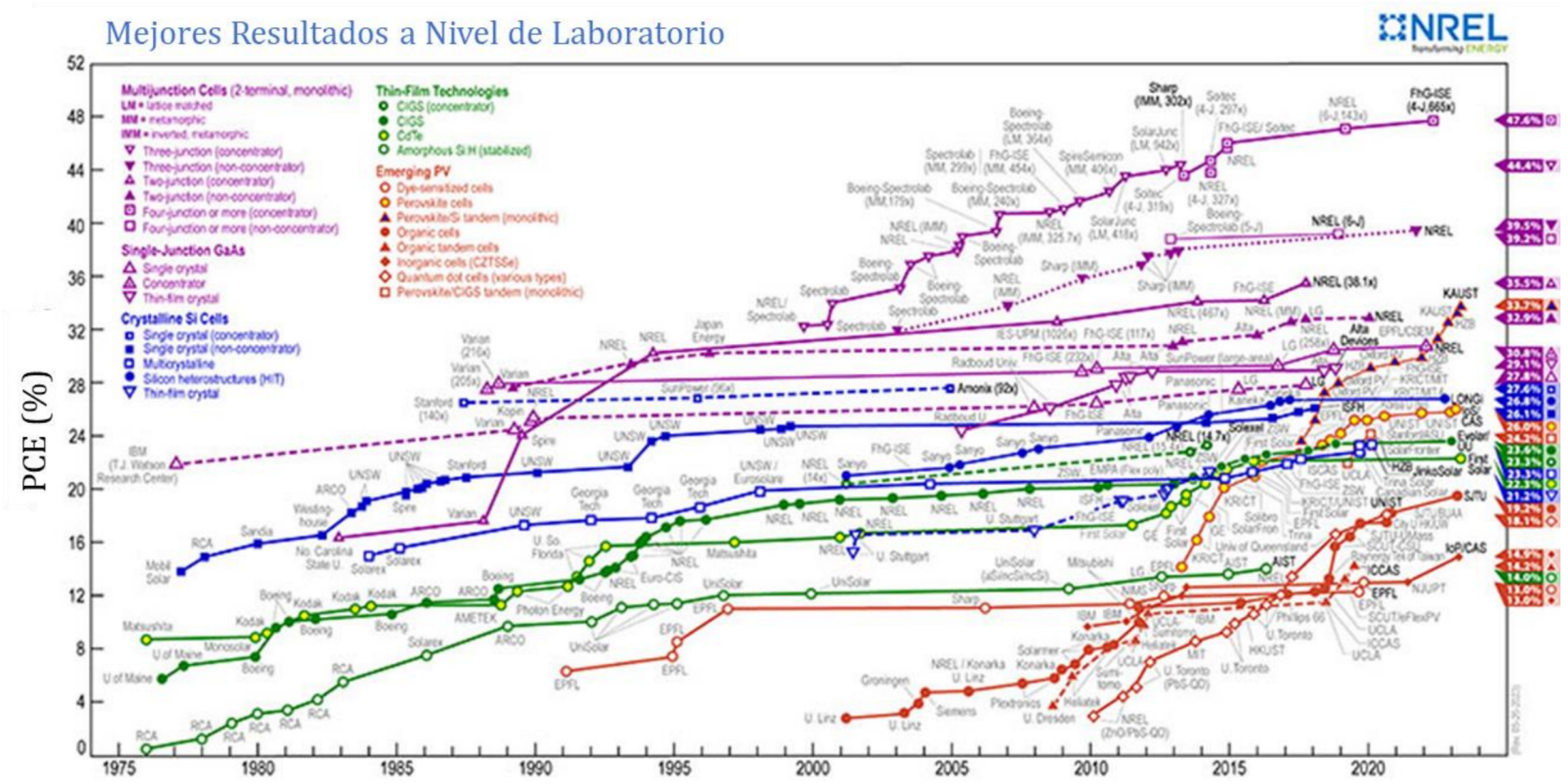


Figura 7. Resultados de PCE de Distintas Tecnologías Fotovoltaicas a Nivel de Laboratorio desde 1976 al Presente. Obtenido de [33]

Los principales tipos de celdas fotovoltaicas son:

Celdas Cristalinas Gruesas: También llamadas "celdas de primera generación", fueron las primeras celdas fotovoltaicas que entraron al mercado, fomentadas por la industria microelectrónica. Esta tecnología, basada en capas cristalinas gruesas de silicio, ha proliferado con un éxito enorme a través de los años, llegando a formar parte de más del 80% de la capacidad instalada global y su instauración en el comercio constituye un 90% del mercado en la actualidad. [28], [30], [31], [34] Este tipo de celdas son la principal representación de la industria fotovoltaica, debido a la facilidad de adquisición de materiales, principalmente silicio, y su alta eficiencia de conversión energética.

Las celdas de esta generación se componen, principalmente, de silicio monocristalino y policristalino y tienen un grosor cercano a 200 – 300 [μm] de la capa absorbente de luz. Las celdas monocristalinas son hechas a partir del proceso de Czochralski, que consiste en cristalizar el silicio dopado a partir de una semilla y, desde ese núcleo, formar distintos cubos que son cortados en forma de oblea para dar origen a las celdas. Las celdas multicristalinas son

creadas a partir del proceso de solidificación del silicio en distintos moldes con forma de ladrillo, para luego cortarlos y dar origen a celdas con múltiples orientaciones de cristal. Las celdas de silicio policristalino son menos eficientes que las monocristalinas, llegando a un PCE entre 10 y 18%, sin embargo, el proceso de construcción es más eficiente, puesto que los costos y las pérdidas de material son menores. Dentro de este grupo también se encuentran las celdas de unión de GaAs III-V, que alcanzan una eficiencia muy alta, entre el 28 – 30%, pero el costo de producción es extremadamente alto. [31]

Además, otra tecnología que evolucionó junto a esta generación son las celdas de emisor pasivado y contacto posterior, o PERC (por su nombre en inglés), las cuales tienen una gran participación en el mercado actual de celdas fotovoltaicas. [32] Esta tecnología es en realidad un arreglo conveniente en la arquitectura de una celda que consiste en la adición de una capa de pasivación en el lado posterior de la estructura, promoviendo la reflexión interna de los rayos solares y la mantención de estos dentro del dispositivo, lo que permite aprovechar mejor la radiación electromagnética. Generalmente, el material utilizado para este arreglo es el óxido de aluminio (Al_2O_3). [31]

Pese a que las celdas de silicio presentan una alta eficiencia, materias primas accesibles y una operación amigable con el medioambiente, el proceso productivo presenta enormes consecuencias. El requerimiento de grandes cantidades de energía calórica, agua y compuestos químicos tóxicos hacen fuerte impacto en términos ambientales, sin embargo, al ser la tecnología más ocupada en la industria fotovoltaica, es difícil de mitigar. Esto significa un serio problema de las celdas de silicio que se ha intentado solucionar por medio de la investigación de otros materiales para dispositivos fotovoltaicos.[35]–[39]

Celdas de Película Delgada: Este tipo de celda son conocidas también como la "segunda generación" de dispositivos fotovoltaicos. Consisten principalmente en celdas construidas con telurio de cadmio (CdTe), Cu (In,Ga)Se_2 (celdas CIGS) y silicio.[31] La particularidad de estas celdas es que son capaces de funcionar con películas muy delgadas de estos materiales, aproximadamente 10 [μm] de grosor de la capa absorbente de luz, reduciendo considerablemente los costos de producción. Además, ofrecen la posibilidad de trabajar con

sustratos más delgados y económicos, dando origen a las celdas flexibles, cuyos usos son mucho van desde la aplicación doméstica a la espacial. [31], [40]

Las celdas CIGS aparecieron como una alternativa para dejar la dependencia de materiales semiconductores en la industria fotovoltaica. En laboratorio, estas celdas han alcanzado un PCE de 23,4%, sin embargo, su producción industrial es capaz de producir dispositivos con un PCE de sólo un 20% y una vida útil de 12 años. Por otro lado, las celdas CdTe también cumplen con el objetivo de reducir la dependencia de semiconductores, alcanzando un PCE de 15 – 16% y una vida útil de 20 años en configuraciones de unión simple, alcanzando récords de 22,1% en PCE, sin embargo, el uso del cadmio las convierte en dispositivos extremadamente tóxicos. [31], [40]

Finalmente, es importante destacar dentro de esta categoría el uso del silicio de cristales amorfos, el cual es utilizado para hacer los dispositivos más populares de segunda generación. Las celdas de silicio amorfo poseen una menor eficiencia en comparación a las otras mencionadas, con un PCE entre 5 – 12 %, sin embargo, posee grandes ventajas como costos de producción más bajos, materiales de construcción no tóxicos, y una enorme disponibilidad de materias primas. La vida útil de esto dispositivos comerciales es de 15 años en general. [28], [31]

Tecnologías Emergentes: Llamados así por su escaza participación en el mercado, estos dispositivos corresponden a la "tercera generación" de la tecnología fotovoltaica. Existe una gran variedad de materiales utilizados dentro de esta categoría, entre los cuales se encuentran las DSSC, las celdas de perovskita (PSC en inglés), celdas de materiales orgánicos (OSC en inglés), celdas de puntos cuánticos (QD en inglés) y celdas de unión múltiple. [31] La mayor cantidad de estudios de los últimos años se han concentrado en el desarrollo de celdas de esta generación, obteniendo crecimientos notablemente rápidos para algunos dispositivos. [1], [28], [30], [31], [41]

Las DSSCs poseen un gran rango de PCE, entre un 5 – 20 % de conversión a costos bajos, un ángulo de operación más alto y menor temperatura interna alcanzada en el dispositivo, pero utilizando materiales venenosos y volátiles con una menor estabilidad térmica. [31] Las OSCs

se caracterizan por presentar numerosas ventajas en aplicaciones relacionadas con la energía solar. Su potencial radica en las características únicas de los semiconductores orgánicos, como su capacidad de ser procesados en solución, su bajo peso, su costo reducido, su flexibilidad, semitransparencia y su aplicabilidad en procesos de fabricación a gran escala. Estas celdas han alcanzado un PCE experimental de 14%, presentando valores comerciales entre un 9 – 11 % y siendo la baja eficiencia su única desventaja. [28], [31]

Las celdas QDs son también conocidas como celdas nanocristalinas y se refieren al proceso de fabricación a partir de un crecimiento epitaxial de un cristal sobre los sustratos, alcanzando PCEs comerciales entre un 11 – 17%.[31] El estudio de estas celdas ha crecido enormemente junto al uso de compuestos haluros metálicos conocidos como perovskita, material que es el foco de este trabajo y del cual se especificará más adelante.

Por último, dentro de esta generación aparecen las celdas de unión múltiple, las cuales funcionan bajo el concepto de la utilización de materiales de distinta absorbancia de longitud de onda del espectro de la luz. La combinación y arreglos específicos, junto al uso de distintos materiales semiconductores de diferente absorbancia, ha logrado alcanzar un PCE estándar del 36% y experimentos reportan un récord de 47,6%. Pese a su alta eficiencia, los costos de manufactura son demasiado altos para competir en la producción a gran escala. [31]

Celdas Inorgánicas Híbridas: Conocida como la “cuarta generación”, son el tipo de tecnología más reciente dentro de las mencionadas anteriormente. Estos dispositivos combinan las características de bajo costo y flexibilidad de las películas delgadas de polímeros con la alta estabilidad proporcionada por nanoestructuras orgánicas. Materiales de construcción comunes para las celdas inorgánicas híbridas son óxidos de metales semiconductores, nanotubos de carbono, grafito y compuestos y mezclas derivadas. La participación del grafito es especialmente destacable en el funcionamiento de los dispositivos solares, ya que sus propiedades únicas como excelente transportador de cargas, ordenamiento estructural plano, baja resistividad y transmitancia, lo posicionan como una opción preferida ante otros materiales en la construcción de celdas solares, especialmente ante el oro y la plata debido a la diferencia en costos de producción. [28], [31], [42], [43] Además, el grafito presenta una serie de ventajas muy útiles para la construcción de dispositivos con materiales sensibles al ambiente, como las

perovskitas. La aplicación de una capa de grafito es capaz de proteger el resto de las capas de las condiciones ambientales y aumentar la vida útil del dispositivo, especialmente de la humedad, ya que es un material hidrofóbico. [31], [42], [43] En combinación con distintos materiales, se han logrado PCEs entre un 10 – 20,3 %, siendo este último valor el correspondiente a la combinación con perovskitas, las cuales incrementan enormemente su estabilidad. [31]

1.4.2 Celdas Fotovoltaicas de Perovskita (PSC)

Las PSCs han presentado avances notorios y rápidos en los últimos años, pasando a tener un PCE de un 3% en 2009 a más de un 25% en el 2020, convirtiéndose en la tecnología fotovoltaica de mayor avance el último período. [1], [30], [31], [44] En esencia, las perovskitas corresponden a una familia de minerales cristalinos con una estructura química general o equivalente del tipo ABX_3, en donde A y B representan dos cationes de distinto tamaño y estado de oxidación y X representa un anión halógeno. La estructura está formada por una red cuboctaédrica BX_6 conectadas por las esquinas y rodeando al átomo de A presente, tal como muestra la **Figura 8**. Además, la estructura de la perovskita puede variar, siendo las más comunes la tetragonal, ortorrómbica y la cúbica. [44], [45]

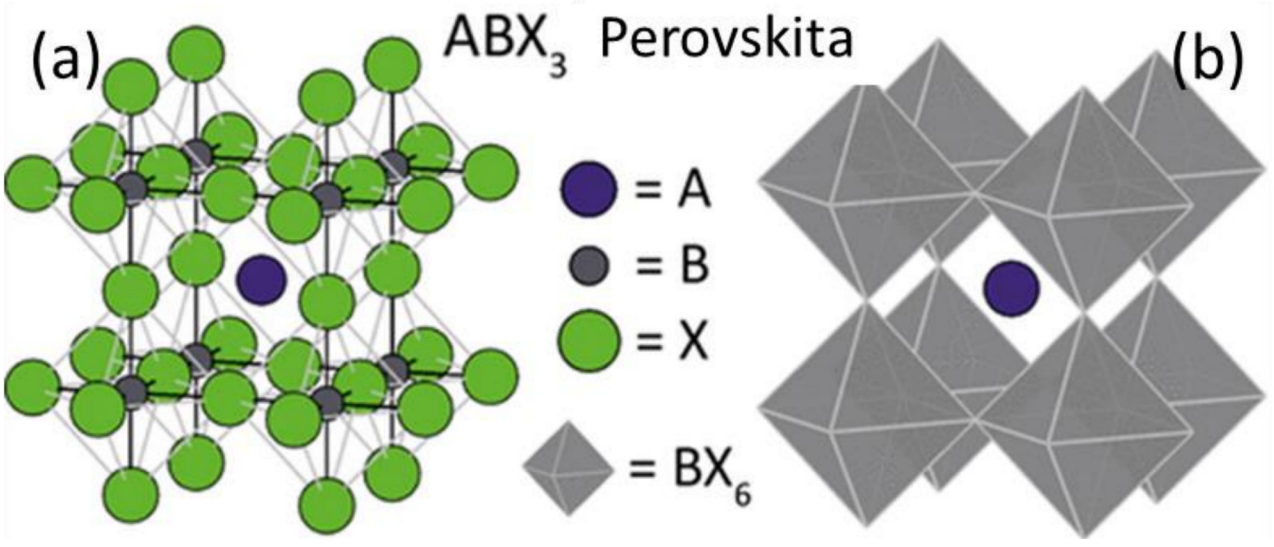


Figura 8. Estructura Cristalina General de las Perovskitas. (a) Forma Atómica de la Estructura (b) Forma en Redes Cristalinas de la Estructura. Obtenido de [45]

Existen variaciones en la estequiometría ABX_3 que pueden ocurrir cuando los sitios de cationes A y B se vacían parcial o totalmente (perovskitas con orden de vacantes) o cuando son reemplazados por una combinación de otros cationes (con diferentes valencias, pero con un equilibrio de carga neutro), lo que resulta en la formación de perovskitas dobles o cuádruples. La perovskita $SrTiO_3$ (tausonita) es generalmente considerada como el ejemplo principal (aristotipo) de la estructura cristalina de esta familia, aunque existen otras como $CsPbBr_3$. Sin embargo, la mayoría de las perovskitas presentan una simetría reducida (hettotipos) en comparación con el aristotipo, debido a distorsiones en la red cristalina, octaedros distorsionados, cationes ordenados, vacantes o la presencia de cationes orgánicos o grupos inorgánicos. [45] La **Figura 9** es muestra de las posibles variaciones que pueden encontrarse para las perovskitas de haluros metálicos.

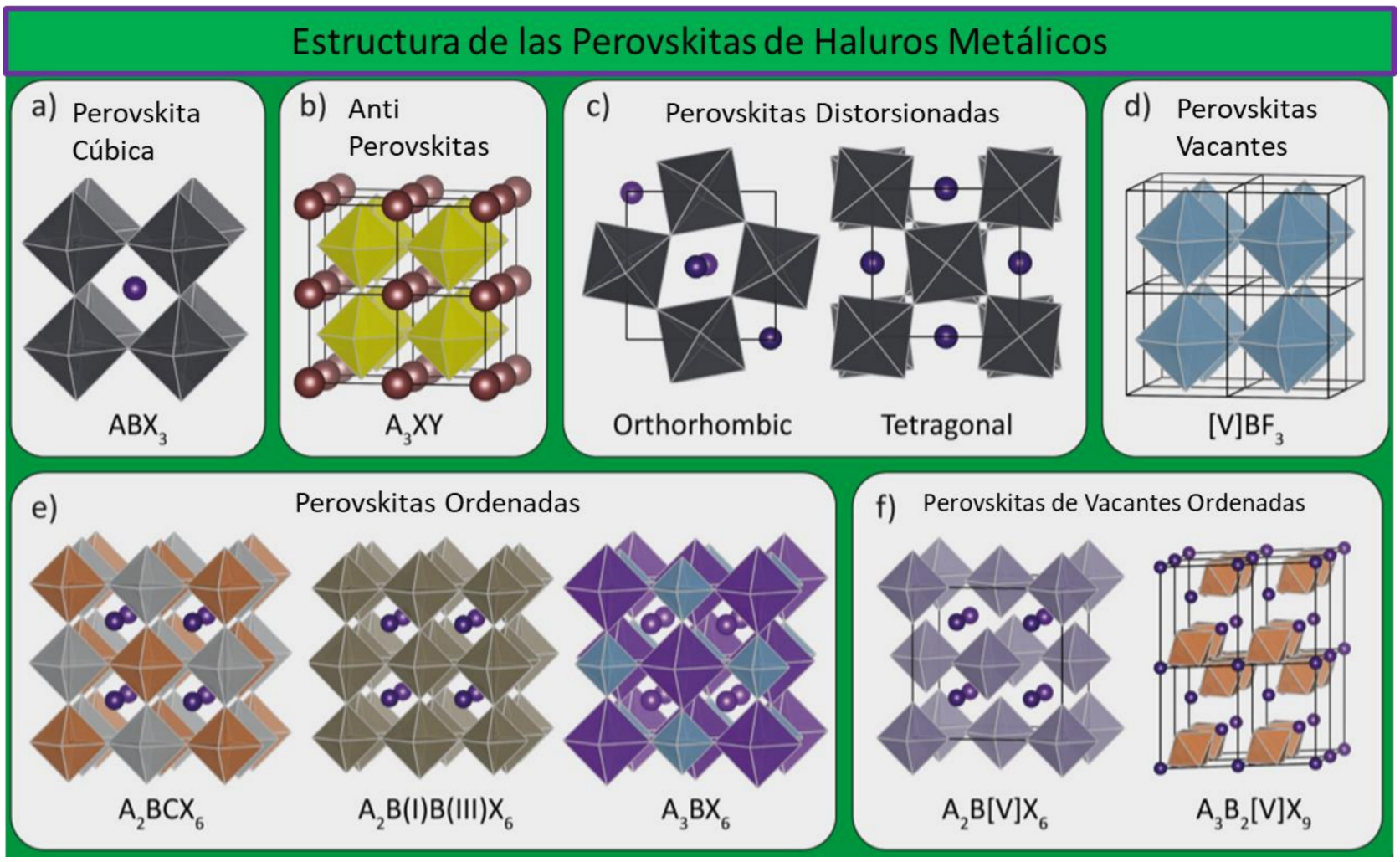


Figura 9. Tipos de Perovskitas de Haluros Metálicos. (a) Estructura Estándar (b) Estructura Inversa (c) Estructura con Deformidad de Ángulo de Redes Cristalinas (d) Estructura de Vacante de Catión (e) Estructura con Distintos Cationes y Estado de Oxidación (f) Estructura de Distintos Cationes con Vacante de Catión. Obtenido de [45]

Las perovskitas son materiales de muchas propiedades curiosas, como la superconductividad, magnetorresistencia y la ambipolaridad para el transporte de cargas. Las características únicas de las perovskitas les permite separar con mayor efectividad los pares electrón-hueco generados, ya que las cargas tienden a ir hacia direcciones opuestas evitando el problema de la recombinación, presente en muchos otros dispositivos solares. [44], [45]

En la actualidad, se han estudiado una vasta cantidad de materiales para la construcción de PSCs y se han obtenido dispositivos funcionales con una gran variedad de combinaciones diferentes, lo cual también ha representado una cualidad de esta familia de minerales, ya que ofrece múltiples alternativa de estudio. Pese a la gran versatilidad en la selección de materiales, casi todos los dispositivos de perovskita presentan un gran inconveniente en el tiempo de vida útil, el cual ha demostrado ser desde apenas unos minutos hasta soportar 10.000 horas sin perder sus propiedades fotovoltaicas. Esto sucede porque las perovskitas son extremadamente sensibles a la humedad, perdiendo la estructura característica que les otorga sus propiedades. [42]–[50] Frente a esto, utilizar carbono, específicamente grafito, ha resultado ser una gran mejora para este problema, puesto que sus propiedades hidrofóbicas protegen el interior del dispositivo de las condiciones ambientales, como se ha mencionado anteriormente. Los mejores resultados de estabilidad funcionan con capas mesoporosas a través de las cuales se infiltra una solución de perovskita, utilizando carbono mesoporoso como electrodo en el tope de la estructura. [42]–[45], [47]–[51] En particular, este trabajo se concentra en las celdas solares de perovskita con estructura de apilamiento triple mesoporoso (m-CPSC en inglés).

La arquitectura de los dispositivos m-CPSCs consiste en un apilamiento de capas mesoporosas de óxidos de metales semiconductores y de carbono conductor sobre el sustrato de vidrio, para finalmente infiltrar los precursores de perovskita en solución a través de la estructura mesoporosa y calentarla, evaporando los solventes y formando el cristal con la estructura requerida, como se muestra en la **Figura 10**. [42]–[44], [47], [49]–[52] La estructura parte por el depósito de una delgada capa compacta de TiO_2 sobre el substrato de vidrio conductor, generalmente hecho de óxido de estaño dopado con flúor ($F:SnO_2$ o FTO), la cual actúa como una barrera de huecos de caga positiva. Como alternativa, algunas celdas utilizan un sustrato

hecho de óxido de estaño dopado con Indio (I:SnO_2 o ITO). Luego se continua con el depósito de las capas mesoporosas; una capa de TiO_2, que funciona como capa transportadora de electrones hacia el substrato; una capa de ZrO_2, que sirve como aislante entre las capas transportadoras de electrones y el electrodo superior; terminando con el depósito de carbono (grafito), hacia donde irán los huecos separados y transportados desde la capa compacta de TiO_2. Cada etapa de depósito está acompañada de un proceso de calentamiento térmico para evaporar los solventes que acompañan a los materiales y fijar las capas en su posición. Finalmente, se termina con la infiltración de perovskita, la cual debe hacerse en solución para fluir a través de los poros de la estructura mesoporosa y luego ser calentada para evaporar los solventes y formar establemente el cristal. La perovskita infiltrada es el material fotoactivo del dispositivo y se encarga de guiar los electrones y huecos hacia la capa compacta de TiO_2 y hacia la capa de carbono, respectivamente. [42], [44], [50]

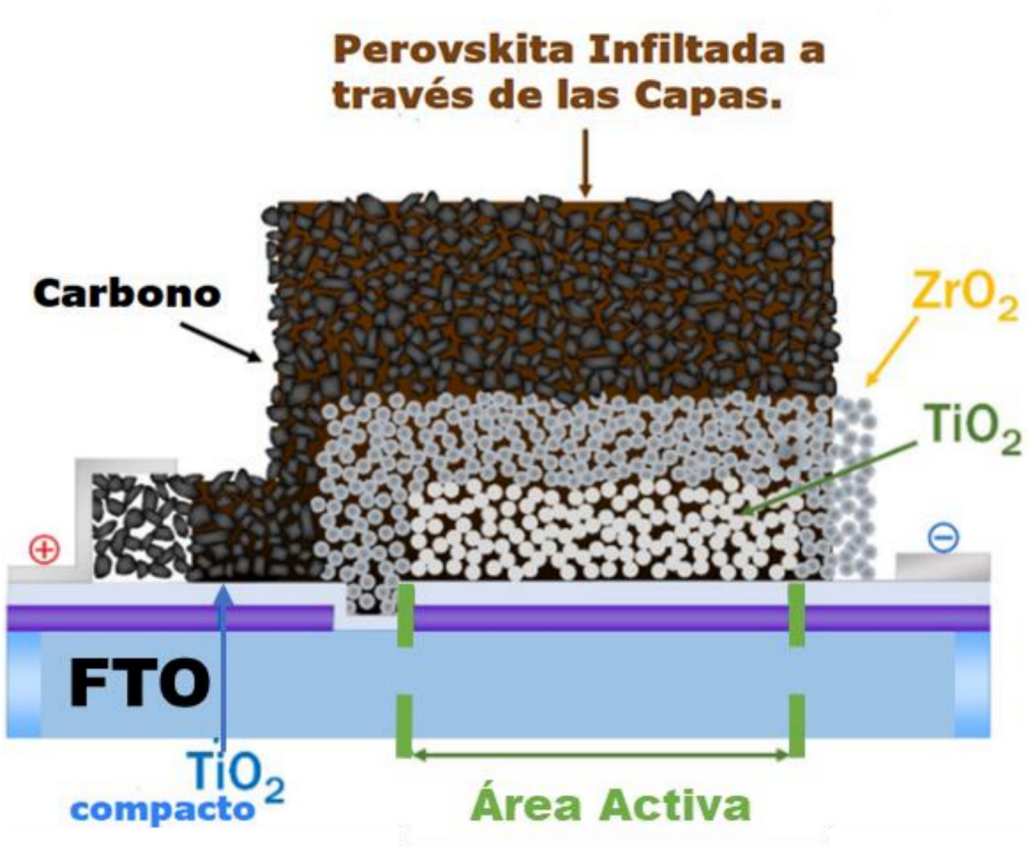


Figura 10. Esquema Estructural de una m-CPSC. Corte Transversal y mirada Interna del dispositivo. Obtenido y Modificado de [44].

Los materiales anteriormente mencionados son los más comunes para construir las m-CPSC, debido a que cada uno de ellos cumple una función en particular que ha predominado en la investigación tecnológica y el desarrollo particular de este tipo de arquitectura. Se ha comprobado que la capa compacta de TiO_2 tiene gran efecto en el rendimiento de las celdas, por lo que la forma en que se deposita puede ser determinante para el PCE obtenido en una medición de eficiencia. [44] En cuanto a la capa mesoporosa de este material, las capas transportadoras de electrones suelen ser de 0,4 – 1 [μm] de espesor, con un diámetro de partícula óptimo de 20 – 30 [nm]. pese a que se ha estudiado mucho en la literatura como material de construcción, quedan otros aspectos importantes que estudiar, como la morfología, la composición química o el dopaje con otros compuestos, siendo de las pocas intervenciones reportadas la adición de materiales conversores de luminiscencia y tratamientos con químicos orgánicos capaces de cambiar convenientemente el band-gap del TiO_2. Fuera de esto, el TiO_2 mesoporoso se ha mantenido como una constante en el desarrollo de las m-CPSC. Además, el TiO_2 es un material termoestable cuyo band-gap no se ve alterado por los cambios de temperaturas que requiere el proceso de construcción, razón por la cual es el principal compuesto utilizado para cumplir la función de capa transportadora de electrones, sin embargo, tampoco existe una base de comparación amplia con otros materiales, algunos utilizados para hacer esta misma capa en dispositivos de arquitectura diferente. Considerando esto, hasta que existan más hallazgos y estudios, el TiO_2 será un material indispensable ante cualquier desarrollo o proyecto de construcción de m-CPSCs. [44], [49]

La aislación entre la capa transportadora de electrones y el electrodo de tope es esencial para el funcionamiento de las m-CPSCs, puesto que reduce la recombinación producida en el par electrón – hueco una vez que se separan. En el desarrollo de esta capa han sido explorados materiales como el Al_2O_3, el SiO_2 y el ZrO_2, siendo este último el más estudiado. [44] La capa de aislación debe ser lo suficientemente gruesa como para evitar que las capas de transporte electrónico y del electrodo de tope se toquen, pero a la vez debe ser lo suficientemente delgada como para no atenuar el flujo de cargas y permitir que la infiltración de la perovskita llegue hasta la capa más profunda. Las configuraciones con mejores resultados en la variación del grosor de la capa de aislación presentan una capa de ZrO_2 entre 2 a 5 [μm], sin embargo, el grosor mejora la eficiencia sólo si la infiltración de perovskita ha sido bien ejecutada. Cabe

destacar que esto ocurre cuando se utiliza la arquitectura de TiO_2, ZrO_2, carbono y AVA-$MAPbI_3$ (Ioduro de Plomo de Metilamonio en Ácido Aminovalérico) como perovskita infiltrada, la cual ha presentado los mejores resultados de estabilidad hasta el momento. Como alternativa, algunas fórmulas de construcción utilizan $FAPbI_3$ (Ioduro de Plomo de Formamidina), sin embargo, los mejores resultados han sido con uso de $MAPbI_3$. [44] La mejor elección del material aislante depende de la formulación de la perovskita que es infiltrada, en particular, para AVA-$MAPbI_3$ se han hecho estudios comparativos que demuestran que el ZrO_2 supera al Al_2O_3 en cuanto a eficiencia, presentando una tendencia favorable en el uso de ZrO_2 en combinación con TiO_2. [44]

En cuanto al electrodo superior que consiste en, principalmente, una mezcla de carbono negro y grafito, sus funciones son aportar una propiedad mesoporosa y conductiva al material de construcción, respectivamente. Además, como ya se ha comentado, el carbono coopera con la estabilidad del dispositivo. La proporción de carbono y grafito dentro de la formulación del material y el grosor de la capa depositada, afectan la infiltración y la conductividad del electrodo, siendo esta última un trabajo arduo e importante. Para minimizar las resistencias en series, la conductividad debe ser lo más alta posible, pero comúnmente las propiedades que aumentan la conductividad, como mayor cantidad de grafito en el material o el grosor de la capa depositada, impiden obtener una infiltración eficaz. [42], [44] La cantidad óptima de grafito en las formulaciones grafito:carbono es de 20% en peso, mientras que el grosor óptimo de la capa está entre los 8 – 9 [μm], aunque existen estudios que reportan una mejor eficiencia a más de 10 [μm]. [42], [44], [49] Diversos estudios se han hecho para mejorar la capa del electrodo superior, principalmente dirigidos a mejorar la selectividad de huecos que tiene mediante métodos químicos, como la adición de grupos C-OH y C=O durante la preparación de las materias primas, que ha mostrado poder elevar la función de trabajo de la capa de carbono desde 5.0 [eV] a 5.2 [eV], conllevando mejoras en la eficiencia de las celdas. La incorporación de nanotubos de carbono a la capa de carbono también ha demostrado tener mejoras en el rendimiento, siendo incluso capaz de combinarse con materiales tipo “p”, como el NiO, WO_3, MoO_3, CuS, Co_2O_3 y CuO, mejorando aún más la eficiencia de las celdas con capas de grosor mucho menor al utilizado generalmente. Estos materiales transportadores de huecos pueden ser incorporados incluso entre la película de aislación y el electrodo superior de carbono. [44]

Debido a que las m-CPSCs representan una gran oportunidad de obtener dispositivos fotovoltaicos a bajos costos de producción y con impactos medioambientales mínimos, en comparación a las celdas de silicio predominantes en el mercado, los estudios no sólo se han enfocado en mejorar la eficiencia, sino también en encontrar una forma de escalar las operaciones aplicadas, como la deposición de la pasta y la infiltración de la perovskita, a un volumen mucho mayor.

1.5 Técnicas de Deposición de Capas Delgadas e Infiltración de Perovskita

En la construcción de las m-CPSCs, los principales pasos que deben ser considerados son la deposición de las capas de óxidos semiconductores y la infiltración de la perovskita. Como se ha visto anteriormente, el grosor y forma de cada capa de la estructura y la infiltración efectiva de perovskita son fundamentales para el correcto funcionamiento del dispositivo. Para lograr esto, se han desarrollado diversas técnicas vistas a continuación.

Técnicas de Infiltración: Este paso es fundamental en el desempeño de una m-CPSCs, puesto que define la calidad de la película de perovskita en el dispositivo. En general, como la perovskita es un cristal, para poder depositarla de manera uniforme y fácil sobre el sustrato se utiliza una solución que contenga los halógenos, aniones y cationes necesarios para formar su estructura. Luego, al aplicar temperatura, los solventes se evaporan y la perovskita se conforma. [43]–[45], [47]–[50] Para llevar la solución al sustrato, se pueden utilizar diversos métodos, como la deposición por goteo (drop casting en inglés) en uno o dos pasos. Utilizando solventes como DMF, DMSO, GBL, DMAc, NMP, MAI o FAI se pueden disolver los precursores de la perovskita y crear una única solución que es luego depositada y tratada térmicamente sobre el sustrato. En la técnica de dos pasos, se puede utilizar uno de los solventes anteriores para depositar los precursores en dos tandas distintas, obteniendo mejores resultados en las películas formadas, pero teniendo defectos en la rugosidad de la película y el tamaño de partícula. [50]

Otros métodos de deposición menos comunes son la deposición por cristalización y el método de abducción de ioduro de plomo, los cuales consisten en abducir moléculas de precursores mediante la afinidad molecular y las reacciones químicas, respectivamente, generando así, junto

con un tratamiento térmico, los cristales de perovskita. Además, otros métodos utilizan vapor para unir los precursores de perovskita y depositarlos o son capaces imprimir capas de perovskita, sin embargo, estos métodos no son tan efectivos en las m-CPSCs, ya que la perovskita debe ser infiltrada a través de todas las películas y no sólo en una capa continua. [50]

Técnicas de Deposición de Capas Delgadas: Para lograr los grosores adecuados en cada capa, se necesita una tecnología que sea capaz de generar uniformidad en la formación de películas. Entre las categorías más utilizadas se encuentran las técnicas de impresión, debido a que presentan serie de ventajas que le permiten considerar una producción competente en el mercado. Las celdas solares imprimibles y, en general, la electrónica impresa, ofrecen técnicas de deposición de gran área rentables para dispositivos en una amplia variedad de sustratos sin importar su forma y estabilidad térmica. Se depositan tintas eléctricamente conductoras o semiconductoras (orgánicas, inorgánicas o híbridas) en el sustrato, creando dispositivos activos o pasivos como transistores de película delgada, condensadores, bobinas y resistencias. Por lo general, los materiales utilizados en la impresión de capas de dispositivos se hacen con compuestos orgánicos (tanto polímeros como moléculas pequeñas), pero no de manera exclusiva. Estas celdas son de bajo costo y además son escalables, llegando a formar parte de muchos de los procesos industriales actuales para celdas imprimibles, como la tecnología rollo a rollo (roll to roll). En esta categoría destacan dos grandes técnicas; la impresión por inyección de tinta (inkjet coating en inglés) y la serigrafía (screen printing en inglés). [50], [53]

La impresión por inyección de tinta es una técnica que tiene sus orígenes en la industria del periódico en papel y es una técnica rentable, fácil de implementar y altamente productiva, lo que la convierte en una opción idónea para la fabricación a gran escala de celdas solares m-CPSCs. Además, es compatible con el proceso de fabricación industrial roll to roll, lo que facilita su escalamiento. Esta técnica representa la versión digitalizada del proceso de impresión convencional, donde los patrones deseados son impresos por computadoras. Al ser un proceso sin contacto, no requiere un sustrato específico en cuanto a material o forma. Su principal ventaja radica en que permite crear patrones bajo demanda sin necesidad de utilizar máscaras, lo cual la hace económica y eficiente en el uso de materiales. Además, ofrece una alta resolución de impresión y brinda libertad de diseño. [50], [53]

La serigrafía es una técnica en dos dimensiones (2D) que permite imprimir patrones complejos y bien definidos. Consiste en utilizar una pantalla cerrada con ranuras abiertas que contienen una emulsión fotográfica prácticamente insoluble. La tinta se aplica en la parte superior de la pantalla y se utiliza una herramienta llamada rasero (squeegee en inglés) para deslizarla sobre toda el área de la pantalla. La presión del squeegee hace que la tinta pase a través de las ranuras abiertas y se deposite en un sustrato, como muestra la **Figura 11**. La pantalla se coloca a una distancia específica por encima del sustrato, determinando, junto a la velocidad de impresión y presión del squeegee, el grosor de la película impresa. [53], [54] En este proceso, la malla adopta una forma cilíndrica y el squeegee se coloca dentro de la pantalla giratoria. La pantalla gira al mismo ritmo que el sustrato, y en cada ciclo se realiza una impresión completa utilizando el rasero estacionario. La serigrafía rotativa permite alcanzar velocidades de impresión hasta de 180 [m/min], mientras que la serigrafía plana alcanza entre 0-35 [m/min]. [53]

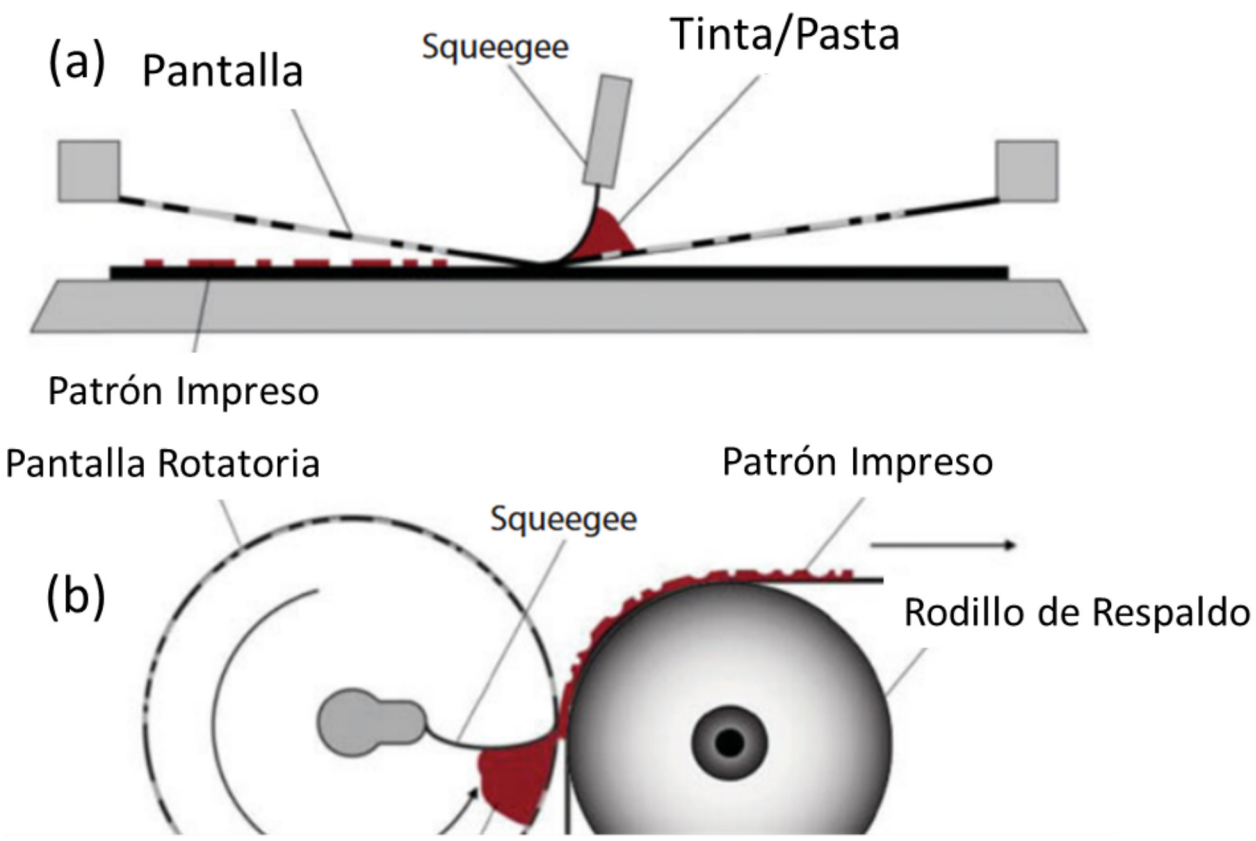


Figura 11. Esquema de Impresión por Serigrafía (a) Sustrato Plano Rígido (b) Sustrato Flexible. Obtenido de [53].

Esta técnica ofrece una gran ventaja al ser completamente compatible con la producción en rollo a rollo y es ampliamente utilizada a nivel de laboratorio para realizar las celdas m-CPSCs

que mejores resultados han presentado, convirtiéndola en una opción interesante de estudiar para hacer un proceso de escalamiento a nivel industrial. [1], [44], [49]–[51], [53]

2 Definición del Problema y Objetivos

Como se ha explicado anteriormente, el crecimientos de la población y el desarrollo industrial, las naciones necesitan cada vez más abastecimiento energético. A este problema se añade la actual crisis climática por la que está pasando el planeta, la cual ha representado uno de los principales problemas de la humanidad en el último siglo Estos motivos hacen interesante el estudio sobre las celdas solares, las cuales son una forma de generar energía limpia. La tecnología de m-CPSCs se alza como un método innovador y ambientalmente más amigable que la celdas de silicio, sin embargo, su escalamiento y durabilidad sigue dejando espacio para hacer investigaciones y mejoras.

En el Laboratorio de Electroquímica y Nanociencias (LEN) del Instituto de Química y Bioquímica, perteneciente a la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valparaíso, se dispone de un equipo de serigrafía semi automático, el cual puede ser utilizado para depositar capas delgadas sobre sustratos en una arquitectura de m-CPSC. Sin embargo, las condiciones de uso de la serigrafiadora yacen incógnitas, por lo que, antes de ser utilizada, necesitó pasar por una puesta en marcha mediante el ensayo de distintas pruebas de impresión y construcción de m-CPSCs.

La hipótesis de este trabajo es que la preparación y los ajustes de la serigrafiadora automática ATMA, modelo AT-25PA, tienen como resultado la puesta en marcha del equipo para construir celdas m-CPSCs capaces de generar energía eléctrica, es decir, funcionales. Como resultado del estudio realizado para comprobar la respuesta a esta afirmación, se pudo proponer una idea fundamentada sobre su aplicación a distintos niveles de producción.

Para concretar lo anterior, el objetivo fue poner a prueba el equipo y ejecutar su puesta en marcha para producir las celdas solares, cumpliendo con las siguientes metas:

- Generar un ambiente adecuado en la sala de trabajo en donde se manipula el equipo.
- Preparar el equipo según el manual del proveedor, asegurando que las conexiones estén bien ubicadas y sean seguras.
- Calibrar las condiciones de operación mediante la determinación y manipulación de los parámetros de operación que presenta el equipo.
- Hacer la elección de un tipo de arquitectura que pueda ser construida en el laboratorio para probar la eficacia del proceso de serigrafía.
- Caracterizar las muestras construidas con el equipo de serigrafía a partir de la definición de sus parámetros fotovoltaicos, como el PCE, j_{SC}, V_{OC} y FF.
- Caracterizar las muestras construidas con técnicas complementarias como análisis por Microscopio de Barrido Electrónico (FE-SEM, por sus siglas en inglés) y análisis cristalográfico por Difractogramas de Rayos X (XRD). Esto permitirá evaluar la calidad de la infiltración con los precursores del material fotovoltaico (CsPbBr3)
- Comparar los resultados obtenidos con el estado del arte actual.
- Investigar el mercado nacional e internacional para tener una referencia clara del comercio de dispositivos de energía solar.
- Determinar un mercado objetivo y la tecnología de mayor presencia en él para fijarla como punto de comparación y posible competencia.
- Calcular la productividad del equipo en condiciones de laboratorio estándar.
- Diseñar una propuesta de proceso productivo tomando como base de cálculo un número mucho mayor a la productividad del laboratorio.
- Calcular y comparar los costos de aplicación de ambas condiciones productivas, principalmente a través un factor de costo por unidad producida, expresado en unidades [USD/W].
- Evaluar la efectividad de la propuesta ante el punto de comparación, en términos de factor de costo por unidad [USD/W].

3 Fundamentos Teóricos

En esta sección se explican los fundamentos sobre los cuales se realizan los experimentos. Para comprender el desarrollo de esta memoria, es necesario conocer de antemano ciertos conceptos relevantes. Los principales conceptos por revisar son el efecto fotovoltaico, el band gap, los parámetros fotovoltaicos y los principios de técnicas de medición.

3.1 Efecto Fotovoltaico y Band Gap.

Como ya se mencionó en los antecedentes, la radiación proveniente del sol puede ser utilizada por dispositivos capaces de transformarla en energía eléctrica. En la **Figura 12** se muestra la radiación alcanzada por distintos puntos entre el sol y la superficie terrestre. La superficie del sol está a cerca de 5900 [K], lo que produce una radiación que llega al punto externo de la atmósfera terrestre con una potencia de 1373 [W/m^2], es decir, atravesando 0 veces el espesor de la atmósfera (AM0). Debido a que parte de la energía es absorbida por los gases, se establece la radiación solar estándar en la superficie terráquea para la medida de dispositivos fotovoltaicos, utilizando un ángulo solar de 48,2°. El ángulo de la luz atraviesa una masa de aire igual 1,5 veces el espesor de la atmósfera (AM1,5) y en este punto se alcanzan los 1000 [W/m^2] de potencia. Se puede apreciar que la mayor cantidad de radiación incidente al planeta corresponde al espectro visible. [55], [56]

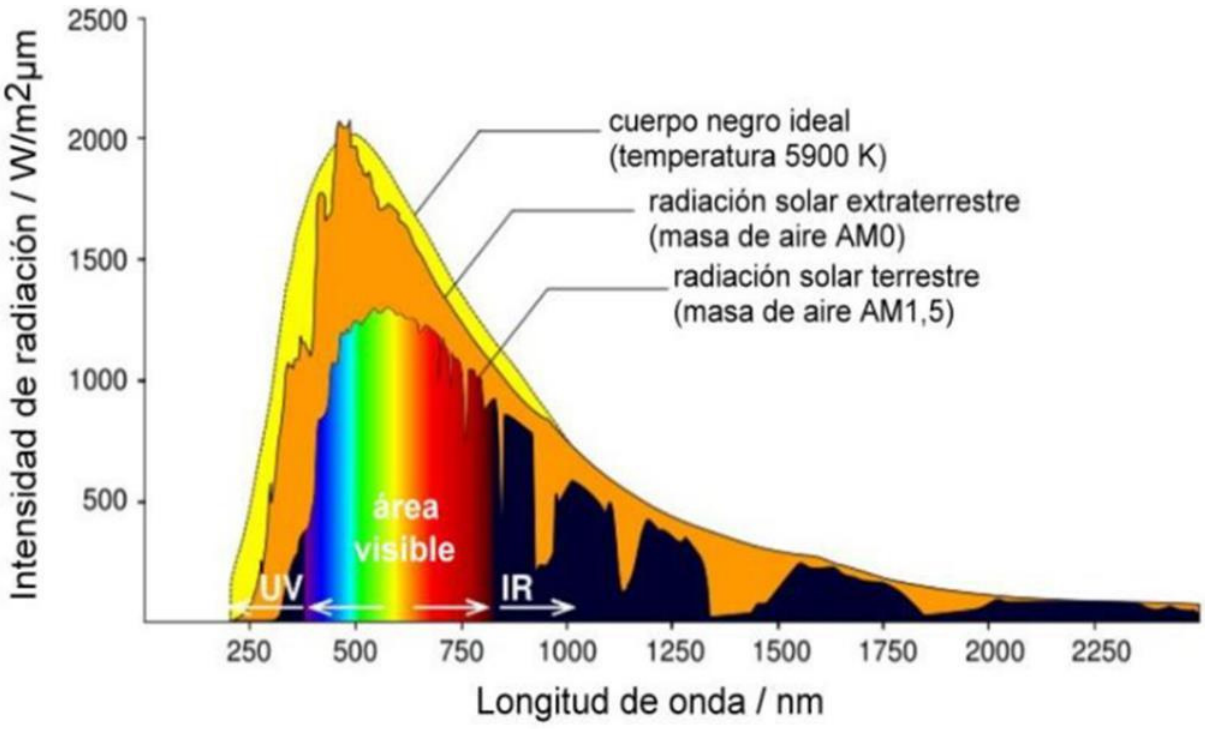


Figura 12. Gráfico de Intensidad de Radiación en función de la Longitud de Onda de la luz incidente en la tierra. Obtenido de [56]

El funcionamiento de estos dispositivos solares se debe al efecto fotovoltaico, que ocurre en ciertos materiales que pueden reaccionar ante fotones incidentes y generar fuerzas electromotrices. Si, además, estos materiales forman parte de un circuito determinado, estas fuerzas son capaces de generar una fotocorriente o fotovoltaje, dependiendo de las características del circuito. Es gracias a este efecto que las celdas solares son capaces de funcionar y ser utilizadas como fuente de electricidad ante la radiación del sol. [55], [56]

La explicación a este fenómeno puede darse a través de la teoría de las bandas, la cual establece que los electrones son los involucrados en los enlaces, además de ser las entidades con carga transportadas entre los átomos. Estos electrones forman una red y generan un conjunto de niveles de energía accesibles, conocidos como bandas electrónicas. A temperaturas muy bajas, cerca del cero absoluto, los electrones de valencia llenan la banda de energía más baja, llamada banda de valencia (BV). A los niveles de energía superiores que no están ocupados por electrones se les llama banda de conducción (BC). La diferencia de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción se conoce como band gap (o banda prohibida), cuyo símbolo es E_g. El band gap determina la capacidad de absorción de luz del material. [56] La **Figura 13** representa las estructuras de bandas características de los distintos tipos de materiales, según su conductividad.

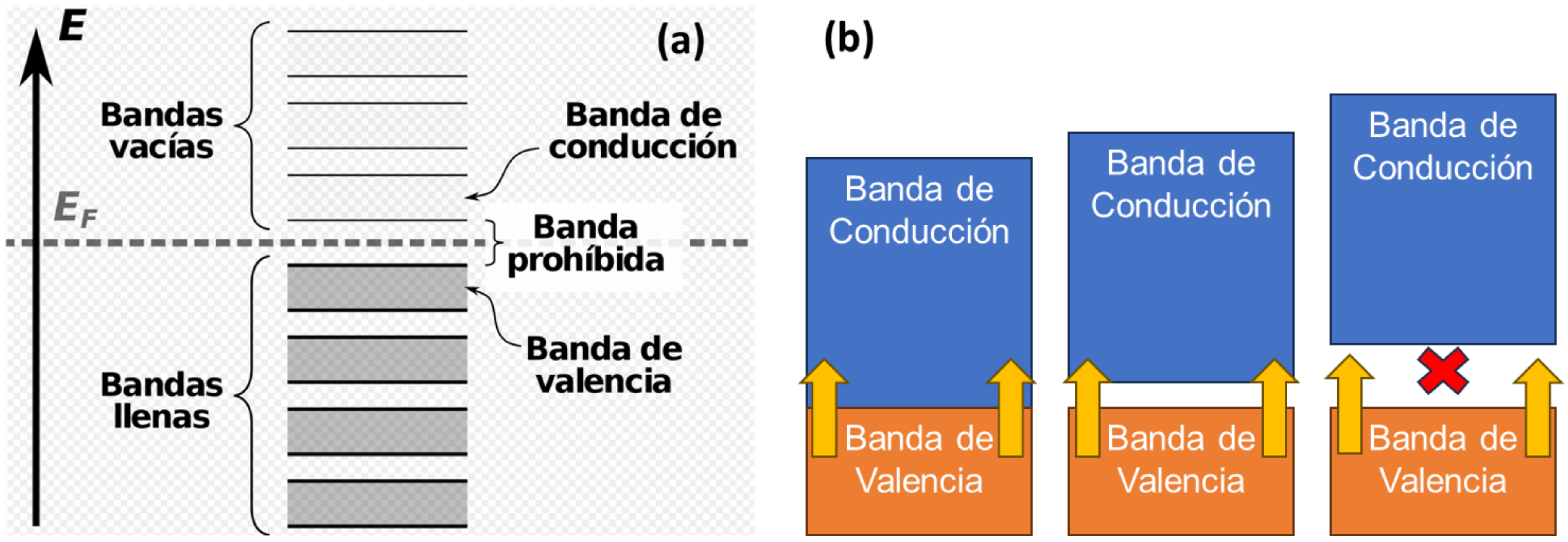


Figura 13. Esquemas de Bandas Prohibidas. (a) Estructura de bandas para un material semiconductor, obtenido de [57] (b) Estructura de bandas para un material conductor, semiconductor y aislante.

Cuando un material interactúa con la luz, los electrones aumentan su nivel de energía (excitación) de la BV a la BC. Dado que la radiación solar que alcanza la superficie de la Tierra abarca sólo una parte específica del espectro electromagnético (UV, visible e infrarrojo cercano), es esencial utilizar materiales con un band gap adecuado para aprovechar al máximo esta región del espectro, en términos energéticos. El proceso más ampliamente utilizado implica el uso de un material que absorbe la luz, a partir del cual se producen 4 eventos; la absorción, por parte del material fotoactivo; la generación de portadores de carga, en donde aparecen los pares electrón-hueco; la separación de los portadores de carga; y finalmente la colección de estos portadores, mediante contactos externos como soldaduras de aleación de estaño. La separación puede ocurrir debido a efectos termodinámicos, como una diferencia en el potencial químico o en la función de trabajo, y/o debido a efectos cinéticos. [55], [56]

A pesar de que las perovskitas son un tipo de material con excelentes propiedades para absorber la luz solar, como se comenta en los antecedentes, su implementación en celdas solares requiere de capas selectivas de electrones (ESL) y de huecos (HSL), materiales tipo n y p, respectivamente. Para lograr una extracción de carga eficiente, es crucial que las bandas de las diferentes capas estén alineadas de manera adecuada. En el caso del ESL, la banda de conducción debe estar situada a niveles de energía más bajos que la banda de conducción de la

perovskita utilizada, de manera que las cargas negativas se muevan hacia esa dirección. Por otro lado, en el HSL, la banda de valencia debe encontrarse a niveles de energía más altos que la banda de valencia de la perovskita, guiando los huecos hacia la otra dirección. En el caso de los materiales conductores, el band gap es mínimo, mientras que los aislantes poseen un band gap extremadamente alto. Esto hace necesaria la incorporación de materiales semiconductores para la construcción de los dispositivos, pues la diferencia entre sus bandas permite un acople conveniente para aprovechar el efecto fotovoltaico. [31], [42], [55], [56]

En la **Figura 14** se presentan los diagramas de bandas de distintas configuraciones de m-CPSCs, utilizando las perovskitas tipo $MAPbI_3$ y $FAPBI_3$.

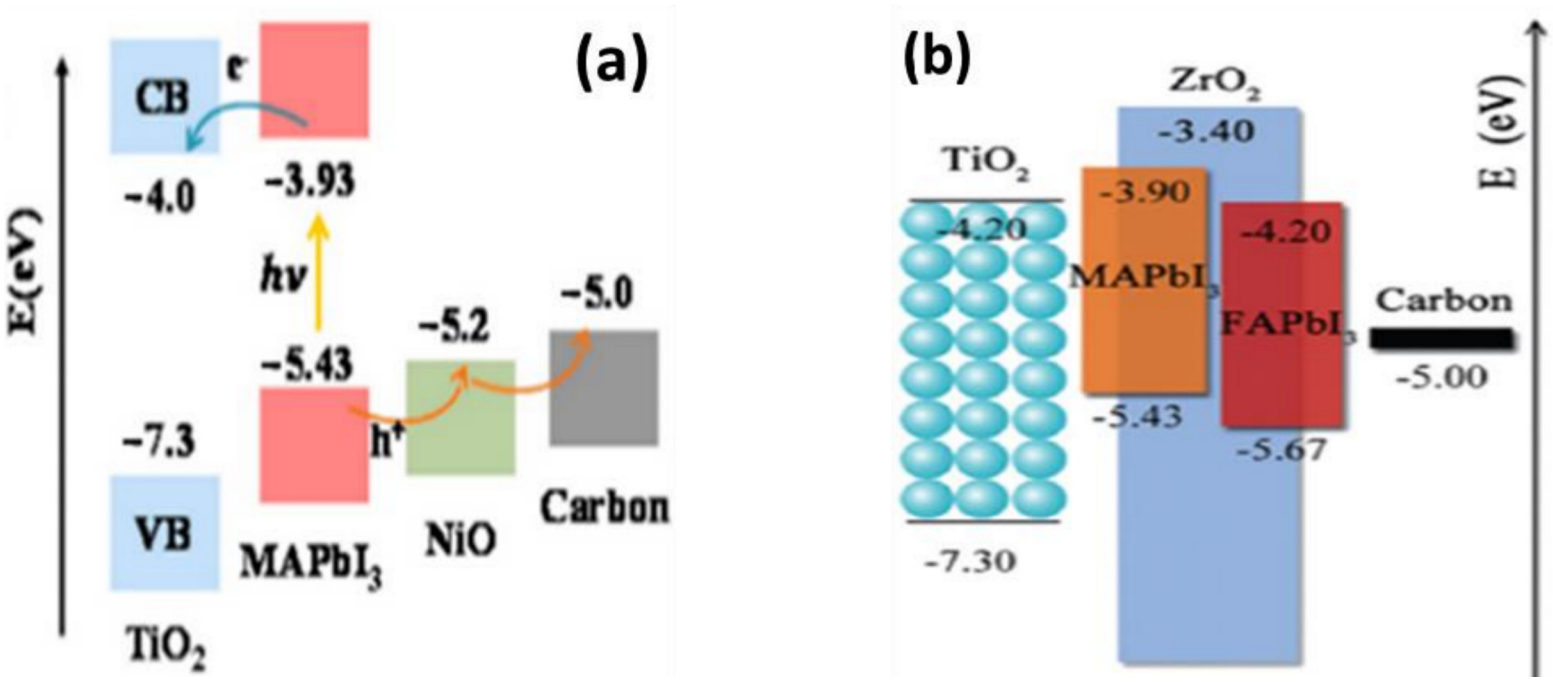


Figura 14. Diagramas de Bandas de m-CPSCs. (a) Se utiliza NiO como aislante entre el electrodo de carbono y la capa mesoporosa de titania. En esta figura se muestra cómo los pares electrón-hueco fluyen hacia direcciones distintas. (b) Se utiliza ZrO2 como aislante y se compara entre perovskita $MAPbI_3$ y $FAPbI_3$. Obtenido de [31], [42]

El band gap deseado de un material semiconductor debe estar entre los 1,1 y 1,7 [eV]. El band gap de las configuraciones de perovskitas mostradas en la **Figura 14** son de, aproximadamente, 1,5 [eV]. El carbono con grafito posee una función trabajo de -5,0 [eV], cercano al oro, mientras que la función trabajo del FTO está en los -4,4 [eV]. Estos dos materiales son conductores, por lo que el band gap que presentan es casi nulo. La circonia es un material inactivo utilizado como

aislante, desde el punto de vista electrónico, esto está relacionado a su considerablemente alto band gap, visto en la imagen (b) de la **Figura 14**. En el caso de las celdas de perovskita construidas con carbono, el material tipo-p es reemplazado, dejando la arquitectura sin un HTL. Esto es beneficioso porque se ahorra en materiales de construcción y gracias a la naturaleza hidrófoba del carbono, se protege la parte interna de los dispositivos de factores ambientales, como la humedad. [31], [42], [51]

3.2 Parámetros Fotovoltaicos

Dentro del funcionamiento de las celdas solares, existen una serie de parámetros comunes que sirven como punto de comparación y también como estandarización del nivel de sus propiedades. Las características que definen a estos dispositivos son la eficiencia de conversión de poder (PCE, por sus siglas en inglés al igual que posteriores), densidad de corriente de corto circuito (j_{sc}), voltaje de circuito abierto (V_{OC}), corriente máxima (j_{max}), voltaje máximo (V_{max}) y factor de llenado (FF). [55], [56]

El V_{OC} es el voltaje alcanzado cuando la densidad de corriente es nula entre las terminales del dispositivo, razón por la que se le llama “circuito abierto” (open circuit en inglés). Por otro lado, cuando el voltaje entre las terminales del dispositivo es 0, la densidad de corriente que transcurre a través de ellos es la j_{SC}, “corriente de corto circuito” (short-circuit en inglés). El FF es la relación entre la potencia máxima obtenida en la medición de los parámetros fotovoltaicos de una celda, V_{max} y j_{max}, y la potencia, calculada con el V_{OC} y el j_{SC}, como se muestra en la ecuación **(1)**. La relación entre la corriente, el voltaje y los parámetros fotovoltaicos de un dispositivo puede verse en la **Figura 15**. El cálculo de la eficiencia de conversión puede verse en la ecuación **(2)**. P_{IN} corresponde a la potencia de radiación que alcanza la superficie activa del dispositivo, es decir, el total de la energía disponible para transformar en energía eléctrica, lo que en condiciones estándar corresponde a 1000 [W/m^2]. [1], [42], [51], [54]–[56]

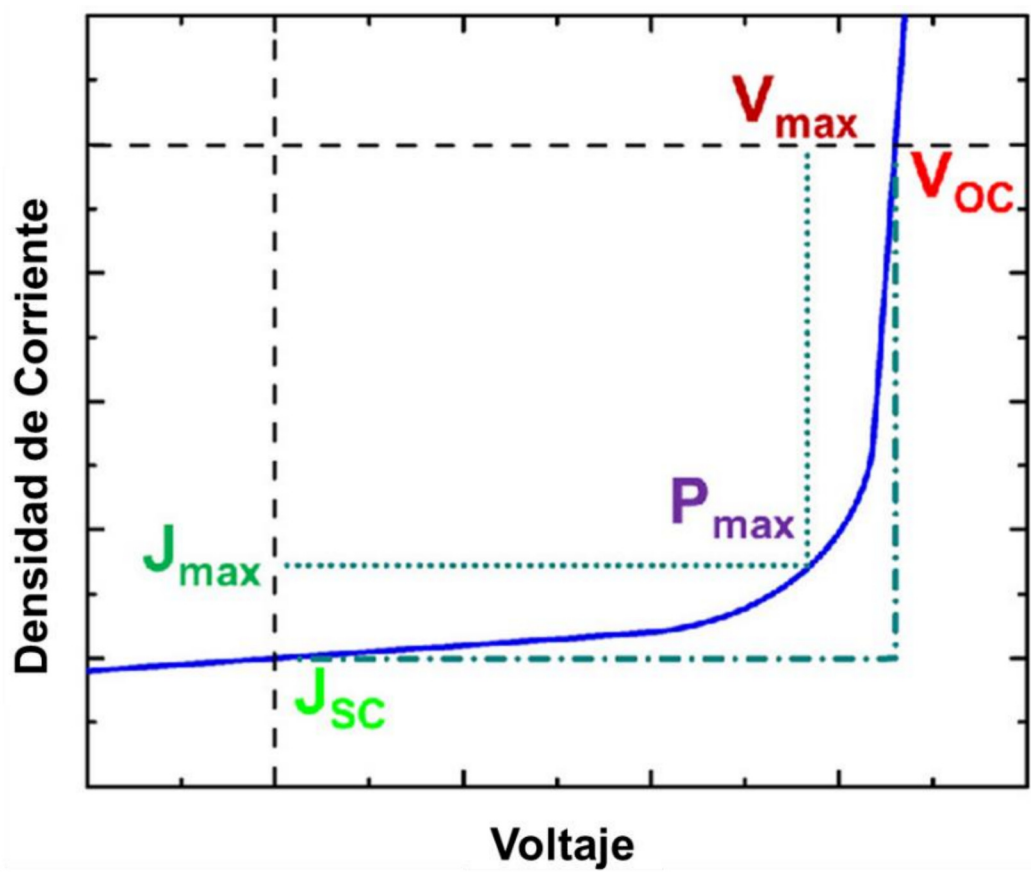


Figura 15. Curva de Densidad de Corriente - Voltaje (j-V). Obtenido de [58]

$$FF = \frac{V_{max} \times j_{max}}{V_{OC} \times j_{SC}} \quad \textbf{(1)}$$

$$\%PCE = 100\% \times \frac{V_{OC} \times j_{SC} \times FF}{P_{IN}} = 100\% \times \frac{V_{max} \times j_{max}}{P_{IN}} \quad \textbf{(2)}$$

3.3 Técnicas de Medición

Las técnicas de medición utilizadas en esta memoria corresponden a la Difractometría de Rayos X (XRD, por sus siglas en inglés al igual que posteriores), la microscopía de barrido electrónico (FE-SEM) y la medición de curvas j-V (Densidad de Corriente – Voltaje).

La técnica de XRD se basa en la utilización de radiación de rayos X para detectar patrones de difracción de los rayos incidentes, caracterizando materiales específicos según el máximo de intensidad (picos) y el ángulo de Bragg (2θ) que presenta la señal medida. La correlación entre estos parámetros permite identificar la presencia de materiales cristalinos en las muestras, a partir de los patrones identificados. Esta técnica analítica es una de las más importantes en las

investigaciones sobre nanopartículas, electroquímica, películas delgadas y celdas solares. [59] Además, esta técnica tiene una variación llamada Difractometría de Rayos X con Ángulo Rasante (GIXRD, por sus siglas en inglés). El análisis GIXRD consiste en la incidencia de los rayos x en un ángulo mucho más pequeño que el ángulo de reflexión de Bragg. Debido a esta geometría de incidencia rasante a la superficie, la interacción de los rayos x se concentra en ella, permitiendo medir con mayor amplitud los cristales presentes, mejorando la intensidad de las señales encontradas y las posibilidades de encontrarlas. Es por esto por lo que es ampliamente utilizada para el análisis de películas delgadas. [60]

La técnica FE-SEM corresponde a una caracterización morfológica de los dispositivos que consiste en un barrido de haz de electrones sobre la superficie de la muestra. Es posiblemente uno de los métodos más importante para investigar y caracterizar nanoestructuras. Se barre un área determinada de la muestra para obtener imágenes de alta resolución en donde se pueden observar aspectos como la continuidad de las capas de la arquitectura, su morfología, la continuidad de las capas, el tamaño y la forma de los granos, la presencia de defectos y el grosor de las capas. [56], [61]

La medición de las curvas se hace a través de la exposición de una determinada área del dispositivo ante la radiación estándar de la superficie terrestre, mediante el uso de un simulador solar. Se utilizan máscaras para seccionar el área con el objetivo de evitar fenómenos de dispersión de la luz que puedan intervenir en una medición correcta, es decir, que sea objetiva. El área de la máscara, A_{MA}, determina la densidad de la corriente, según se calcula en la ecuación **(3)**, en donde i corresponde a la corriente medida en miliamperios. Con las ecuaciones **(1), (2)** y **(3)** se hace cálculo de los parámetros fotovoltaicos y se caracterizan las muestras en función de ellos. [1], [42], [56]

$$j\ \left[\frac{mA}{cm^2}\right] = \frac{i\ \ [mA]}{A_{MA}\ [cm^2]} \qquad \textbf{(3)}$$

En el cálculo de las curvas j-V también se debe considerar un factor importante, el índice de histéresis (HI). La histéresis es una característica relevante que se puede observar en la medición de las curvas j-V en una celda solar, cualquiera sea. Según el sentido en el que se lleve a cabo la medida, es decir, si se lleva a cabo desde circuito cerrado hacia circuito abierto (barrido de ida o "forward scan" en inglés) o, por el contrario, si es de circuito abierto hacia circuito cerrado (barrido de vuelta o "reverse scan" en inglés), se pueden obtener distintos valores de eficiencia. Este fenómeno se debe a procesos dinámicos lentos que interfieren en la separación de cargas y dependen de la acumulación de carga en la interfase de perovskita y otros contactos selectivos de la arquitectura. De esta manera, la histéresis no sólo depende del sentido de registro de las curvas j-V, sino que también depende de los materiales de construcción y de la técnica de deposición de perovskita. Una menor histéresis en la medición es indicio de una buena construcción de dispositivo. El cálculo del índice de histéresis es descrito por la ecuación **(4)**. [55], [56]

$$HI = \frac{j_{max,reverse} + j_{max,forward}}{j_{max,reverse}} \qquad \textbf{(4)}$$

4 Metodología Experimental

Durante el desarrollo de esta memoria se llevaron a cabo una serie de experimentos con la serigrafiadora semiautomática ATMA modelo AT-25PA, con el fin de obtener información empírica del funcionamiento de la máquina y de los resultados de su operación en distintas condiciones.

Para realizar las pruebas se utilizó como modelo la celda m-CPSC propuesta por Baker et. al. [1], cuyos parámetros de celda obtenidos fueron un V_{OC} de 1,44 [V], J_{SC} de 7,75 [mA cm^{-2}], FF igual a 0,74 y un PCE del 8,19%. El tipo de perovskita utilizado en la celda modelo fue la $CsPbBr_3$. La disponibilidad de los materiales en el laboratorio fue determinante para la elección de este tipo de perovskita, ya que infiltraciones de otros tipos requieren una formulación más compleja o, derechamente, comprar los precursores hechos. [44] La arquitectura de la celda construida en este estudio es muy similar al a utilizada por Baker et al. [1]

Cabe destacar que, si bien, el objetivo experimental de esta memoria se enfocó principalmente en definir un protocolo de impresión con la máquina serigrafiadora que permita imprimir correctamente las tres capas mesoporosas sobre un sustrato, es necesario también llegar al final del proceso de construcción para tener una visión más amplia de los resultados obtenidos, mediante la caracterización de la celda por curvas j-V, parámetros fotovoltaicos, imágenes del FE-SEM y difractogramas de rayos x. Lo anterior permitió validar el protocolo de serigrafiado mediante la consecución de celdas solares con ciertos valores de eficiencia, los cuales se proyectan como optimizables en el transcurso del tiempo.

4.1 Materiales y Procedimiento.

4.1.1 Prefase Experimental.

Antes de comenzar con los experimentos principales, fue necesario adecuar las condiciones de trabajo en el laboratorio y conseguir algunos de los materiales necesarios para ejecutar el procedimiento. Dentro de las actividades correspondientes a esta fase previa se encuentran:

- ***<u>Preparación de la Sala de Serigrafía</u>***: Para adecuar la sala de operaciones fue necesario mejorar la aislación de la sala de serigrafía y reducir la humedad relativa del lugar. Para lograr esto se compraron 2 higrómetros, burletes y una cápsula desecadora de 500 [g] de capacidad con KCl para reducir la humedad. Pese a que las puertas de esta habitación se abren constantemente por la circulación del personal de laboratorio, se consiguió una diferencia en la humedad relativa de alrededor del 2,44% entre la sala de serigrafía y la sala de recepción. Se recomienda además hacer uso de una aspiradora para mantener la sala libre de polvo.

- ***<u>Preparación de Materiales Para Serigrafía</u>***: Antes de comenzar a hacer pruebas en el equipo, fue necesario complementarlo con ciertas piezas indispensables para el funcionamiento de la máquina, como los bastidores y el squeegee. Los bastidores fueron obtenidos mediante un pedido especial a proveedores locales, cuyas especificaciones se encuentran en la **Tabla 8**. Para poder imprimir, se utilizó una planilla otorgada por colaboradores internacionales, la cual es expuesta en la **Figura 17**. Esta planilla, originalmente diseñada para imprimir sobre sustratos 2,5×2,5 [cm^2] con un surco de fábrica que evita el cortocircuito en la celda, fue utilizada en la construcción de los bastidores para cada pasta y además en su respectivo fotolito. Este fotolito sirvió como herramienta de precisión para la serigrafía, utilizándose como se explica más adelante en el protocolo de serigrafía. Adicionalmente, se presenta la **Figura 16**, en donde se representan las distintas capas impresas por serigrafía y el sustrato, junto a las medidas específicas que caracterizan el diseño de la planilla utilizada.

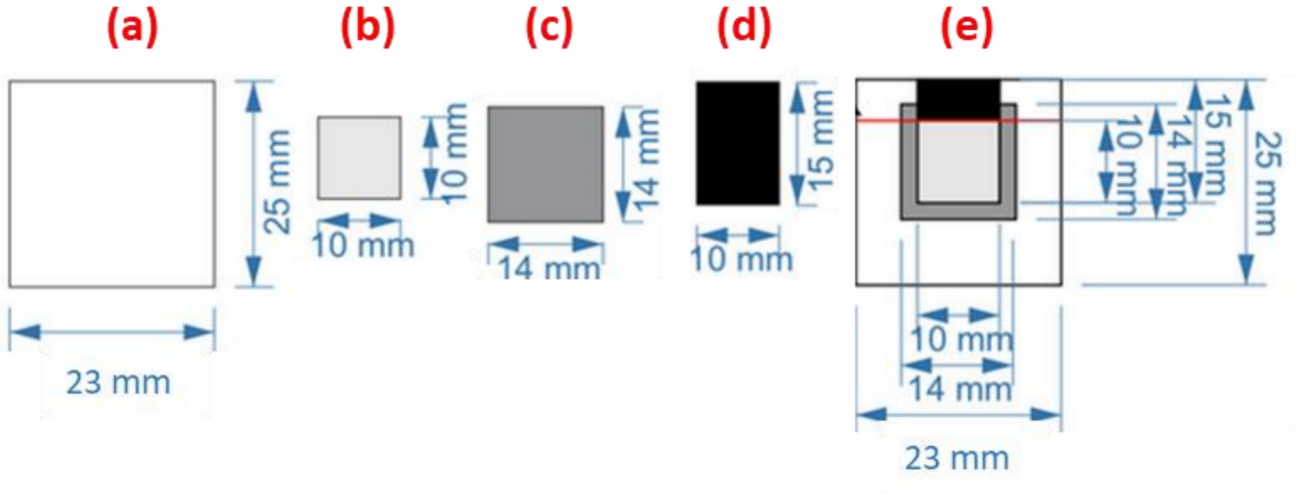


Figura 16. Estructura y Medidas de las Capas Serigrafiadas y del Sustrato. (a) Medidas del Sustrato de FTO Desnudo (b) Medidas de la Capa de Titania (c) Medidas de la Capa de Circonia (d) Medidas de la Capa de Carbono (e) Estructura Completa con Surco en Rojo.

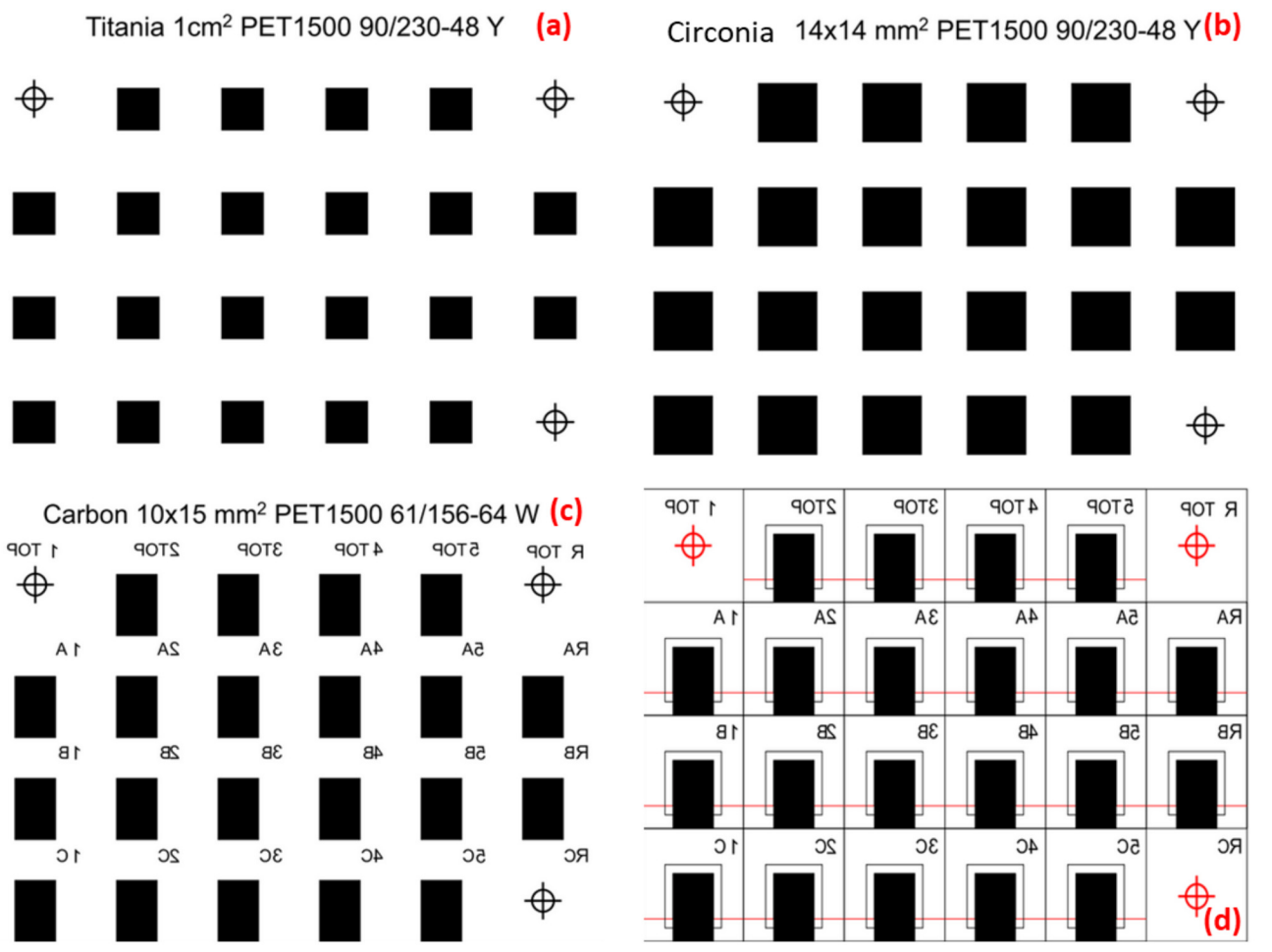


Figura 17. Diseño de Impresión en Bastidores y Fotolitos. (a) Corresponde al diseño de impresión de pasta de Titania (b) Pasta de Circonia (c) Pasta de Carbono y (d) Diseño Triple Stack sobre una celda con surco, marcado con una línea roja.

Los códigos que aparecen al lado de los nombres representan el tipo de malla que se utiliza para construir los bastidores. El PET 1500 se refiere a una tela de alto módulo a partir de monofilamentos de poliéster. Los bastidores de las pastas de circonia y titania poseen el código "PET 1500 90/230-48 Y", mientras que el código de la malla que se usa para el carbono es "PET 1500 61/156-64 W". Estos códigos pueden identificarse en el **Anexo 1** y en el **Anexo 4.** Según esta información, se muestran los códigos y su significado en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Descripción del Código de Mallas Utilizadas en los Bastidores.

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	OTRAS CARACTERÍSTICAS
PET 1500- PW 90/230-48 Y (Titania y Circonia)	Tela de Poliéster, 90 hilos por centímetro (230 hilos por pulgada), diámetro de hilo nominal de 48 [µm], color amarillo (Y)	Abertura de malla de 55 [µm], Porcentaje de Área Abierta de 24,6%, Espesor de malla de 78 [µm], Volumen Teórico de Pasta de 19,2 [cm^3/m^2]
PET 1500 - PW 61/156-64 W (Carbono)	Tela de Poliéster, 61 hilos por centímetro (156 hilos por pulgada), diámetro de hilo nominal de 48 [µm], color blanco (W)	Abertura de malla de 90 [µm], Porcentaje de Área Abierta de 30,1%, Espesor de malla de 101 [µm], Volumen Teórico de Pasta de 30,4 [cm^3/m^2]

Además, en la **Figura 18** se muestran los principales parámetros que componen una determinada malla y que permiten complementar la caracterización para su uso aplicado en la serigrafía. Estas características corresponden a las presentadas anteriormente en la **Tabla 2.** Cabe destacar que, como puede verse en el **Anexo 1**, ambas mallas poseen un tipo de ligamento PW (tafetán), es decir, tiene una proporción entre hilos verticales y horizontales igual a 1:1.

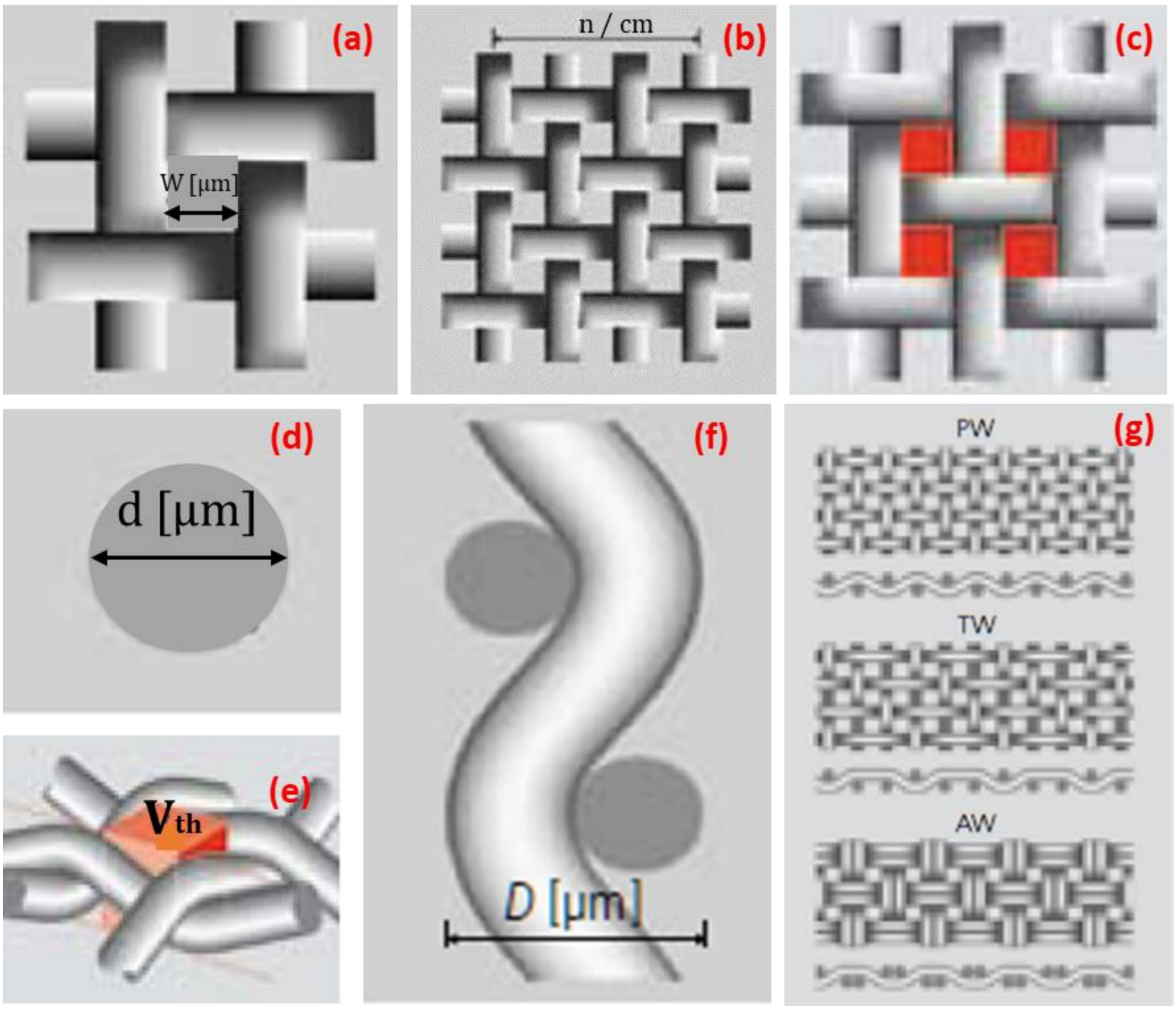


Figura 18. Parámetros de Caracterización de una Malla para Bastidor. (a) Abertura de la Malla (b) Número de Hilos (c) Superficie Libre o Abierta (d) Diámetro Nominal del Hilo (e) Volumen Teórico de Tinta (f) Espesor de la Tela (g) Tipo de Ligamento de la Tela. Modificado de Anexo 4

Por otro lado, el squeegee obtenido de fábrica (ATMA) no poseía un borde biselado, cualidad importante para mejorar la impresión de las pastas. [54] Se compró a un proveedor externo una pieza larga del squeegee deseado y se dividió, con ayuda de una guillotina, en distintas piezas de 15 [cm] de longitud; 1 para imprimir la pasta de titania, 2 para imprimir la pasta de circonia y 1 para imprimir la de carbono.

También es importante mencionar que, para realizar las impresiones, fue necesario disponer de un escantillón compuesto de distintas piezas de vidrio para sujetar las muestras durante la etapa de serigrafía y evitar daños en las mallas de los bastidores, como muestra la **Figura**

40, en el protocolo de serigrafía. Este escantillón se preparó a partir de distintos cortes hechos sobre una plancha de FTO del mismo proveedor de las muestras, con una dimensión de 30×30 [cm^2]. El grosor de esta plancha es de 2,2 [mm], el mismo que tienen las muestras individuales de FTO, lo que evita cambios de nivel contra la malla durante el barrido y posibles daños en ella.

- ***Puesta en Marcha de la Serigrafiadora***: Cuando todos los materiales necesarios fueron reunidos y las condiciones de la habitación fueron mejoradas, se prosiguió con la puesta en marcha del equipo. Con ayuda del manual del equipo y de la colaboración internacional, se logró activar por primera vez la serigrafiadora para luego comenzar con el ajuste de los parámetros de operación. Los parámetros de operación importantes en el equipo corresponden a:

1) La apertura de impresión (conocida en inglés como GAP).
2) La velocidad del squeegee.
3) La presión del squeegee.
4) La graduación de los tornillos del squeegee y la barredora de pasta.

Los parámetros recomendados para la impresión son una velocidad de 110 [mm/s], 3 [mm] de GAP, un squeegee biselado sin inclinación y una presión de 2,5 [bar]. [54] Los experimentos de la puesta en marcha comenzaron desde este punto de partida, a excepción de la velocidad de barrido, que fue de 100 [mm/s] como indica el manual del equipo, y la graduación de los tornillos del squeegee y de la barredora, sobre los cuales no había información específica disponible, por lo que fue ajustada tras la experimentación y la puesta en marcha del equipo. La **Tabla 3** compara las condiciones de uso recomendadas con las obtenidas después de la puesta en marcha.

Tabla 3. Tabla de Condiciones de Operación de la Serigrafiadora semiautomática, antes y después de la puesta en marcha.

Parámetro de Operación	Antes de los Ajustes	Después de los Ajustes
Apertura de Impresión	3 [mm]	4 [mm]
Velocidad del Squeegee	110 [mm/s]	100 [mm/s]
Presión del Squeegee	2,5 [bar]	2,5 [bar]
Graduación de Tornillos de Squeegee	-	1 [mm]
Graduación de Tornillos Barredora	-	6,5 [mm] y 5° de Inclinación

La puesta en marcha y los resultados obtenidos fueron por medio de una serie de intentos de depósito de las distintas pastas sobre sustratos recocidos. En el experimento se utilizaron sustratos cortados en laboratorio en un formato de 2,3×2,5 [cm^2] y 2,2 [mm] de espesor, con ayuda de la punta de diamante. Justo antes de comenzar a serigrafiar los sustratos, se hizo estudio del manual y de las funciones del equipo para reconocer sus capacidades y los parámetros de impresión. Una vez adquirido este conocimiento, se probó el equipo con los sustratos anteriormente descritos y sin número de serie, con el objetivo de hacer un análisis previo en la graduación de los tornillos del squeegee y la barredora de pasta.

Tras varios intentos, se consiguió dar con el posicionamiento correcto de la barredora y del squeegee. Cabe destacar que no se pudo trabajar con un GAP de impresión menor a 4 [mm], debido a que es un límite de fábrica. Siendo así, se probó una impresión con distintos cambios de GAP de impresión, variando desde el 4 – 6 [mm], generando películas visiblemente aceptables hasta los 5 [mm]. En cuanto a la presión del squeegee, se probó la impresión en 2,0 y 2,5 [bar], siendo esta última la mejor. Esto se mantuvo constante para determinar la graduación del tornillo del squeegee, en la cual se probó desde los -1,25 [mm] (graduación bajo el 0) hasta los 1,25 [mm] (graduación sobre el 0), obteniendo resultados óptimos a 1 [mm]. La barredora fue probada en múltiples graduaciones, siendo la más precisa a los 6,5 [mm], sin embargo, el esparcimiento de la pasta no fue regular hasta inclinarla en 5° con relación al eje del bastidor. Las últimas variaciones correspondieron a

la velocidad, aplicando un barrido de 50, 100, 200 y 300 [mm/s], sin embargo, no hubo cambios visiblemente relevantes en las películas. En la **Figura 19** se puede ver el resultado de las primeras series serigrafiadas, cuyas películas no son regulares o, incluso, son escasamente impresas sobre el sustrato de FTO. Dentro de la misma figura se presentan los resultados de los avances obtenidos mediante el trabajo continuo y calibración del equipo.

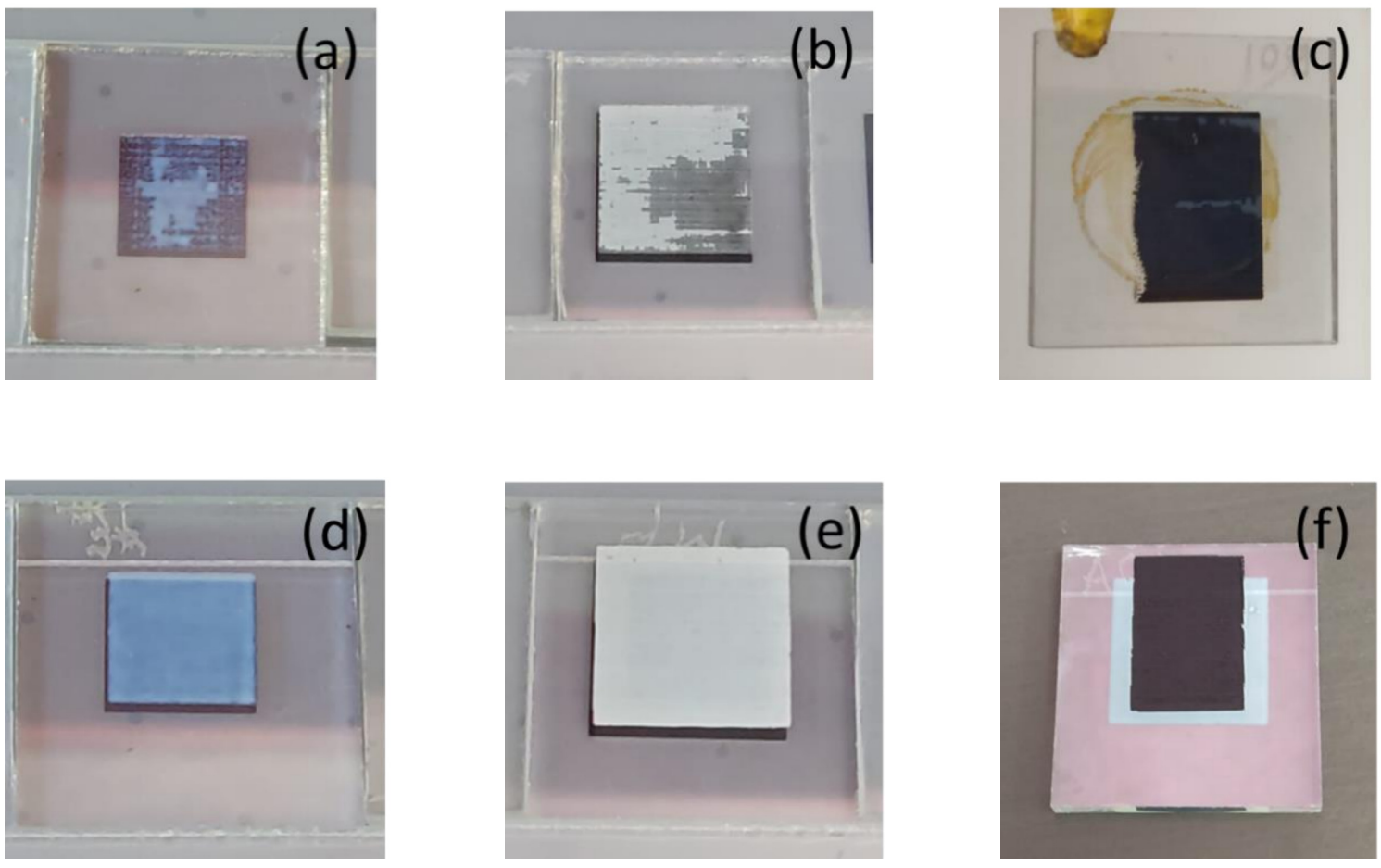


Figura 19. Muestras Preparadas en la Prefase Experimental. (a) y (d) Presentan el antes y el después de la puesta en marcha del equipo para la película de titania. (b) y (e) Compara la película de circonia. (c) y (f) Compara la película de Carbono.

La película de circonia fue particularmente difícil de imprimir, debido a la adhesión del sustrato al bastidor y a la existencia de cráteres en la superficie de la película. Se intervino la sujeción del sustrato a partir de la aplicación de un material adhesivo, con el fin de impedir que el vidrio se quede pegado a la malla del bastidor, tal como se explica en el protocolo de serigrafía, en la **Figura 51**. La aplicación de este adhesivo no sólo solucionó este problema, sino que también

mejoró la calidad de la película serigrafiada, junto con un cambio en el modo de impresión del equipo, **Figura 50**.

Finalmente, tras ejecutar la impresión de 7 series de muestras, se genera un protocolo para utilizar el equipo y llevar a cabo la serigrafía de manera correcta. Este protocolo es el principal resultado de la puesta en marcha del equipo y contiene los materiales, instrumentos, accesorios y pasos a seguir que se necesitan para ejecutar una buena operación en el equipo. Una vez finalizado este protocolo, se da por finalizada puesta en marcha de la serigrafiadora semiautomática, prosiguiendo con el estudio de las celdas construidas desde la serie 8 en adelante.

4.1.1 Fase Experimental con Serigrafiadora Puesta en Marcha

El método de construcción consiste en la aplicación de un procedimiento continuo que tiene 6 días de duración por lote o serie de muestras fabricadas, El proceso comienza con la aplicación paulatina de las capas de la arquitectura del modelo m-CPSC seleccionado, para luego infiltrar los cristales disueltos de perovskita en un solvente orgánico. Terminado esto, se deben soldar una aleación metálica conductora como electrodo y hacer la medición de los parámetros de las celdas construidas.

Cada serie consta de un rango entre 6 – 21 muestras, cuyo proceso está esquematizado en el diagrama del proceso experimental, **Figura 20**. El proceso utiliza materiales, utensilios, instrumentos, equipos y accesorios enunciados en la **Tabla 4, Tabla 5**, **Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9**. Tres de estas tablas están contenidas en el capítulo siguiente, el Protocolo de Serigrafía.

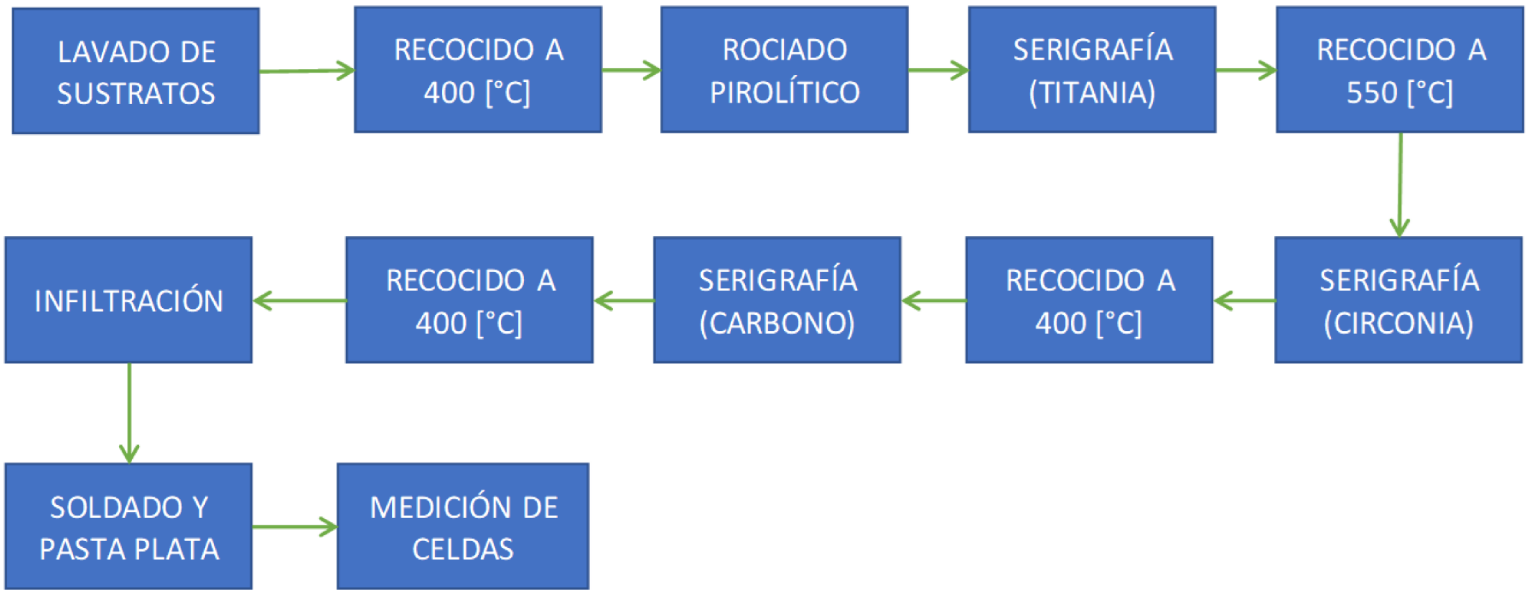


Figura 20. Diagrama de Proceso del Método Experimental.

Tabla 4. Tabla de Materiales e Instrumentos del procedimiento experimental.

INSTRUMENTOS Y MATERIALES	UTILIZACIÓN
Solución de Limpieza Hellmaex Diluída al 2% v/v en agua Milli-Q	Lavado de Sustratos.
Acetona, ≥ 99,5%, código 179124, Merck	Lavado de Sustratos.
Agua Desionizada	Lavado de Sustratos.
Dimetilsulfóxido (DMSO), Anhídrico ≥ 99,9%, código 276855, Merck	Síntesis de Solución de Perovskita.
Ácido Nítrico, 70%, código 438073, Merck	Lavado de Utensilios.
Tanque de Nitrógeno 10 [m^3] Air Liquide, código 227101000	Secado y Limpieza de Sustratos.
Micropipetas de 5 [mL] y 10 [µL].	Síntesis de Solución de Perovskita e Infiltración de la Solución.
Puntas de micropipetas de 5 [mL] y 10 [µL].	Síntesis de Solución de Perovskita e Infiltración de la Solución.
Rociador tubular de 50 [mL], Merck.	Rociado Pirolítico.
Esponja de Lavado	Lavado de Sustratos.
Jeringa de Vidrio de 100 [mL] y aguja de acero inoxidable.	Síntesis de Solución de Perovskita.
Alambre de aleación metálica Cerasolzer, código MS308, MBR electronics	Deposición de Metales Conductores sobre Muestras.
Pasta de plata en solvente orgánico.	Deposición de Metales Conductores sobre Muestras.
Bromuro de Plomo, Anhídrico ≥ 99,9%, código 915696, Merck	Síntesis de Solución de Perovskita.
Bromuro de Cesio, Anhídrico ≥ 99,9%, código 202142, Merck	Síntesis de Solución de Perovskita.
Celda de Referencia de Silicio Monocristalino, Greatcell Energy	Calibración del Simulador Solar.
Cinta Adhesiva no Conductiva, Kapton Tape	Infiltración de la Solución de Perovskita.

En términos generales, el procedimiento empieza con la selección de los sustratos que serán utilizados como muestras de la serie, sean sustratos de FTO unitarios, de una medida de 2,3×2,5 [cm^2], o planchas de 10x15 [cm^2]. Los sustratos deben ser marcados con una punta de diamante, como muestra la **Figura 21**, para ser reconocidos en el seguimiento del proceso de construcción. Después, se limpian del vidrio y se lavan meticulosamente con esponja y ultrasonido. Luego se secan con nitrógeno y son llevados a recocer hasta el día siguiente.

Tabla 5. Tabla de Equipos Utilizados en el Procedimiento Experimental.

EQUIPO	**MODELO Y MARCA**	**UTILIZACIÓN**
Campana de Extracción	G.A. Ventas / GACBJ	Rociado Pirolítico.
Cámara de Guantes	Terrauniversal / CAT 160308	Síntesis de Solución de Perovskita.
Placa Calefactora Ovan	Ovan / MCG05E	Síntesis de Solución de Perovskita.
Placa Calefactora Cromtek	Cromtek / EH45-S	Síntesis de Solución de Perovskita.
Compresor 1,5 HP 50L CE50-OL	Hariken / HK2 – 50L	Uso de Serigrafiadora y Cámara de Guantes.
Placa Calefactora IKA	IKA / RCT B	Síntesis de Solución de Perovskita.
Lavadora Ultrasónica	Runyes	Limpieza de Sustratos y Utensilios sucios.
Purificadora de Agua	Synergy / ET Synergy UV	Limpieza de Sustratos.
Balanza Analítica	Scientech / ZSA 210 REV-E	Síntesis de Solución de Perovskita.
Horno de Secado	S/N 1611143014	Secado de Utensilios Lavados.
Soldadora Ultrasónica	MR – 540 A / Mecs Tech	Soldado de Electrodos Metálicos.
Simulador Solar	S/N 1611143014	Medición de Curvas j-V.
Fuente de Medición de Unidades (SMU)	2601B / Keithley	Calibración del Simulador Solar.
Potencioestato	PGSTAT302N / Autolab	Medición de Curvas j-V.

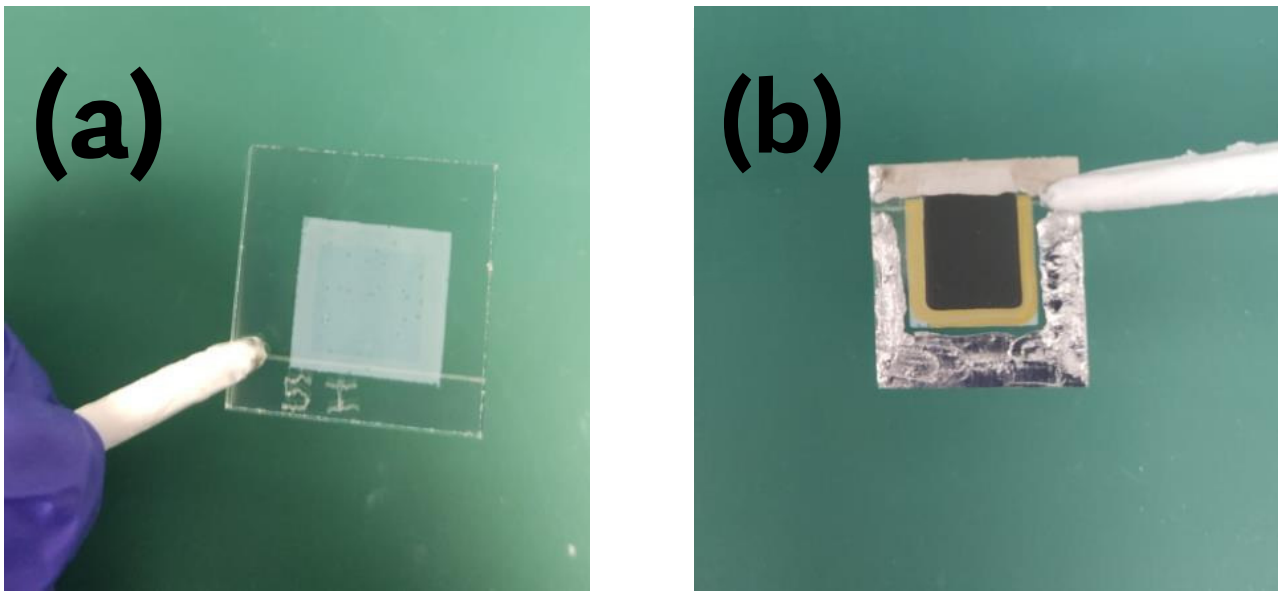


Figura 21. (a) Inscripción del número de serie sobre el surco en la muestra trabajada. (b) Imagen de una celda solar terminada y lista para su medición.

Posteriormente se deposita una capa compacta de TiO_2 sobre el sustrato limpio mediante la técnica de rociado pirolítico (spray pirolisis en inglés) a alta temperatura. Cuando las muestras vuelven a estar a temperatura ambiente después del depósito de la capa compacta, son llevadas al proceso de serigrafía, en donde se deposita una fina capa de pasta de TiO_2, que luego es enviada a recocer en el horno y no se retiran de allí hasta el día siguiente. Este último par de pasos se repiten en la deposición de las pastas de ZrO_2 y Carbono, mediante distintos protocolos de tratamiento térmico y con 1 día de duración. En el quinto día, cuando las muestras ya han reposado después de depositar y recocer las 3 capas mesoporosas, se prepara una solución de perovskita a partir de precursores inorgánicos de bromuro de cesio y plomo, los que son disueltos en un solvente orgánico y son llevados a un tratamiento térmico con agitación para su completa disolución. La solución es luego infiltrada por goteo sobre las capas mesoporosas, tras rodear la superficie activa con cercos de cinta Kapton Tape y ambientar su temperatura a la de la solución. Cuando la solución ha sido infiltrada, se lleva a una mayor temperatura para evaporar los solventes orgánicos y promover la conversión de la perovskita a su forma cristalina. Una vez que la perovskita infiltrada a través del ensamble mesoporoso se ha estabilizado, se añaden los metales conductores alrededor de la celda a través de un proceso de Soldado Ultrasónico, esparciendo pasta de plata al final de la operación. Las muestras se dejan reposar una noche para que el solvente de la pasta de plata se evapore. Finalmente se realiza la medición de los parámetros de las celdas fotovoltaicas preparadas en una habitación oscura,

utilizando la radiación estándar de medición de 1 [kW m^{-2}] producida por un simulador solar, el cual es calibrado con una celda de referencia de silicio.

Cada etapa del procedimiento es realizada siguiendo su respectivo protocolo, lo que permite hacer reproducible el experimento y ejecutar un mejor seguimiento de las variaciones entre distintas preparaciones o cambios en el procedimiento. La explicación específica de cada etapa del proceso es presentada a continuación.

Etapa de Lavado: En esta etapa se limpian los sustratos llegados de fábrica, con el fin de prevenir defectos en la construcción de la celda debido a la suciedad remanente en los vidrios. Primero se utiliza la solución de limpieza alcalina Hellmanex, concentrada al 2% v/v, para lavar manualmente los sustratos de FTO desnudo con una esponja durante 30 segundos cada uno, y luego se enjuaga con agua destilada. Posteriormente se calienta agua milli-Q, cerca del punto de ebullición, y se vierte en un recipiente con los sustratos dentro, lo suficiente hasta cubrirlos por completo para luego llevarlos a la lavadora ultrasónica, en donde se completarán 2 ciclos de 8 minutos cada uno, contemplando el cambio del agua entre ciclos. Posteriormente se retira el agua y se enjuaga con acetona, para eliminar trazas de agua y luego sumergir en este mismo compuesto los sustratos, llevándolos nuevamente a dos ciclos de lavado ultrasónico de 8 minutos, pero sin cambiar la acetona. El último ciclo de lavado se hace con etanol, enjuagando primero los sustratos y luego sumergiéndolos para llevarlos a dos ciclos de 8 minutos cada uno, cambiando el etanol entre ciclos. Una vez que se finaliza con el lavado ultrasónico, las muestras son secadas con gas N_2 y luego guardadas para ser recocidas.

Recocido: El recocido es la etapa en donde las muestras son estabilizadas y preparadas, mediante un tratamiento térmico, para ingresar a la siguiente etapa de construcción dentro del proceso experimental. Esta operación ocurre en la mufla Nabertherm, mostrada en la **Figura 24** del protocolo de serigrafía. Primero se realiza al finalizar el lavado de sustratos, donde el tratamiento térmico alcanza los 500 [°C] por 5 minutos, a través de una rampa de 30 minutos. Luego se aplica durante el rociado pirolítico, a 450 [°C] por 30 minutos con una rampa de 1 hora. Finalmente, se aplica por 30 minutos tras imprimir cada una de las tres capas mesoporosas, a una temperatura de 550 [°C] con una rampa de 1 hora y media para TiO_2, y a 400 [°C] con

una rampa de 1 hora para ZrO_2 y Carbono. Este paso se hace con la finalidad de evaporar cualquier traza del solvente de las pastas aplicadas, lo cual se conoce como sinterizado.

En esta etapa se debe considerar también un período de enfriamiento muy lento, puesto que los sustratos y capas son susceptibles a sufrir fisuras ante cambios bruscos de temperatura. En general, este período toma de 4 a 6 horas en el laboratorio, por lo que la continuidad del proceso de construcción queda limitada por esta espera, y a su vez lo convierte en uno de los principales focos para la planificación del trabajo.

Serigrafía: Esta etapa representa el foco de investigación en este trabajo y es la base de la planificación semanal para la producción de series de muestras. Utilizando la serigrafiadora semiautomática se depositan las capas mesoporosas de TiO_2, ZrO_2 y Carbono sobre el sustrato. Las condiciones de operación son fácilmente medibles gracias a la graduación de instrumentos incorporados al equipo, lo que permite que el proceso sea uniforme y reproducible. El procedimiento específico de esta etapa, junto con la operación del equipo utilizado y otras consideraciones importantes son detalladas en el siguiente capítulo, en el protocolo de serigrafía.

Infiltración: Esta etapa es de gran importancia debido a que se realiza la deposición de cristales de perovskita ambivalente que conducirán los pares electrón-hueco a través de la estructura. Dentro de un frasco de 15 [mL] se preparan 3 [mL] de una solución 0,5 [M] de bromuro $PbBr_2$, disuelto en dimetilsulfóxido (DMSO) dentro de la cámara de guantes en una humedad relativa cercana a 33%, medida obtenida gracias a un higrómetro dentro de la cámara. La solución es llevada a una placa calefactora con agitación magnética para mejorar la solubilidad del $PbBr_2$ a los 50 [°C], obteniendo una mezcla homogénea transparente y evitando que se evapore prematuramente el solvente orgánico. Los bordes del sustrato sin capas mesoporosas son previamente cubiertos con Kapton Tape y luego se llevan las muestras a una placa a 50 [°C] para evitar cambios bruscos de temperatura. Cuando la mezcla inicial está lista, se pesa una cantidad molar de CsBr equivalente a la de bromuro de plomo, para ser disuelto en los 3 [mL] de solución homogénea por 30 minutos, aproximadamente. El cálculo de los gramajes de los bromuros para 3 [mL] de DMSO es mostrado en las ecuaciones **(5)**, **(6)**, **(7)**, **(8)** y **(9)**:

$$0{,}5\ [M] = \frac{mol_{PbBr_2}}{L_{solucón}} = \frac{mol_{PbBr_2}}{0{,}0015\ [L]} \tag{5}$$

$$0{,}5\ [M] = \frac{mol_{CsBr}}{L_{solucón}} = \frac{mol_{CsBr}}{0{,}0015\ [L]} \tag{6}$$

$$mol_{PbBr_2} = 0{,}5\ [M] * 0{,}0015\ [L] = 7{,}5 * 10^{-4}[mol] = mol_{CsBr} \tag{7}$$

$$m_{PbBr_2} = MM_{PbBr_2} * mol_{PbBr_2} = 367{,}01\left[\frac{g}{mol}\right] * 7{,}5 * 10^{-4}[mol] = 0{,}2753\ [g] \tag{8}$$

$$m_{CsBr} = MM_{CsBr} * mol_{CsBr} = 212{,}81\ \left[\frac{g}{mol}\right] * 7{,}5 * 10^{-4}[mol] = 0{,}1596\ [g] \tag{9}$$

La solución homogénea final es puesta en un vaso precipitado de 5 [mL], precalentado también a 50 [°C], para luego depositar 8 [µL] de la solución sobre cada una de las muestras, en el centro de la capa mesoporosa de titania, y mantener las condiciones estáticas por 10 minutos. Pasado este tiempo, las muestras se llevan a 250 [°C] al cabo de 30 minutos sobre la placa de calefacción Ovan y se mantienen en esa temperatura por 10 minutos más. Al finalizar lo anterior, se apaga la placa Ovan y se dejan enfriar las muestras a la misma razón con la que se enfría la placa a temperatura ambiente, mientras se quitan los trozos de cinta Kapton Tape de la superficie caliente.

Soldado Ultrasónico: Para hacer el depósito del electrodo metálico de la celda, primero se necesita precalentar las muestras hasta los 180 [°C], con el fin de evitar fracturas y defectos por la diferencia de temperatura entre el metal fundido y el sustrato. Luego, con la utilización de la

soldadora de ultrasonido a 260 [°C] y 10 [W], se funde un trozo de alambre Cerasolzer, código MS-308, y se deposita alrededor de las capas mesoporosas sobre el sustrato, en donde sólo está la capa superficial de titania compacta. Este alambre metálico, hecho de una aleación de zinc, antimonio y estaño, está especialmente hecho para ser utilizado como soldadura sobre cerámicos y vidrios cubiertos con superficies electro-conductivas, como el FTO. Se rodean ambos lados del sustrato separados por el surco, pero sin tocarlo, como muestra la imagen (b) de la **Figura 21**, pues esto provocaría un cortocircuito en el flujo de la corriente entre un extremo y otro. Cuando la capa metálica de conducción está lista, se dejan enfriar las muestras por 10 minutos a temperatura ambiente y se procede a agregar una pequeña porción de pasta de plata en el extremo superior de la celda, pasando levemente por sobre la capa de carbono. Una vez hecho esto, se deja reposar la celda bajo campana hasta el día siguiente para que el solvente de la pasta de plata se evapore por completo, convirtiéndola en una película altamente conductora.

Medición: Para finalizar con el experimento, se realiza la medición de las celdas, en donde se caracterizan a través de sus parámetros fundamentales como el V_{OC}, j_{SC}, PCE y FF. La medición se lleva a cabo mediante el uso del simulador solar, el cual es calibrado con una celda de referencia de silicio monocristalino para emitir, a una distancia exacta desde el foco de emisión de luz, una radiación de 1 [kW m^{-2}]. Para esto también se utiliza la fuente de medición de unidades (SMU, por sus siglas en inglés) marca Keithley, el cual permite saber cuál es el voltaje producido por la celda de referencia a medida que se varía la distancia entre ella y el simulador solar. Cuando ya se ha encontrado la distancia que recibe esta cantidad de radiación, se retira la celda de referencia y se prepara el montaje de la medición, donde se sostiene la parte posterior de la celda en el centro del área iluminada y se conectan los electrodos del potenciostato a lados distintos del surco, como muestra la **Figura 22**. En este mismo montaje es necesario añadir una máscara de cartón de color negro, con una abertura de área cuadrada y conocida en el centro. La abertura de esta máscara se posiciona en un lugar aleatorio dentro del área activa de la celda, con el fin de medir las propiedades fotoeléctricas de una región interna y permitir el cálculo de la densidad de corriente con un área conocida. La máscara es sujetada con una pinza que la mantiene quieta mientras que la luz atraviesa la abertura e ilumina la región seleccionada. Iniciando la medición de la actividad fotoeléctrica generada dentro de la celda, se recolectan

los datos, los cuales son guardados en un archivo Excel para ser posteriormente analizados. Este procedimiento permite obtener las curvas j-V y los gráficos de PCE y FF de cada serie.



Figura 22. Montaje en Cámara Oscura para la Medición de Resultados.

Además de la medición anterior, algunas de las muestras fueron enviadas al FE-SEM dentro de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valparaíso, en donde se les tomó una imagen SEM para caracterizar el perfil de las capas depositadas sobre el sustrato. Las 3 muestras medidas por esta técnica fueron las F – 8, H – 8 e I – 8, pertenecientes a la serie 8. Esta prueba permitió conocer el grosor de las capas serigrafiadas y dar una idea de la calidad de infiltración de $CsPbBr_3$ en el ensamble mesoporoso triple de los materiales depositados. Además, la muestra K – 8 fue llevada a la Universidad de Chile para un análisis FE-SEM de ángulo rasante, con el fin de obtener resultados de mayor precisión en la capa compacta de titania.

Mientras que el primer grupo de muestras, de la serie 8, se analizó en territorio nacional, otro grupo de muestras de la serie 6 y 7 fue llevado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, en Uruguay, en donde fue sometido a un análisis por XRD. El análisis entregado por el laboratorio externo vino acompañado de tablas que informan sobre la calibración de las señales en el equipo. En base a esta información se realiza la asignación de materiales a las

señales de los difractogramas, determinando indicios de su presencia. Además, Se hizo el análisis de la muestra K – 7, en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile, lugar en el que se aplicó la técnica de GIXRD para obtener una señal más clara de la capa compacta de titania sobre FTO.

Dentro de los análisis por XRD y FE-SEM entraron las muestras presentadas en la **Tabla 6**, las cuales tienen distintas estructuras y formas de infiltración entre sí, además del número de serie.

Tabla 6. Tabla de Muestras Enviadas a Análisis por Técnica XRD y FE-SEM.

MUESTRA	ANÁLISIS	CONDICIONES DE PREPARACIÓN
K – 7 (Serie 7)	XRD y GIXRD	FTO + c-TiO2 Rociado Pirolíticamente.
I – 7 (Serie 7)	XRD	FTO + c-TiO2 Rociado Pirolíticamente + m-TiO2 Serigrafiado según protocolo.
J – 7 (Serie 7)	XRD	FTO + c-TiO2 Rociado Pirolíticamente + m-TiO2 + m-ZrO Serigrafiado según protocolo.
F – 6 (Serie 6)	XRD	FTO + c-TiO2 Rociado Pirolíticamente + m-TiO2 + m-ZrO + Carbono Serigrafiado según protocolo.
H – 6 (Serie 6)	XRD	FTO + c-TiO2 + Capas Mesoporosas + Infiltración 2 Pasos: 8 [microL] de PbBr2 1 [M] en DMF a 70 [°C] + Inmersión 50 [mL] de CsBr 0,07 [M] en metanol 50 [min].
I – 6 (Serie 6)	XRD	FTO + c-TiO2 + Capas Mesoporosas + Infiltración 1 Paso: 8 [microL] de PbBr2 y CsBr 0,4 [M] en DMF a 50 [°C] por 10 [min].
B – 7 (Serie 7)	XRD	FTO + c-TiO2 + Capas Mesoporosas + Infiltración 1 Paso: 8 [microL] de PbBr2 y CsBr 0,4 [M] en DMF a 50 [°C] por 10 [min]. Se repite la infiltración una vez fría.
D – 7 (Serie 7)	XRD	FTO + c-TiO2 + Capas Mesoporosas + Infiltración 1 Paso: 8 [microL] + 8 [microL] de PbBr2 y CsBr 0,4 [M] en DMF a 50 [°C] por 10 [min]. Se repite la infiltración una vez fría.
G – 7 (Serie 7)	XRD	FTO + c-TiO2 + Capas Mesoporosas + Infiltración 1 Paso: 8 [microL] + 8 [microL] de PbBr2 y CsBr 0,4 [M] en DMF a 50 [°C] por 10 [min]. Se repite la infiltración una vez fría.
F – 8 (Serie 8)	FE-SEM	FTO + c-TiO2 + Capas Mesoporosas + Infiltración 1 Paso: 8 [microL] de PbBr2 y CsBr 0,4 [M] en DMF a 50 [°C] por 10 [min].
H – 8 (Serie 8)	FE-SEM	FTO + c-TiO2 + Capas Mesoporosas + Infiltración 1 Paso: 8 [microL] de PbBr2 y CsBr 0,4 [M] en DMF a 50 [°C] por 10 [min].
I – 8 (Serie 8)	FE-SEM	FTO + c-TiO2 + Capas Mesoporosas + Infiltración 1 Paso: 8 [microL] de PbBr2 y CsBr 0,4 [M] en DMF a 50 [°C] por 10 [min].

4.2 Protocolo de Serigrafía.

Este protocolo describe la manera correcta de manipular el equipo de serigrafía disponible en el Laboratorio de Electroquímica y Nanociencias del Instituto de Química y Bioquímica, perteneciente a la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valparaíso. El equipo es presentado en la **Figura 23**. Dicho protocolo es utilizado para obtener capas mesoporosas de titania (TiO_2), circonia (ZrO_2) y carbono (C) mediante serigrafiado de pastas que contienen estos componentes. El sustrato sobre el cual se serigrafían dichas capas es un óxido transparente

conductor (OTC), en este caso particular corresponde a un vidrio alcalino cubierto con una película de aproximadamente 200 [nm] de dióxido de estaño dopado con flúor (FTO), el cual ha sido previamente cubierto con una película fina de titania mediante la técnica de rociado pirolítico.

IMPORTANTE: Este instructivo debe ser seguido de manera rigurosa y sólo asegura resultados para las actividades mencionadas anteriormente. El trabajo con cada tipo de pasta posee procedimientos específicos que deben ser revisados en la sección elaborada para la operación con dicha pasta, descrita en la parte final de este documento. La forma correcta de hacer seguimiento de estos pasos especiales es dirigirse a la sección de pasta correspondiente y buscar el número del paso que requiere la revisión, dentro del **mismo tipo de procedimiento** al que pertenece ese paso.

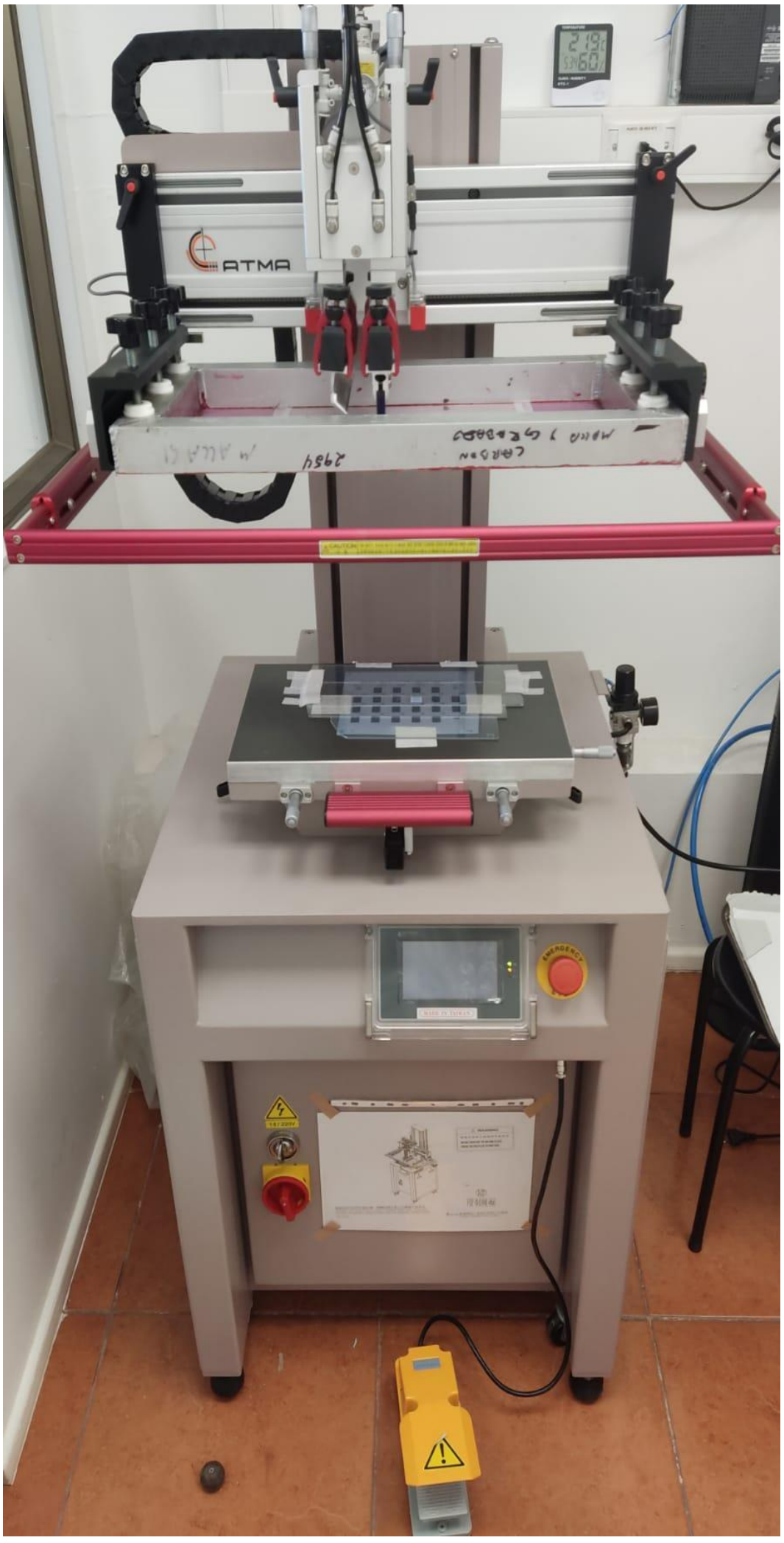


Figura 23. Serigrafiadora Semi – Automática AT-25PA.

4.2.1 RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD.

Este protocolo cuenta con la realización de actividades que podrían resultar peligrosas para la integridad física del operador. Es por este propósito por el cual se establece esta sección de seguridad, en donde se hace énfasis en el manejo seguro de equipos, instrumentos, accesorios y materiales, así como también en ciertas conductas preventivas que evitarán accidentes y ayudarán a resolver problemas durante la operación.

Es sumamente importante el uso de equipos de protección personal (EPP), los cuales protegen al usuario de peligros directos en el área de trabajo. Los EPP constan de:

- Guante de Nitrilo, Látex o material afín.
- Máscara con Filtro de Aire.
- Capa Blanca de Laboratorio.
- Pantalones y Calcetines Largos.
- Calzado Cerrado.
- Mascarilla Desechable (cuando no se necesite filtro de aire).

Dada la cantidad de reactivos químicos, artículos cortopunzantes y objetos de alta temperatura a los que se expone el personal, se debe trabajar ***siempre con el uso de los EPP.*** Los guantes también protegerán los equipos y las muestras de la contaminación por material orgánico, entre otros contaminantes provenientes desde el mismo usuario.

Otro punto importante en las recomendaciones de seguridad es en consideración los siguientes consejos para el desarrollo de este trabajo:

- Tener mucho cuidado al momento de cambiar la graduación de los tornillos de altura, en la parte superior del cabezal. Es un error común y grave olvidar que el sello debe ser removido antes de girar el tornillo.

- Existe un gran número de partículas pequeñas pululando dentro del laboratorio. Se debe trabajar de manera calmada para agitar el ambiente lo mínimo posible y proteger las muestras.
- Tener el modo semiautomático de la serigrafiadora pausado siempre que no se esté desarrollando un ciclo de impresión.
- Hay que asegurar que la hoja del bisturí sea realmente filosa, de lo contrario reemplazarla con otra.
- Se debe ser especialmente cuidadoso al trabajar la pasta de carbono, puesto que ensucia muy fácilmente y es difícil de remover.
- Al momento de instalar el bastidor, jamás ponerlo completamente al extremo en el interior del brazo de sujeción, puesto que existe una curvatura en la esquina que puede dejar inclinado al accesorio.
- Cuando se pega el fotolito a la base gris de trabajo, recordar cuál fue la primera cinta masking adherida con los dedos. Si el pegado no queda bien, se puede usar de pivote esta primera cinta para despegar, enderezar y volver a pegar el fotolito.
- Si el equipo no está imprimiendo pese a haber verificado que la altura y ángulo de los accesorios son correctos, verificar entonces la presión de alimentación y del squeegee, en el manómetro negro de regulación y en el manómetro al tope del cabezal, respectivamente.
- Se debe ser muy cuidadoso con la manipulación del techo del porta-muestras de aluminio, por ningún motivo deben tocar las muestras.
- No es estrictamente necesario quitar el pedal de operación ni cerrar la alimentación neumática del equipo al dejar de usarlo, siempre y cuando los cables queden en una posición segura, cubiertos o detrás de los equipos.
- A diferencia de las otras pastas, la titania debe ser diluida en terpineol antes de ser utilizada. Si no hay pasta preparada, poner un agitador magnético dentro de un frasco ámbar y pesar en este 15 [g] de pasta comercial de titania y 15 [g] de alfa-terpineol de la Tabla *7*. Debe quedar agitándose 1 noche entera a temperatura ambiente entre 50 y 100 [rpm].
- Para serigrafiar, se deben verter al menos 15 [g] de cada pasta sobre el bastidor.

4.2.2 MATERIALES, ACCESORIOS Y UTENSILIOS.

Para ejecutar el proceso de impresión mediante serigrafía es necesario contar con una serie de materiales, utensilios y accesorios para llevar a cabo el procedimiento. Además del equipo de serigrafía, es necesario utilizar la mufla Nabertherm (**Figura 24**) para los tratamientos térmicos entre las impresiones. El resto de los objetos utilizados son expuestos en las tablas a continuación.

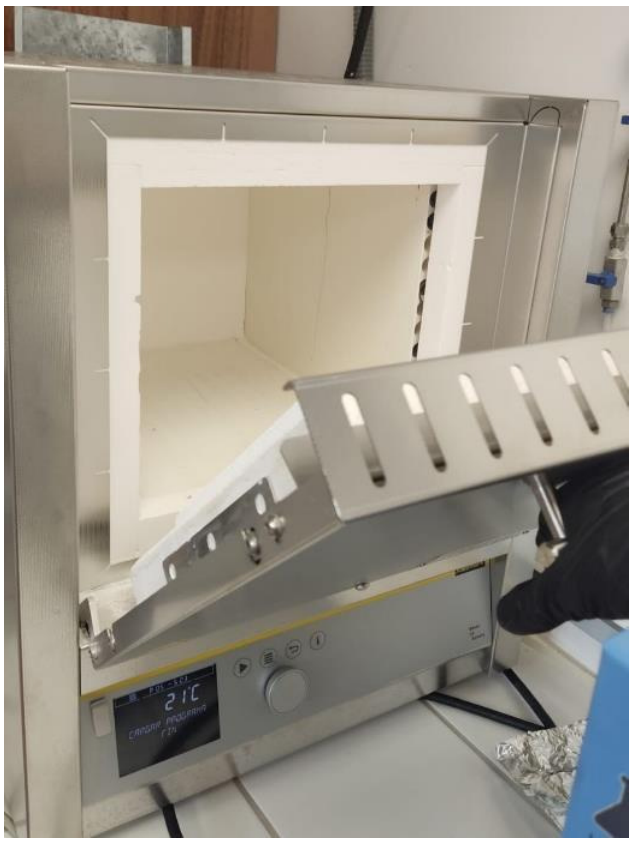


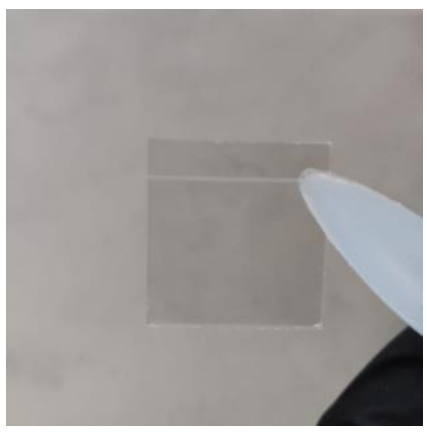
Figura 24. Mufla Nabertherm Modelo L(T) 24/11.

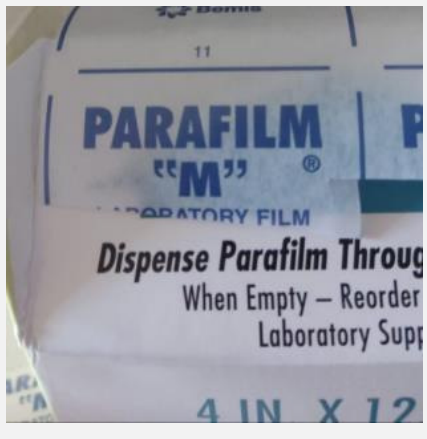
Materiales: Enunciados dentro de la **Tabla 7**, son aquellos que se consumen durante la ejecución del proceso.

Tabla 7. Tabla de Materiales de Serigrafía.

MATERIAL	MARCA / CÓDIGO	FOTOGRAFÍA
PASTA DE TITANIA	Solaronix / T/SP 14421	
PASTA DE CIRCONIA	Solaronix / ZT/SP: 46421	
PASTA DE CARBONO	Sunchemical / C2130814 D2	

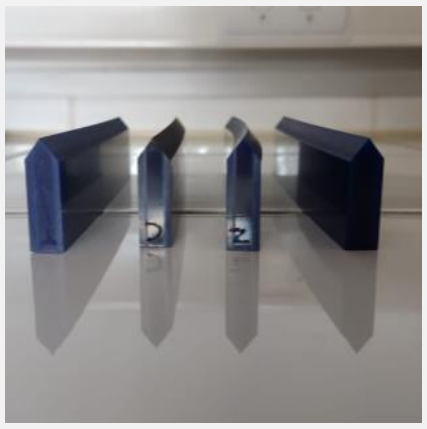
ALFA-TERPINEOL 250 [ML]	Sigma-Aldrich / 432628	
CINTA ADHESIVA 3M DE 19 [MM] DE ANCHO	Scotch / S110114	
CINTA ADHESIVA MASKING DE 48 [MM] DE ANCHO	Topex / 110232483	

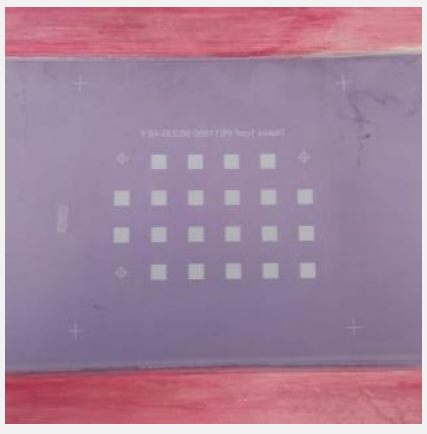
HOJA DE ACETATO 216×279 [MM^2] DE 100 [µM] DE ESPESOR	Helioffice / 0054	
SUSTRATO DE FTO CON TIO_2 ROCIADO PIROLÍTICAMENTE.	Xop Glass / TEC-15	
ETANOL	Sigma -Aldrich / 1009832511	

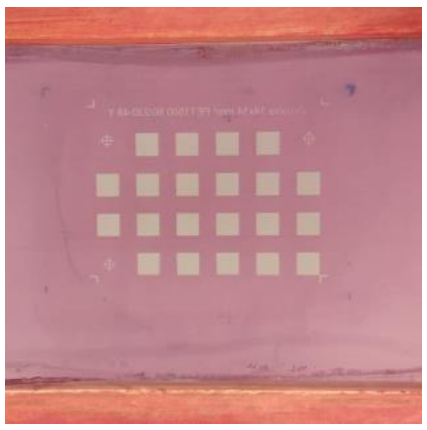
ESTOPA	Activas Chile	
PARAFILM	Bemis / PM-996	

Accesorios: Enunciados dentro de la Tabla *8*, son aquellos que, una vez puestos en su posición, no necesitan ser manipulados para ejecutar su función dentro del proceso.

Tabla 8. Tabla de Accesorios de Serigrafía.

ACCESORIO	MARCA / CÓDIGO	FOTOGRAFÍA
SQUEEGEES BISELADOS DE 85 SHORE Y 15 [CM] DE LONGITUD	RK Siebdrucktechnik /	
BARREDORA DE ACERO INOXIDABLE	ATMA	
ESCANTILLÓN DE VIDRIO FTO.	Xop Glass / TEC-15	

PORTA-SQUEEGEE DE 15 Y 20 [CM] DE LONGITUD.	ATMA	
FOTOLITOS DE TITANIA, CIRCONIA Y CARBONO.	Activas Chile	
RECIPIENTE ACERO INOXIDABLE 20×16,5×7,5 [CM^3].	Runyes	
BASTIDOR PARA TITANIA CON MALLA DE 90 MESH	Activas Chile / MALL90	

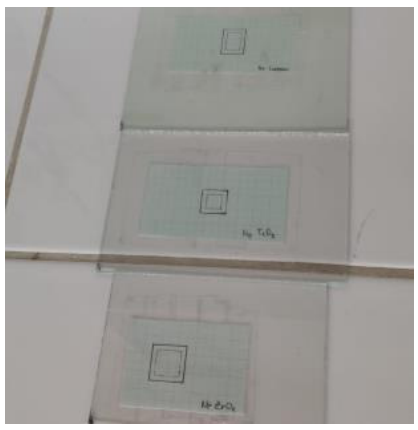
BASTIDOR PARA CIRCONIA CON MALLA DE 90 MESH	Activas Chile / MALL90	
BASTIDOR PARA CARBONO CON MALLA DE 61 MESH	Activas Chile / MALL61	
RECIPIENTE PLÁSTICO DE RESIDUOS DE LAVADO	-	

Utensilios: Enunciados dentro de la **Tabla 9**, son aquellos que deben ser manipulados durante la ejecución de su función dentro del proceso.

Tabla 9. Tabla de Utensilios de Serigrafía.

UTENSILIO	MARCA / CÓDIGO	FOTOGRAFÍA
PINZA DE TEFLÓN 127 × 12 [MM]	Fluoroware / SPI-PFA01-AB	
LLAVES ALLEN DE 3 Y 4 [MM] DE DIÁMETRO.	ATMA	
ESPÁTULAS PLÁSTICAS	Liscal / 110260725	

BISTURÍ	ChannelMED / Sterile R 08220	
BROCHA DE LIMPIEZA	• Condor / 110226489	
REGLA METÁLICA DE 30 [CM].	Kendo / 114145283	
PORTA-MUESTRAS CERÁMICO CUBIERTO DE ALUMINIO CON PROTECCIÓN.	LEN	

VIDRIOS CON PLANILLA DE CORTE MILIMETRADA PARA TITANIA, CIRCONIA Y CARBONO.	LEN	
TABLA DE CORTE 45 × 30 [CM²]	Best Hand Quality / A3 45 × 30	

4.2.3 PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN

1. Llevar a la tabla de corte una hoja de acetato de 216×279 [mm^2] un bisturí afilado, brocha de limpieza, regla metálica y la planilla de corte de cuadrilátero unitario correspondiente al material de la pasta que será serigrafiada en la operación**.**

2. Limpiar con la brocha la tabla de corte y montar sobre ella la planilla de vidrio y la hoja de acetato, en ese orden. Se debe ajustar la posición de la planilla con la marca negra que está en la tabla. La posición de la hoja se ajusta con el borde izquierdo e inferior de la tabla. Luego, sujetar la hoja de acetato por los bordes y cortar sobre la línea continua. El corte debe ser continuo y de un solo trazo, sin dejar rastros de material devastado en los bordes de la hoja. El posicionamiento sobre la tabla de corte debe ser el que se muestra en la **Figura 25.**

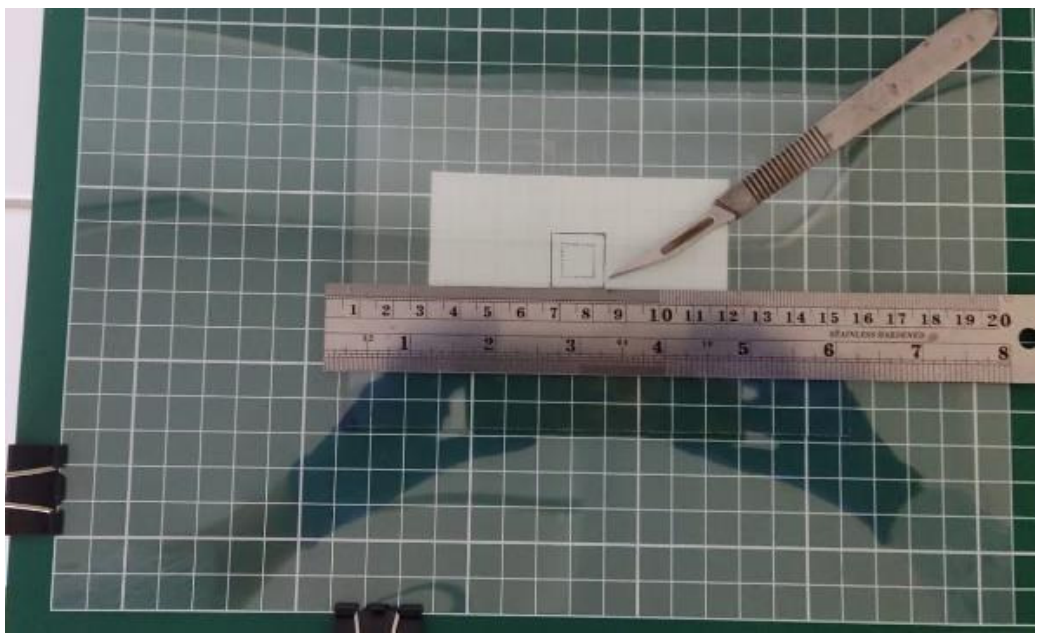


Figura 25. Configuración de Corte de la Hoja de Acetato.

3. Pegar la hoja de acetato sobre el bastidor del material correspondiente con la cinta 3M, ajustando la posición del corte realizado sobre el cuadrilátero que se desea imprimir. La hoja de acetato debe quedar totalmente estirada sobre el bastidor y pegada por los bordes extremos, tal como se muestra en la **Figura 26.**

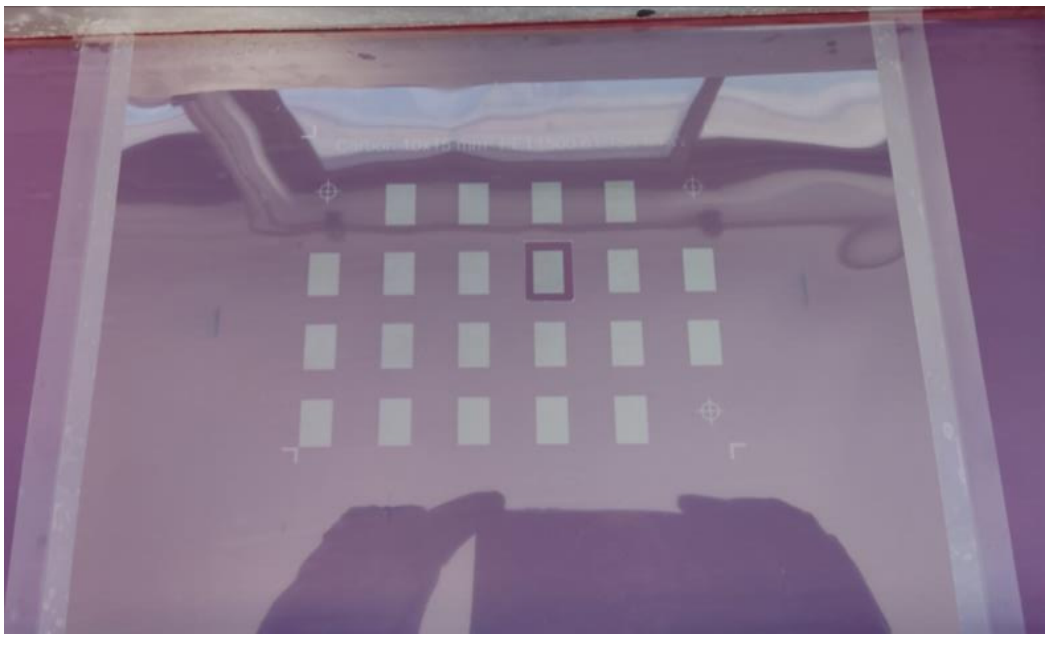


Figura 26. Hoja de Acetato pegada al Bastidor.

4. Tomar el fotolito correspondiente al material de la pasta y luego pegar 3 trozos grandes de cinta masking sobre éste, pero en dirección opuesta al bastidor y sin adherirlo a la malla, como puede verse en la **Figura 27.** Limpiar con brocha o pistola de aire si es que está sucio el fotolito.

5. Orientar el fotolito en su posición exacta sobre la parte inferior del bastidor (contraria al papel acetato) y pegar 3 trozos delgados de cinta masking en las esquinas, adhiriendo el fotolito a la malla. Es imperativo que el fotolito quede precisamente ajustado en la malla, sin que se vea la pantalla blanca del bastidor, tal y como muestra la **Figura 27**.

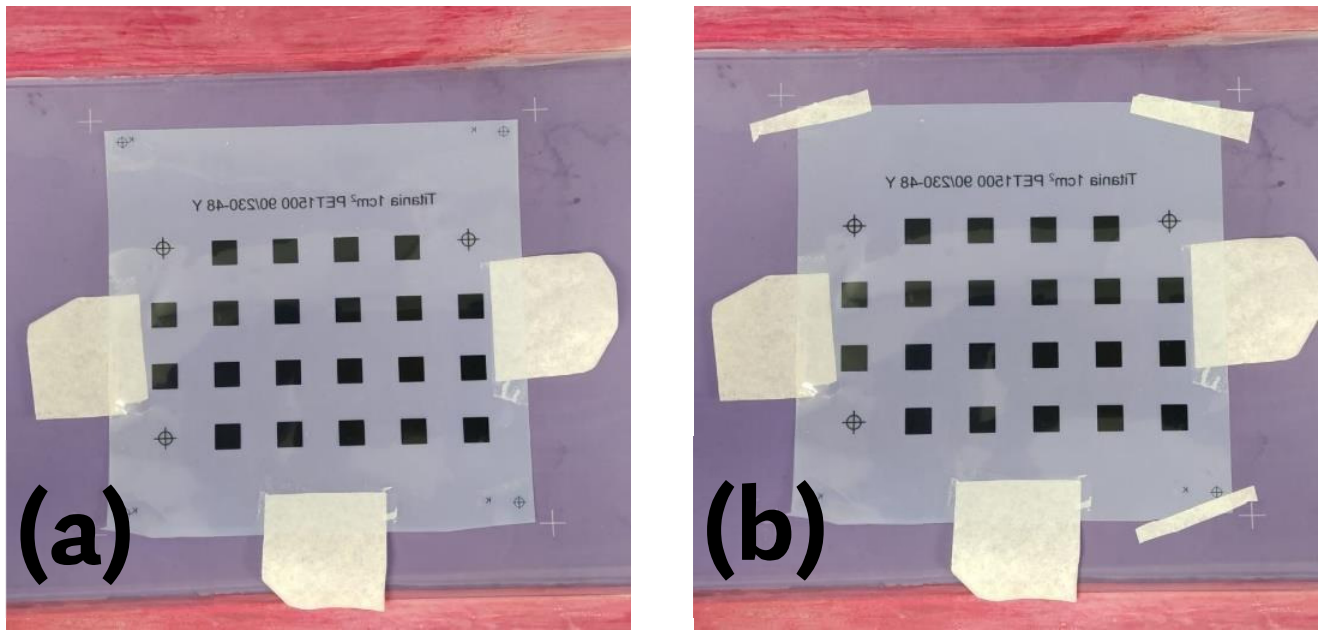


Figura 27. (a) Fotolito con trozos gruesos de masking sin pegar al bastidor. (b) Fotolito pegado al bastidor con trozos delgados de masking en las esquinas.

6. Quitar la cubierta plástica de la serigrafiadora. El equipo debe quedar completamente descubierto.

7. Soplar con la pistola de aire comprimido todo el cabezal y la base gris de trabajo, incluyendo los brazos de sujeción del bastidor. Se debe limpiar el equipo de todo el polvo antes de montar las piezas, como muestra la **Figura 28**.

8. Ajustar la posición de la base de la serigrafiadora a una distancia de 20 centímetros desde las paredes, la cual debe estar además perfectamente horizontal. El equipo no debe vibrar ni quedar inclinado.

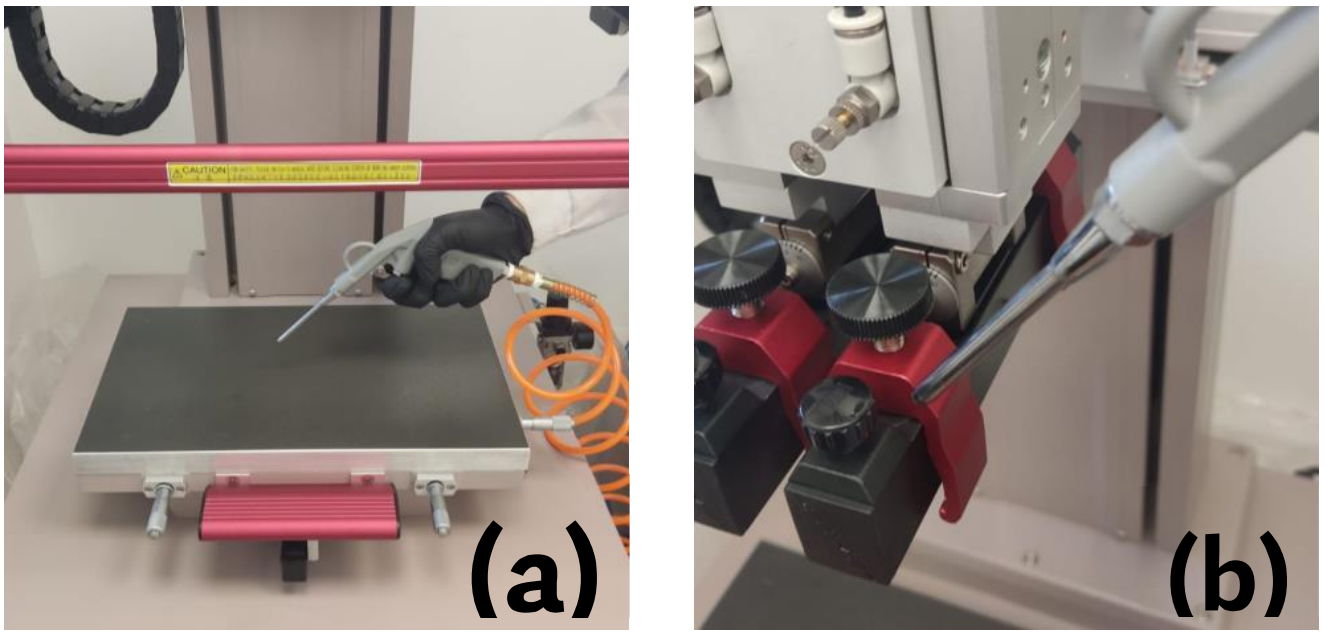


Figura 28. (a) Soplido de la pistola sobre la base gris de trabajo. (b) Soplido de la pistola en el cabezal de impresión.

9. Montar el bastidor en la serigrafiadora, con el papel acetato en la parte superior y el lado que contiene dos cruces de la pantalla de la malla apuntando hacia la izquierda. Asegurar la posición del bastidor centrándolo respecto al cabezal tornillos de sujeción, los cuales deben sostener el bastidor ***siempre*** desde la zona plana del marco de aluminio, como se muestra en la **Figura 29**.

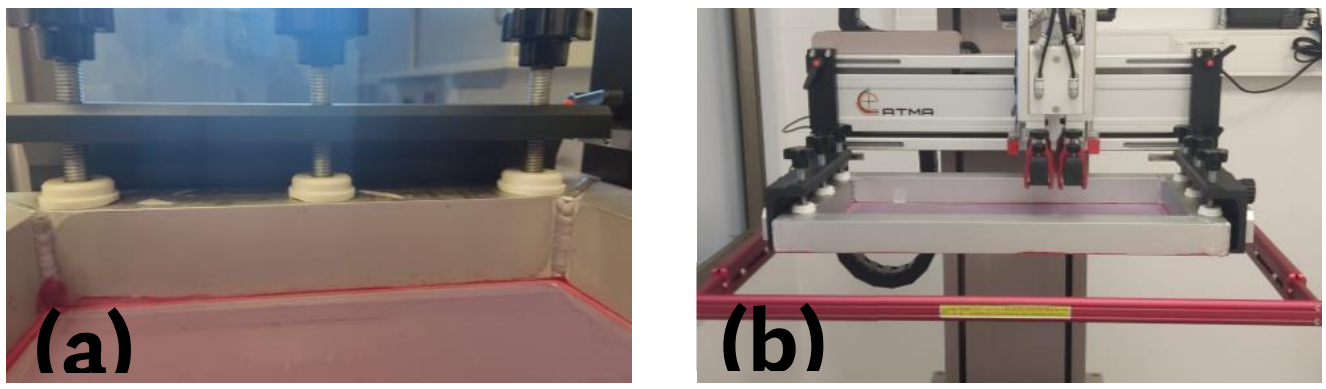


Figura 29.(a) Sujeción del Bastidor desde el Marco de Aluminio. (b) Bastidor montado en el Cabezal de impresión.

10. Barrer la hoja de acetato con la brocha de limpieza, de manera suave y siempre desde el centro hacia el exterior de la hoja. Se debe quitar cualquier partícula de polvo o pelusa de su superficie.

11. Aflojar los 2 tornillos que afirman cada una de las barras negras de ajuste angular del cabezal de impresión con ayuda de la llave Allen de 3 [mm] de diámetro, como se muestra en la **Figura 30**. Sólo girar hasta que los tornillos queden sueltos, de 3 – 4 giros.

12. Utilizando la llave Allen de 4 [mm] de diámetro, soltar los tornillos del porta-squeegee de 15 [cm] y poner el squeegee dentro, de manera que la base plana quede tocando completamente la base interior del porta-squeegee. El bisel (visto en la punta) de mayor longitud del squeegee debe quedar de lado contrario a las cabezas de los tornillos. Finalizado esto, volver a apretar los tornillos, asegurando que quede bien apretado. Para finalizar la instalación, ir al punto 23 de este mismo procedimiento. Revisar la ***sección de pasta*** para cada caso.

13. Primero quitar el seguro de los tornillos de graduación del squeegee (derecho) y la barredora (izquierdo), en el tope del cabezal de impresión, como se muestra en la **Figura 30**. Se debe girar el seguro hasta que quede completamente suelto, pero sin que salga de la estructura.

14. Girar los tornillos graduados, como en la **Figura 30.** Para titania y carbono, girar hasta llegar a 1 [mm] de altura para el squeegee (2 vueltas sobre el 0) y 6,5 [mm] de altura para la barredora (13 vueltas sobre el 0). Luego, volver a cerrar los seguros. Para la circonia, revisar la ***sección de pasta.***

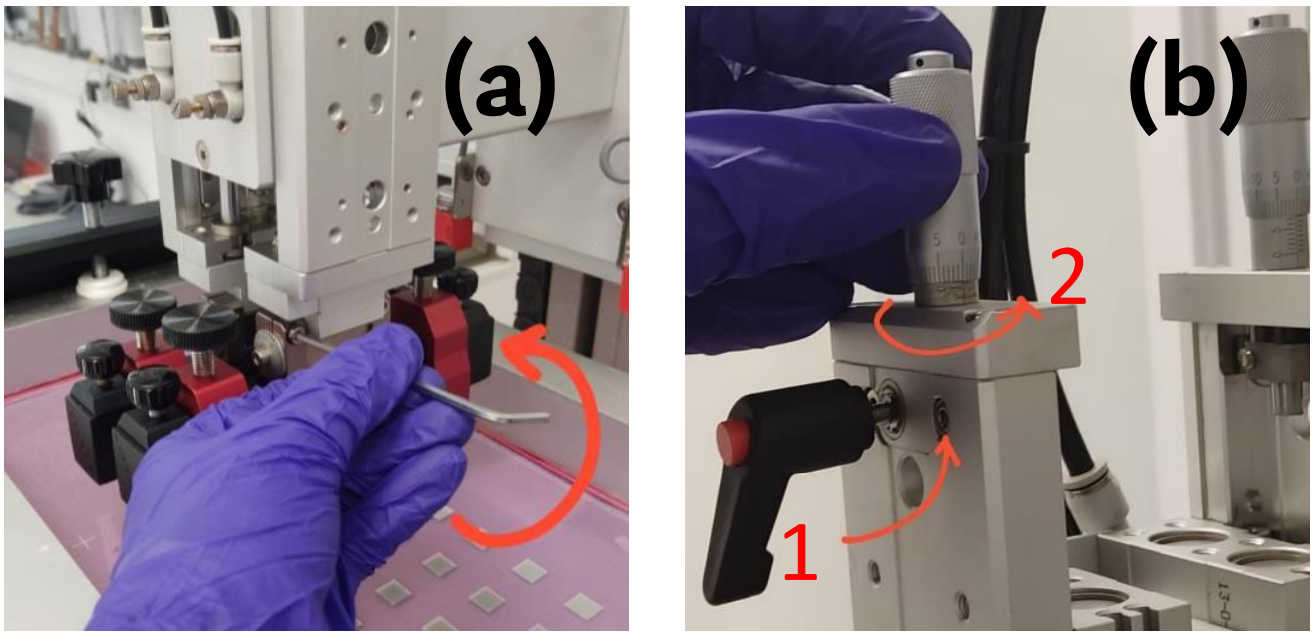


Figura 30. (a) Giro del tornillo de la Barra Negra de ajuste angular con Llave Allen. (b) Giro del Seguro y del Tornillo de Graduación del squeegee y la barredora.

15. Conectar el compresor en el enchufe de poder N°9, mostrado en la **Figura 31**. Conectar la manguera azul de aire comprimido en la entrada de alimentación de la serigrafiadora, asegurando antes que la válvula de globo del compresor, que se muestra abierta en la misma figura, esté cerrada. Luego encender el compresor, el cual comenzará a operar.

16. Cuando el compresor termine de acumular aire, se debe activar la entrada de la alimentación neumática a la serigrafiadora deslizando la válvula azul hacia la izquierda, como se ve en la **Figura 32.**

17. Abrir la válvula de globo del compresor y la válvula negra de regulación que posee la serigrafiadora, como se muestra en la **Figura 31** y **Figura 32**, respectivamente. Para hacer lo segundo, primero se debe levantar la perilla negra que funciona de seguro, luego se debe regular la presión de entrada lentamente hasta llegar a 2,5 [bar]. Finalmente, bajar el seguro negro de la válvula.

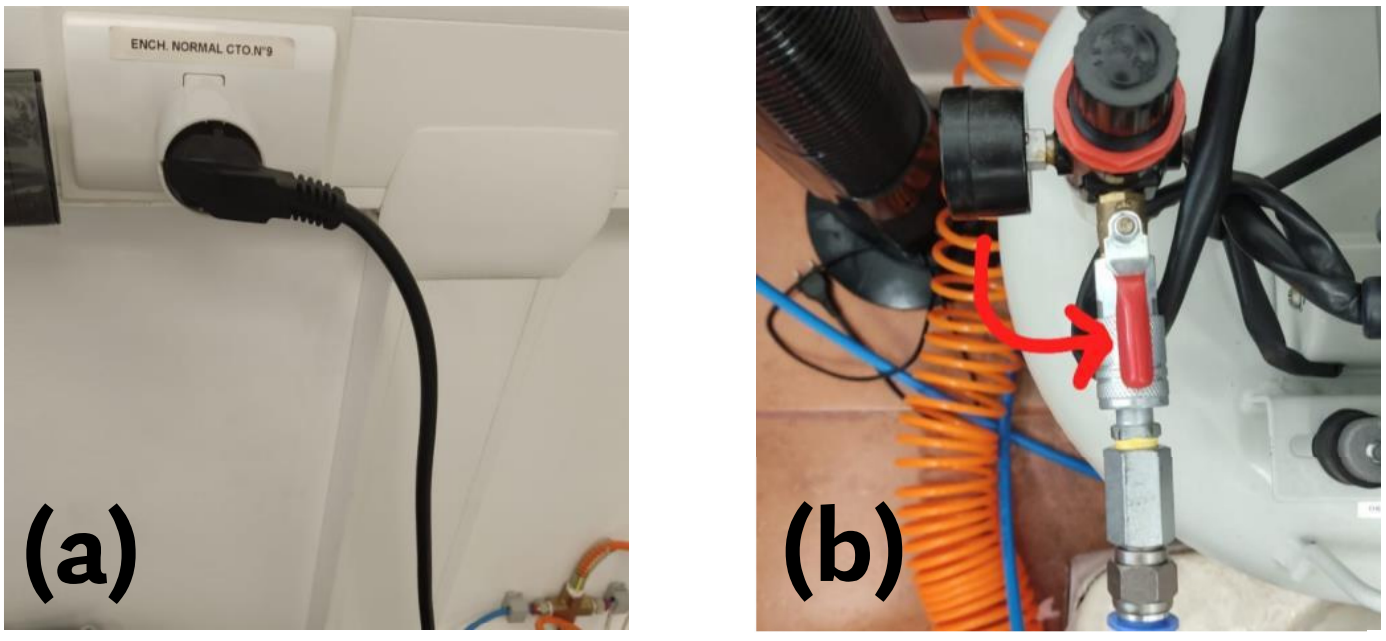


Figura 31. (a) Enchufe de Circuito N°9. (b) Giro de Apertura de la Válvula de Globo del Compresor.

18. Conectar la serigrafiadora en el enchufe de poder N°10 y luego encenderla girando el switch de poder principal rojo, en la parte inferior frontal del equipo, a su posición de encendido (ON). Revisar **Figura 32.**

19. Conectar el pedal de operación semiautomática a la serigrafiadora, en el enchufe que se encuentra debajo del borde frontal superior en la base del equipo, como se muestra en la **Figura 32**. A continuación, girar el anillo alrededor de la conexión para fijarlo y posicionar el pedal en un lugar cómodo en el suelo, cerca del equipo.

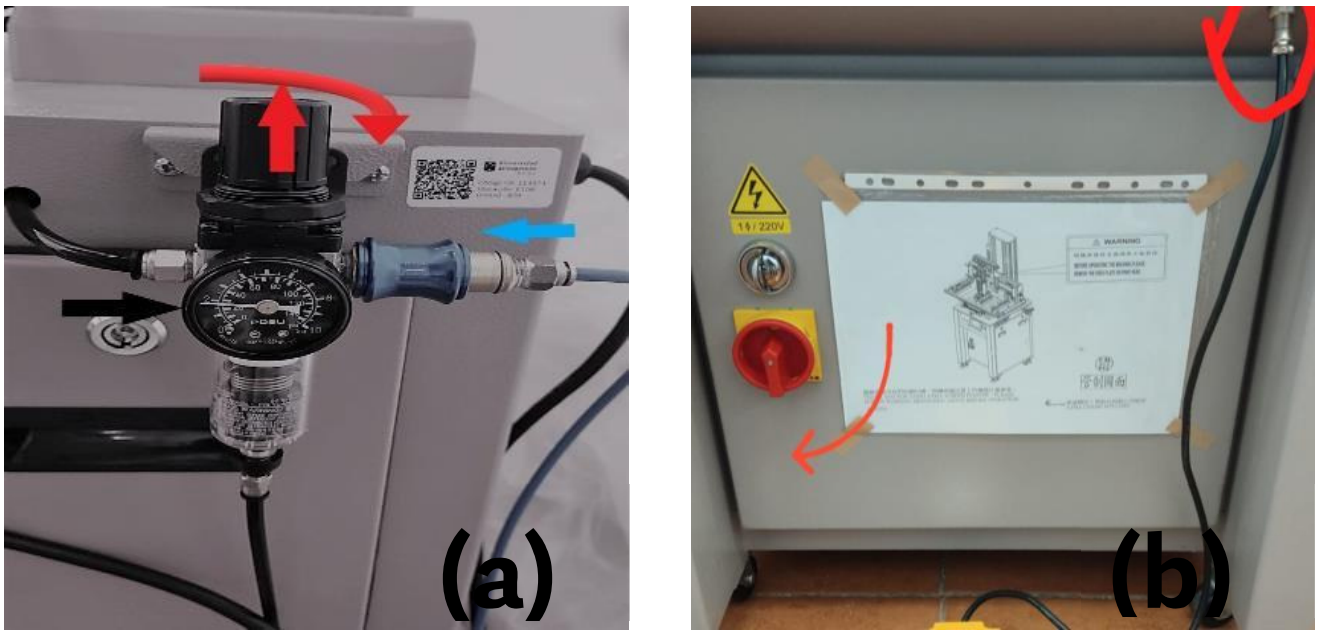


Figura 32. (a) Apertura de Válvula de Alimentación de Aire (azul) y Válvula de Regulación (negra) con manómetro. (b) Giro del Switch de Poder Principal y Lugar de Conexión del Pedal.

20. Una vez encendida, esperar a que el panel presente una imagen estable, mover la tapa hacia abajo, tocar la pantalla y luego apretar el botón de autocalibración, como muestra la **Figura 33.** Esperar a que el cabezal del equipo termine de moverse y el panel cambie al menú principal.

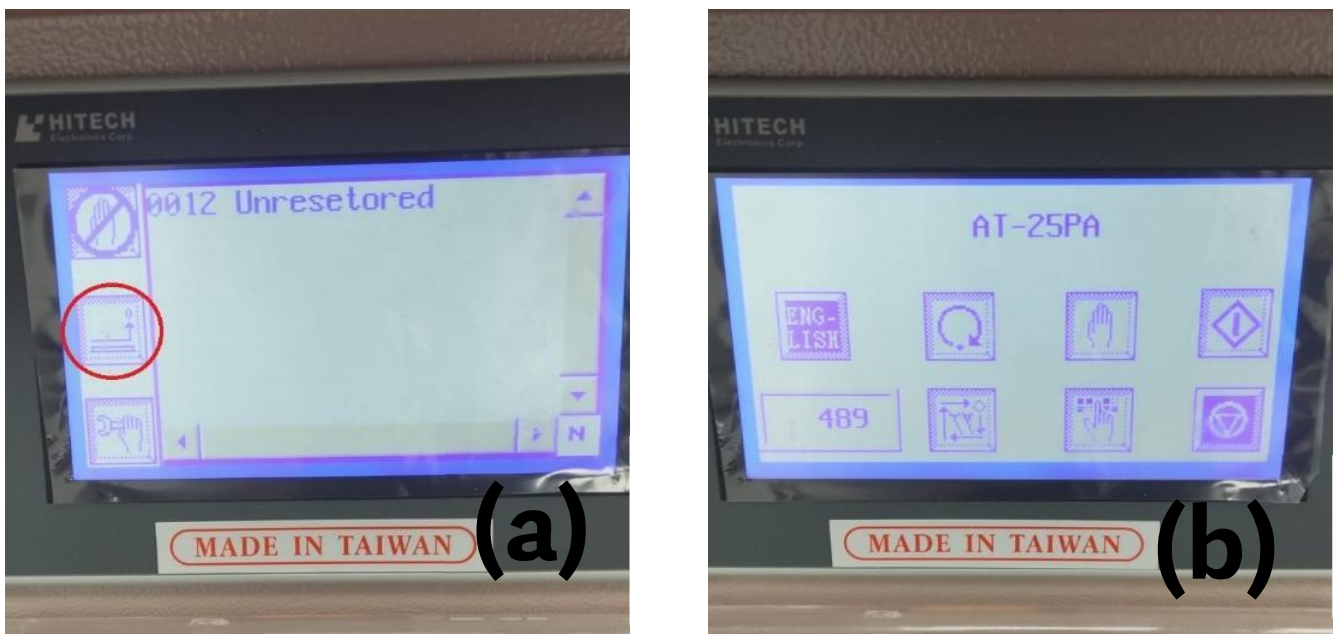


Figura 33. (a) Botón de Auto-calibración de la Serigrafiadora. (b) Panel en Menú Principal.

21. Despejar la base gris de trabajo e ingresar al modo de ***operación manual*** en el menú principal, como muestra la **Figura 34** y luego mantener presionado el botón de ***bajar bastidor,*** visto en la **Figura 35**, hasta que el bastidor alcance su límite inferior y se detenga.



Figura 34. Selección del Modo Manual.

22. Una vez abajo el bastidor, presionar con los dedos las tres cintas adhesivas grandes del fotolito que miran hacia la base gris de trabajo, desde la superficie de la hoja de acetato. Deben quedar bien pegadas a la base, como muestra la **Figura 36**. Luego, subir el bastidor hacia su posición original con el botón de ***subir bastidor*** y retirar 3 los trozos pequeños de cinta adhesiva que pegaban el fotolito al bastidor. Si el fotolito no queda estirado sobre la base, despegar las cintas, extenderlo y volverlas a pegar, usando de pivote (cinta que no se despega) el primer trozo de cinta que se pegó.

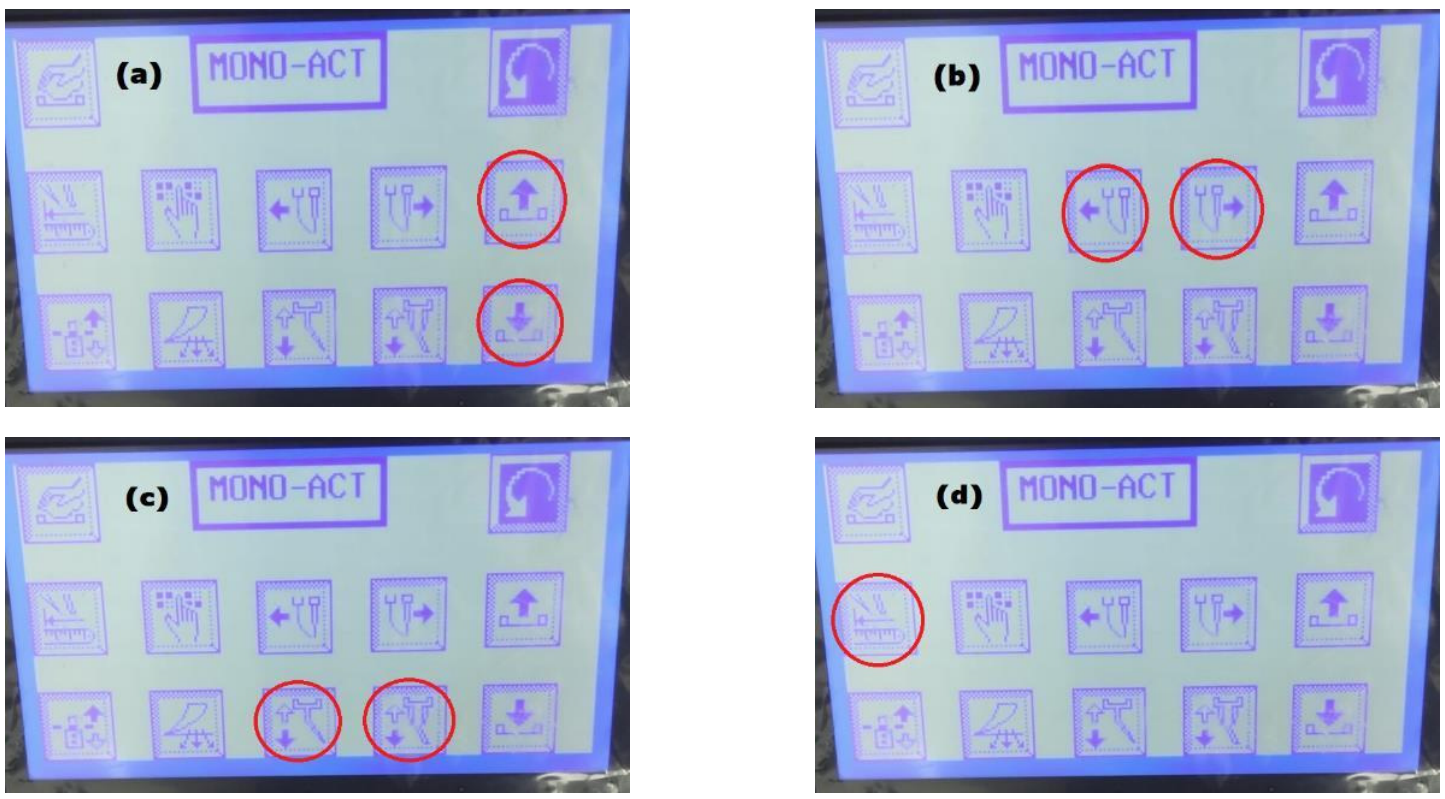


Figura 35. Utilización del Modo Manual. (a) Subir y Bajar el Bastidor, (b) Mover el Cabezal Hacia Izquierda y Derecha, (c) Bajar/Subir Barredora y Squeegee, (d) Fijar Posición de Impresión.

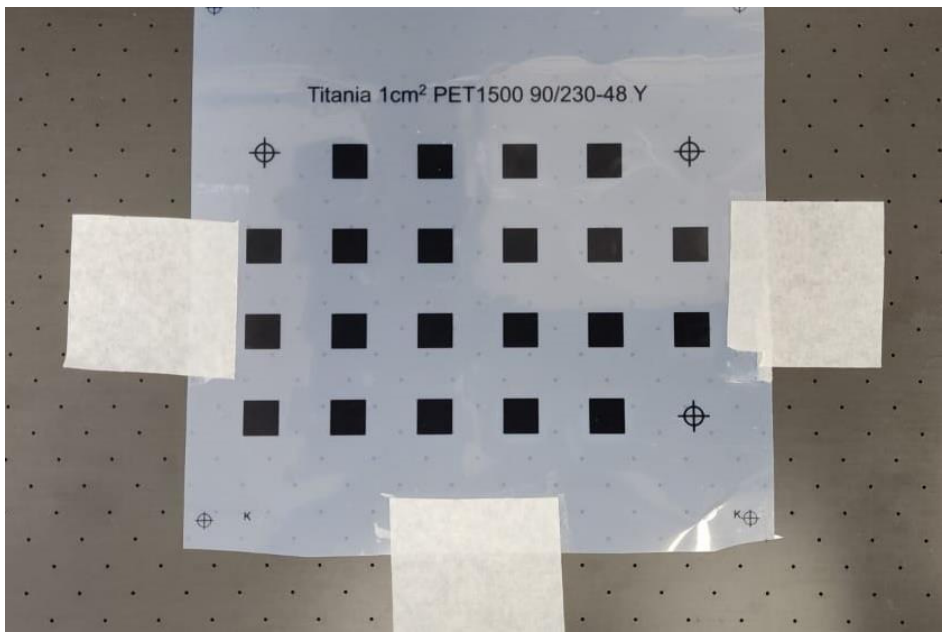


Figura 36. Fotolito Pegado a la base gris de trabajo.

23. Montar, en primer lugar, el porta-squeegee con el squeegee en la barra derecha con ayuda de los sujetadores rojos tipo H. Asegurar que las cabezas de los tornillos del porta-squeegee queden apuntando hacia la derecha, como se ejecuta en la **Figura 37**. El accesorio debe quedar centrado en la barra. Girar a 0 grados la barra derecha y apretar los

sujetadores tipo H de esta barra, cuidando que la pieza quede centrada en el bastidor. Luego, apretar los tornillos de la barra para asegurar el ángulo de la pieza.

24. Montar, en segundo lugar, la barredora metálica a la barra izquierda, de manera que la parte inferior de la barredora, la pala, apunte hacia la derecha, al igual que en la **Figura 37**. Luego, girar la barra angular a 5 grados (entre la marca de 0 y 10 grados del medidor angular) y apretar los tornillos de los sujetadores. Para circonia y carbono, revisar la ***sección de pasta.***

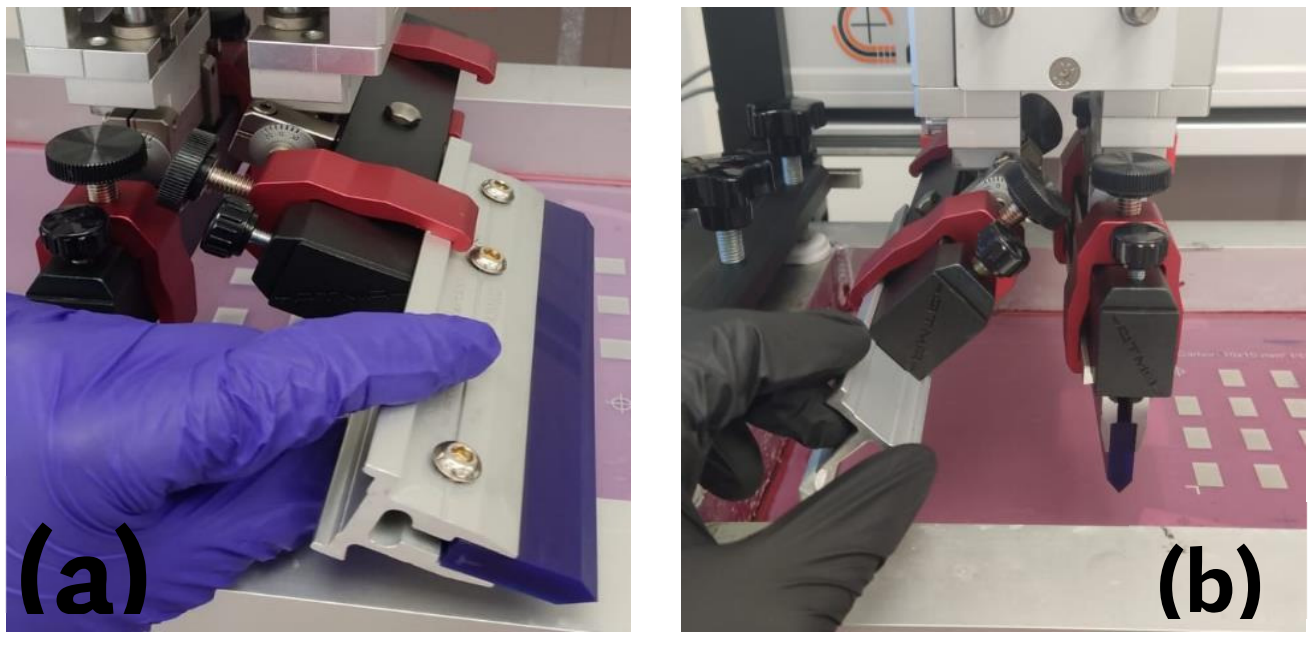


Figura 37. (a) Montaje del Squeegee. (b) Montaje de la Barredora.

25. Traer los sustratos preparados en la placa porta-muestras con un techo protector de aluminio. Debe cubrir completamente la superficie de la placa y tener una curvatura con altura suficiente para evitar el contacto entre el aluminio y las muestras. Esto puede apreciarse en la **Figura 38**.

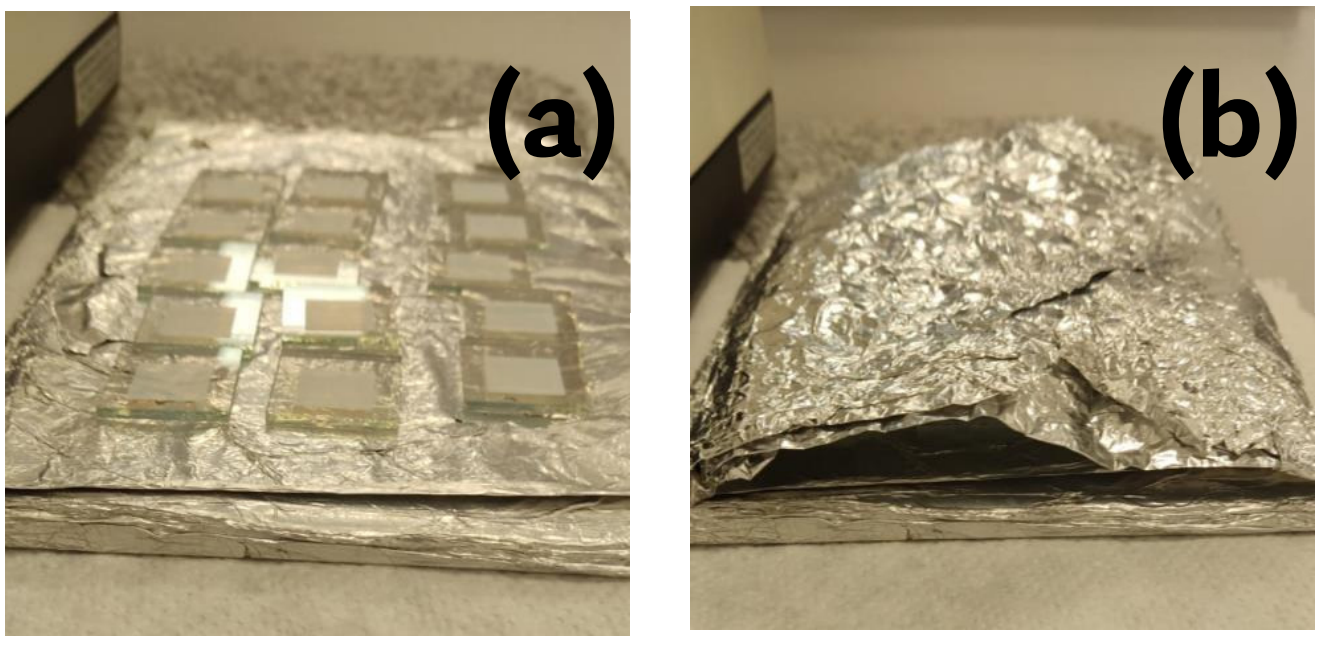


Figura 38. (a) Porta-muestras descubierto y en uso. (b) Porta-muestras protegido por techo protector de aluminio.

26. Manipular un sustrato de prueba, de medidas exactamente iguales a las de una muestra original, y ponerlo en la posición del fotolito que será serigrafiada. El sustrato debe tomarse desde una esquina superior al surco, muy cerca del borde y dejarse siempre con el surco hacia arriba, como en la **Figura 39**.

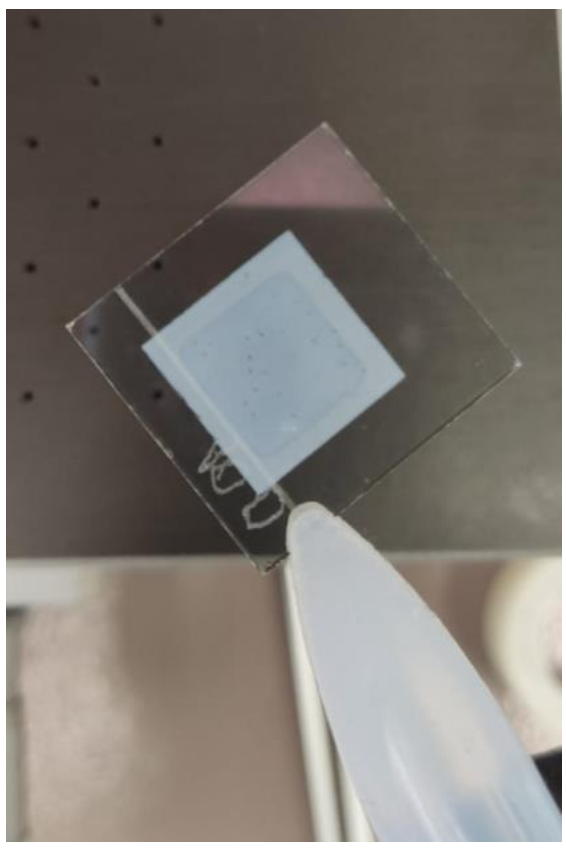


Figura 39. Manipulación Correcta del Sustrato.

27. El ajuste de la posición se hace considerando dos principales puntos de vista: la frontal y la lateral hacia el equipo. Para cada tipo de pasta, ver la ***sección de pasta.***

28. Poner los vidrios Nº I´ y II´ del escantillón en extremos opuestos y paralelos al surco del sustrato. Si el sustrato se mueve de su posición, puede hacerse el ajuste manipulándolo a través de estos vidrios.

29. Poner los vidrios Nº III' y IV' del escantillón a los lados del sustrato y en extremos opuestos, perpendiculares al surco. Si el sustrato se mueve, puede hacerse el ajuste manipulando estos vidrios, cuidando de no mover los vidrios I´ y II´ para no tener que volver a ajustar esa posición.

30. Poner los vidrios Nº I y II del escantillón a cada extremo del cuerpo de vidrio, en la perspectiva frontal hacia el equipo. Por ningún motivo se debe mover el sustrato de su posición. Verificar la posición de los vidrios en la **Figura 40**.

31. Pegar los vidrios Nº I, I' y IV' del escantillón a la base gris de trabajo con cinta adhesiva masking. Pegarlos unitariamente y luego entre ellos, tal y como se muestra en la **Figura 40**. Estas piezas de vidrio deben quedar completamente inmóviles. Para circonia y carbono, revisar la ***sección de pasta.***

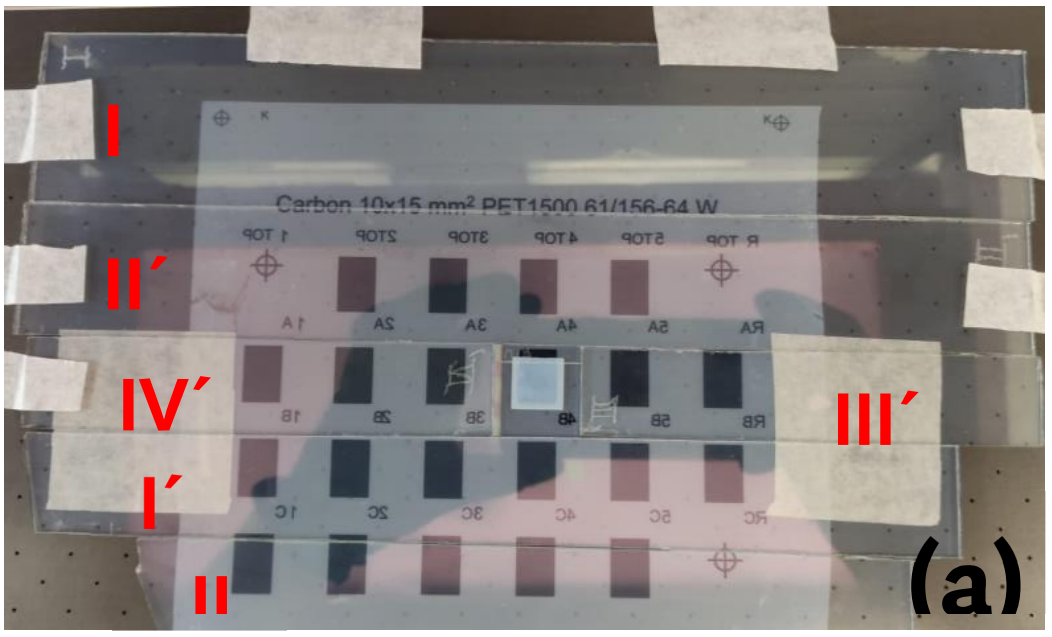


Figura 40. (a) Primer paso de Pegado de los Vidrios del Escantillón. (b) Segundo paso de Pegado de los Vidrios del Escantillón.

32. Ingresar en el panel al modo de ***fijar posición de impresión,*** dentro del menú de ***operación manual*** visto en la **Figura 35,** luego elegir los límites extremos de movimiento del cabezal que minimicen el recorrido de impresión, en base a la posición escogida de la hoja de acetato para imprimir. Los límites se definen en base a la posición del corte y deben permitir que ambos accesorios adheridos al cabezal de impresión queden a una distancia de, al menos, 1 posición de cuadrilátero pasada desde el corte tras hacer su recorrido en la impresión. Los valores que se deben ajustar están marcados en la **Figura 41**.

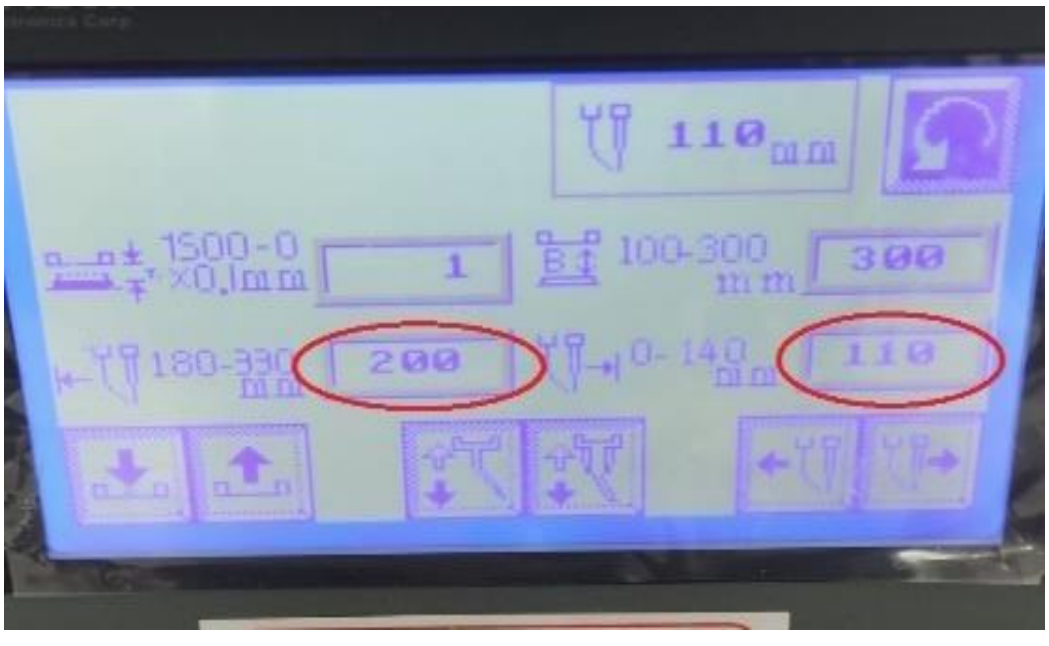


Figura 41. Variables de Ajuste de Movimiento dentro del modo de Ajuste de Posición.

33. Volver al menú de ***operación manual*** y mover el cabezal hacia la derecha, lo suficiente como para generar espacio y esparcir el contenido del frasco en la superficie de la hoja de acetato. Debe esparcirse entre las posiciones que tienen los accesorios al estar en el tope izquierdo del barrido, mientras que la longitud frontal debe cubrir el largo de la pieza más extensa (barredora). De ser necesario, usar la espátula plástica para esparcir mejor la pasta, cuidando de no ensuciarla con polvo. Para circonia, revisar la ***sección de pasta.***

34. Volver a poner el cabezal en su posición inicial original y bajar ambas piezas del cabezal de impresión, luego subirlas. Ambos accesorios deben quedar impregnados con pasta, como se muestra en la **Figura 43**. Al bajar el squeegee, se debe leer el manómetro del cabezal, en la parte superior de este, y confirmar que la presión llega a los 0,2 [MPa], como se muestra a continuación en la **Figura 42**.

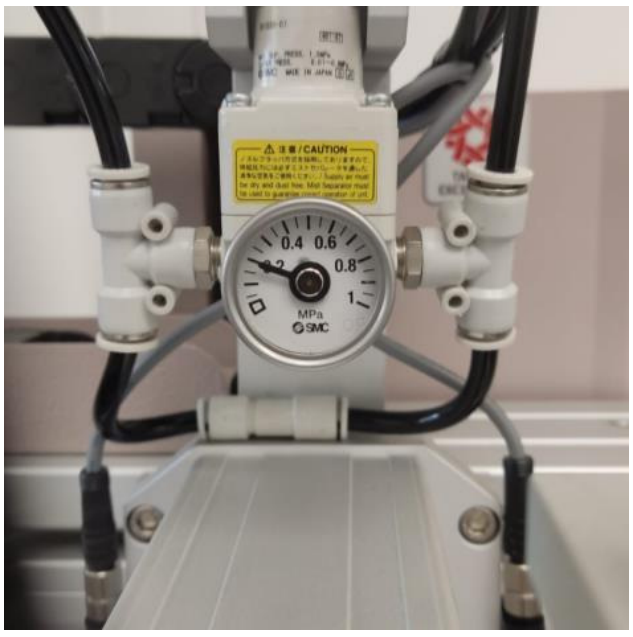


Figura 42. Manómetro del Cabezal cuando el Squeegee se encuentra abajo.

35. Mover el cabezal hacia su tope derecho y volver a bajar ambas piezas. La distancia entre ambos quedará marcada por la pasta. Luego, esparcir superficialmente algo de la pasta con la espátula plástica, tal cual muestra la **Figura 43**. Se debe evitar que el squeegee pase por el acetato sin que haya pasta entre ellos.

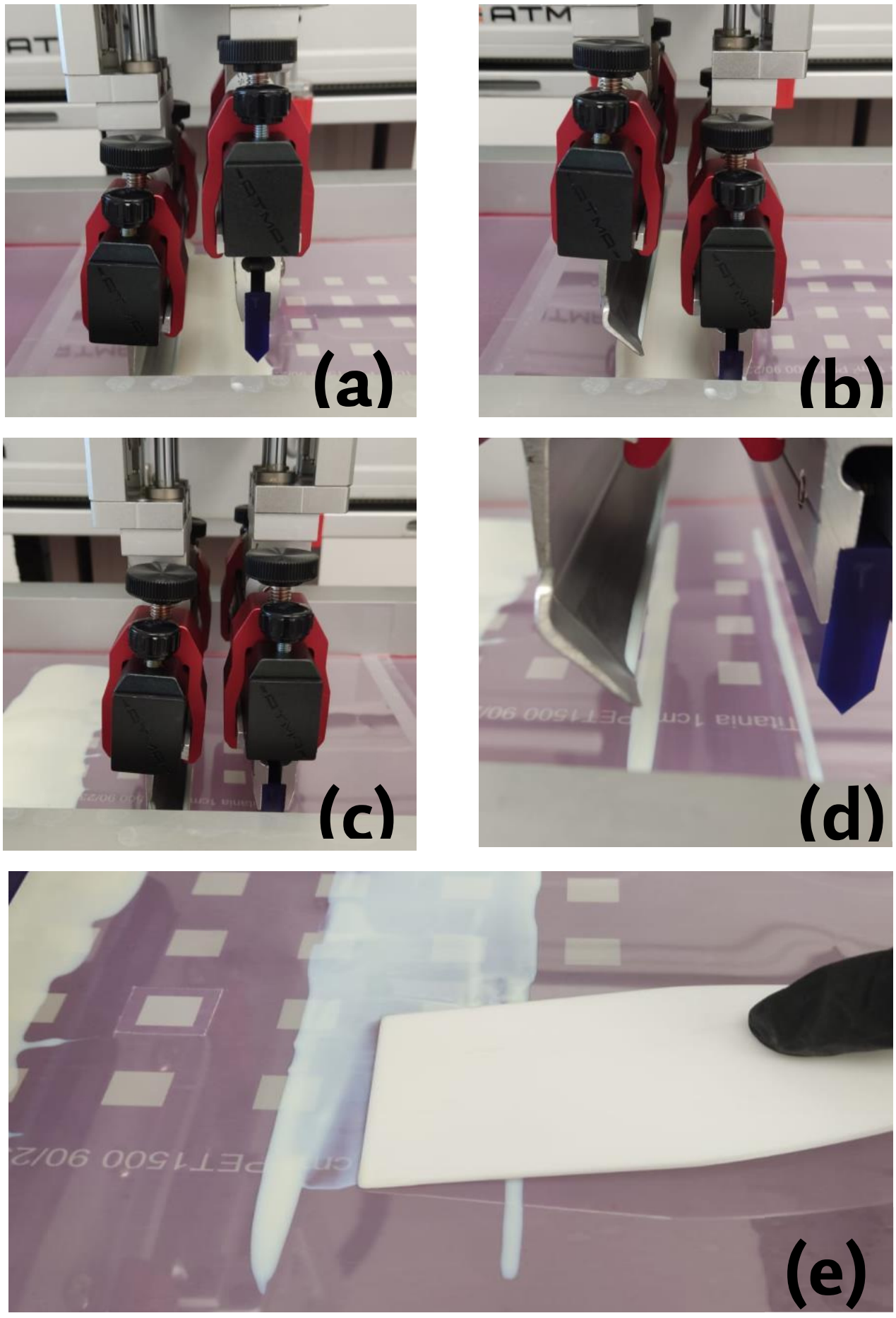


Figura 43. Procedimiento de los pasos 26 y 27. (a) Barredora abajo. (b) Squeegee abajo. (c) Cabezal en el lado izquierdo y ambas piezas abajo. (d) Piezas levantadas y visualización de las marcas. (e) Esparcimiento de la Pasta con Espátula.

1. Mover el cabezal hacia su posición original, en el extremo izquierdo, e impregnar la malla con pasta de manera manual; presionar el botón de ***bajar la pieza izquierda***, luego

mantener presionado el botón para mover cabezal hacia la derecha hasta finalizar el recorrido; después, levantar la pieza izquierda con el mismo botón que se usa para bajarla y presionar el botón de ***bajar la pieza derecha***, luego mantener presionado el botón para mover cabezal hacia la izquierda y levantar el squeegee al finalizar el recorrido, de la misma manera que se hizo con la pieza izquierda. La abertura del corte en el acetato, junto a la posición de impresión en el bastidor, quedarán impregnadas con pasta. Para circonia, revisar la ***sección de pasta.***

2. Volver al menú principal y entrar al modo de ***función de impresión***, en donde debe seleccionarse la función de ***esparcimiento de tinta antes de imprimir,*** como puede apreciarse en la **Figura 44.** Para circonia, revisar la ***sección de pasta.***

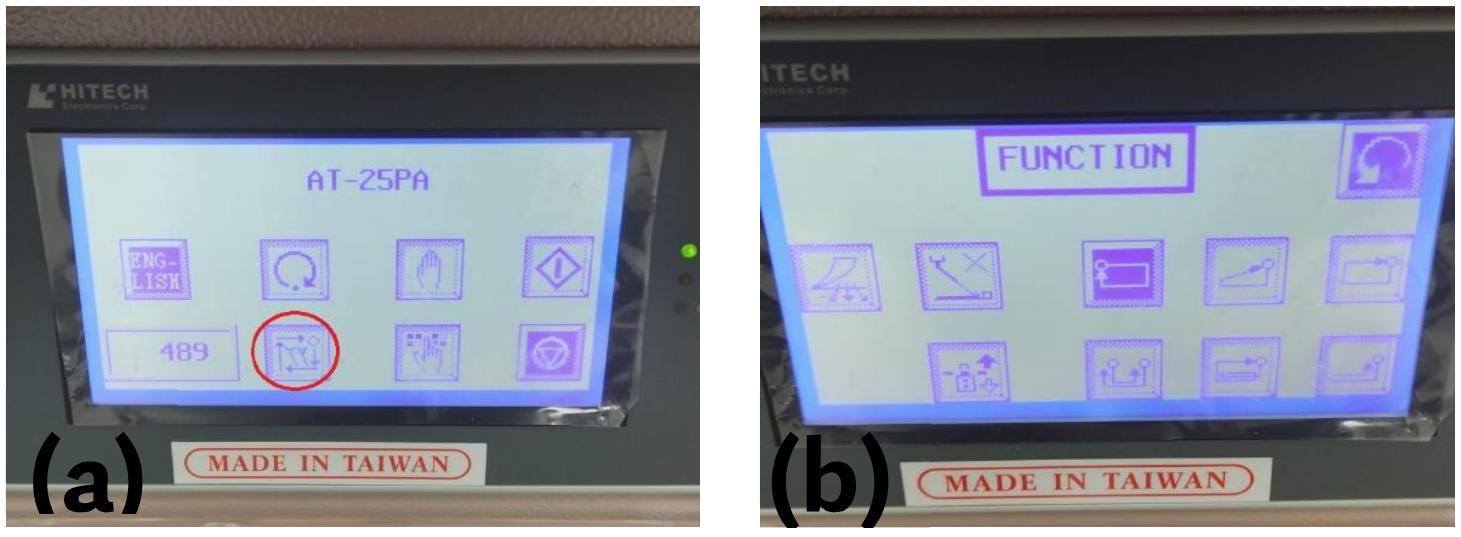


Figura 44. (a) Modo de Función de Impresión. (b) Modo de Función: Esparcimiento ante de Imprimir.

3. Finalmente, volver al menú principal y activar el modo de ***funcionamiento semiautomático*** apretando, en orden, los dos botones que se muestran en la **Figura 45**.

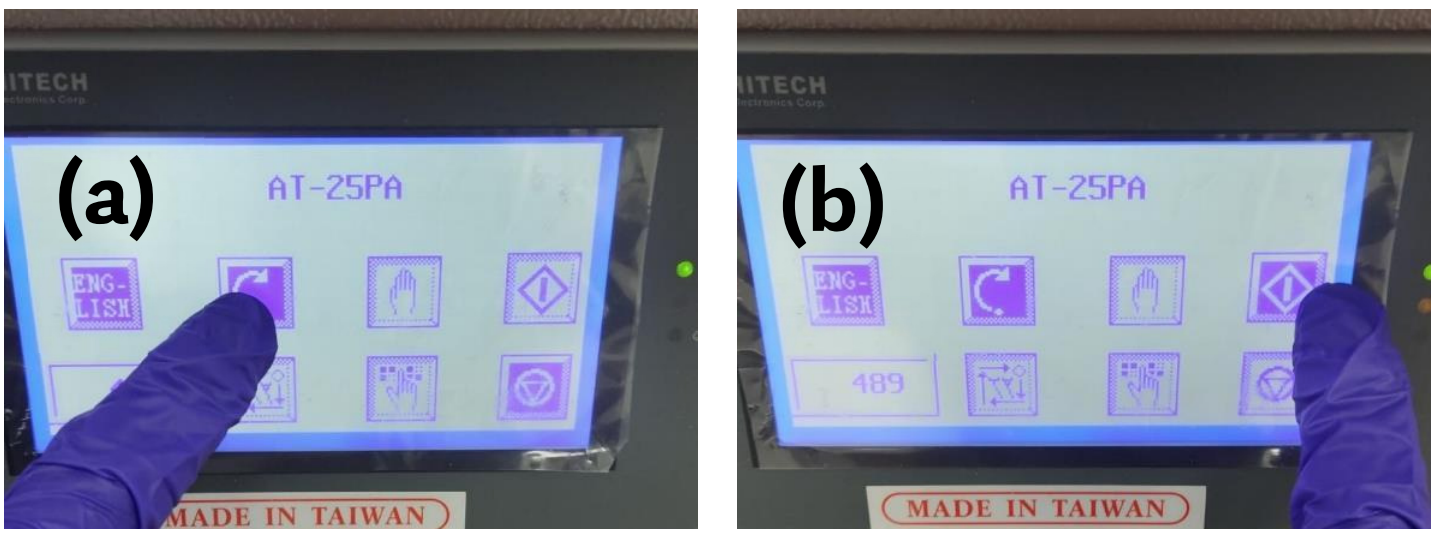


Figura 45. (a) Botón de Modo Semiautomático. (b) Botón de Activación del Modo Semiautomático.

Una vez finalizados estos pasos, el equipo se encontrará en condiciones de comenzar a operar.

4.2.4 PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN

Desde este punto el trabajo debe ser rápido y continuo:

1. Utilizar el sustrato de prueba para verificar la correcta impregnación de la malla, haciendo la primera impresión sobre éste. Basta con pisar el pedal sólo una vez para realizar un ciclo de impresión, el cual no empezará hasta que se suelte la presión sobre el pedal.

2. A partir de la primera vez, se deberá volver a repasar la pasta entre los extremos del tope izquierdo de ambas piezas del cabezal, evitando que el acetato tenga contacto directo con la goma, tal cual como se mostró en la **Figura 43**.

3. Imprimir sobre el sustrato de prueba las veces que sean necesarias antes de hacerlo sobre las muestras, hasta que la película quede correctamente serigrafiada sobre la prueba.

4. Quitar el sustrato de prueba apartando los vidrios del escantillón II, II' y III' (los que no están adheridos a la base gris de trabajo), para luego manipular con pinzas de teflón y dejar a un lado cuidadosamente. Para circonia y carbono, revisar la ***sección de pasta.***

5. Poner una muestra en la posición ajustada entre los escantillones fijos y luego cerrar con los escantillones móviles, recordando que el surco debe apuntar hacia el fondo del equipo y la cara que lo contiene debe apuntar hacia arriba. Para circonia y carbono, revisar la ***sección de pasta.***

6. Soplar levemente con la pistola de aire comprimido la suciedad superficial. Debe ser un flujo de aire muy leve, que a penas emita sonido al salir. El ángulo de soplido debe ser de menos de 45º de inclinación respecto a la superficie del escantillón.

7. Activar el ciclo de impresión con el pedal. Luego, retirar la muestra delicadamente y colocar en la placa cubierta de aluminio, sacar otra muestra de la placa y tapar con el techo de aluminio.

8. Repetir este proceso hasta terminar con todas las muestras y luego pausar el modo semiautomático desde el panel, como muestra la **Figura 46**. Dejar reposando las muestras tapadas por 15 minutos dentro del horno. Finalmente, activar el programa del horno correspondiente al material de la pasta que se trabajó. Revisar la ***sección de pasta*** para cada material.



Figura 46. Modo Semiautomático Pausado.

Una vez finalizados estos pasos, la operación del equipo está completa y se tendrá que dar paso inmediato a la recuperación de la pasta y la limpieza antes de comenzar con la desactivación del equipo.

4.2.5 PROCEDIMIENTO DE RECUPERACIÓN Y LIMPIEZA

1. Remover el squeegee del cabezal con ayuda de la llave Allen de 3 [mm], con el movimiento inverso al mostrado en la **Figura 30** y cuidando de no ensuciar los alrededores por el goteo de la pasta. Remover la pasta del bisel con la espátula y depositarla en el frasco, raspando la espátula con este último de ser necesario, como muestra la **Figura 47**. Repetir lo mismo con la barredora o la otra pieza del cabezal utilizada para serigrafiar.

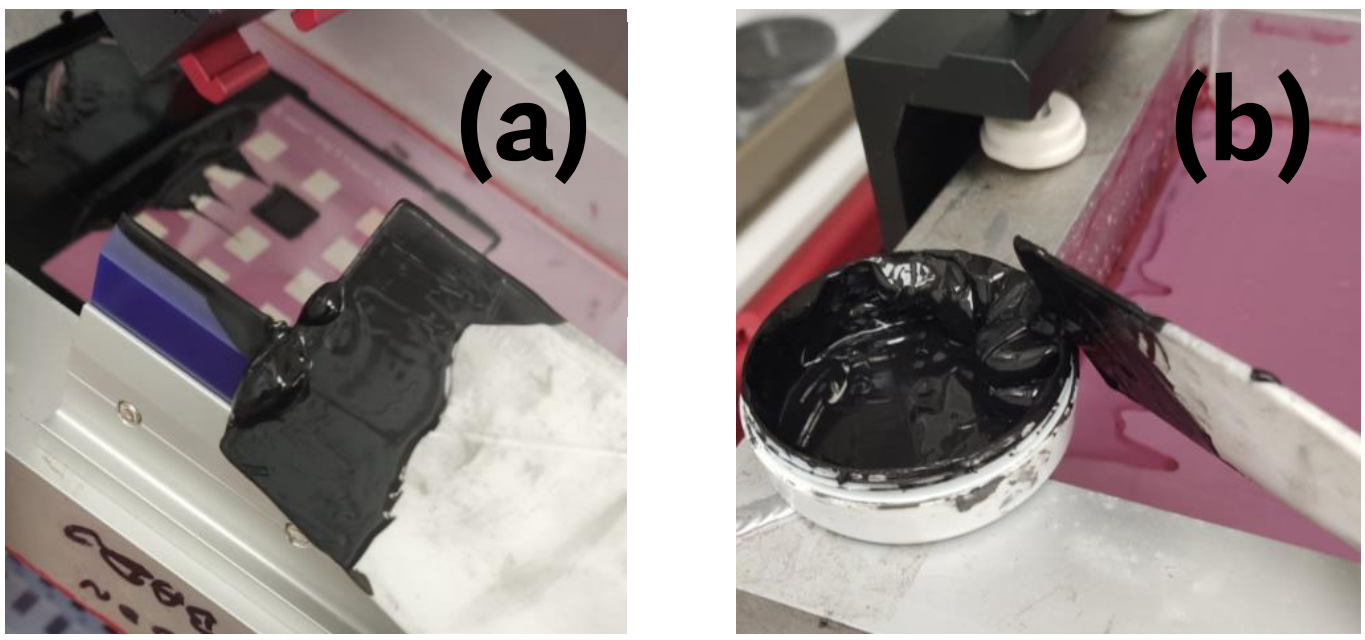


Figura 47. (a) Recuperación de Pasta en Accesorios. (b) Devolución de la Pasta al Frasco.

2. Soltar los seis tornillos del brazo de sujeción y mover el bastidor hacia adelante, sujetándolo luego sólo con los tornillos de sujeción del medio y exterior del brazo, exactamente como se ve en la **Figura 48**. Recuperar la pasta que está sobre el acetato con la espátula y depositarla en el frasco.

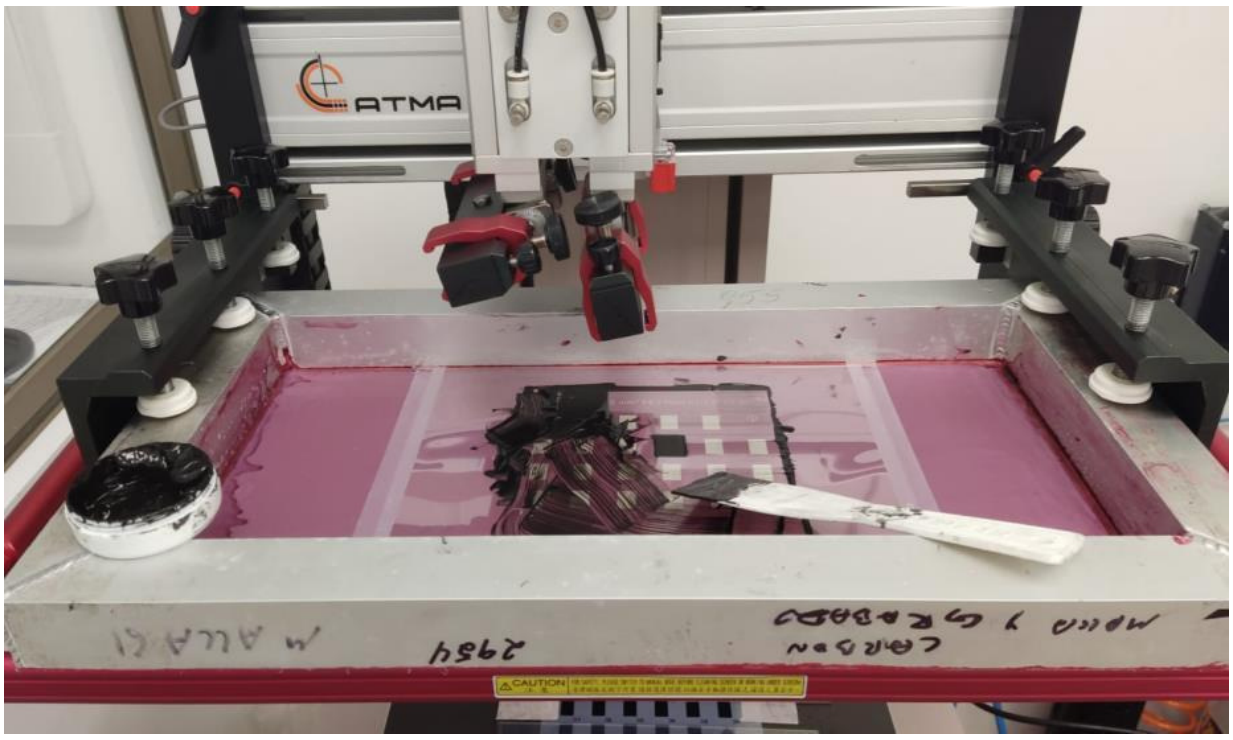


Figura 48. Posición de Recuperación del Bastidor.

3. Inmediatamente después de recuperar toda la pasta posible, cerrar y guardar el frasco. Sellar con un trozo de Parafilm alrededor de la tapa, asegurando que no queden aberturas, excepto para el frasco de titania, que ya es hermético.

4. Quitar la hoja de acetato del bastidor y desecharla. Poner el bastidor sobre el contenedor plástico, que sirve para apoyar y al mismo tiempo desechar residuos orgánicos de etanol y de pasta trabajada. Posicionarlos como muestra la **Figura 49**.



Figura 49. Bastidor sobre Contenedor Plástico para la limpieza.

5. Rociar etanol sobre la superficie de la pantalla del bastidor que está sucia con la pizeta. Esperar 30 segundos para disolver.

6. Cortar un trozo de estopa y humedecerlo con etanol, luego arrastrar y remover las partículas sólidas hacia una misma dirección en el bastidor. Debe hacerse delicadamente y por ambos lados de la malla.

7. Limpiar por ambos lados hasta que ya no se vean partículas sólidas ni manchas blancas en la pantalla de impresión. Para carbono, revisar la ***sección de pasta.***

8. Remover el exceso de pasta en los accesorios sucios (incluyendo la espátula) con papel absorbente. Esperar 30 segundos para disolver cada lado con un chorro de etanol de la pizeta y luego remover el resto de la pasta con estopa humectada con etanol, mientras se seca el bastidor. Separar los squeegees de los porta-squeeges utilizados. Para carbono, revisar la ***sección de pasta.***

9. Dejar secando los accesorios sobre papel absorbente. Los rastros de polvo o pelusa pueden ser removidos después con un chorro de aire fuerte de la pistola o con la brocha de limpieza.

10. Traspasar los residuos orgánicos a un contenedor más pequeño, como un vaso de vidrio, y luego desechar en el depósito de residuos orgánicos del laboratorio. Arrastrar con un poco de etanol de la pizeta si el contenedor grande queda sucio después de ser vaciado, luego limpiar los bordes con estopa y etanol. Los bordes superiores que eventualmente tienen contacto con los bastidores no deben quedar sucios.

11. Desmontar, retirar y guardar todas las piezas, accesorios y utensilios que fueron puestos en la serigrafiadora durante el ***procedimiento de preparación***. Desechar en el lugar que corresponden los residuos de cinta adhesiva, vidrio roto, papel sucio, guantes en desuso y otros materiales de un solo uso.

12. En caso de que el escantillón se haya ensuciado con pasta, lavar con etanol y estopa hasta que salga la mancha visible, luego enjuagar con acetona, dejar secando en la estufa y guardar bajo una hoja de papel o toalla nova limpia, junto al resto de los vidrios.

    Una vez que se hayan limpiado y ordenado todas las piezas, accesorios y utensilios del procedimiento de preparación, proceder a realizar los pasos de la sección de ***desactivación del equipo.***

4.2.6 DESACTIVACIÓN DEL EQUIPO

1. Después de utilizar el equipo, se debe retirar todo instrumento, accesorio y material del bastidor, exceptuando los sujetadores rojos tipo H. Asegurar que la serigrafiadora quede en las mismas condiciones que antes de su uso.

2. Desatornillar el anillo, desconectar el pedal del equipo y guardar junto con los demás instrumentos y accesorios.

3. Apagar la serigrafiadora girando el switch de poder rojo a su posición de apagado (OFF).

4. Desconectar la serigrafiadora y poner el cable en su posición original, entre la columna de impresión y la base gris de trabajo.

5. Cerrar la válvula de alimentación negra, quitando antes el seguro y girando la perilla hasta reducir la presión al mínimo posible, no mayor a 0,5 [bar]. Luego, deslizar la válvula de paso azul hacia la derecha. La alimentación de aire quedará completamente bloqueada.

6. Cerrar la válvula de bola del compresor.

7. Apagar y desenchufar el compresor. Luego, dejar el cable alrededor del compresor en una posición estable y sin sobresalir del perímetro del equipo.

8. Cubrir la serigrafiadora completamente con el protector plástico.

Una vez finalizado este último paso, la serigrafiadora quedará completamente desactivada y separada del resto de las líneas y equipos del laboratorio.

4.2.7 SECCIÓN DE PASTA DE TITANIA

4.2.7.1 Procedimiento de Preparación

12. Utilizar el squeegee destinado a la serigrafía de la pasta de titania, el cual está marcado con una letra “T” en la cara lateral de la goma, cerca de la base plana. Revisar la **Tabla 8** para verificar la posición de la letra.

27.1. El ajuste del sustrato de titania debe asegurar que el extremo superior del cuadrilátero negro del fotolito, que se encuentra debajo del sustrato, quede perfectamente tangente al surco. El ajuste fino debe hacerse con la ***vista lateral*** hacia el equipo, pudiendo utilizar los vidrios Nº I´ y II´ del escantillón para mover el sustrato.

27.2. El ajuste del sustrato de titania también debe asegurar que el cuadrilátero negro del fotolito quede perfectamente centrado, respecto al lado izquierdo y derecho dentro del sustrato, visto desde la perspectiva frontal hacia el equipo. Este ajuste se hace con la ***vista frontal*** hacia el equipo, pudiendo utilizar los vidrios Nº III´ y IV´ del escantillón para mover el sustrato.

5.1.1.1 Procedimiento de Operación

8. El programa utilizado para el tratamiento térmico de la película de titania es el número 4 de la mufla Nabertherm. La rampa de temperatura es de 1 hora y media para alcanzar los 530 [°C] y se mantiene 30 minutos en ese valor. El nombre del programa es ***R1TIO.***

4.2.8 SECCIÓN DE PASTA DE CIRCONIA

4.2.8.1 Procedimiento de Preparación

12. La circonia utiliza 2 squeegees en lugar de un squeegee y la barredora. En este caso se deben utilizar los squeegees marcados con una letra “Z” en la cara lateral de la goma, cerca de la base plana. Revisar la **Tabla 8** para verificar la posición de la letra. Dado que el porta-squeegee de 15 [cm] estará ocupado por una de las gomas, utilizar el porta-squeegee de 20 [cm] para la otra, procurando cumplir con las mismas condiciones de instalación que en el primero.

14. En el trabajo con circonia, ambos tornillos de graduación del cabezal deben marcar la misma altura, por lo que se debe ajustar tanto el tornillo derecho como el izquierdo a 1 [mm] (2 vueltas sobre el 0) de altura.

24. El porta-squeegee de 20 [cm] debe ir montado en la barra izquierda en lugar de la barredora. Las cabezas de los tornillos deben apuntar hacia la izquierda. Luego, girar a 0 grados la barra izquierda y apretar los sujetadores tipo H de esta barra, cuidando que la pieza quede centrada en el bastidor.

27. El ajuste del sustrato de circonia debe asegurar que la película serigrafiada de ***titania*** quede perfectamente contenida y centrada dentro del cuadrilátero negro del fotolito, en ambas vistas ***frontal y lateral.*** Se utilizan estas dos vistas para lograr el ajuste.

31. Cuando los vidrios del escantillón que están pegados queden completamente inmóviles, el armazón estará completo. Ocurrido esto, se deben pegar dos pequeños y delgados trozos de cinta adhesiva 3M en las esquinas superior derecha e inferior izquierda del sustrato, en la perspectiva frontal hacia el equipo.

33. Se debe agitar la pasta con vigor durante 1 minuto antes de esparcirla sobre el bastidor, asegurando que la totalidad del fluido sea arrastrado por el instrumento de agitación. El instrumento puede ser una varilla de vidrio, cuchara plástica pequeña o cualquier otro objeto limpio que permita una agitación de estas características en el frasco de la circonia. El instrumento debe estar limpio antes de ser utilizado, por lo que se debe limpiar con la pistola de aire, brocha de limpieza o lavar con acetona, agua desionizada y secar.

36. Luego de impregnar, se debe arrastrar un poco de pasta con la espátula y dejar la superficie de la abertura del acetato completamente cubierta por pasta.

37. La función de impresión que corresponde para la pasta de circonia es ***bajar y esparcir por ambos lados antes de subir,*** vista en la **Figura 50**.

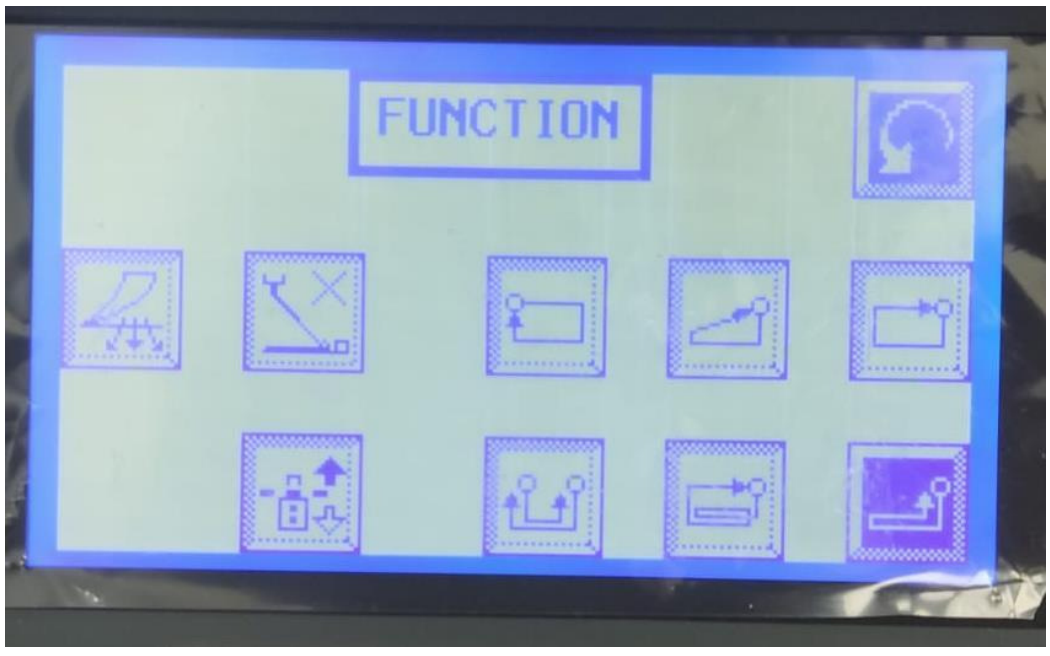


Figura 50. Función de Trabajo con Pasta de Circonia.

4.2.8.2 Procedimiento de Operación

4. No remover completamente la cinta 3M que sostiene al sustrato, quitarla suavemente sin dañar la superficie del sustrato y dejarla pegada únicamente al escantillón fijo de cada lado, de manera que no interfiera al sacar la muestra**.** La **Figura 51** muestra cómo se debe proceder en la manipulación de la cinta.

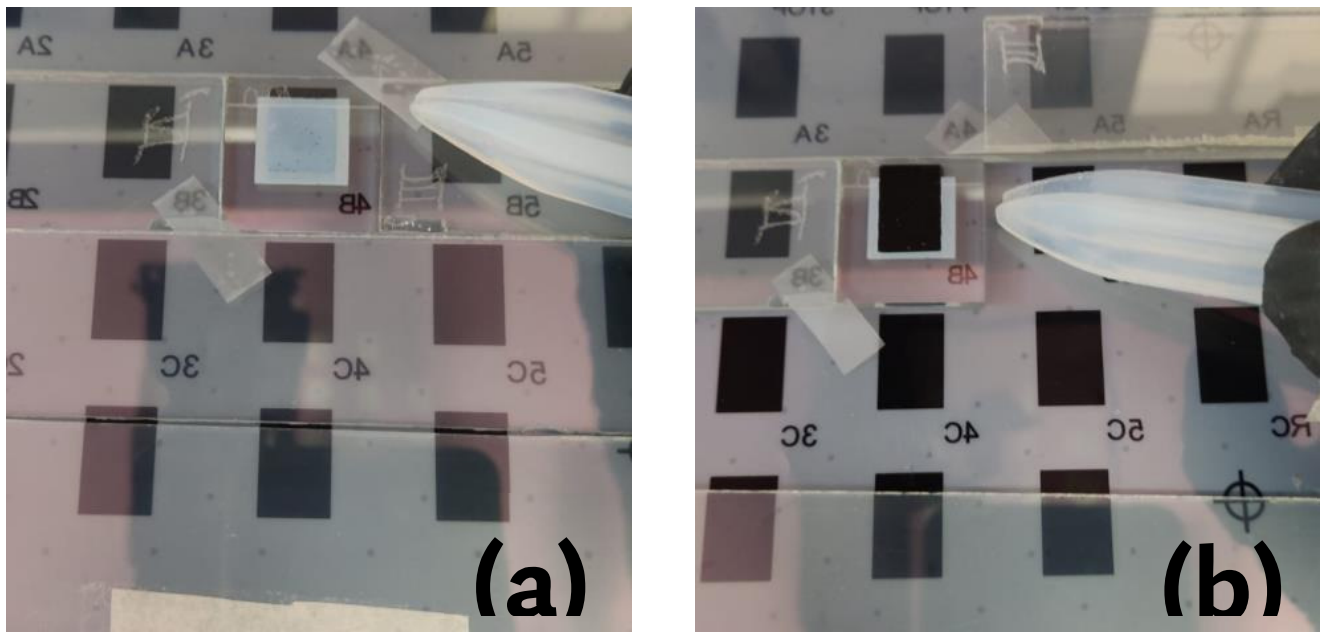


Figura 51. (a) Posicionamiento de la Cinta 3M para retener la muestra. (b) Posicionamiento de la Cinta 3M para retirar la muestra.

5. Proceder con la manipulación de las cintas en las muestras tal como se prepararon y removieron para el sustrato de prueba. No será necesario ajustar la posición de las cintas de nuevo, puesto que quedarán fijas si no se remueven por completo al sacar la muestra. Hacer esto para todas las muestras.

8. El programa utilizado para el tratamiento térmico de circonia es el número 5 de la mufla Nabertherm. La rampa de temperatura es de 1 hora para llegar a 400 [°C] y se mantiene por 30 minutos en ese valor. El nombre del programa es ***R1ZRO – C.***

4.2.9 SECCIÓN DE PASTA DE CARBONO

4.2.9.1 Procedimiento de Preparación

12. Utilizar el squeegee destinado a la serigrafía de la pasta de carbono, el cual está marcado con una letra “C” en la cara lateral de la goma, cerca de la base plana.

24. Antes de montar la barredora, cortar un delgado y largo trozo de cinta masking y pegarlo alrededor de la pala de la barredora, dejando sólo un centímetro de la punta descubierto, como se ve en la **Figura 52**. La parte superior de la pala debe quedar totalmente envuelta por esta cinta, sin dejar rugosidades.

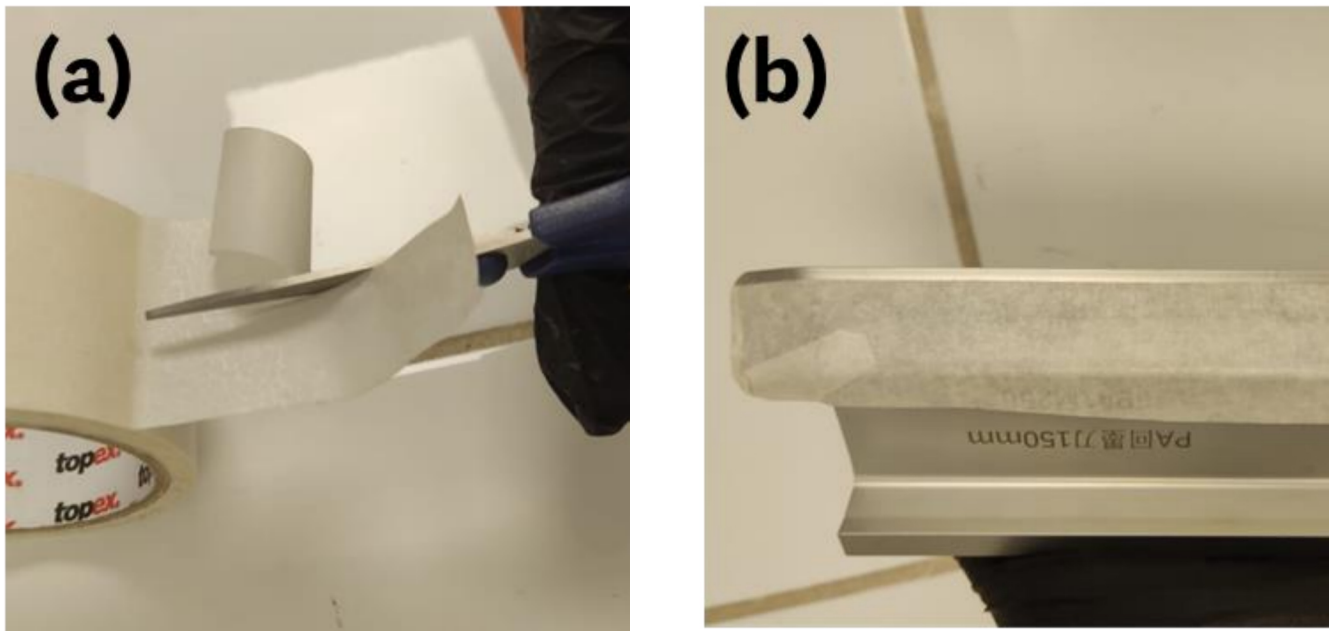


Figura 52. (a) Recorte del grosor de la cinta masking para barredora. (b) Forma de pegado con la punta descubierta de la barredora.

27.1. El ajuste del sustrato de carbono debe asegurar que la película serigrafiada de titania quede perfectamente centrada dentro del cuadrilátero negro del fotolito, en la perspectiva frontal hacia el equipo. Dado que ambos cuadriláteros son del mismo grosor, los bordes laterales de la película de titania estarán tangentes o muy cercanos a los bordes laterales del cuadrilátero negro, bajo la misma perspectiva frontal. Cabe mencionar que este ajuste se hace con la ***vista frontal hacia el equipo***.

27.2. El ajuste del sustrato de carbono también debe asegurar que la película cuadrada de titania quede contenida desde el extremo izquierdo del cuadrilátero negro del fotolito, visto desde la perspectiva lateral hacia el equipo. Este ajuste se hace utilizando la ***vista lateral hacia el equipo***.

31. Cuando los vidrios del escantillón que están pegados queden completamente inmóviles, el armazón estará completo. Ocurrido esto, se deben pegar dos pequeños y delgados trozos de cinta adhesiva 3M en las esquinas superior derecha e inferior izquierda del sustrato, en la perspectiva frontal hacia el equipo.

4.2.9.2 Procedimiento de Operación

4. No remover completamente la cinta 3M que sostiene al sustrato, quitarla suavemente sin dañar la superficie del sustrato y dejarla pegada únicamente al escantillón fijo, de manera que no interfiera al sacar la muestra**.** La **Figura 51** muestra cómo se debe proceder en la manipulación de la cinta.

5. Proceder con la manipulación de las cintas en las muestras tal como se prepararon y removieron para el sustrato de prueba. No será necesario ajustar la posición de las cintas de nuevo, puesto que quedarán fijas si no se remueven por completo al sacar la muestra. Hacer esto para todas las muestras.

8. El programa utilizado para el tratamiento térmico de carbono es el número 5 de la mufla Nabertherm. La rampa de temperatura es de 1 hora para llegar a 400 [°C] y se mantiene por 30 minutos en ese valor. El nombre del programa es ***R1ZRO – C.***

4.2.9.3 Procedimiento de Recuperación y Limpieza

7.1 Dejar el bastidor humectado con etanol e inmediatamente después limpiar los accesorios, como indica el paso 8 del procedimiento de recuperación y limpieza. Cuando se haya terminado la limpieza de accesorios, continuar con el paso siguiente.

7.2 Una vez que la tela es manchada con carbono, jamás vuelve a su tonalidad original, en su lugar, se debe buscar eliminar lo que más se pueda la opacidad. Haciendo uso de la estopa humectada con etanol, se limpia la posición sucia de manera suave, cambiando la zona de la estopa que tiene contacto con la superficie cada vez que quede saturada de pasta de carbono. Este proceso toma tiempo y debe hacerse con humectación constante de etanol, hasta que la posición se recupere hasta una tonalidad grisácea.

8. Remover la cinta masking de la barredora y desecharla. Remover el exceso de pasta con toalla nova e introducir la barredora, la espátula y el squeegee sin el portador dentro del recipiente de acero inoxidable de la **Tabla 8**. Luego verter etanol en el contenedor metálico hasta que todos los materiales queden completamente sumergidos, aproximadamente a 1 [cm] de la superficie del líquido. Cuando esto esté preparado, someter el recipiente y su contenido a un lavado ultrasónico, en un ciclo de 45 minutos. Al finalizar, remover lo que siga sucio con estopa y etanol, poniendo especial énfasis en la limpieza de la barredora. Dejar las piezas secando sobre toalla nova cuando estén limpias.

4.3 Resultados y Discusión.

Después de realizar las pruebas y mediciones presentadas, se hizo análisis de los resultados. Para empezar, se evaluaron los resultados de las curvas j-V obtenidas en la medición con el simulador solar. Para presentar los resultados, fue necesario ordenar las muestras en torno a un criterio que permitiese determinar cuál es mejor. El criterio seleccionado fue el PCE, dando como resultado la confección de la **Tabla 10**, en donde se presentan los 10 mejores resultados obtenidos.

Tabla 10. Mejores Resultados Obtenidos en la Medición de Curvas j-V.

MUESTRA	PCE %	FF	HI	Voc [V]	jsc [mA cm^{-2}]
H – 8 (SERIE 8)	2,55	0,51	0,01	1,25	3,99
F – 8 (SERIE 8)	2,21	0,45	-0,02	1,27	3,88
C – 10 (SERIE 10)	2,02	0,66	0,04	1,18	2,60
D – 10 (SERIE 10)	2,02	0,65	0,04	1,21	2,58
I – 10 (SERIE 10)	2,00	0,65	0,01	1,12	2,75
F – 10 (SERIE 10)	1,99	0,61	0,01	1,14	2,85
K – 8 (SERIE 8)	1,89	0,60	0,06	1,25	2,54
M – 8 (SERIE 8)	1,85	0,46	0,01	1,25	3,23
H – 10 (SERIE 10)	1,84	0,60	0,05	1,17	2,62
P – 8 (SERIE 8)	1,74	0,62	0,00	1,24	2,28

La celda **campeona** es la celda **H – 8**, de la serie 8, cuyos parámetros fotovoltaicos fueron un V_{OC} de 1,25 [V], J_{SC} de 3,99 [mA cm^{-2}], FF igual a 0,51 y un PCE del 2,55%. Los mayores resultados por parámetro presentados; para el PCE fue el mencionado para la muestra H – 8; el mayor valor de FF fue de 0,69, perteneciente a las muestras C – 8 y B – 10 que no tuvieron un PCE lo suficientemente alto como para ser reportadas; el mayor j_{SC} fue de 3,99 [mA cm^{-2}], de la muestra H – 8; y el VOC más alto fue de 1,27 [V], de la muestra F – 8. En general, las serie 8 y 10 obtuvieron los mejores parámetros fotovoltaicos. La serie 9 no tiene menciones

importantes debido a su bajo rendimiento en la mayoría de estos parámetros. Cabe destacar que los valores de j_{SC} reportados en la tabla tienen valor positivo, sin embargo, en las mediciones y resultados de las curvas, este parámetro se marca como negativo. Esto es resultado de la forma en que se conectan los electrodos en la medición, sin embargo, las magnitudes son idénticas.

Comparando con los parámetros presentados por el grupo de la Universidad de Swansea, quienes utilizaron la misma perovskita $CsPbBr_3$, los valores de las celdas campeonas obtenidos por en este experimento son menores en un 69%, 31%, 13% y 48% para el PCE, FF, V_{OC} y j_{SC}, respectivamente. [1] Si se compara con los mayores resultados obtenidos por parámetro, la diferencia se reduce a 6% y 12% para el FF y el V_{OC}, respectivamente. En base a esto se determina que el PCE y el j_{SC} son los parámetros que necesitan mayor optimización. Resumidamente, mejorar el j_{SC} será esencial para acercarse a los resultados reportados en la literatura, dado que el V_{OC} es cercano a los resultados esperados en el estado del arte.

Respecto a los resultados gráficos, las curvas j-V de las mejores muestras y la muestra campeona son presentadas en la **Figura 53**. Los resultados muestran una forma característica de este tipo de curvas, semejantes a las presentadas por el grupo de la Universidad de Swansea, en la **Figura 54**. La diferencia en la dirección de la curva se debe a que los resultados elaborados poseen un signo negativo en la densidad de corriente j_{SC}, mientras que poseen uno positivo en la literatura. Ambas formas permiten ver la magnitud de la densidad de corriente, puesto que se considera el valor absoluto de la magnitud graficada.

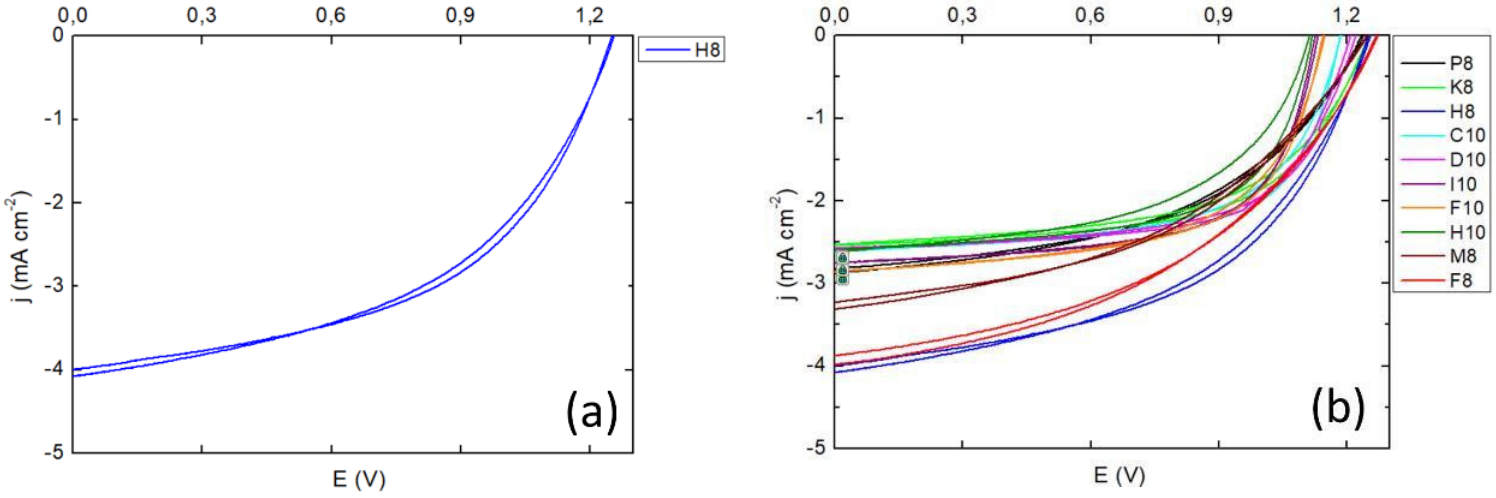


Figura 53. Curvas j-V de los resultados obtenidos. (a) Curva j-V de Muestra Campeona C-10. (b) Curva j-V de las 10 Mejores Muestras.

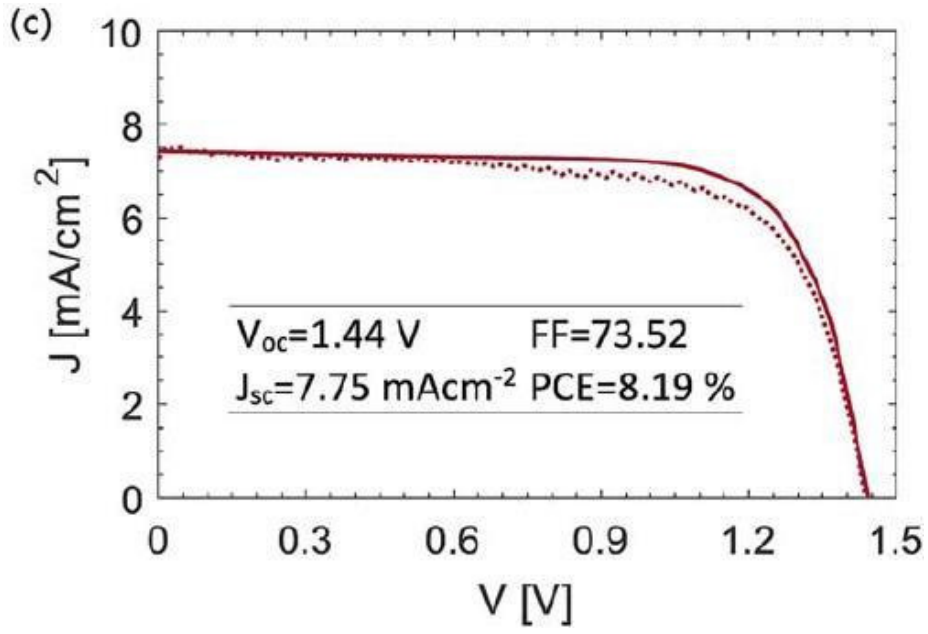


Figura 54. Curva j-V de la Celda presentada por la Baker et al. De la Universidad de Swansea. Obtenido de [1].

Se midieron los parámetros fotovoltaicos de las series 8, 9 y 10, de donde se seleccionaron las mejores celdas presentadas con anterioridad. En la **Tabla 11**, **Tabla 12** y **Tabla 13** se presentan los resultados obtenidos de estas series en función del PCE de cada muestra y de las variables aplicadas en su construcción. El análisis de los resultados de las series es complementario entre las tablas para las variables de volumen de infiltración de perovskita y GAP de impresión. Para la discusión, se compara la concentración de las condiciones de construcción entre la mitad superior e inferior de cada serie. En la serie 10, las 7 mejores muestras presentaron una mayoría en las condiciones de 8 [µL] de solución de $CsPbBr_3$ infiltrada y 2,5 [bar] de presión de squeegee. Los resultados de la serie 8 también concentran en la mitad superior una infiltración con 8 [µL] de solución en lugar de 10 [µL]. Por otro lado, el GAP de impresión de 4 [mm] tiene una mayor concentración en la mitad superior de las series 8 y 9 que los de 5 [mm] o más. En cuanto a la graduación del tornillo del squeegee, la serie 9 presenta una mitad superior con mayor concentración de 1 [mm] que de 0,75 [mm]. Cabe aclarar que las condiciones variables que no aparecen entre las tablas de este análisis se mantuvieron en valores estándar de 8 [µL] de volumen de solución, 1 [mm] de graduación de squeegee, 4 [mm] de GAP de impresión y 2,5 [bar] de presión de squeegee.

Tabla 11. Resultados y Condiciones de Construcción de la Serie 8.

MUESTRA (serie 8)	PCE %	Infiltración [µL]	GAP de Impresión [mm]
H-8	2,55	8	4,0
F-8	2,21	8	4,0
K-8	1,89	8	4,0
M-8	1,85	8	5,0
P-8	1,73	10	5,0
A-8	1,68	10	4,0
D-8	1,66	10	4,0
N-8	1,54	10	4,0
O-8	1,45	8	5,4
J-8	1,40	8	4,0
B-8	1,40	10	4,0
C-8	1,31	10	4,0
G-8	1,18	10	5,2
L-8	1,05	10	5,2

Tabla 12. Resultados y Condiciones de Construcción de la Serie 9.

MUESTRA (serie 9)	PCE %	Graduación del Tornillo Squeegee [mm]	GAP de Impresión [mm]
K-9	0,62	1,00	4,0
A-9	0,58	0,75	5,0
N-9	0,56	1,00	4,0
O-9	0,55	1,00	4,0
E-9	0,55	0,75	5,0
L-9	0,53	1,00	4,0
I-9	0,53	0,75	4,0
J-9	0,42	0,75	4,0
P-9	0,39	1,00	4,0
G-9	0,37	0,75	4,0
H-9	0,35	0,75	4,0
M-9	0,35	1,00	4,0
B-9	0,34	0,75	5,0
C-9	0,31	0,75	5,0
D-9	0,31	0,75	4,0
F-9	0,23	0,75	5,0

Tabla 13. Resultados y Condiciones de Construcción de la Serie 10.

MUESTRA (serie 10)	PCE %	Infiltración [µL]	Presión del Squeegee [bar]
C-10	2,02	8	2,5
D-10	2,02	8	2,5
I-10	2,00	8	2,0
F-10	1,99	10	2,5
H-10	1,84	10	2,5
B-10	1,66	8	2,5
L-10	1,65	10	2,0
M-10	1,59	10	2,0
O-10	1,57	10	2,0
K-10	1,54	8	2,0
J-10	1,54	8	2,0
E-10	1,51	10	2,5
N-10	1,41	10	2,0
A-10	1,26	8	2,5
G-10	1,22	8	2,0

Tras el análisis anterior, se determina que fueron las combinaciones de condiciones estándar las que predominaron en los mejores resultados de las distintas series construidas, fortificando la conclusión de que la puesta en marcha de la serigrafiadora fue efectiva.

Por otro lado, respecto a las imágenes del FE-SEM obtenidas para las muestras F – 8, I – 8 y H – 8, se presentan los resultados en la **Figura 55 y Figura 56**, en donde la imagen muestra un mapa de los elementos químicos presentes en el perfil de dichas muestras a través de la arquitectura construida, proporción que es especificada en la **Tabla 14**. La composición entre las muestras no varía notablemente, por lo que se determina que la distribución de los materiales mantiene su proporción en la serigrafía, lo que es un buen indicio de la uniformidad en la construcción para evaluar la escalabilidad.

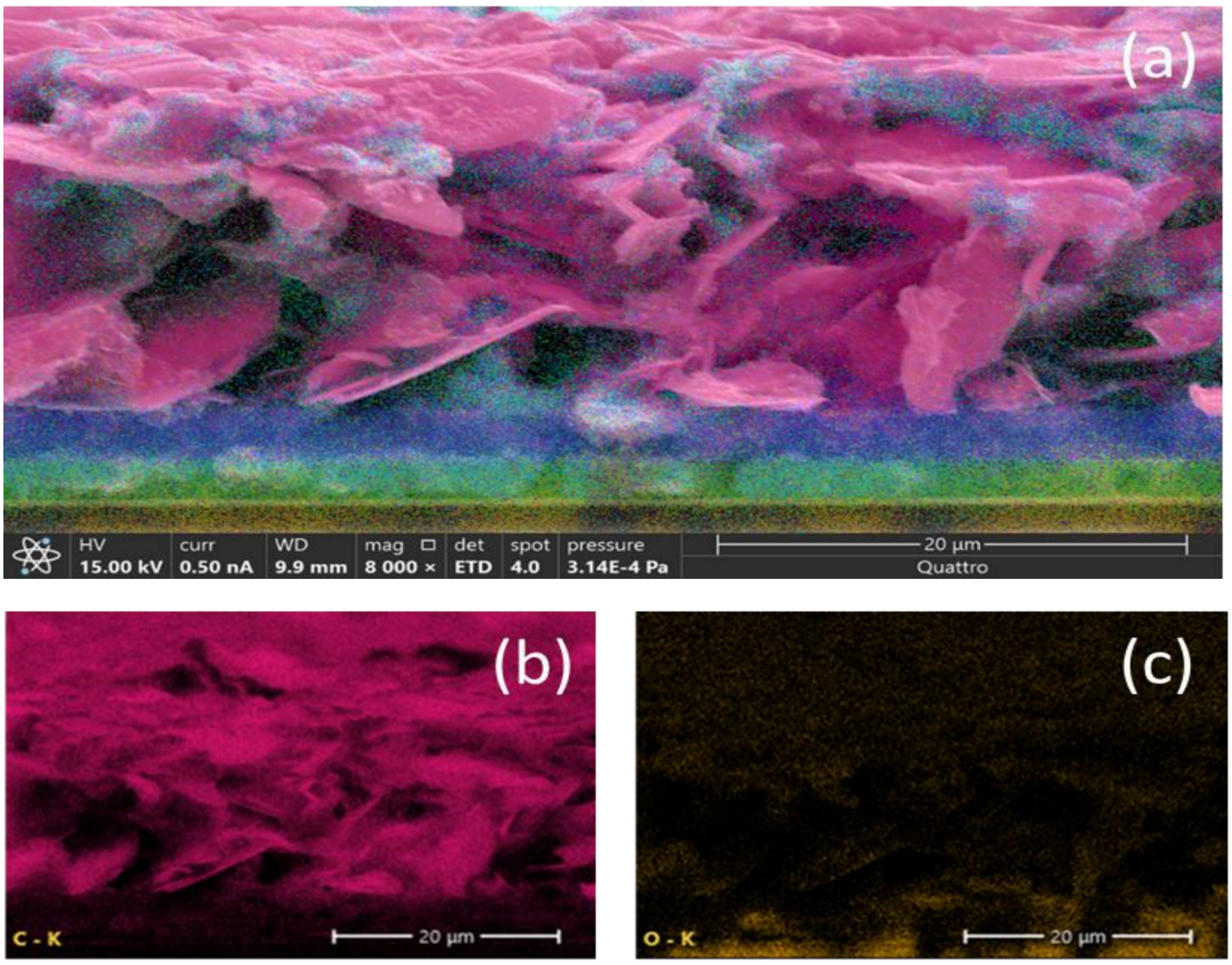


Figura 55. Imágenes a color obtenidas de la técnica FE-SEM para caracterizar elementos presentes en la estructura. (a) Mapa de todos los elementos detectados por el microscopio. (b) Mapa Individual del Carbono, (c) Oxígeno (d) Titanio (e) Bromo (f) Circonio (g) Estaño.

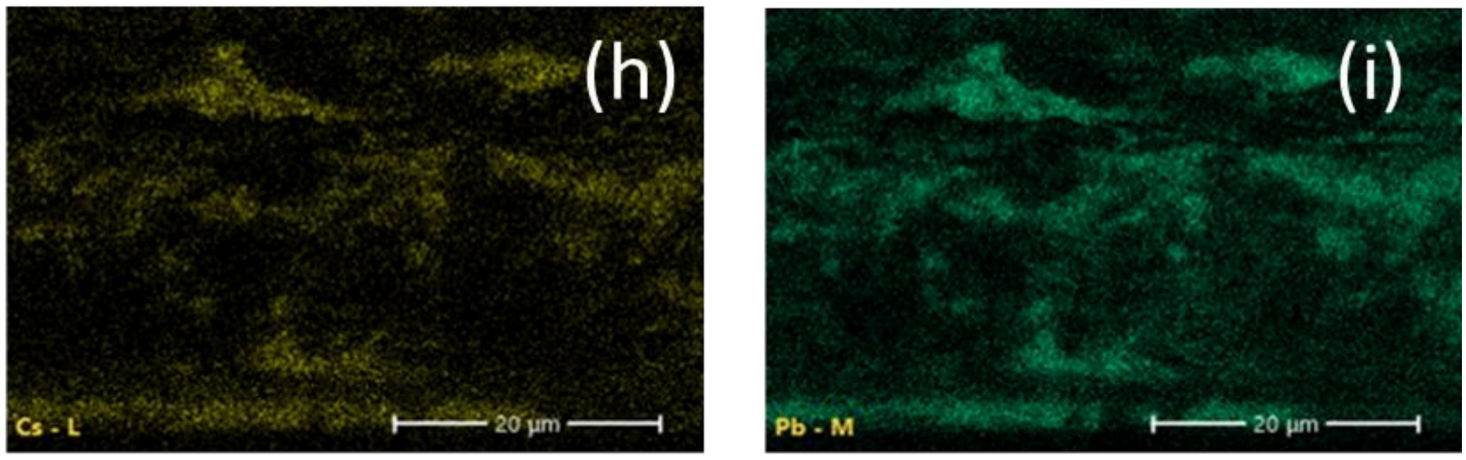


Figura 56. Continuación de los Resultados del FE-SEM. (h) Cesio (i) Plomo.

Si bien las imágenes anteriores no proporcionan información exacta ni de los compuestos químicos presentes ni de su morfología, sí permite ver la distribución de los elementos a través de las capas y obtener información relevante sobre la infiltración de la solución de perovskita y dar una idea de los materiales presentes, en base a los antecedentes de la construcción. Para empezar, existen una serie de espacios en blanco que pueden deberse a elementos distintos a los buscados en el microscopio o al efecto de carga eléctrica de los materiales. Al no haber una conexión a tierra, los materiales acumulan cargas eléctricas y el barrido electrónico sobre ellos se distorsiona, lo que resulta en una claridad excesiva de la imagen. [61]

Las distribuciones de circonio (f), titanio (d) y carbono (b) se concentran, principalmente, en el lugar donde se depositaron las pastas que los contenían, lo que permite identificar cada capa con claridad. En el caso del estaño (g), su concentración se sitúa, principalmente, en la capa base de la imagen, donde se sitúa el sustrato. La siguiente concentración alta es la del titanio, en la capa compacta y mesoporosa de titania, seguida por el circonio y luego el carbono. Estos resultados son coherentes con los materiales de construcción aplicados capa por capa, representando una buena ejecución del proceso de serigrafía. En cuanto al oxígeno, se puede apreciar una distribución generalizada, lo cual es de esperar debido a que la mayoría de los compuestos presentes contienen este elemento, a excepción del carbono y la perovskita. El cesio (h), bromo (e) y plomo (i) están distribuidos de una manera muy similar entre ellos y se encuentran a lo largo de la estructura mesoporosa triple, dentro de las imágenes del FE-SEM. Pese a que es imposible determinar sólo en base a este análisis si estos elementos son

efectivamente a la perovskita $CsPbBr_3$, sí representan un indicio fuerte ya que su distribución es tan similar que parecen estar unidos entre sí. Para complementar el análisis sobre la perovskita presente en las muestras, en la **Tabla 14** se presentan las proporciones de los elementos químicos entregadas por el microscopio.

Tabla 14. Composición de la Variedad Atómica encontrada en las Muestras. (a) F-8 (b) I-8 (c) H-8.

(a)Elemento	% Atómico	(b)Elemento	% Atómico	(c)Elemento	% Atómico
C	74.3	C	81.9	C	83.0
O	13.6	O	11.8	O	11.1
Ti	2.0	Ti	1.0	Ti	0.6
Br	2.4	Br	1.4	Br	2.1
Zr	4.5	Zr	2.4	Zr	1.5
Sn	0.6	Sn	0.2	Sn	0.2
Cs	1.4	Cs	0.6	Cs	0.7
Pb	1.2	Pb	0.7	Pb	0.8

Para las muestras F-8 e I-8, la proporción atómica entre Cs, Pb y Br es de aproximadamente 1:1:2. Para la muestra H-8, la proporción entre estos elementos es de 1:1:3, lo cual es estequiométricamente correcto en relación con el tipo de perovskita infiltrada, $CsPbBr_3$. Esto puede ser indicio de que la solución preparada para la serie 8 no quedó perfectamente homogénea, infiltrando proporciones distintas en cada muestra. Complementando este análisis con los resultados anteriores, es importante destacar que la muestra campeona fue la H-8, la cual coincidentemente contiene la mejor proporción estequiométrica de los elementos que conforman la perovskita utilizada. La muestra F-8 posee el segundo lugar en eficiencia, mientras que los parámetros fotovoltaicos de la muestra I-8 no pudieron ser medidos debido a problemas técnicos. La construcción de todas estas muestras fue realizada con condiciones estándar de volumen de infiltración, presión de squeegee, GAP de impresión y graduación del tornillo del squeegee. Esto quiere decir que la diferencia entre F-8 y H-8 puede deberse netamente a la calidad estequiométrica que presenta la perovskita en cada muestra.

En la **Figura 57** se presentan las imágenes por separado de cada una de las capas depositadas sobre el sustrato. Con ayuda de la escala inserta en la imagen, se hace la medición del grosor de cada capa. Los grosores de las capas son; 16,42 – 19,34 [µm], para carbono; 2,40 – 4,63 [µm], para circonia; 1,54 – 1,94 [µm], para titania compacta sumada con la mesoporosa; y 368 – 417 [nm], para el FTO.

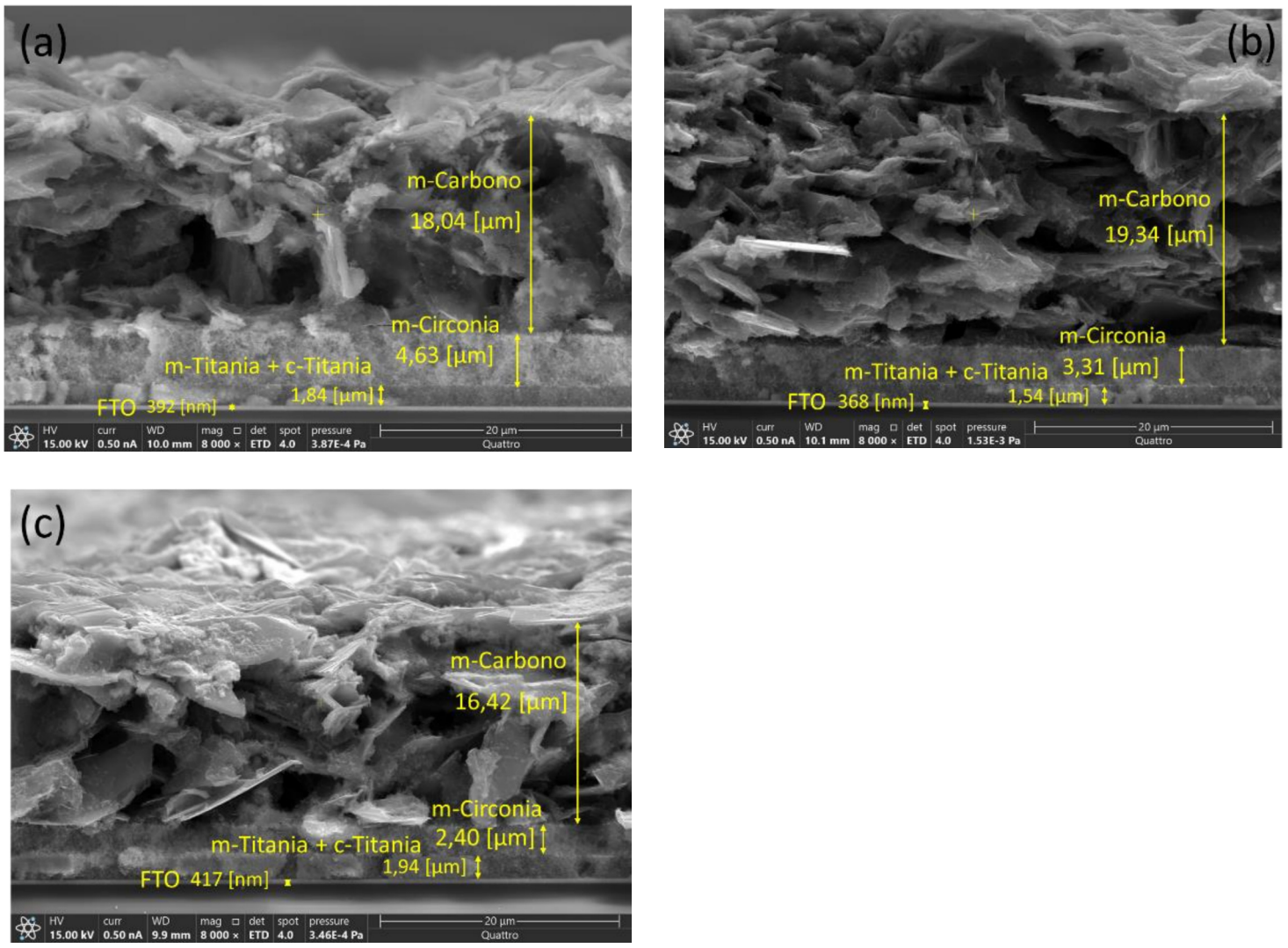


Figura 57. Espesor de las Tres Capas Mesoporosas, la Capa Compacta de Titania y FTO. (a) F-8 (b) I-8 (c) H-8.

Si bien, los grosores de las capas medidas son relativamente semejantes entre las muestras, son más grandes en comparación con la literatura disponible para arquitecturas similares de m-CPSCs, indicadas en la **Figura 58**. [42], [44], [49], [54] En general, los espesores de las capas varían entre los estudios, obteniendo distintos resultados en la eficiencia de las celdas. El grosor de la capa compacta de titania suele estar en el orden de los 50 [nm], mientras que la capa mesoporosa del mismo material se encuentra en el rango de los 0,4 – 1 [µm]. La capa de

circonia, que funciona como separación de las capas que conducen electrones y huecos, es sin duda la capa que más ha sido estudiada en cuanto a la definición de su espesor. Los mejores resultados reportados se presentan entre los 1 – 4,84 [µm] de grosor. El grosor de la capa de carbono suele estar en la magnitud de los 8 – 10 [µm] en la construcción, pero resultados óptimos han sido reportados a más de 15 [µm]. [42], [44], [49]

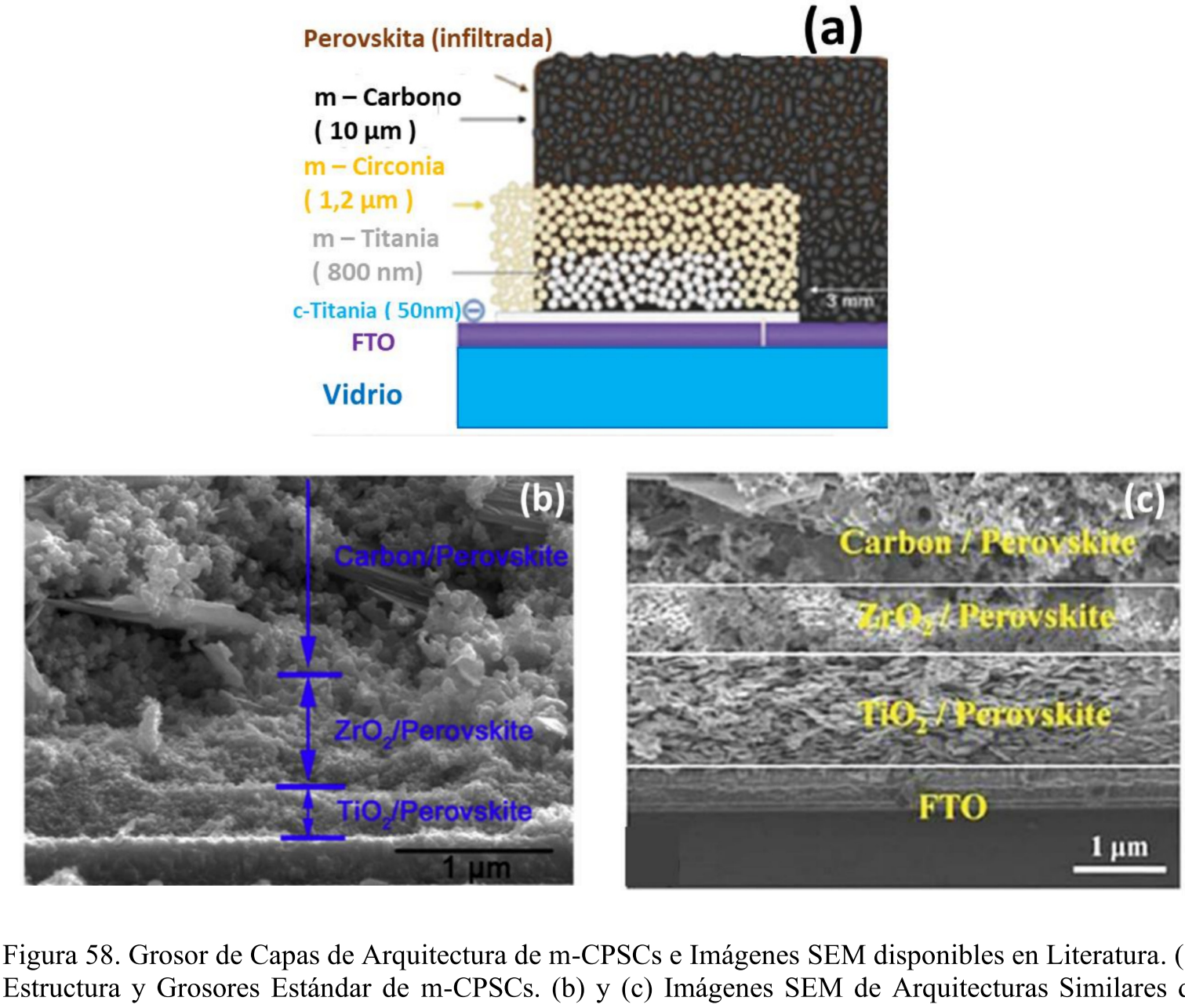


Figura 58. Grosor de Capas de Arquitectura de m-CPSCs e Imágenes SEM disponibles en Literatura. (a) Estructura y Grosores Estándar de m-CPSCs. (b) y (c) Imágenes SEM de Arquitecturas Similares de Capas Delgadas depositadas por Serigrafía. Modificado de [42], [49]

En base a los resultados comparados con la literatura, ciertas capas cumplen con el grosor deseado y otras no. El grosor de la capa de circonia está dentro del rango de resultados óptimos reportados, sin embargo, el carbono presenta un grosor significativamente más alto, lo que puede ser perjudicial para una infiltración óptima de la perovskita. Los valores también son más

altos en la titania, en donde no se alcanza a diferenciar bien al capa mesoporosa de la compacta. La muestra campeona, H-8, es la que presenta las capas de circonia y carbono más delgadas, sin embargo, presenta el grosor total de titania más grande. El grosor de la capa de carbono puede afectar mucho en la calidad de infiltración de la solución de perovskita, por lo que podría ser otro motivo que explica la diferencia entre las eficiencias obtenidas para las muestras F-8 y H-8. [1]

Como último análisis, se estudiaron los difractogramas obtenidos de las series 6 y 7. Tras revisar las imágenes obtenidas de los rayos x, se asignaron los picos a los materiales contenidos en la **Tabla 15**. Además, la **Figura 59** muestra la señal de los patrones de cada uno de estos materiales para el equipo utilizado.

Tabla 15. Tabla de Compuestos Químicos Asignados en Análisis XRD.

Compuesto	Número de Ficha	Clasificación del Cristal
FTO	00-041-1445	Tetragonal, Rutilo
Carbono	04-014-0362	Hexagonal
Circonia	00-037-1484	Monoclínica
Titania	04-011-0664	Tetragonal, Anatasa
Perovskita $CsPb_2Br_5$	04-024-4338	Tetragonal 2
Perovskita $CsPbBr_3$	01-087-4957	Tetragonal 1
Perovskita $CsPbBr_3$	04-014-9676	Ortorómbica 2

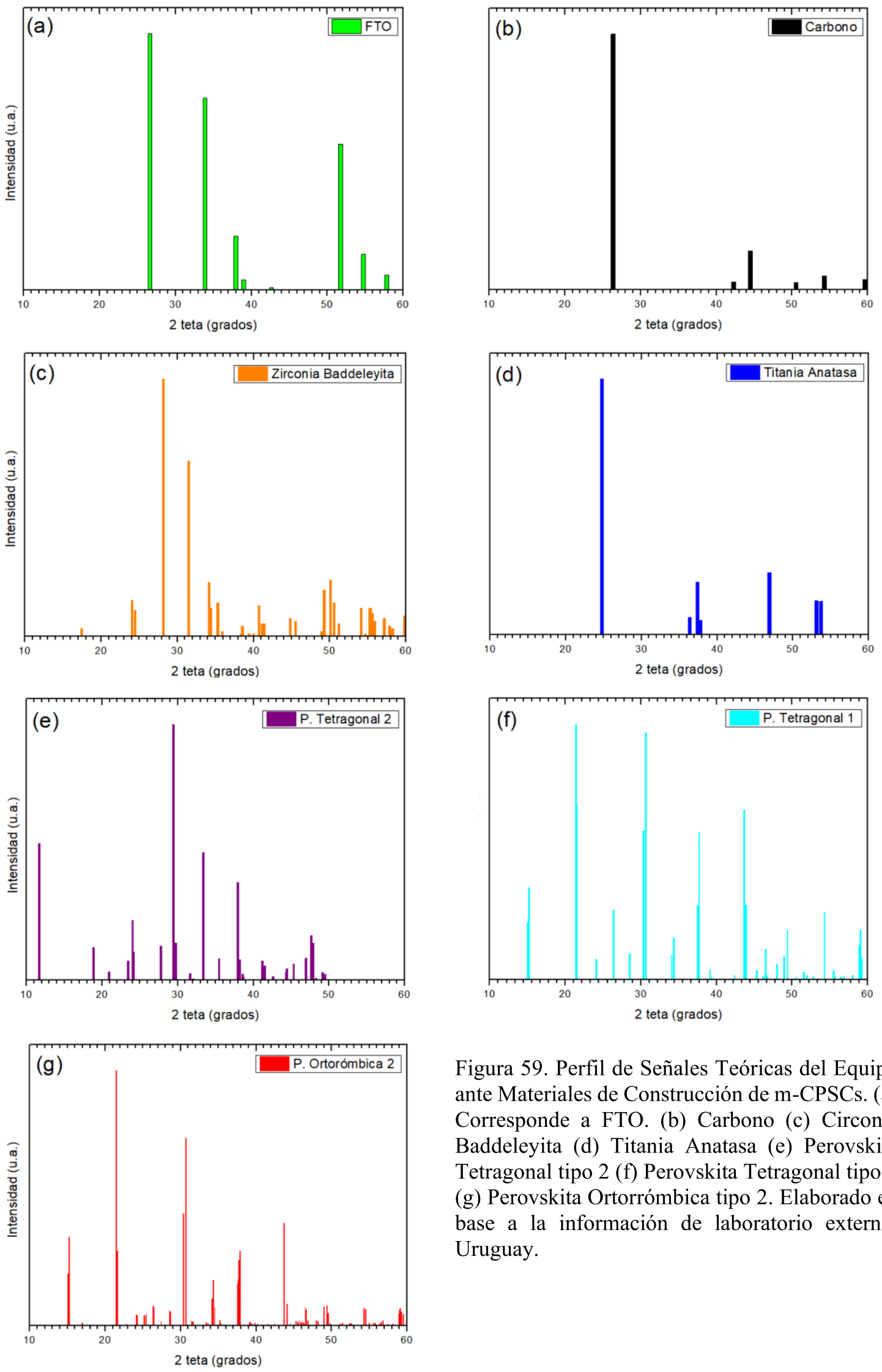


Figura 59. Perfil de Señales Teóricas del Equipo ante Materiales de Construcción de m-CPSCs. (a) Corresponde a FTO. (b) Carbono (c) Circonia Baddeleyita (d) Titania Anatasa (e) Perovskita Tetragonal tipo 2 (f) Perovskita Tetragonal tipo 1 (g) Perovskita Ortorrómbica tipo 2. Elaborado en base a la información de laboratorio externo, Uruguay.

Dentro de los perfiles de señal elaborados se considera también el cristal anatasa de titania, puesto que el óxido de titania serigrafiado corresponde precisamente a este. Pese a no ser asignado, es de gran importancia para comprender la evolución que presentan los difractogramas, a través de la lectura capa por capa de las muestras. La figura **Figura 60** presenta los difractogramas de las muestras hasta el proceso de serigrafía, mientas que la **Figura 61** muestra los difractogramas de la infiltración de perovskita. La asignación se hace por una congruencia numérica; el valor que calce más cercano al centro de una determinado pico es asignado. Si dos valores diferentes están cerca del centro, entonces se asignará desde el más cercano al más lejano. Como las señales representan un indicio, puede que sean pertenecientes a distintos materiales, por lo que se utiliza la literatura y la evolución histórica de las muestras capa por capa para determinar la asignación.

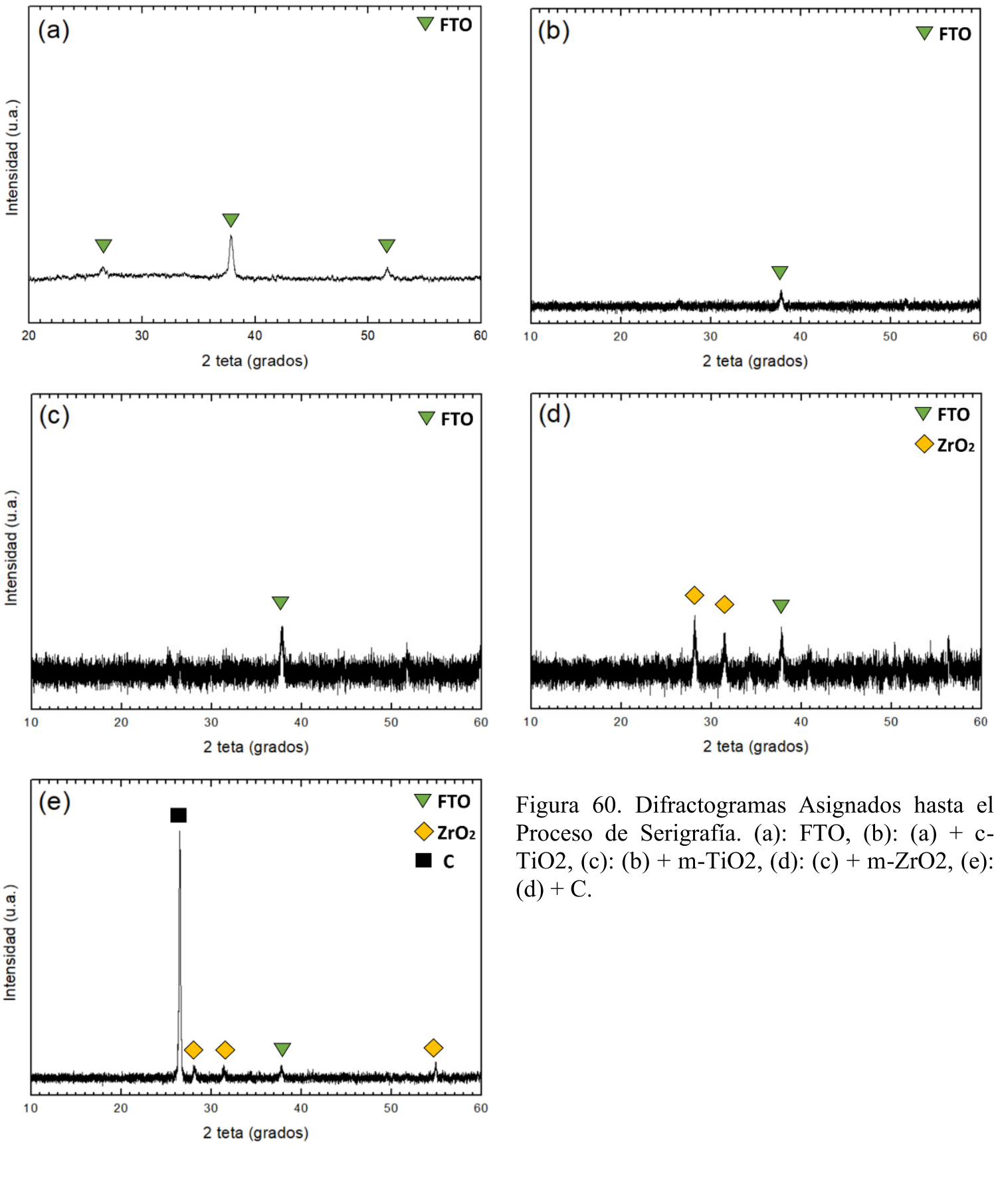


Figura 60. Difractogramas Asignados hasta el Proceso de Serigrafía. (a): FTO, (b): (a) + c-TiO2, (c): (b) + m-TiO2, (d): (c) + m-ZrO2, (e): (d) + C.

En el difractograma (a) de la **Figura 60** se muestran los resultados de la muestra PDA de FTO, en donde se hacen presentes tres picos importantes; a los 26,5, 37,85 y 51,7 grados. Debido a que en este caso sólo se busca FTO como SnO_2, se compara inmediatamente con los valores de la lectura del equipo para tal material. Los puntos coinciden coherentemente con los valores del FTO rutilo, los cuales son 26,61, 37,95 y 51,78 grados, correspondiente a los planos (110), (200) y (211), respectivamente. Esto deja en claro que, en efecto, los picos en estos grados son

producto de la presencia de FTO. Desde el difractograma (b) en adelante, los picos de los planos (110) y (211) de FTO dejan de ser visibles. Sin embargo, la presencia del pico del plano (200) establece la misma conclusión. En el difractograma (b) de la **Figura 63** se presenta información encontrada en literatura sobre las señales esperadas para FTO. Los picos señalados en este difractograma son congruentes con los encontrados en el análisis de este trabajo, por lo que se refuerza la conclusión sobre la presencia del FTO. (14)

En cuanto a la titania anatasa, no se encontraron patrones de picos que sugieran su presencia en los difractogramas, especialmente en el análisis de la muestra K – 7 e I – 7, difractogramas (b) y (c) de la **Figura 60**, respectivamente. Estas dos muestras fueron construidas hasta la capa compacta de titania y hasta la capa mesoporosa del mismo material. Según la información proporcionada por el laboratorio externo, existe un pico de menor intensidad en los 37,78 grados, lo cual es más cercano al pico visto en los resultados que el de FTO, en el 37,95. Sin embargo, debido a que el pico está presente en la misma posición desde la muestra con FTO puro, se atribuye a la presencia de FTO, lo que sugiere que el pico de titania puede estar solapado o simplemente el material no pudo ser detectado por el equipo. Los errores comunes en los difractogramas, como el solapamiento y la desaparición de picos, se debe a distintos factores. Entre estos se encuentran el estrés residual, asociado con los mecanismos de nucleación y crecimiento de las películas delgadas, así como también a tratamientos térmicos. Otros factores son la desalineación del goniómetro y el gradiente de composición en una muestra. Este último factor es muy importante, puesto que es precisamente el caso de las muestras analizadas posteriores al difractograma (a). Por lo que es probable que la adición de nuevos materiales sea responsable de la desaparición de algunos picos, el solapamiento de ellos y/o su movimiento en el ángulo 2 teta. Al revisar la información en literatura sobre análisis XRD hechos para la titania anatasa, **Figura 62,** se concluye que existen similitudes con los resultados obtenidos, sin embargo, la intensidad y posición de los picos en los difractogramas mencionados de la **Figura 60** refuerzan la conclusión anterior. (5)

En la medición de la muestra J – 7 se aprecia la circonia en su tipo de cristal baddeleyita, mostrando picos cercanos a los valores de 28,18 y 31,47 grados en el difractograma (d). En la medición de la muestra F – 6 aparece otro pico que no se detectó en las capas anteriores, cercano a los 54,96 grados, pudiendo ser una señal de distintos materiales; FTO, plano (220) en 54,76

grados; titania rutilo, plano (211) en 54,32 grados; y circonia baddeleyita, plano (310) en 55,4 grados. Debido a que el FTO fue medido en 3 difractogramas anteriores sin presentar picos en esa zona, se descarta, pese a tener la mayor congruencia numérica, al igual que la titania. Las turbulencias de esta zona comienzan al agregar circonia, sin embargo, el pico no se estabiliza hasta agregar carbono, lo que sugiere que estos dos materiales pueden ser los responsables del cambio. El carbono posee un pico de 5,5% de intensidad en 54,3 grados, lo que frente al pico de intensidad de 11% que presenta la circonia baddeleyita en los 55,4 grados, es considerado como menos probable. Finalmente, se atribuyen todos estos picos a la circonia baddeleyita. Los planos de este material detectados, en orden respectivo a los grados presentados, son el ($\bar{1}11$), (111) y el (310). Según la literatura, **Figura 64**, estos picos son característicos de la circonia baddeleyita en grados muy similares. Así, se refuerza la conclusión descrita en este párrafo sobre los puntos asignados a este material.

En el difractograma de la muestra F – 6, cuya capa llega hasta el carbono mesoporoso, se aprecia un pico de gran intensidad cerca de los 26,37 grados, en donde el equipo emite una señal alta para el carbono al grafito. Esta es la única señal de la presencia de carbono en la capa, pero debido a su precisión en el ángulo y magnitud, se concluye que precisamente se trata de este material. El plano del carbono sugerido en el pico corresponde al (002), tal como se ve en el difractograma (c) de la **Figura 63**. Distintos tratamientos de este tipo de carbono han obtenido el mismo pico, por lo cual se concluye que el pico discutido pertenece a este material.

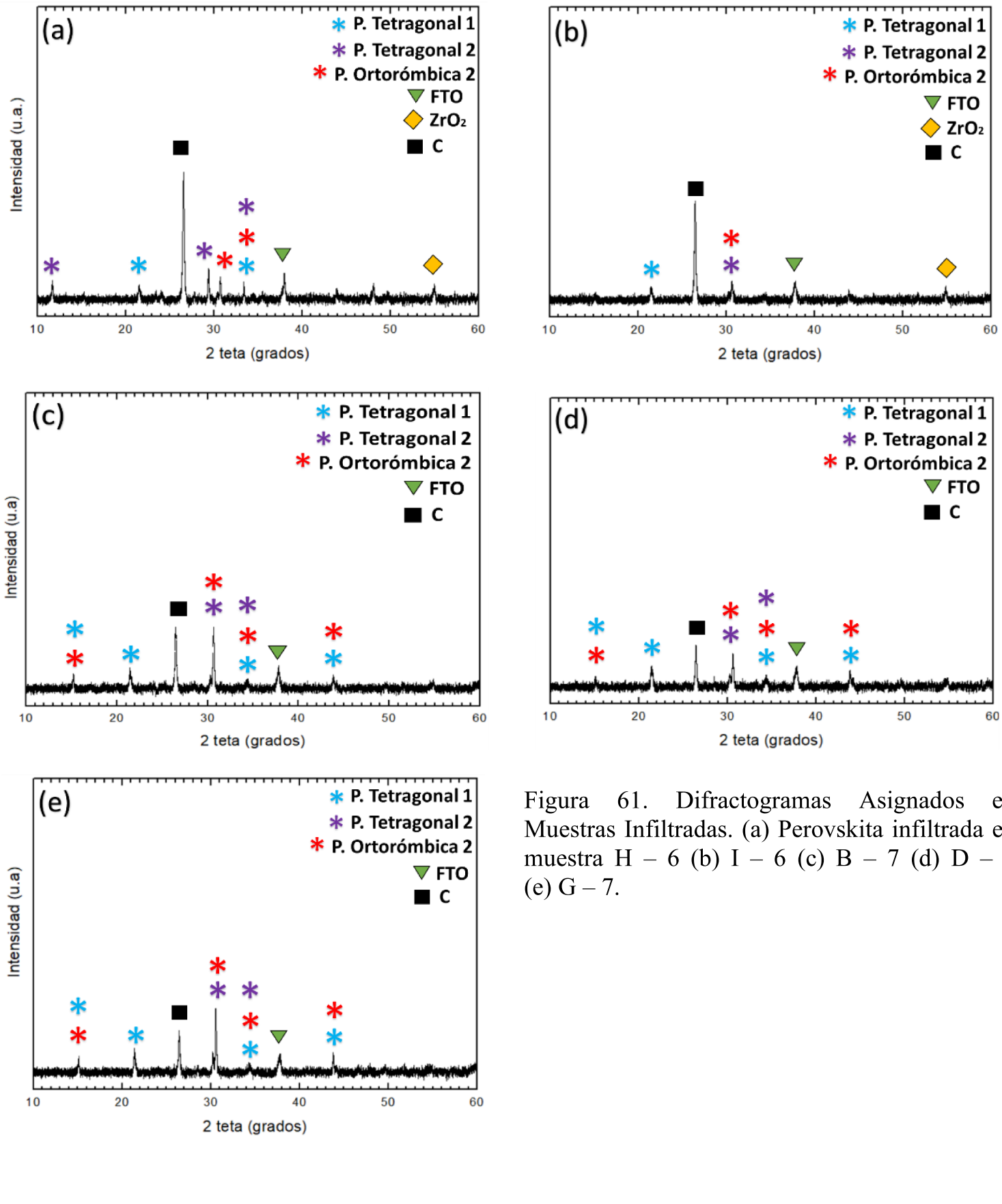


Figura 61. Difractogramas Asignados en Muestras Infiltradas. (a) Perovskita infiltrada en muestra H – 6 (b) I – 6 (c) B – 7 (d) D – 7 (e) G – 7.

En base al difractograma (a) de la **Figura 61**, en donde se busca principalmente la influencia de la perovskita infiltrada, se identifica la posible existencia de múltiples tipos de este material. La señal obtenida presenta una variedad de picos nuevos que dan una sugerencia predominante de ciertos tipos por sobre otros. El primero corresponde a los 11,75 grados, cuyo valor más cercano corresponde a los 11,65 de la perovskita tetragonal tipo 2, en el plano (002). El segundo pico nuevo aparece en 21,54 grados, valor que calza precisamente con el plano (200) de la perovskita tetragonal tipo 1, en el mismo valor. La perovskita ortorrómbica tipo 2 también está

cerca de estos valores, en un ángulo 2 teta de 21,47 y 21,64, pero la congruencia numérica es muy exacta para la perovskita tetragonal de tipo 1, por lo que se concluye que este material es el responsable del pico detectado.

Los siguientes picos analizados son los detectados en los valores de 29,4 y 30,75 grados. Los indicios encontrados son perovskita tetragonal tipo 1 en 30,64 grados, perovskita ortorrómbica tipo 2 en 30,7 grados, perovskita tetragonal tipo 2 posee el pico más alta intensidad de su tabla en 29,4 grados exactos. En 29,37 grados se detecta el Bromuro de Cesio cúbico, mientras que en 30,59 grados existe un pico de alta intensidad para bromuro de plomo ortorrómbico. Se asignan los materiales de perovskita tetragonal tipo 2, para el pico en 29,4 grados en el plano (213), y perovskita ortorrómbica tipo 2, para el pico 30,75 en el plano (220). También existe la posibilidad de que la presencia de perovskita altere la medición del equipo para el material de circonia baddeleyita encontrado con anterioridad, moviendo los picos de los planos $(\bar{1}11)$ y (111) a las posiciones encontradas en el difractograma de la muestra H – 6. [62]

En los 33,45 grados se encuentra el siguiente nuevo pico, el cual se desplaza en, aproximadamente, 1 grado hacia la derecha desde el difractograma (c). Este pico calza con los valores de 33,35 perovskita ortorómbica 2, con una intensidad teórica de 17,8%. La perovskita tetragonal tipo 2 presenta un pico de gran intensidad a los 33,37 grados, con un 49,9%. De la misma manera, la perovskita tetragonal tipo 1 se hace presente en los 34,37 grados, con una intensidad de 16,4%. Pese a que la congruencia numérica sugiere como material responsable a la perovskita tetragonal tipo 1, al analizar la intensidad del y compararlo con las referencias de la **Figura 65**, se hace difícil determinar si realmente es ortorrómbica, o tetragonal. Sin embargo, los estudios sugieren que, en efecto, esta señal no es producto del ruido sino efecto de la perovskita en una de sus formas cristalinas.

Otro pico de relevancia aparece en los 40,08 grados. El plano (134) de la perovskita ortorrómbica tipo 1 es el único que se acerca a este pico con una intensidad relevante, en 40,22 grados. El último pico relevante del difractograma (a) está en los 48,08 grados, el cual se asocia a perovskita tetragonal en el plano (420) y (008), o a bromuro de cesio ortorrómbico (214). El segundo material posee un pico teórico precisamente en los 48,09 grados, aunque la intensidad es de apenas 9%. Por otro lado, los picos teóricos de la perovskita tetragonal tienen buena

intensidad, pero distan mucho más en el ángulo, pues se encuentran en los 47,89 grados. Siendo difícil de determinar, se analizan los difractogramas posteriores en este punto del eje y no se detecta ningún pico cercano, por lo cual se concluye que es simplemente el ruido correspondiente a la medición de la muestras H – 6.

No hay mayores cambios en el difractograma (b) respecto al (a) de la **Figura 61**, pero en el difractograma (c) se estabilizan dos picos en la señal que podrían ser asociados a materiales presentes en las muestras. Existen dos distintos tipos de perovskitas que pueden ser responsables de estos picos; a los 15,21 se presenta la perovskita tetragonal tipo 1, en 15,18 grados, sin embargo, predomina la perovskita ortorrómbica tipo 2 con una intensidad similar y precisión exacta en 15,21 grados, en el plano (110). Debido a que este pico no se vio antes, se atribuye la responsabilidad a estos materiales, que poseen una intensidad semejante alrededor de este punto y cuyo pico es visible en los difractogramas posteriores.

El otro pico relevante está en los 43,86 grados. Al igual que en el anterior, se estabiliza desde el difractograma (c) en adelante. Nuevamente son indicios de perovskita tetragonal tipo 1, en 43,89 grados, y de perovskita ortorrómbica tipo 2, en 43,74 grados. En este caso, la forma con prioridad es la tetragonal, cuyo plano es el (400). Esta última forma también tiene un pico teórico cercano y de mayor intensidad en 43,62 grados, plano (222).

La infiltración hecha en 2 pasos, para la muestra H – 6, fue la única que mostró un pico en los 11,65 grados y, además, el posible desplazamiento de los picos de circonia baddeleyita, los cuales se muestran como un solo pico en los difractogramas posteriores de perovskita infiltrada. La muestra I – 6, que fue infiltrada con menor volumen de solución precursora de perovskita, no mostró ningún pico en los 15,21 grados, a diferencia de todas las otras que tuvieron el doble de dosificación y sí mostraron actividad en este punto.

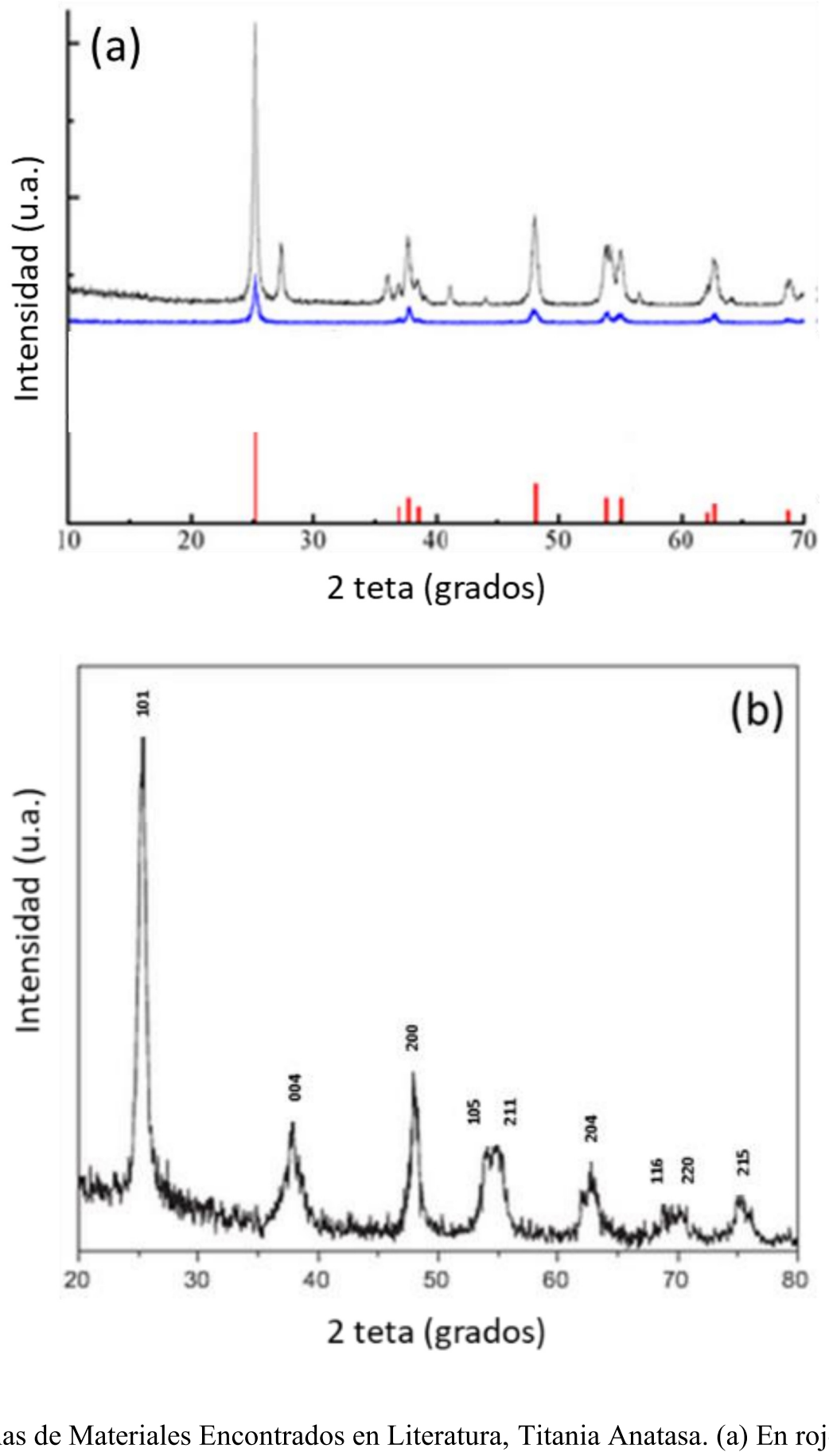


Figura 62. Difractogramas de Materiales Encontrados en Literatura, Titania Anatasa. (a) En rojo el patrón de titania anatasa, en negro y azul resultados de difractogramas (b): Resultados de difractograma de titania anatasa. Obtenido de [63], [64]

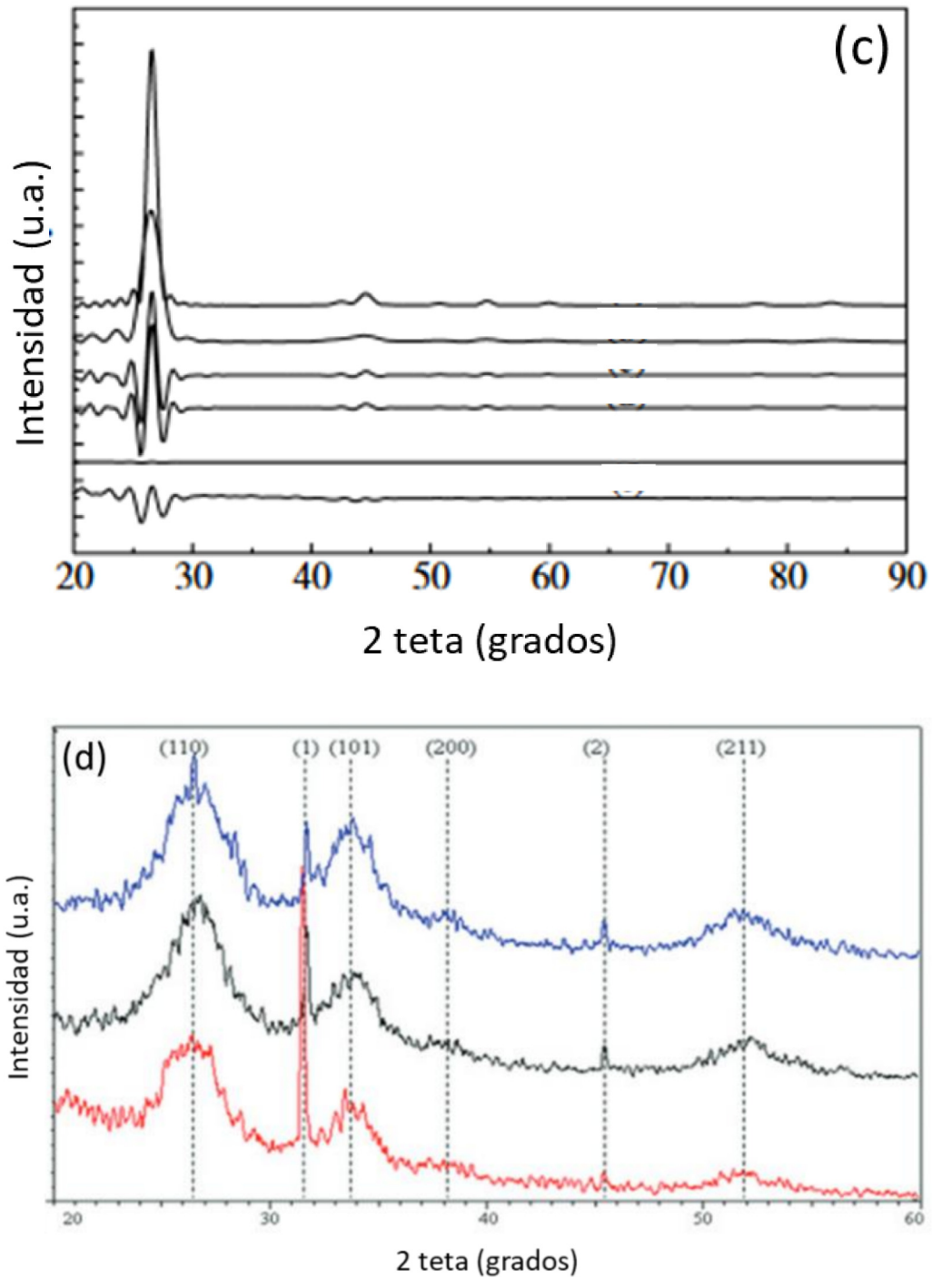


Figura 63. Difractogramas de Materiales Encontrados en Literatura (c) Carbono (d) FTO. Obtenidos de [64], [65]

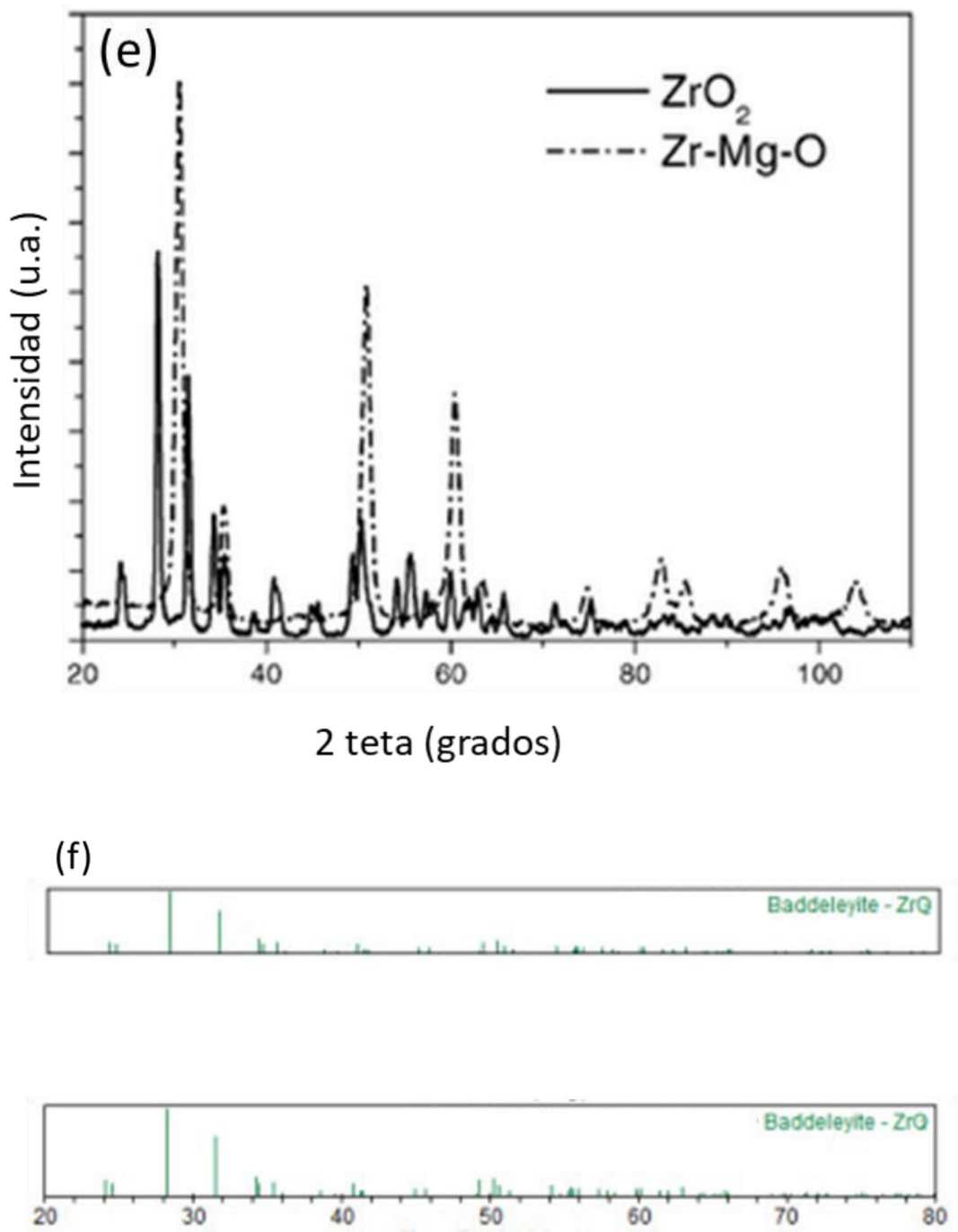


Figura 64. Difractogramas de Materiales Encontrados en Literatura, Circonia Baddeleyita. (e) Resultado Empírico de Distintas combinaciones de Circonia (f) Patrón de Baddeleyita. Obtenido de [66], [67]

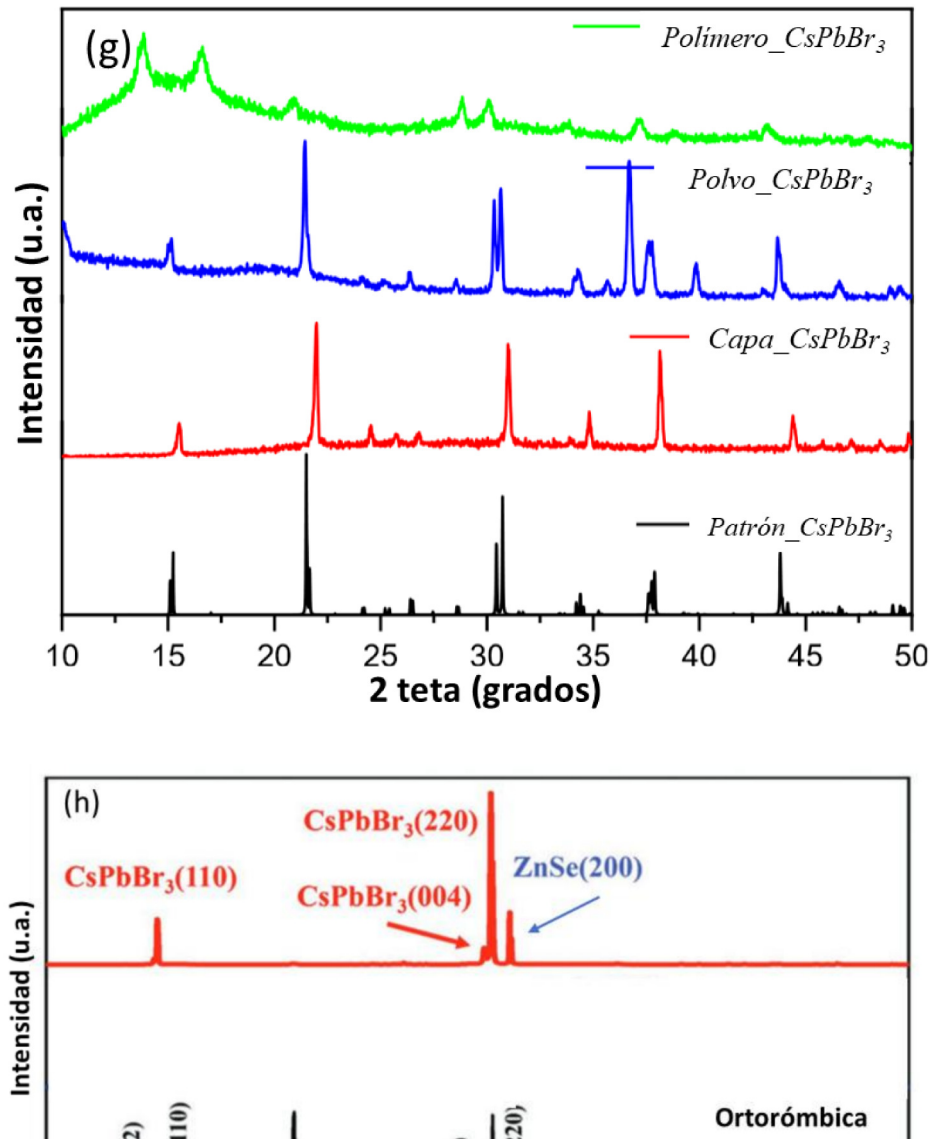


Figura 65. Difractogramas de Materiales Encontrados en Literatura, Perovskita $CsPbBr_3$. (g) Ortorrómbica bajo distintos medios de síntesis y patrón. (h) Ortorrómbica con y sin capa de ZnSe (i) Cúbica por Puntos Cuánticos. Obtenido de [52], [68], [69]

Finalmente se hizo análisis de la muestra K – 7, enviada a la Universidad de Chile para ver las señales de titania compacta y FTO por medio del GIXRD. Se realizaron 2 mediciones de GIXRD sobre la muestra, obteniendo los resultados de la **Figura 66**, en donde se comparan directamente los patrones de FTO y titania anatasa junto con el resultado del XRD y el GIXRD. Es evidente que los resultados de ambos análisis por rayos x se asemejan mucho más al patrón de FTO que al de titania anatasa, por lo que se fortifica la conclusión anterior sobre la oclusión de los picos de la titania por parte del FTO.

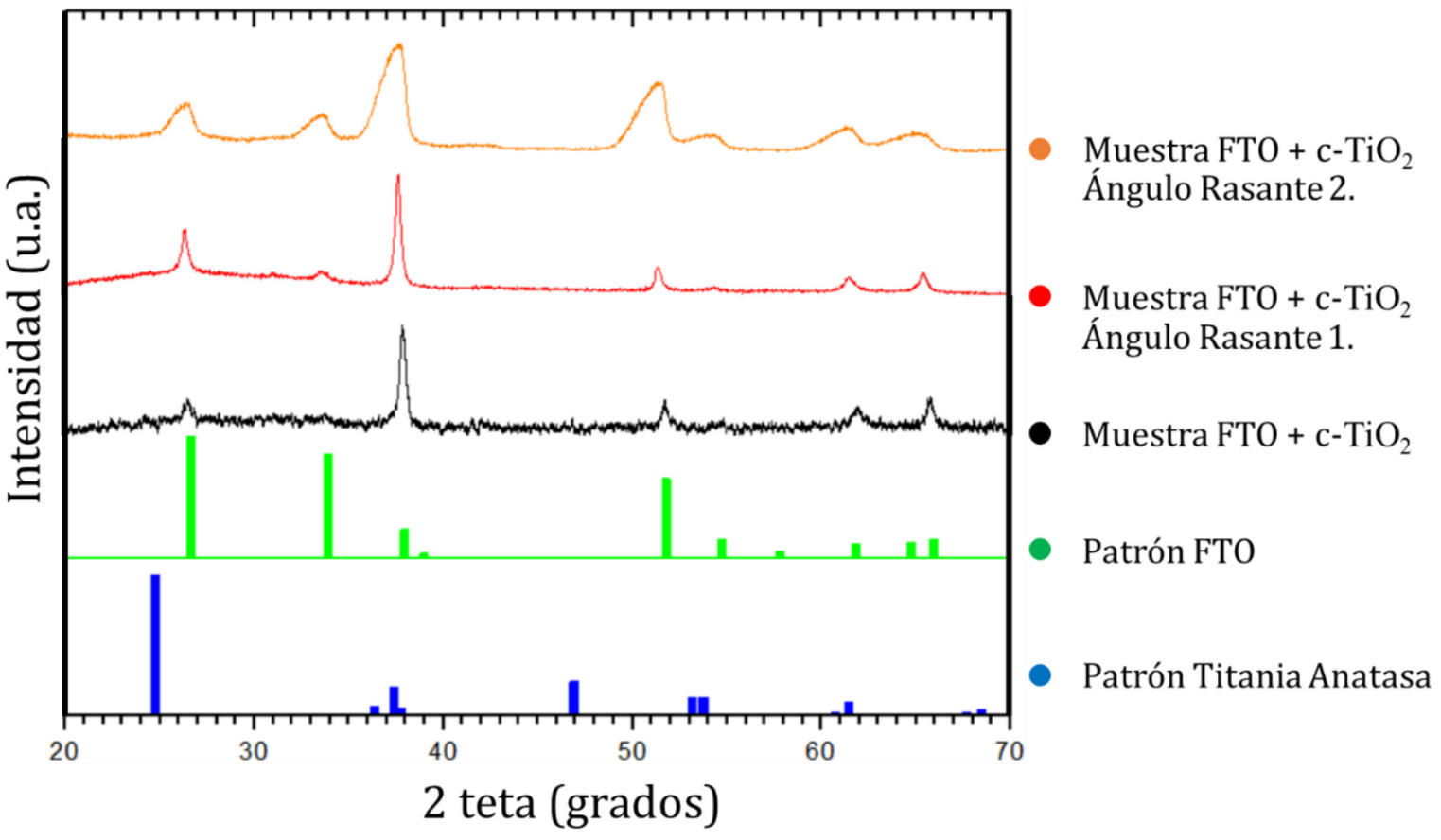


Figura 66. Comparación de Patrones de FTO y Titania Anatasa con Resultados de Difractogramas.

Los resultados de la muestra campeona, H – 8, son los más similares a la literatura en cuanto a los análisis del FE-SEM, tanto en el espesor de las capas como en la calidad estequiométrica de la perovskita infiltrada. Las imágenes obtenidas de esta técnica indican que las celdas aún pueden ser mejoradas, incluso cuando los resultados son relativamente cercanos. Existe un buen acercamiento a los grosores de las capas depositadas sobre los sustratos y la distribución de los elementos a través de ellas es coherente con lo esperado.

Los análisis de los picos en las señales medidas por XRD demuestran que existe una conversión de perovskita efectiva dentro del proceso de construcción, sin embargo, es imposible determinar con precisión a qué tipo de forma cristalina del material corresponden, debido a la variedad que presentan entre 2 tipos de estructura ortorrómbica y una tetragonal. Los materiales encontrados son coherentes con los aplicados en el proceso de construcción y las señales y picos también están acordes a la literatura disponible. En cuanto a la titania anatasa, no hubo picos que señalaran su presencia, ni en la capa compacta ni en la mesoporosa. Tras la revisión del XRD y del GIXRD, se concluye que la señal del FTO oculta la presencia de titania en las muestras.

En cuanto a los parámetros fotovoltaicos, estos se encuentran por debajo de los del grupo de la Universidad de Swansea, siendo el más cercano el V_{OC}. Los resultados obtenidos en la experimentación permiten concluir que aún pueden realizarse mayores estudios para hacer cambios finos y mejorar los parámetros de las celdas, tanto en la operación de serigrafía como en el resto del proceso de construcción, especialmente en la síntesis e infiltración de la perovskita $CsPbBr_3$.

Tras analizar la caracterización de las muestras construidas en base a los parámetros fotovoltaicos, la forma de las curvas j-V, el análisis de las imágenes FE-SEM y los gráficos de picos en XRD y GIXRD, se determina que las ajustes hechos en la serigrafiadora semiautomática la han convertido en un equipo capaz de depositar las capas mesoporosas de una celda m-PCSC de manera funcional, creando condiciones estándar no sólo para la deposición de capas mesoporosas, sino que también para la infiltración de perovskita.

5 Aplicación Industrial

En esta sección se utilizó el estudio hecho en el laboratorio, con la serigrafiadora semiautomática AT-25PA, para hacer un análisis de uso industrial basado en un volumen de producción más grande que el que puede ser conseguido a una escala de laboratorio. Esta información sirvió como base para generar una propuesta de un escalamiento industrial del proceso de serigrafía y recocido para la construcción de m-CPSCs. La propuesta es presentada determinando las materias primas requeridas, los insumos, el proceso productivo, la especificación del producto final, los equipos industriales, el mercado en el que se incorpora, los costos de aplicación y el costo de manufactura por unidad, expresado en unidades [USD/W].

5.1 Mercado de celdas solares

El mercado de paneles solares ha tenido un gran incremento en su actividad de los últimos años, especialmente bajo el contexto de transición energética y la meta de cero emisiones para el 2050. La evolución de la tecnología y el alcance de las generaciones de celdas fotovoltaicas han dejado una gran gamma de productos disponibles en el mercado global, en donde predominan las celdas de silicio de primera generación. Se espera que la generación de potencia proveniente de energías renovables alcance aproximadamente el 61% para el año 2030, lo que significa un gran incremento para el mercado fotovoltaico. Esto ocurre debido a que la energía eólica y la solar representan juntas más del 90% del notorio incremento de potencia generada en el 2021, y también a que, a su vez, sólo el 28,7% de la generación total vino de fuentes renovables en el mismo año. Inmediatamente después, en el año 2022, se registró el récord de incremento de capacidad de generación de energías renovables, alcanzando casi los 295 [GW] de potencia, en donde 192 [GW] pertenecieron a la energía solar. China destaca por contribuir en el año 2022 aproximadamente 140,6 [GW] en generación renovable, casi un 50% de la contribución mundial. [70] Aún se necesitan más esfuerzos para alcanzar el 61% de esta meta y tanto la

tecnología como el mercado irán evolucionando en torno a ella, creando una oportunidad ascendente para este tipo de productos. [30], [32], [71]

Dentro de esta industria, tal vez el grupo de mayor importancia en el mundo es la Súper Liga de Módulos de Silicio (SMSL, por sus siglas en inglés), formada por 9 empresas líderes en el mercado de paneles solares y tecnología fotovoltaica. Este grupo fue formado en el año 2015, a partir de una alianza estratégica constituida por 5 grandes empresas del sector fotovoltaico.[72] En el año 2019 fueron 9 empresas las que se consolidaron como miembros del grupo, y su capacidad de contribución combinada para el año 2022 fue de 105 [GW], lo que alcanza cerca del 55% de la contribución de generación en ese año. [70], [73], [74]

Todas estas empresas tienen reconocimiento mundial y consolidan un potente sector dentro del mercado que abarcan. En la **Tabla 16** se comparte información sobre la capacidad de algunas empresas pertenecientes a la SMSL que realizan reportes anuales para sus inversionistas. El incremento en la capacidad de producción de estas empresas ha sido muy marcado en los últimos dos años, crecimiento generalizado entre las empresas dado que, en el año 2022, la mayoría de la industria global (no sólo la SMSL) presentó un alza explosiva en las ventas y envíos. [32], [71], [73] Para los años 2022, 2023 y futuro, las mejoras en la eficiencia y la incorporación de nuevas instalaciones productivas han permitido a las empresas prever una capacidad de producción aún mayor, impulsadas por el gran crecimiento del mercado fotovoltaico que contempla el plan mitigación del cambio climático hacia el 2050. [32], [71], [73], [75] Es importante señalar que la mayoría de estas empresas tienen sus cuarteles generales en China, lo que se condice con el alza productiva del país como líder mundial en el mercado y uso general de la tecnología fotovoltaica.

Tabla 16. Capacidad Productiva de Empresas pertenecientes a la SMSL en 2021 y Predicción a Corto Plazo. Elaborada en base a [75]–[84]

Empresa	Ubicación	Capacidad Productiva 2021 [GW]	Capacidad Productiva 2022-2024 [GW] (especulada)
Jinko Solar	Shanghai, China	101,5	270
LONGI Solar	Xi'an, China	108,5	240
Canadian Solar	Guelph, Canadá	54,7	235
Trina Solar	Jiangsu, China	85	170
JA Solar	Pekin, China	20	135
Hanwha Q Cells	Seoul, Korea del Sur	15	26,7
First Solar	Arizona, Estados Unidos	9,8	16

En lo que respecta al contexto nacional, no existen productores locales relevantes de este tipo de tecnología, por lo que casi la totalidad de los módulos fotovoltaicos son importados desde el extranjero. Sin embargo, el no ser partícipe de la producción no implica que no exista un comercio de este tipo de productos. Al contrario, la planificación de la matriz energética del país está profundamente ligada a la importación de tecnología, con el objetivo de llevar a cabo los proyectos renovables que forman parte del proceso de descarbonización nacional presente en la agenda energética de Chile. [85] Actualmente, el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) está encargado de regular los estándares, requisitos, términos, registros, formalidades técnicas y procesos ambientales que los ministerios y entidades gubernamentales competentes establezcan. Esto se logra a través de la elaboración de herramientas como las guías de procedimientos, que garantizan una evaluación coherente y efectiva de todos los proyectos nacionales, asegurando a su vez la protección del medioambiente y la modernización del sistema.[86] Este organismo público trabaja coactivamente con el ministerio de energía, institución de gobierno nacional responsable de elaborar y coordinar los distintos planes, políticas y normas para el desarrollo energético del país. [87] El SEA posee un registro de todos los proyectos de producción energética que han sido presentados, aprobados o rechazados e

incluso de aquellos que están en proceso de construcción. La información técnica que presenta esta base de datos es una referencia precisa de los informes de proyectos presentados y de la caracterización técnico-económica de ellos, lo que la convierte en una excelente herramienta para evaluar el desarrollo tecnológico, industrial y económico del país.

El SEA aplica un método de evaluación llamado Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), el cual todos los meses presenta reportes estadísticos sobre los proyectos que ingresan al SEA. Específicamente para el mes de marzo del 2023, se registraron 137 proyectos del sector energético dentro de la base de datos del SEA, la cantidad más alta entre todos los sectores, como se aprecia en la **Figura 67.** [88]

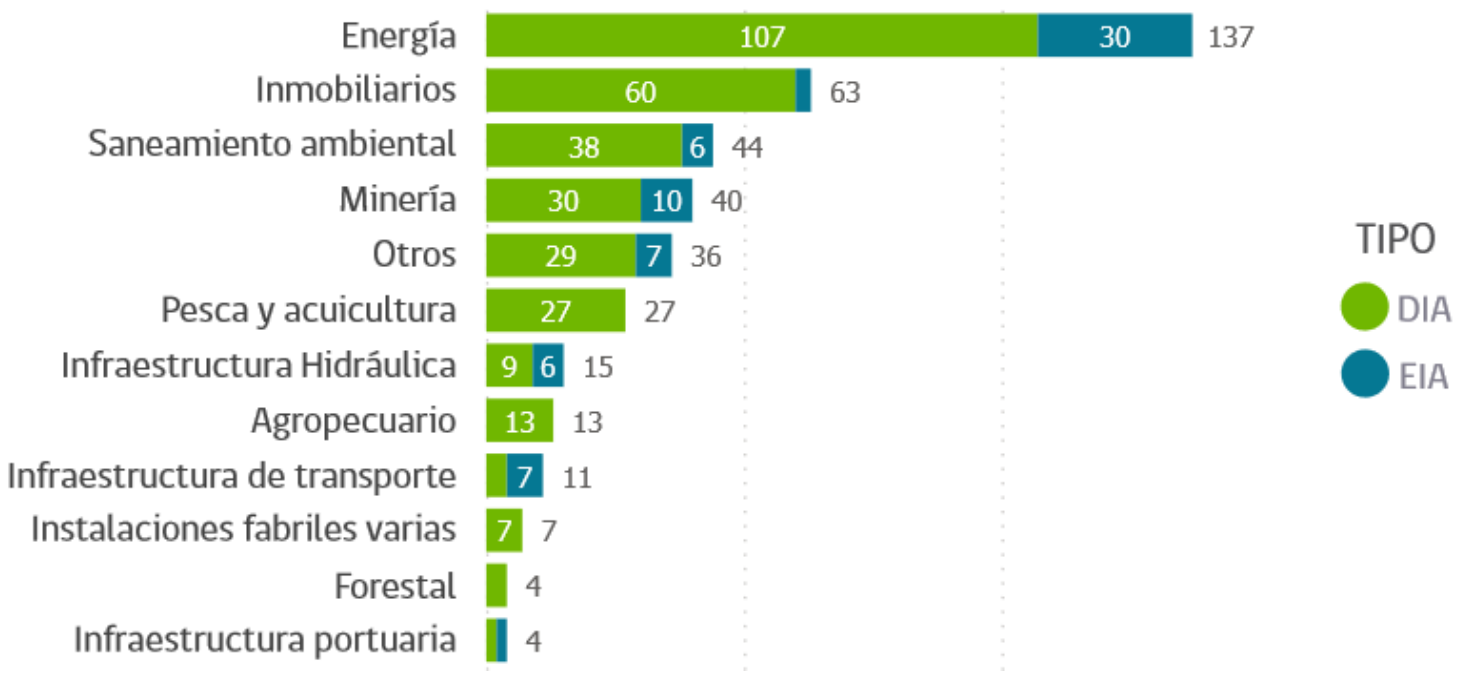


Figura 67. Cantidad de Proyectos Registrados por Sector en el SEA hasta Marzo del 2023. Obtenido de [88]

Las regiones del país con la actividad de proyectos energéticos más alta del último año son Antofagasta, Atacama y Coquimbo. (Ministerio del Medioambiente del Gobierno de Chile, 2023) En la **Tabla 17** se presenta un listado de los más recientes proyectos de tecnología fotovoltaica aprobados y en proceso de revisión de las regiones mencionadas, junto a la capacidad de generación en [MW], titular del proyecto y el tipo de tecnología solar utilizada.

Tabla 17. Proyectos de Generación Fotovoltaica de las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo. Obtenido de [89]–[108]

NOMBRE DEL PROYECTO	CAPACIDAD INSTALADA DEL PROYECTO [MW]	TITULAR DEL PROYECTO	TIPO DE TECNOLOGÍA
Parque Fotovoltaico Socompa Solar	262,7	SOCOMPA SOLAR SPA	PERC Monocristalino
Parque Fotovoltaico Lince Solar	12,5	DPP HOLDING CHILE SPA	Silicio monocristalino
Parque Fotovoltaico Cristales	379	Cristales SpA	Silicio monocristalino
Parque Fotovoltaico Titan Solar	12,5	DPP HOLDING CHILE SPA	Silicio monocristalino
Parque Fotovoltaico Andalhue	12	Abra Solar SpA	Silicio monocristalino
Planta Fotovoltaica Bonasort	9	GR Lauca SpA	Silicio monocristalino
Parque Fotovoltaico Antilco	15	Astro Solar Spa.	Silicio monocristalino
Parque Solar Fotovoltaico Don Esteban	12,5	SOLAR TI TREINTA Y UNO SPA	PERC Monocristalino
Parque Solar Fotovoltaico Chungungo Solar	12,5	Chungungo Solar SpA	PERC Monocristalino
Planta Fotovoltaica Alto Norte 9 MW	9	GR Quelat SpA	Silicio policristalino
Proyecto Fotovoltaico Las Chilcas	12,9	Pesquero Solar SpA	Monocristalino Tipo P
Planta Fotovoltaica Arica 9 MW	9	Chapiquina Solar SpA	Silicio policristalino
Proyecto Fotovoltaico Taruca	13,8	Taruca Solar SpA	Monocristalino Tipo P
Parque Fotovoltaico Chirihue	24	PFV CHIRIHUE SPA	Silicio monocristalino
Parque Fotovoltaico El Peñón	10,5	EL PENÓN SpA	Silicio monocristalino
Parque Fotovoltaico Faro de El Triunfo	6,2	FOTOVOLTAICA FARO I SPA	Silicio monocristalino
Parque Fotovoltaico Cerrillos	10,5	CERRILLOS SPA	Silicio monocristalino
Peñon Solar II	11,8	Enlasa Energia S.A.	Silicio monocristalino
Parque Solar Paihuen	12,2	Yumbrel Solar SpA.	Silicio monocristalino
Parque Fotovoltaico Momano	7,5	CVE Proyecto Catorce SpA	PERC Monocristalino

Una gran parte de los proyectos utilizan celdas de silicio monocristalino como tecnología solar para generar electricidad, seguida por la tecnología PERC monocristalina. Los principales proveedores de la tecnología solar que contemplan los proyectos nacionales corresponden, en su gran mayoría, a las grandes empresas internacionales pertenecientes a la SMSL, entre las cuales destacan LONGI Solar, Canadian Solar, Trina Solar y, en su mayoría, Jinko Solar.

Con estos antecedentes, se define el principal competidor del mercado nacional; las celdas de silicio monocristalino de primera generación. Las celdas comercializadas en los nuevos proyectos están caracterizadas por tener, en general, una vida útil de 30 años y un PCE aproximado de un 20%, mientras que los módulos están compuestos desde 144 a 156 celdas y producen entre 425 – 650 [W] en condiciones de medición estándar. El costo de las celdas solares puede ser definido por el Precio Mínimo Sustentable (MSP), el cual indica el menor precio de venta de cierto producto para sostener un negocio sustentable a largo plazo.[109] Los módulos construidos en China alcanzan un MSP de 0,37 [USD/W], de los cuales 0,21 [USD/W]

corresponden a la construcción de la celda y el resto al ensamblaje y operación del módulo. Estos módulos son desde un 11 – 37% más baratos que los construidos en Alemania, Estados Unidos y Korea del Sur. [110] Recientes estudios sugieren que el MSP de los módulos de silicio podrían llegar a tener un costo de 0,30 - 0,31 [USD/W] para los años venideros, por lo que será este valor el que se utilizará como base de comparación para la competitividad de la propuesta generada. [41], [50], [111], [112]

5.2 Propuesta Industrial

Antes de presentar el escalamiento de la etapa de serigrafía para un uso industrial, se establece claramente cuál es el producto final y cuál es la productividad actual en el laboratorio. Como el experimento realizado en este trabajo consistió en la construcción de un tipo específico de m-CPSC, los resultados y conclusiones están asociados al uso del equipo de serigrafía sólo con ese tipo de celdas. En base a esto, se seleccionó como producto final del proceso el mismo tipo de celda presentado por la Universidad de Swansea y desarrollado en el laboratorio.[1]

5.2.1 Propuesta Productiva a Escala de Laboratorio

Respecto a la productividad del laboratorio, es importante señalar que fue calculada en base a ciertos cambios importantes. La principal diferencia es que el proceso de producción industrial parte en la etapa posterior al tratamiento de rociado pirolítico, por lo que los sustratos que ingresan al proceso son los que ya poseen la capa de titania compacta en su estructura. Otra diferencia importante es que los sustratos no son procesados de manera unitaria en la serigrafiadora, sino que son trabajados como planchas de vidrio de 10×15 [cm^2]. Esto hace necesario incluir una etapa de división de la plancha en 24 unidades de 2,5×2,5 [cm^2], después de la serigrafía de todas las pastas y sus respectivos tratamientos térmicos.

En cuanto a los equipos utilizados, se consideran los equipos disponibles y manipulados en el experimento, por lo que la información recolectada sobre ellos es fundamental para la construcción y el cálculo del volumen de producción. Cabe destacar que no se utilizan

exactamente los mismos equipos para cada etapa, sino que se realiza el escenario de producción considerando una disponibilidad mejorada de algunos de ellos, por ejemplo, la utilización de múltiples placas calefactoras marca Cromtek para sustituir el uso de otras placas más pequeñas. La **Figura 68** representa el proceso por el cual se someten los sustratos hasta ser transformados en el producto deseado.



Figura 68. Diagrama de Proceso de Producción en Escala de Laboratorio.

Para realizar el cálculo de la producción en escala de laboratorio es indispensable determinar la productividad de cada equipo y etapa. A partir de las mediciones realizadas durante la experimentación, se confecciona la **Tabla 18**, en donde se muestra la productividad de cada etapa importante. Según esta tabla, la productividad de la mufla Nabertherm en el proceso de recocido es notablemente más baja que la del resto de las operaciones, por lo que el proceso productivo del laboratorio queda limitado por esta etapa de construcción. La mufla posee un área interna basal de 28×34 [cm^2], superficie que sólo permite procesar 2 planchas de 10×15 [cm^2] como máximo por tanda. También es notable que la productividad de la etapa de soldado es muy baja, sin embargo, no es la principal limitante del proceso. Cabe destacar que la productividad (P_C) ha sido calculada como la cantidad de celdas unitarias procesadas por etapa (N_C) dividida por la cantidad de tiempo que toma procesarlas (t_P) en horas. La ecuación **(10)** muestra, como ejemplo de cálculo, la productividad de la mufla.

$$P_C = \frac{N_C}{t_P} = \frac{24 \times 2\ [unidades]}{6\ [hora]} = 8\ \left[\frac{unidades}{hora}\right] \quad \textbf{(10)}$$

Tabla 18. Tabla de Productividad de Operaciones y Equipos en la Producción a Escala de Laboratorio.

OPERACIÓN UNITARIA	EQUIPO PRINCIPAL	PRODUCTIVIDAD DEL EQUIPO [unidades/hora]
SERIGRAFÍA	SERIGRAFIADORA ATMA	1920
RECOCIDO	MUFLA NABERTHERM	8
SEPARACIÓN	TABLA DE CORTE PARA VIDRIO	96
INFILTRACIÓN	PLACA CROMTEK	192
	MICROPIPETA 10 [µL]	480
CONVERSIÓN	PLACA CALEFACTORA OVAN	96
SOLDADO Y APLICACIÓN DE PASTA DE PLATA	DEPÓSITO DE PASTA DE PLATA	600
	SOLDADORA ULTRASÓNICA	12

Así, la **Tabla 18** permite hacer una planificación de la operación dedicada del laboratorio en la construcción de celdas. Es importante destacar que la productividad de la serigrafiadora semiautomática es notablemente más alta que la del resto de los equipos, ya que es capaz de procesar 5.760 [unidades/hora], lo que, dividido por los 3 ciclos necesarios para depositar cada película delgada, dan como resultado 1.920 [unidades/hora], un volumen de producción que no

puede ser alcanzado en escala de laboratorio. En base a esto se diseña el plan operativo presentado en la **Tabla 19**, en donde se exponen las actividades que se realizan durante 6 días de trabajo, lo que es considerado como una semana productiva en este proceso. Algunas actividades se han dispuesto para ser realizadas en paralelo junto a otras, dentro del mismo bloque horario, con el fin de optimizar la producción. Esto se debe a dos principales motivos detectados en estos pasos; el primero es que algunos pasos tienen muy corta duración, dando la posibilidad de realizar los siguientes dentro del mismo bloque; mientras que el segundo motivo es que algunas actividades, como el recocido, la preparación de la cámara de guantes y los tratamientos térmicos de la solución de perovskita no requieren una participación constante, generando espacios para realizar otras actividades.

Tabla 19. Planificación de Trabajo Semanal del Proceso Productivo en Escala de Laboratorio.

HORARIO	DÍA 1		DÍA 2	DÍA 3	
	ACTIVIDADES		ACTIVIDADES	ACTIVIDADES	
8 a 9	Limpieza de Sustratos	Serigrafía de Titania	Serigrafía de Circonia y Limpieza de Pastas	Serigrafía de Carbono y Limpieza de Pastas	
9 a 10	Recocido Tanda 1	Limpieza de Pastas	Recocido Tanda 1	Recocido Tanda 1	Preparación (Kapton Tape)
10 a 11	Recocido Tanda 1		Recocido Tanda 1	Recocido Tanda 1	Preparación (Kapton Tape)
11 a 12	Recocido Tanda 1		Recocido Tanda 1	Recocido Tanda 1	Preparación (Kapton Tape)
12 a 13	Recocido Tanda 1		Recocido Tanda 1	Recocido Tanda 1	Preparación (Kapton Tape)
13 a 14	Recocido Tanda 1		Recocido Tanda 1	Recocido Tanda 1	Preparación de Cámara de Guantes
14 a 15	Recocido Tanda 1		Recocido Tanda 1	Recocido Tanda 1	Preparación de Cámara de Guantes
15 a 16	Recocido Tanda 2		Recocido Tanda 2	Recocido Tanda 2	Preparación de Cámara de Guantes

HORARIO	DÍA 4		DÍA 5	Día 6
	ACTIVIDADES		ACTIVIDADES	ACTIVIDADES
8 a 9	Preparación de Cámara de Guantes	Separación en Unidades	Ambientación 180 [°C]	Embalaje Celdas
9 a 10	Preparación de Cámara de Guantes	Separación en Unidades	Soldado Ultrasónico	Embalaje Celdas
10 a 11	Preparación de Solución de Perovskita en la Cámara de Guantes		Soldado Ultrasónico, Reposición	Embalaje Celdas y Limpieza
11 a 12	Tratamiento Térmico de la Solución	Separación en Unidades y Cinta Kapton Tape 1	Soldado Ultrasónico	
12 a 13	Ambientación Térmica de la Tanda 1 e Infiltración de Perovskita	Conversión de Perovskita Tanda 1	Soldado Ultrasónico, Reposición	
13 a 14	Conversión de Perovskita Tanda 1	Cinta Kapton Tape 2	Soldado Ultrasónico	
14 a 15	Ambientación Térmica de la Tanda 2 e Infiltración de Perovskita	Conversión de Perovskita Tanda 2	Soldado Ultrasónico	
15 a 16	Conversión de Perovskita Tanda 2	Limpieza de Instrumentos Sucios	Soldado Ultrasónico	
16 a 17	Reposo de las Celdas en Ambiente Seco		Soldado Ultrasónico y Aplicación Pasta de Plata Sobre las Celdas	

En los tres primeros días de trabajo se depositan las capas mesoporosas sobre los sustratos. La primera limpieza programada, correspondiente a la limpieza con la pistola de aire comprimido, se realiza en cuestión de segundos sobre un gran volumen de sustratos. A continuación, la serigrafía contempla un proceso de preparación, de aproximadamente 30 minutos, mientras que la ejecución para el volumen de producción de 4 planchas de sustratos por semana es equivalente 1 un minuto de procesamiento. Finalmente, el tiempo de lavado es de 10 minutos. Así, todas estas actividades pueden ser realizadas en las dos primeras horas del día 1. El tiempo de recocido considerado en el proceso es de 6 horas por tanda, incluyendo el tiempo de enfriamiento necesario. Cuando la primera tanda termina, casi al final del turno laboral, se retira una plancha e inmediatamente ingresa la otra, que estará lista al día siguiente. De esta manera, se optimiza la producción para hacer un máximo semanal de 4 planchas, lo que equivale a un total de 96 celdas.

El tiempo de lavado para la circonia toma lo mismo que para la titania, sin embargo, el carbono requiere de 20 minutos para limpiar las piezas, sin necesidad de un lavado ultrasónico ya que se pueden conseguir buenos resultados de limpieza sin su aplicación. En el tercer día es necesario preparar las condiciones de trabajo del cuarto día, además de ejecutar la serigrafía del carbono. Se preparan los trozos de cintas Kapton Tape y la preparación de la cámara de guantes, debido a que este último paso puede tomar hasta 3 horas de trabajo o más, dependiendo de las condiciones ambientales en términos de humedad.

Al llegar el cuarto día, se debe completar la preparación de la cámara de guantes, lo que puede llegar a tomar, considerando el tratamiento previo, hasta 2 horas. Durante los tiempos muertos se separan las unidades con una punta de diamante, lo cual se pausa en el momento en que la cámara está lista para ser utilizada. Se prepara la solución de perovskita en la cámara, en donde se pesan los gramos de CsBr y $PbBr_2$ necesarios, dejando este último compuesto dentro del volumen requerido de solvente DMSO en un frasco de vidrio. Primero se deja la mezcla de bromuro de plomo y DMSO por aproximadamente 15 minutos a 50 [°C] y 200 [RPM] en una placa de calefacción Ovan. Cuando está completamente disuelto, se añade el bromuro de cesio a la solución y se mantiene en las mismas condiciones de agitación y temperatura por 1 hora y media. Durante los tiempos muertos de esta etapa se termina de cortar las planchas y se pegan los trozos de la cinta Kapton Tape sobre la primera tanda, de 48 celdas unitarias, y se dejan

ambientadas a 50 [°C] en la placa Cromtek. Cuando la solución de perovskita está completamente disuelta, se extraen 8 [µL] y se infiltran en cada celda con una micropipeta, luego se aplica el tratamiento térmico del proceso de conversión de perovskita a 250 [°C] sobre la placa Cromtek. Durante esta etapa de la primera tanda, se pegan los trozos de cinta sobre las 48 celdas de la segunda tanda, las que luego son ambientadas e infiltradas de la misma manera que la primera. A medida que se termina el tratamiento térmico, se retiran y desechan los trozos de cinta mientras las celdas están calientes. Al enfriarse, las celdas son almacenadas en una desecadora hasta el día siguiente. Los trozos de cinta y todos los materiales desechables que han tenido contacto con plomo son desechados en un recipiente de residuos peligrosos. El resto de los materiales reutilizables, como agitadores magnéticos y vasos precipitados, se lavan con agua destilada y ultrapura, para luego entrar en una solución de ácido nítrico idéntico al utilizado en el lavado del método experimental. Los residuos líquidos son desechados en un contenedor de residuos peligrosos.

En el quinto día, se retiran 48 celdas de la desecadora y se calientan hasta 180 [°C] en la placa Cromtek, que tiene suficiente área para admitir todas las unidades. Durante este tiempo, se prepara la soldadora ultrasónica para adherir la aleación metálica Cerasolzer a las celdas. La productividad de la etapa de soldad ultrasónico es de apenas 12 unidades por hora, por lo que se necesita la mayoría del día para ejecutar esto. Cada unidad soldada es inmediatamente retirada de la placa calefactora y puesta a enfriar sobre una superficie cerámica a temperatura ambiental, mientras que, al terminar el soldado de 24 celdas, cada 2 horas se reincorporan 24 más para ambientarlas mientras se terminan las que aún siguen en la placa. De esta manera, se optimiza el tiempo sobre una sola placa Cromtek para terminar con las celdas restantes. Al terminar la etapa de soldado, se añade rápidamente la pasta de plata sobre cada una de las unidades y se dejan secar hasta el día siguiente.

En el sexto día, se guardan las celdas dentro de un recipiente plástico que luego es envuelto en papel aluminio, para evitar la incidencia de la luz. El recipiente es puesto en una caja y se almacenan hasta ser utilizadas, finalizando así el proceso productivo, con un resultado de 96 celdas por semana. Todo el procedimiento ha sido planificado para ser ejecutado por un solo operador, con posible asistencia en el cuarto día. El trabajo semanal es de un total de 40 horas, restando una hora diaria para el almuerzo, a excepción del sexto día.

5.2.2 Propuesta Productiva a Escala Industrial

Como ya se ha discutido anteriormente, las celdas solares de perovskita son de una construcción más económica y de menor impacto medioambiental que las de silicio, sin embargo, la vida útil de estos dispositivos aún es una desventaja importante por lo que la tecnología aún necesita madurez para ser viable como competidor sólido de las celdas de silicio. Actualmente existen celdas solares de multicomponentes que contienen perovskita y otros materiales, sin embargo, requieren de procesos de construcción más complicados y materiales adicionales para ser elaboradas. El objetivo de este trabajo fue encontrar un modo de escalar el uso de la serigrafiadora semiautomática para conseguir grandes volúmenes de producción, en base a lo cual se genera esta propuesta, que consiste en la adaptación de la etapa de serigrafía y recocido para este uso.

Para comenzar, se necesitó utilizar una base de cálculo como volumen de producción para acotar el escalamiento a números razonables, por lo que se seleccionó la productividad máxima de la serigrafiadora para hacer el escalamiento. Como la etapa de serigrafía está fuertemente relacionada con la etapa de recocido, la cual representa la mayor limitante del proceso productivo en consideración la productividad de los equipos presentados en la **Tabla 18**, los principales arreglos de la propuesta consistieron en rediseñar esta etapa con nuevos equipos y tiempos de operación distintos.

Debido a que los hornos toman mucho tiempo en enfriarse y sus capacidades son limitadas, se decidió cambiar a un equipo de proceso continuo para procesar más rápido los sustratos. Para esto se consideraron distintos equipos de operación continua de gran capacidad con múltiples funciones necesarias para ejecutar el protocolo de recocido, como cámaras de precalentamiento y calentamiento, además de cámaras de enfriamiento para reducir notablemente el tiempo de procesamiento. En la **Tabla 20** se presenta el equipo seleccionado junto con sus principales características.

Tabla 20. Propiedades del Equipo de Recocido Industrial.

EQUIPO	Horno Eléctrico con Cinta Transportadora de Producción Continua
PROVEEDOR / MODELO	Luoyang Yaoxin Electric Furnace Co., Ltd. / YX-WD
Temperatura de Operación (Adaptable)	200 – 1600 [°C]
PRODUCTIVIDAD	1234 - 1728 [unidades/hora]
Potencia Máxima	35 [KW]
Dimensiones (Ancho×Largo×Alto) (Adaptable)	300x30x15 [cm^3]
Costo	3300 [USD]

El equipo tiene la gran cualidad de ser adaptable en características importantes como dimensiones y temperatura de trabajo, además de una velocidad regulable para realizar todas las etapas del recocido de manera continua. Para optimizar el uso del horno, se considera la manipulación de bandejas de una aleación de aluminio y acero inoxidable, cuyas dimensiones son 30×30×1,8 [cm^3]. Estas bandejas permitirán aprovechar la altura de cámara para aumentar la productividad. Si se considera un espacio de 1 [cm] entre bandejas y un espesor de las planchas de vidrio, de 2,2 [cm], se consigue un total de 5 [cm] de altura por sección, dando abasto para poner 3 bandejas con 6 planchas cada una simultáneamente en cada posición del horno. La **Tabla 21** muestra las dimensiones del equipo, de las bandejas y de las planchas, junto con la capacidad máxima de cada una que puede contener el equipo, dentro del volumen efectivo de trabajo. Cabe destacar que, como el equipo es adaptable en ciertas características como sus dimensiones, el volumen efectivo será menor al volumen real de la cámara para evitar problemas de espacios ajustados en el proceso.

Tabla 21. Dimensiones Efectivas de Trabajo del Horno Continuo y Capacidad Calculada.

Dimensiones Efectivas	Horno	Bandejas	Planchas	Número de Bandejas	Número de Planchas
ANCHO [cm]	30	30	15	1	2
LARGO [cm]	300	30	10	10	30
ALTO [cm]	15	1,8	2,2	3	3
Total				**30**	**180**

Ya que el equipo es capaz de contener 180 planchas de vidrio durante su procesamiento, se utiliza la ecuación **(10)** para calcular su productividad. Ya que el equipo cuenta con un sector de enfriamiento, se puede regular esta etapa para que la rampa de alza de temperatura esa la misma que la de descenso, es decir, que ambas duren la misma cantidad de tiempo. Estableciendo esto, se define un tiempo de procesamiento de 3,5 horas y 2,5 horas, es decir, una productividad de 1.234 y 1.728 [unidades/hora], para el recocido de titania y circonia/carbono, respectivamente. Considerando la productividad de la serigrafiadora, de 5.760 [ciclos/hora], se calcula que se necesitan 5 hornos eléctricos de proceso continuo para recocer la titania y 4 para la circonia y el carbono. Sin embargo, este arreglo no usa de manera eficiente los hornos, dejando capacidad de sobra en algunos de ellos. Es por esto por lo que se propone como arreglo el uso de 3 serigrafiadoras semiautomáticos, utilizando 14 y 10 hornos eléctricos de proceso continuo, para titania y circonia/carbono respectivamente. En este caso, la productividad de la operación de serigrafía – recocido aumenta a 5.760 [unidades/hora]. En la **Tabla 22** se muestra el volumen de producción para el funcionamiento de estas dos operaciones a distinta cantidad de horas al día de trabajo, en donde se marca con negrita la producción del uso de 3 serigrafiadoras, llamada configuración 2, en comparación con el uso de tan solo 1 de estos equipos, llamada configuración 1.

Tabla 22. Volumen de Producción a Distintas Horas de Trabajo de la Configuración 1 y Configuración 2.

Horas de Trabajo [h/día]	Configuración	Volumen de Producción [unidades/día]
1	1	1.920
	2	**5.760**
3	1	5.760
	2	**17.280**
7	1	13.440
	2	**40.320**
11	1	21.120
	2	**63.360**
23	1	44.160
	2	**132.480**

Es notable que la productividad de esta propuesta es mucho más alta que la del laboratorio, incluso optimizando los tiempos y operaciones unitarias de este último. Si se considera un total de 96 unidades a la semana, es decir, 16 unidades diarias procesadas por serigrafía y recocido en las condiciones de laboratorio, se concluye que es una cantidad ínfima en comparación a las 40.320 unidades por día que puede llegar a alcanzar el proceso con la segunda configuración, al cabo de las mismas horas de operación al día aproximadamente. Para esto se consideran 7 horas laborales por día, puesto que la limpieza y la preparación del equipo toman aproximadamente 1 hora. Es importante destacar que, si se considera sólo la operación serigrafía – recocido del proceso productivo a escala de laboratorio, la productividad queda establecida como la de la mufla Nabertherm, equivalente a 8 unidades por hora, es decir, 56 unidades por día, operando las 7 horas establecidas. Esta cantidad sigue siendo mucho menor al volumen de producción industrial obtenido con las nuevas configuraciones y el uso de la serigrafiadora es cercano a 0,004 horas por pasta, es decir, 0,012 horas totales por cada 7 horas de operación de la mufla. La ecuación **(11)** muestra el cálculo para determinar el tiempo de uso de la serigrafiadora (t_{op}^{S}) en estas últimas condiciones.

$$t_{op}^{S} = \frac{Productividad\ Mufla}{Productividad\ Serigrafiadora} = \frac{8\ [unidades]}{1.920\ [unidades/h]} = 0{,}004\ [h] \qquad \textbf{(11)}$$

De esta manera se consigue una producción industrial del proceso de serigrafía y recocido para la construcción de m-CPSCs.

5.3 Balances de Masa y Energía

Para poder realizar el proceso de serigrafía y recocido, es necesario contar con un abastecimiento de materias primas, electricidad e insumos de limpieza. En la **Tabla 23** se presenta información relevante sobre el uso de las pastas e insumos de limpieza para cada tipo de serigrafía. Estos datos se obtuvieron mediante cálculos experimentales durante las etapas de impresión y lavado correspondientes a la serigrafía.

Tabla 23. Lista de Insumos de Limpieza y Consumo de Pasta (g_i) en Serigrafía.

Consumo de Insumos de Limpieza para la etapa de Serigrafía		
Titania	Estopa [g]	10
	Etanol [mL]	25
Circonia	Estopa [g]	10
	Etanol [mL]	25
Carbono	Estopa [g]	20
	Etanol [mL]	65

Pasta Utilizada por Unidad Construida (g_i)		
Titania	Pasta [g]	0,0023
Circonia	Pasta [g]	0,0041
Carbono	Pasta [g]	0,0083

Con esta información se procede a plantear los balances de masa para hacer cálculo de los volúmenes de materias primas requeridas por el proceso de serigrafía – recocido. La ecuación **(12)** presenta el balance de masa general del proceso de serigrafía, en donde M_i^{entra}, M_i^{sale}, M_i^{rx} y M_i^{ac} representan la masa que entra, que sale, que reacciona y que se acumula durante el proceso, respectivamente. El subíndice i representa el tipo de material sobre el cual se hace el cálculo. Como el proceso de la serigrafía no posee reacciones químicas involucradas, el balance pasa a estar representado por la ecuación **(13)**, en donde se separa M_i^{sale} en $M_{i,Rec}^{sale}$ y $M_{i,DS}^{sale}$, que representan la cantidad de masa de pasta recuperada y la depositada en el sustrato, respectivamente. La ecuación **(14)** muestra el cálculo de $M_{i,DS}^{sale}$, el cual se obtiene en base a la cantidad de unidades producidas por hora (N_P), al tiempo de operación por día (t_{op}) y a la cantidad pasta utilizada por unidad g_i. Los valores de M_i^{ac} corresponden a la cantidad de pasta remanente en el bastidor y las piezas, la cual se pierde en la limpieza. Esta cantidad es equivalente a 1,95, 0,93 y 1,59 [g] para titania, circonia y carbono, respectivamente.

$$M_i^{entra} - M_i^{sale} \mp M_i^{rx} = M_i^{ac} \quad \textbf{(12)}$$

$$M_i^{entra} - (M_{i,Rec}^{sale} + M_{i,DS}^{sale}) = M_i^{ac} \quad \textbf{(13)}$$

$$M_{i,DS}^{sale} = g_i \times N_P \times t_{op} \quad \textbf{(14)}$$

Conforme a las ecuaciones y datos presentados, se hace cálculo de las materias primas requeridas para el proceso productivo en escala de laboratorio e industrial, considerando la productividad máxima de la serigrafia – recocido, es decir, sin incluir el resto de las etapas y con el fin de hacer una comparación más exacta entre ambas opciones. Las ecuaciones **(15) - (20)** representan el balance de masa aplicado a la escala de laboratorio e industrial de la titania,

calculado por día de operación. Estas ecuaciones se utilizan también en los balances de masa de circonia y carbono, cuyos resultados están incluidos más adelante, en la **Tabla 24.** Cabe destacar que, debido a las condiciones de uso de la serigrafiadora, siempre se utilizará una cantidad de pasta igual a un múltiplo de 20 [g] superior a la cantidad depositada total, como se ve a continuación.

$$M_{Ti,DS}^{sale} = g_{Ti} \times N_{P,LAB} \times t_{op} = 2{,}3 \times 10^{-3} \left[\frac{g}{unidad}\right] \times 8 \left[\frac{unidades}{h}\right] \times 7 \left[\frac{h}{día}\right] = 0{,}13 \left[\frac{g}{día}\right] \quad \textbf{(15)}$$

$$M_{Ti,Rec}^{sale} = M_{Ti}^{entra} - M_{Ti,DS}^{sale} - M_{Ti}^{ac} = (20 - 0{,}13 - 1{,}95) \left[\frac{g}{día}\right] = 17{,}92 \left[\frac{g}{día}\right] \quad \textbf{(16)}$$

$$M_{Ti,DS}^{sale} + M_{Ti}^{ac} = (0{,}13 + 1{,}95)\,[g] = 2{,}08\,[g] \quad \textbf{(17)}$$

Es importante notar que, en la ecuación **(16)**, puede verificarse que la productividad del proceso en escala de laboratorio es tan baja que se pierde más pasta en el lavado de la que se deposita sobre los sustratos. Esto ocurre para las 3 pastas utilizadas en el proceso. En cuanto a las condiciones industriales, se tiene que:

$$M_{Ti,DS}^{sale} = g_{Ti} \times N_{P,LAB} = 2{,}3 \times 10^{-3} \left[\frac{g}{unidad}\right] * 40.320 \left[\frac{unidades}{día}\right] = 92{,}61 \left[\frac{g}{día}\right] \quad \textbf{(18)}$$

$$M_{Ti,Rec}^{sale} = M_{Ti}^{entra} - M_{Ti,DS}^{sale} - M_{Ti}^{ac} = (340 - 317{,}5 - 1{,}95) \left[\frac{g}{día}\right] = 25{,}44 \left[\frac{g}{día}\right] \quad \textbf{(19)}$$

$$M_{Ti,DS}^{sale} + M_{Ti}^{ac} = (92{,}61 + 1{,}95)\left[\frac{g}{día}\right] = 94{,}56\left[\frac{g}{día}\right] \quad \textbf{(20)}$$

De esta manera se calcula la masa recuperada de pasta en cada caso, mientras que la cantidad de materias primas consumida en el proceso es el equivalente a la suma de $M_{i,DS}^{sale}$ y M_{i}^{ac}, ecuaciones **(17)** y **(20)**.

En cuanto a los balances de energía, debido a que no se conoce el funcionamiento específico de los programas de los equipos ni muchas de las variables características de la transferencia de calor de ellos. Tanto en la propuesta industrial como en la de laboratorio se hace necesario un supuesto fundamental para el cálculo de la energía utilizada, el cual es presentado a continuación. Para estimar la cantidad de energía, se utiliza la potencia de consumo (P_C) y el tiempo de operación (t_{op}). Además, para los equipos encargados de la etapa de recocido, la potencia utilizada se define como la efectiva de consumo (P_{EFC}), la que se estima con un cálculo lineal, en donde se hace referencia a la potencia máxima de consumo (P_{MC}) que es alcanzada a la temperatura máxima de funcionamiento (T_{MF}). Así, se calcula la energía como la potencia consumida para cada caso en base a la temperatura de operación de los equipos (T_{OP}), de la mufla de laboratorio en las ecuaciones **(21)-(25)**, y del horno de operación continua, ecuaciones **(26)-(30)**. El cálculo de los consumos es distinto para el recocido de titania y de circonia/carbono, puesto que se alcanza una temperatura de 550 [°C] en la primera y 400 [°C] para las otras capas delgadas, sin mencionar que el tiempo de operación de los equipos también difiere.

MUFLA $$P_{EFC}^{Ti} = \frac{P_{MC} \times T_{OP}}{T_{MF}} = \frac{4{,}5[kW] \times (550 + 273{,}15)[K]}{(1.200 + 273{,}15)[K]} = 2{,}51[kW] \quad \textbf{(21)}$$

MUFLA $$P_{C}^{Ti} = P_{EFC}^{Ti} \times t_{OP}^{Ti} = 2{,}51\ [kW] \times 7\left[\frac{h}{día}\right] = 17{,}60\ \left[\frac{kW_h}{día}\right] \quad \textbf{(22)}$$

MUFLA

$$P_{EFC}^{Zr/C} = \frac{P_{MC} \times T_{OP}}{T_{MF}} = \frac{4{,}5[kW] \times (400 + 273{,}15)[K]}{(1.200 + 273{,}15)[K]} = 2{,}06[kW] \quad \textbf{(23)}$$

MUFLA

$$P_{C}^{Zr/C} = P_{EFC}^{Zr/C} \times t_{OP}^{Zr/C} = 2{,}06\ [kW] \times (7 + 7)\left[\frac{h}{día}\right] = 28{,}79\ \left[\frac{kW_h}{día}\right] \quad \textbf{(24)}$$

MUFLA

$$P_{C}^{total} = P_{C}^{Zr/C} + P_{C}^{Ti} = (28{,}79 + 17{,}60)\left[\frac{kW_h}{día}\right] = 46{,}39\ \left[\frac{kW_h}{día}\right] \quad \textbf{(25)}$$

A continuación, se repite el cálculo para los hornos de recocido continuo, en donde se debe considerar el número de equipos (N_{eq}) que se utilizan en cada proceso. Como se mencionó anteriormente, el recocido de la titania necesita 14 equipos, mientras que la circonia y el carbono sólo 10.

HORNO CONTINUO

$$P_{EFC}^{Ti} = \frac{P_{MC} \times T_{OP}}{T_{MF}} = \frac{35[kW] \times (550 + 273{,}15)[K]}{(1.600 + 273{,}15)[K]} = 15{,}4[kW] \quad \textbf{(26)}$$

HORNO CONTINUO

$$P_{C}^{Ti} = P_{EFC}^{Ti} \times t_{OP}^{Ti} \times N_{eq} = 15{,}4\ [kW] \times 7\left[\frac{h}{día}\right] \times 14 = 1.507{,}3\left[\frac{kW_h}{día}\right] \quad \textbf{(27)}$$

HORNO CONTINUO

$$P_{EFC}^{Zr/C} = \frac{P_{MC} \times T_{OP}}{T_{MF}} = \frac{35[kW] \times (400 + 273{,}15)[K]}{(1.600 + 273{,}15)[K]} = 12{,}58[kW] \quad \textbf{(28)}$$

HORNO CONTINUO

$$P_{C}^{Zr/C} = P_{EFC}^{Zr/C} \times t_{OP}^{Zr/C} = 12{,}58\ [kW] \times 7\left[\frac{h}{día}\right] \times 20 = 1.760{,}9\ \left[\frac{kW_h}{día}\right] \quad \textbf{(29)}$$

HORNO CONTINUO

$$P_C^{total} = P_C^{Zr/C} + P_C^{Ti} = (1.760{,}9 + 1.507{,}3)\left[\frac{kW_h}{día}\right] = 3.268{,}2\ \left[\frac{kW_h}{día}\right] \quad \textbf{(30)}$$

Además, es necesario hacer el mismo cálculo para la serigrafiadora y el compresor de aire, cuyas potencias de consumo (P_{EFC}) son 0,83 [kW] y 11,2 [kW] (1,5 [HP]), respectivamente. Además, la serigrafiadora tiene un consumo de aire de 0,54 [L/ciclo], mientras que el caudal de alimentación del compresor es de 196 [L/min]. Siendo así, se calcula el tiempo de operación del compresor (t_{op}^{C}) para ambas escalas en las ecuaciones **(32)** y **(33)**, a través del cálculo de los litros por hora (L_{ph}) del equipo de serigrafía, en la ecuación **(31).**

$$L_{ph} = Consumo\ de\ Aire\ por\ Ciclo \times Ciclos\ por\ Hora = \ 0{,}54\ \left[\frac{L}{ciclo}\right] \times 240\left[\frac{ciclos}{h}\right] = 129{,}6\ \left[\frac{L}{h}\right] \quad \textbf{(31)}$$

USO ESCALA LABORATORIO

$$t_{op}^{C} = \frac{L_{ph} \times t_{op}^{S}}{Caudal\ Compresor} = \frac{129{,}6\ \left[\frac{L}{h}\right] \times 0{,}0042\ \left[\frac{h}{día}\right]}{196 \times 60\left[\frac{L}{h}\right]} = 0{,}00005\ \left[\frac{h}{día}\right] \quad \textbf{(32)}$$

USO ESCALA INDUSTRIAL

$$t_{op}^{C} = \frac{L_{ph} \times t_{op}^{S} \times N_{eq}}{Caudal\ Compresor} = \frac{129{,}6\ \left[\frac{L}{h}\right] \times 7\ \left[\frac{h}{día}\right] \times 3}{196 \times 60\left[\frac{L}{h}\right]} = 0{,}231\ \left[\frac{h}{día}\right] \quad \textbf{(33)}$$

Al igual que antes, el tiempo de operación es la suma de las tres etapas de serigrafía necesarias para construir un dispositivo. Las ecuaciones **(34)-(37)** se presentan como evidencia del cálculo relacionado al resto de los equipos.

SERIGRAFIADORA LABORATORIO

$$P_C = P_{EFC} \times t_{op}^S = 0{,}83\ [kW] \times 0{,}0042 \left[\frac{h}{día}\right] = 0{,}0005 \left[\frac{kW_h}{día}\right] \quad \textbf{(34)}$$

COMPRESOR LABORATORIO

$$P_C = P_{EFC} \times t_{op}^C = 11{,}2[kW] \times 0{,}00005 \left[\frac{h}{día}\right] = 0{,}0467 \left[\frac{kW_h}{día}\right] \quad \textbf{(35)}$$

SERIGRAFIADORA INDUSTRIAL

$$P_C = P_{EFC} \times t_{op}^S \times N_{eq} = 0{,}83\ [kW] \times 7 \left[\frac{h}{día}\right] \times 3 = 17{,}43 \left[\frac{kW_h}{día}\right] \quad \textbf{(36)}$$

COMPRESOR INDUSTRIAL

$$P_C = P_{EFC} \times t_{op}^C = 11{,}2[kW] \times 0{,}231 \left[\frac{h}{día}\right] = 2{,}59 \left[\frac{kW_h}{día}\right] \quad \textbf{(37)}$$

Finalmente, los resultados del consumo energético y de materias primas calculados por las múltiples ecuaciones de este capítulo son presentados en la **Tabla 24**, en donde se detalla el consumo total de materias primas y potencia eléctrica.

Tabla 24. Consumo Total de Materias Primas y Potencia Eléctrica.

MATERIAS PRIMAS	LABORATORIO		INDUSTRIA	
	Pasta [g/día]	Potencia [KW-h/día]	Pasta [g/día]	Potencia [KW-h/día]
Titania	2,08	17,60	94,6	1513,98
Circonia	1,16	14,40	164,3	887,13
Carbono	2,06	14,40	337,6	887,13
TOTAL		**46,39**		**3288,23**

5.4 Costos de las Propuestas

A continuación, se presentan los costos comparativos entre la aplicación de las operaciones de serigrafía y recocido en la escala de laboratorio y la industrial. Para comenzar, los costos de los equipos de cada proceso son presentados en la **Tabla 25**, en donde la diferencia entre ambas es claramente notoria, llegando a ser de 95.306 [USD] aproximadamente. El activo que tiene la principal participación en el costo industrial es la serie de 34 hornos eléctricos requeridos para el funcionamiento continuo de 3 serigrafiadoras semiautomáticas. Los hornos eléctricos son los que destacan en los costos del escalamiento, pues llegan a formar cerca del 80% del total.

Tabla 25. Costos de Inversión de Equipos Requeridos por cada Propuesta.

LABORATORIO				INDUSTRIA			
EQUIPOS	**CANTIDAD**	**USD/unidad**	**USD total**	**EQUIPOS**	**CANTIDAD**	**USD/unidad**	**USD total**
MUFLA NABERTHERM L(T) 24/11	1	$ 7.378	$ 7.378	Horno Eléctrico con Cinta Transportadora YX-WD	34	$ 3.300	$ 112.200
SERIGRAFIADOR A ATMA AT-25PA	1	$ 9.111	$ 9.111	SERIGRAFIADOR A ATMA AT-25PA	3	$ 9.111	$ 27.333
Compresor 1,5 HP 50L CE50-OL	1	$ 458	$ 458	Compresor 1,5 HP 50L CE50-OL	1	$ 458	$ 458
TOTAL			**$ 16.947**	TOTAL			**$ 139.991**

A continuación, en la **Tabla 26**, se muestra el costo de los implementos necesarios para llevar a cabo los procesos, los cuales también son considerados como costos fijos. En ambos se consideran los mismos materiales puesto que no existen diferencias significativas en la manipulación de los hornos eléctricos y la mufla, debido a que son equipos automáticos. En el escalamiento destaca el uso de las bandejas de aleación de aluminio y acero inoxidable, las cuales forman parte del 65,3% de los costos de implementos.

Tabla 26. Costos de Implementos por cada Propuesta.

LABORATORIO				INDUSTRIA			
IMPLEMENTOS	**CANTIDAD**	**USD/unidad**	**USD total**	**IMPLEMENTOS**	**CANTIDAD**	**USD/unidad**	**USD total**
Pistola de Aire	1	$ 13	$ 13	Pistola de Aire	1	$ 13	$ 13
Squeegee RKS Printan Monflex 9x30mm, 3660 mm	1	$ 226	$ 226	Squeegee RKS Printan Monflex 9x30mm, 3660 mm	1	$ 226	$ 226
Pinza de Teflón SPI-PFA01-AB	1	$ 365	$ 365	Pinza de Teflón SPI-PFA01-AB	3	$ 365	$ 1.094
Líneas de Aire Comprimido	1	$ 709	$ 709	Líneas de Aire Comprimido	1	$ 709	$ 709
Bandeja de Aleación Aluminio - Acero Inoxidable JCBP-1826.	1	$ 2	$ 2	Bandeja de Aleación Aluminio - Acero Inoxidable JCBP-1826.	2520	$ 2	$ 4.334
Bastidores	3	$ 12	$ 36	Bastidores	9	$ 12	$ 109
Fotolitos	3	$ 4	$ 13	Fotolitos	9	$ 4	$ 38
Mascarilla 3M 6300	1	$ 35	$ 35	Mascarilla 3M 6300	3	$ 35	$ 105
TOTAL			**$ 1.398**	**TOTAL**			**$ 6.638**

Luego se presentan los costos asociados a los insumos de limpieza y equipos de protección personal utilizados para operar las máquinas en el proceso, los que corresponden a costos variables. En los resultados de la **Tabla 27** se notifica que los costos totales de insumos son los menores de todos los tipos de costos, destacando el consumo de guantes de nitrilo en la operación industrial, que alcanzan un 58,7% del total de costos en esta sección. También es importante destacar que los insumos de limpieza no varían en cantidad, puesto que en ambas propuestas se hace un lavado la misma cantidad de veces por día, por ende, por año. Además, se considera en esta sección el consumo de las mallas de los bastidores, puesto que se ha considerado un recambio de ellas de al menos 1 vez al año, en el laboratorio, y 2 veces al año en la industria.

Tabla 27. Costos de Insumos por cada Propuesta.

LABORATORIO				INDUSTRIA			
INSUMOS	**CANTIDAD ANUAL**	**USD/unidad**	**USD total**	**INSUMOS**	**CANTIDAD ANUAL**	**USD/unidad**	**USD total**
Malla PET 1500 90/230-48 Y	2	$ 12	$ 25	Malla PET 1500 90/230-48 Y	12	$ 12	$ 147
Malla PET 1500 61/156-64 W	1	$ 12	$ 12	Malla PET 1500 61/156-64 W	6	$ 12	$ 72
Filtro Mascarilla PAR 3M 60923	1	$ 27	$ 27	Filtro Mascarilla PAR 3M 60923	6	$ 27	$ 163
Guantes Nitrilo Comfortday 100 unidades.	7,2	$ 12	$ 89	Guantes Nitrilo Comfortday 100 unidades.	144	$ 12	$ 1.786
Etanol EMSURE® acs,iso, 1009832511 2.5 [L]	17	$ 47	$ 783	Etanol EMSURE® acs,iso, 1009832511 2.5 [L]	17	$ 47	$ 783
Estopa Blanca Activas 1[kg]	14	$ 6	$ 88	Estopa Blanca Activas 1[kg]	14	$ 6	$ 88
TOTAL			**$ 1.023**	**TOTAL**			**$ 3.038**

Luego se presenta, en la **Tabla 28**, los costos asociados a las materias primas para cada caso. La diferencia entre las cantidades totales de ambas propuestas llega a ser de 9.233.944 [USD]. En ambas propuestas, el costo de los sustratos de FTO corresponde a la cifra principal, conformando un 56% y casi un 94% de los costos totales para la propuesta de laboratorio e industrial, respectivamente. También se destaca la pasta de circonia como el segundo material más caro de esta sección de costos variables.

Tabla 28. Costos de Materias Primas por cada Propuesta.

LABORATORIO				INDUSTRIA			
MATERIAS PRIMAS	**CANTIDAD ANUAL**	**USD/unidad**	**USD total**	**MATERIAS PRIMAS**	**CANTIDAD ANUAL**	**USD/unidad**	**USD total**
FTO XopGlass TEC 15A 2,2mm, 10X15 mm	840	$ 14	$ 12.195	FTO XopGlass TEC 15A 2,2mm	604800	$ 14	$ 8.686.440
Alfa-Terpineol 250 [mL] Sigma-Aldrich 432628	2	$ 232	$ 374	Alfa-Terpineol 250 [mL] Sigma-Aldrich 432628	73	$ 232	$ 16.980
Pasta de Titania Solaronix 20 [g] 14421	19	$ 121	$ 2.269	Pasta de Titania Solaronix 1 [kg] 14413	17	$ 3.377	$ 57.475
Pasta de Circonia Solaronix 20 [g] ZT/SP 46421	21	$ 308	$ 6.408	Pasta de Circonia Solaronix 1 [kg] ZT/SP 46413	59	$ 7.031	$ 415.779
Pasta de Carbono Conductor Sunchemical 1[kg] C2130814 D2	0,7	$ 650	$ 482	Pasta de Carbono Conductor Sunchemical 1[kg] C2130814 D2	122	$ 650	$ 78.997
TOTAL			**$ 21.728**	**TOTAL**			**$ 9.255.672**

Como se ha mencionado antes, el proceso a escala de laboratorio sólo necesita de 1 operador, sin embargo, el proceso en escala industrial hace uso de 34 hornos eléctricos y 3 serigrafiadoras. Se estima que una persona es capaz de estar a cargo de la producción de 2 hornos eléctricos, debido a que se realiza lentamente y de manera automática, mientras que cada serigrafiadora necesita una persona dedicada en su operación. Esto hace un total de 20 personas, 17 para los hornos y 3 para las serigrafiadoras. Además, en la **Tabla 29** se incluye el costo del consumo eléctrico de los equipos, cuyo valor actual promedio está cerca de los 118,1 [USD/MW-h]. [113] En la escala de laboratorio, los costos del personal de trabajo son un 73,5% más altos que los de consumo eléctrico, lo que se reduje a un 0,6% tras el escalamiento.

Tabla 29. Costos de Consumo Eléctrico y Mano de Obra por cada Propuesta.

LABORATORIO				INDUSTRIA			
Otros Costos Variables	**CANTIDAD ANUAL**	**USD/unidad**	**USD total**	**Otros Costos Variables**	**CANTIDAD ANUAL**	**USD/unidad**	**USD total**
Suministro Eléctrico [kW-h]	16.701	$ 0,1181	$ 1.972	Suministro Eléctrico [kW-h]	1.183.762	$ 0,1181	$ 139.802
Personal de Trabajo	1	$ 7.442	$ 7.442	Personal de Trabajo	20	$ 7.442	$ 148.837
TOTAL			**$ 9.414**	**TOTAL**			**$ 288.639**

Con esta información disponible, se hace cálculo del total de inversión requerida por cada propuesta en la **Tabla 30**. Se evidencia que los costos variables son más altos que los costos fijos en ambos casos, sin embargo, debido al volumen de producción de la escala industrial, esta brecha incrementa significativamente debido a los altos precios del sustrato. Mientras que, en la escala de laboratorio, los costos fijos son un 57% de los variables, en la propuesta industrial esta proporción disminuye a cerca de 1,5%, evidenciando el gran impacto que tiene la compra masiva de sustratos de FTO, como se evidenció anteriormente. Los costos de los sustratos conforman un 91% del total de costos de la escala industrial

Tabla 30. Total de Inversión Requerida por cada Propuesta.

Total de Inversión	Escala Laboratorio	Escala Industrial
Costos Fijos [USD]	$ 18.345	$ 146.619
Costo Variables [USD]	$ 32.166	$ 9.547.349

Los costos variables de las propuestas son utilizados para hacer cálculo del costo [USD/W] de las celdas solares producidas. Para esto, se ha considerado una serie de eficiencias, desde la obtenida en los experimentos hasta las que se encuentran cercanas a las utilizadas en el mercado nacional actual, correspondiente a las de silicio entre un 20 y 25% de PCE. En base a esto, se

desarrolla la **Tabla 31**, en donde se presentan los costos de producción por [USD/W] de ambas propuestas. Comparando con los costos actuales del competidor, entre 0,30 – 0,31 [USD/W], los costos de la propuesta industrial, en el mejor de los casos, es de 4,2 [USD/W], lo cual es más de 10 veces el valor de la competencia. En cuanto a los costos del laboratorio, estos superan los 10 [USD/W] en el mejor de los casos, lo cual es de esperar, puesto que los equipos no han sido seleccionados para realizar optimizar costos en una producción de alto volumen, sino que sólo son utilizados con fines experimentales.

Tabla 31. Costo [USD/W] para el Proceso de Serigrafía - Recocido por cada Propuesta.

Costo [USD/W] del Proceso Serigrafía - Recocido		
PCE	LABORATORIO	INDUSTRIA
2,55%	100,1	41,3
5%	51,1	21,0
10%	25,5	10,5
15%	17,0	7,0
20%	12,8	5,3
25%	10,2	4,2

En base a lo anterior, se hizo una proyección de la propuesta productiva a escala industrial, con el fin analizar los costos su aplicación a través del tiempo. Para hacer los cálculos, se consideró que en Chile existen 5 días feriados irrenunciables y que el resto del año puede ser dedicado a producción, es decir, 360 días al año. Se decidió proyectar la aplicación por 10 años productivos, bajo las mismas condiciones y sin hacer reposiciones ni nuevas inversiones en activos fijos. También se aplicó una tasa de depreciación de los equipos a 10 años, con el fin de cerrar los cambios financieros en el mismo año. La **Tabla 32** muestra cómo se aplica la depreciación total de los equipos industriales al cabo de 10 años sobre el valor total.

Tabla 32. Depreciación de los Equipos Industriales.

Equipos de Operación Industrial		
Año	Depreciación [USD]	Valor Libro [USD]
0		$ 106.991
1	$ 10.699	$ 96.291
2	$ 10.699	$ 85.592
3	$ 10.699	$ 74.893
4	$ 10.699	$ 64.194
5	$ 10.699	$ 53.495
6	$ 10.699	$ 42.796
7	$ 10.699	$ 32.097
8	$ 10.699	$ 21.398
9	$ 10.699	$ 10.699
10	$ 10.699	$ -

Finalmente se presenta el flujo de caja hecho para los costos de inversión de la propuesta industrial por 10 años de funcionamiento continuo, en la **Figura 69**. Actualmente, en Chile el impuesto a la renta es de un 25%, mientras que, para proyectos nuevos y arriesgados como este, suele considerarse una tasa de devolución entre el 10 y el 20%, por lo que se selecciona un 15% para realizar los cálculos financieros.[114] En el flujo de caja se comprueba el impacto de los altos precios del sustrato, puesto que, desde el primer año de producción, los gastos se elevan súbitamente, lo cual puede ser visto por el valor actual de costos (VAC). Los gastos permanecen altos por el resto del período contabilizado, ya que su inversión debe ser anual para sostener la producción.

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
(-) Costos Fijos											
(-) Costos Variables		$ 9.547.349	$ 9.547.349	$ 9.547.349	$ 9.547.349	$ 9.547.349	$ 9.547.349	$ 9.547.349	$ 9.547.349	$ 9.547.349	$ 9.547.349
Costos totales	0	$ 9.547.349	$ 9.547.349	$ 9.547.349	$ 9.547.349	$ 9.547.349	$ 9.547.349	$ 9.547.349	$ 9.547.349	$ 9.547.349	$ 9.547.349
(-) Depreciación		$ 10.699	$ 10.699	$ 10.699	$ 10.699	$ 10.699	$ 10.699	$ 10.699	$ 10.699	$ 10.699	$ 10.699
Resultado antes del Impuesto	0	$ -9.558.048	$ -9.558.048	$ -9.558.048	$ -9.558.048	$ -9.558.048	$ -9.558.048	$ -9.558.048	$ -9.558.048	$ -9.558.048	$ -9.558.048
(+) Ahorro en Impuestos		$ 2.389.512	$ 2.389.512	$ 2.389.512	$ 2.389.512	$ 2.389.512	$ 2.389.512	$ 2.389.512	$ 2.389.512	$ 2.389.512	$ 2.389.512
Resultados después del Impuesto		$ -7.168.536	$ -7.168.536	$ -7.168.536	$ -7.168.536	$ -7.168.536	$ -7.168.536	$ -7.168.536	$ -7.168.536	$ -7.168.536	$ -7.168.536
(-) Inversión en activos	$ 220.609										
(+) Depreciación		$ 10.699	$ 10.699	$ 10.699	$ 10.699	$ 10.699	$ 10.699	$ 10.699	$ 10.699	$ 10.699	$ 10.699
Flujo de Caja	$ -220.609	$ -7.157.837	$ -7.157.837	$ -7.157.837	$ -7.157.837	$ -7.157.837	$ -7.157.837	$ -7.157.837	$ -7.157.837	$ -7.157.837	$ -7.157.837
VAC	$ -220.609	$ -5.946.879	$ -12.884.107	$ -12.884.107	$ -12.884.107	$ -12.884.107	$ -12.884.107	$ -12.884.107	$ -12.884.107	$ -12.884.107	$ -12.884.107
Tasa de Impuesto	0,25										
Tasa de Descuento	0,15										

Figura 69. Flujo de Caja de los Costos de Inversión Industriales y VAC.

Tras hacer análisis del mercado, las propuestas productivas, escalamiento y costos de inversión, se determina que el proceso propuesto no es capaz de competir en el mercado nacional ni internacional. El costo por celda obtenido es de 41,3 [USD/W], cerca de 40,99 [USD/W] más que los que cuesta el proceso completo de construcción de celdas de silicio. Pese a esto, la operación industrial propuesta consigue celdas de 58,8 [USD/W] más económicas que la operación de escala de laboratorio. Debido a la diferencia de costos entre lo propuesto y lo comerciable, es notorio que se necesita de otra tecnología para competir, ya sea en el cambio a un proceso roll to roll de aplicación continua o en un cambio en el sustrato utilizado para fabricar las m-CPSCs.

También se hace enfoque en los grandes costos en materias primas que representa la compra de los sustratos de FTO. Dentro de estos costos no se consideró el adicional al proceso de rociado pirolítico, sin embargo, los valores son tan altos que no tiene caso sensibilizar los resultados en base a este costo externo, puesto que de todas maneras abarcan cerca de un 91% de los costos totales en el escalamiento industrial.

6 Conclusiones

Después de hacer análisis a los resultados experimentales obtenido, se determina que la muestra campeona H – 8 presenta la mayor similitud a la literatura en cuanto a los análisis del FE-SEM, tanto en el espesor de las capas como en la calidad estequiométrica de la perovskita infiltrada. También es la que más se acerca a los parámetros fotovoltaicos de las celdas construidas por el grupo de la Universidad de Swansea [1], sin embargo, la diferencia en el PCE de casi 5,64% deja espacio para seguir desarrollando el proceso de construcción en las múltiples operaciones unitarias. Los análisis hechos por XRD y GIXRD permitieron determinar la presencia efectiva de perovskita en 3 posibles estructuras del cristal; dos tipos de forma ortorrómbica y una tetragonal. Según los análisis hechos, no se pudo obtener información de la titania impresa sobre los sustratos debido a la interferencia con las señales de FTO.

En cuanto a las propuestas de producción, la escalabilidad, los costos de inversión y los costos por potencia generada en dólares por watt, se concluye que el proceso propuesto no puede competir a nivel nacional ni internacional. El costo por celda obtenido es de 41,3 [USD/W], lo que representa un aumento de aproximadamente 40,99 [USD/W] en comparación con el costo total del proceso de construcción de celdas de silicio monocristalino. Sin embargo, la operación industrial propuesta logra células con un costo de 58,8 [USD/W] más económicas que la operación a escala de laboratorio, dejando espacio para realizar más mejoras en un estudio prolongado sobre el equipo y el proceso productivo. También se recomienda la adopción de un proceso continuo de aplicación semejante al roll-to-roll en la serigrafiadora, evaluando el cambio del sustrato utilizado para fabricar las m-CPSCs según el método experimental. Además, se logró diseñar un programa de trabajo más eficiente que el utilizado en el método experimental para la producción de celdas solares, en donde se aprovechan los tiempos muertos de cada actividad para llegar a una producción óptima.

Por último, de acuerdo con los resultados obtenidos, se determinó que las mejores celdas fueron construidas con los parámetros estándar que se establecieron después de la puesta en marcha del equipo, lo que termina por comprobar la hipótesis planteada en los objetivos, es decir, los ajustes de la serigrafiadora semiautomática ATMA, modelo AT-25PA, tuvieron como resultado la puesta en marcha del equipo para construir celdas m-CPSCs funcionales. Por ende, el

protocolo desarrollado en este estudio es válido para obtener este tipo de celdas y su calidad al operar la serigrafiadora AT-25PA marca ATMA.

7 REFERENCIAS

[1] I. Poli *et al.*, “Screen printed carbon CsPbBr3 solar cells with high open-circuit photovoltage,” *J Mater Chem A Mater*, vol. 6, no. 38, 2018, doi: 10.1039/c8ta07694d.

[2] British Library, “The Industrial Revolution,” Oct. 14, 2009. https://www.bl.uk/georgian-britain/articles/the-industrial-revolution (accessed Jun. 26, 2023).

[3] Encyclopedie Energie, “World Energy Consumption 1800-2000: The Results,” *World Energy History*, Mar. 14, 2022. https://www.encyclopedie-energie.org/en/world-energy-consumption-1800-2000-results/#_ftn1 (accessed Jun. 27, 2023).

[4] European Environment Agency, “Greenhouse gas emissions by country and sector (infographic),” *European Parliment*, Mar. 28, 2023. Accessed: Jun. 27, 2023. [Online]. Available: https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20180301STO98928/greenhouse-gas-emissions-by-country-and-sector-infographic

[5] IEA, “History,” *About Us*, Feb. 16, 2023. https://www.iea.org/about/history (accessed Jun. 27, 2023).

[6] IEA, “World Energy Outlook 2022,” 2022.

[7] IEA, “Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector,” Apr. 20, 2021.

[8] S. Vijayavenkataraman, S. Iniyan, and R. Goic, “A review of climate change, mitigation and adaptation,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1. 2012. doi: 10.1016/j.rser.2011.09.009.

[9] S. Fawzy, A. I. Osman, J. Doran, and D. W. Rooney, “Strategies for mitigation of climate change: a review,” *Environmental Chemistry Letters*, vol. 18, no. 6. 2020. doi: 10.1007/s10311-020-01059-w.

[10] P. K. Thornton, P. J. Ericksen, M. Herrero, and A. J. Challinor, “Climate variability and vulnerability to climate change: A review,” *Global Change Biology*, vol. 20, no. 11. 2014. doi: 10.1111/gcb.12581.

[11] L. Atwoli *et al.*, “COP27 Climate Change Conference: urgent action needed for Africa and the world,” *Tidsskrift for den Norske Laegeforening*, vol. 142, no. 15, 2022, doi: 10.48153/jrrs/2022/clhx5852.

[12] R. Lindsey and L. Dahlman, “Climate Change: Global Temperature,” *Science & Information for a Climate-Smart Nation*, 2021.

[13] M. A. Clark *et al.*, “Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets,” *Science (1979)*, vol. 370, no. 6517, 2020, doi: 10.1126/science.aba7357.

[14] O. Hoegh-Guldberg *et al.*, “The human imperative of stabilizing global climate change at 1.5°C,” *Science*, vol. 365, no. 6459. 2019. doi: 10.1126/science.aaw6974.

[15] T. Wiedmann and J. Minx, “Ecological Economics Research Trends,” *Nova Publishers*. 2007.

[16] European Environment Agency, “Greenhouse gas emissions by country and sector (infographic),” Mar. 28, 2023. https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20180301STO98928/greenhouse-gas-emissions-by-country-and-sector-infographic (accessed Jun. 26, 2023).

[17] IEA, “CO2 Emissions in 2022,” Mar. 2023. Accessed: Jun. 26, 2023. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022

[18] N. Maamoun, “The Kyoto protocol: Empirical evidence of a hidden success,” *J Environ Econ Manage*, vol. 95, pp. 227–256, May 2019, doi: 10.1016/J.JEEM.2019.04.001.

[19] IPCC, “About the IPCC,” *About Us*, Apr. 17, 2023. https://www.ipcc.ch/about/ (accessed Jun. 27, 2023).

[20] G. E. Metcalf, “On the economics of a carbon tax for the United States,” *Brookings Pap Econ Act*, vol. 2019, no. Spring, 2019, doi: 10.1353/ECA.2019.0005.

[21] Z. Jia and B. Lin, “Rethinking the choice of carbon tax and carbon trading in China,” *Technol Forecast Soc Change*, vol. 159, p. 120187, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.TECHFORE.2020.120187.

[22] G. E. Metcalf, “Carbon taxes in theory and practice,” *Annual Review of Resource Economics*, vol. 13. 2021. doi: 10.1146/annurev-resource-102519-113630.

[23] IEA, “Renewable Electricity,” Sep. 2022. Accessed: Jun. 26, 2023. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/renewable-electricity

[24] C. Ferguson D., “Energy: what everyone needs to know,” *Choice Reviews Online*, vol. 50, no. 06, 2013, doi: 10.5860/choice.50-3287.

[25] EIA (U.S. Energy Information Administration), “Nuclear explained ,” Jul. 2022. https://www.eia.gov/energyexplained/nuclear/ (accessed Jun. 26, 2023).

[26] Y. Chu, “Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies,” *Global Energy Network Institute*, no. August, 2011.

[27] L. Cameron and B. Van Der Zwaan, “Employment factors for wind and solar energy technologies: A literature review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 160–172, May 2015, doi: 10.1016/J.RSER.2015.01.001.

[28] A. H. Eldin, M. Refaey, and A. Farghly, “A Review on Photovoltaic Solar Energy Technology and its Efficiency,” *A Review on Photovaltaic Solar Energy Technology and its Efficiency*, no. December, 2015.

[29] H. Xi, L. Luo, and G. Fraisse, “Development and applications of solar-based thermoelectric technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 5. 2007. doi: 10.1016/j.rser.2005.06.008.

[30] United States Energy Department, “Solar photovoltaic cell basics,” *https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-cell-basics*, 2023.

[31] J. Pastuszak and P. Węgierek, “Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development,” *Materials*, vol. 15, no. 16. 2022. doi: 10.3390/ma15165542.

[32] International Energy Agency, “Solar PV,” *https://www.iea.org/reports/solar-pv*, Sep. 2022.

[33] NREL, “Best Research-Cell Efficiency Charts,” *Photovoltaic Research*, 2022. https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html (accessed Jun. 26, 2023).

[34] T. Saga, “Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production,” *NPG Asia Materials*, vol. 2, no. 3. 2010. doi: 10.1038/asiamat.2010.82.

[35] E. A. Alsema and M. J. de Wild-Scholten, “Environmental impacts of crystalline silicon photovoltaic module production,” in *Proceedings of the 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, LCE 2006*, 2006. doi: 10.1557/proc-0895-g03-05.

[36] S. Dubey, N. Y. Jadhav, and B. Zakirova, “Socio-Economic and Environmental Impacts of Silicon Based Photovoltaic (PV) Technologies,” *Energy Procedia*, vol. 33, pp. 322–334, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2013.05.073.

[37] C. Ramírez-Márquez, G. Contreras-Zarazúa, M. Martín, and J. G. Segovia-Hernández, “Safety, Economic, and Environmental Optimization Applied to Three Processes for the Production of Solar-Grade Silicon,” *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 7, no. 5, 2019, doi: 10.1021/acssuschemeng.8b06375.

[38] Y. Tsuo, J. Gee, P. Menna, and D. Strebkov, “Environmentally benign silicon solar cell manufacturing,” *Photovoltaic Solar Energy Conversion*, no. July, 1998.

[39] B. Huang, J. Zhao, J. Chai, B. Xue, F. Zhao, and X. Wang, “Environmental influence assessment of China’s multi-crystalline silicon (multi-Si) photovoltaic modules considering recycling process,” *Solar Energy*, vol. 143, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2016.12.038.

[40] A. Bosio, S. Pasini, and N. Romeo, “The history of photovoltaics with emphasis on CdTe solar cells and modules,” *Coatings*, vol. 10, no. 4. 2020. doi: 10.3390/coatings10040344.

[41] N. Bartie *et al.*, “Cost versus environment? Combined life cycle, techno-economic, and circularity assessment of silicon-and perovskite-based photovoltaic systems Gold Contribution Accessibility Gold,” 2023, doi: 10.1111/jiec.13389.

[42] L. Fagiolari and F. Bella, “Carbon-based materials for stable, cheaper and large-scale processable perovskite solar cells,” *Energy and Environmental Science*, vol. 12, no. 12. 2019. doi: 10.1039/c9ee02115a.

[43] J. Ryu, K. Lee, J. Yun, H. Yu, J. Lee, and J. Jang, “Paintable Carbon-Based Perovskite Solar Cells with Engineered Perovskite/Carbon Interface Using Carbon Nanotubes Dripping Method,” *Small*, vol. 13, no. 38, 2017, doi: 10.1002/smll.201701225.

[44] S. M. P. Meroni, C. Worsley, D. Raptis, and T. M. Watson, “Triple-mesoscopic carbon perovskite solar cells: Materials, processing and applications,” *Energies*, vol. 14, no. 2. 2021. doi: 10.3390/en14020386.

[45] Q. A. Akkerman and L. Manna, “What Defines a Halide Perovskite?,” *ACS Energy Letters*. 2020. doi: 10.1021/acsenergylett.0c00039.

[46] E. Unger and T. J. Jacobsson, “The Perovskite Database Project: A Perspective on Collective Data Sharing,” *ACS Energy Lett*, 2022, doi: 10.1021/acsenergylett.2c00330.

[47] J. M. Frost and A. Walsh, “What Is Moving in Hybrid Halide Perovskite Solar Cells?,” *Accounts of Chemical Research*, vol. 49, no. 3. 2016. doi: 10.1021/acs.accounts.5b00431.

[48] D. A. Egger, E. Edri, D. Cahen, and G. Hodes, “Perovskite Solar Cells: Do We Know What We Do Not Know?,” *Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 6, no. 2. 2015. doi: 10.1021/jz502726b.

[49] T. Liu *et al.*, “Critical parameters in TiO2/ZrO2/Carbon-based mesoscopic perovskite solar cell,” *J Power Sources*, vol. 293, 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.05.106.

[50] P. Roy, N. Kumar Sinha, S. Tiwari, and A. Khare, “A review on perovskite solar cells: Evolution of architecture, fabrication techniques, commercialization issues and status,” *Solar Energy*, vol. 198. 2020. doi: 10.1016/j.solener.2020.01.080.

[51] A. Mei *et al.*, “A hole-conductor-free, fully printable mesoscopic perovskite solar cell with high stability,” *Science (1979)*, vol. 345, no. 6194, 2014, doi: 10.1126/science.1254763.

[52] S. M. H. Qaid, H. M. Ghaithan, B. A. Al-Asbahi, and A. S. Aldwayyan, “Ultra-stable polycrystalline CsPbBr3 perovskite–polymer composite thin disk for light-emitting applications,” *Nanomaterials*, vol. 10, no. 12, 2020, doi: 10.3390/nano10122382.

[53] A. Kovalenko and M. Hrabal, “Printable solar cells,” in *Printable Solar Cells*, 2017. doi: 10.1002/9781119283720.ch5.

[54] R. Escalante, “Dye-sensitized and hybrid lead halide perovskite solar cells: Novel materials and methods for scale-up,” Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Mérida, 2019.

[55] P. A. Lynn, *Electricity from Sunlight: An Introduction to Photovoltaics*, 1st ed. London: Wiley, 2010.

[56] S. Ramos Terrón, “Fabricación y Caracterización de Celdas Fotovoltaicas de Perovskita de Nueva Composición.,” Universidad de Sevilla, Sevilla, 2018.

[57] T. Starling, “Semiconductor band structure (lots of bands),” *Banda de Valencia, Wikipedia*, Apr. 07, 2015.

[58] A. D. Printz and D. J. Lipomi, “Competition between deformability and charge transport in semiconducting polymers for flexible and stretchable electronics,” *Applied Physics Reviews*, vol. 3, no. 2. 2016. doi: 10.1063/1.4947428.

[59] H. Khan, A. S. Yerramilli, A. D’Oliveira, T. L. Alford, D. C. Boffito, and G. S. Patience, “Experimental methods in chemical engineering: X-ray diffraction spectroscopy—XRD,” *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 98, no. 6. 2020. doi: 10.1002/cjce.23747.

[60] E. Achilli *et al.*, “materials Capabilities of Grazing Incidence X-ray Diffraction in the Investigation of Amorphous Mixed Oxides with Variable Composition,” 2022, doi: 10.3390/ma15062144.

[61] R. FlatabØ, A. Coste, and M. M. Greve, “A systematic investigation of the charging effect in scanning electron microscopy for metal nanostructures on insulating substrates,” *J Microsc*, vol. 265, no. 3, 2017, doi: 10.1111/jmi.12497.

[62] G. Cappuccio and M. L. Terranova, “Thin film characterisation by advanced X-ray diffraction techniques ,” Frascati, May 1996. Accessed: Jun. 27, 2023. [Online]. Available: https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/465281

[63] J. Wang, J. Yu, X. Zhu, and X. Z. Kong, “Preparation of hollow TiO2 nanoparticles through TiO2 deposition on polystyrene latex particles and characterizations of their structure and photocatalytic activity,” *Nanoscale Res Lett*, vol. 7, 2012, doi: 10.1186/1556-276X-7-646.

[64] W. Z. Samad, M. M. Salleh, A. Shafiee, and M. A. Yarmo, “Structural, optical and electrical properties of fluorine doped tin oxide thin films deposited using inkjet printing technique,” *Sains Malays*, vol. 40, no. 3, 2011.

[65] Z. Q. Li, C. J. Lu, Z. P. Xia, Y. Zhou, and Z. Luo, “X-ray diffraction patterns of graphite and turbostratic carbon,” *Carbon N Y*, vol. 45, no. 8, 2007, doi: 10.1016/j.carbon.2007.03.038.

[66] M. M. Tijani, A. Aqsha, and N. Mahinpey, “X-ray diffraction and TGA kinetic analyses for chemical looping combustion applications,” *Data Brief*, vol. 17, 2018, doi: 10.1016/j.dib.2017.12.044.

[67] H. Teterycz, R. Klimkiewicz, and M. Łaniecki, “The role of Lewis acidic centers in stabilized zirconium dioxide,” *Appl Catal A Gen*, vol. 249, no. 2, pp. 313–326, Aug. 2003, doi: 10.1016/S0926-860X(03)00231-X.

[68] H. Chen, Y. Wang, J. Wang, and W. Liu, “Thermal stability of cspbbr3 perovskite quantum dots assembled with sba-15,” *Coatings*, vol. 11, no. 8, 2021, doi: 10.3390/coatings11080953.

[69] Y. Wang *et al.*, “Epitaxial Growth of Large-Scale Orthorhombic CsPbBr3 Perovskite Thin Films with Anisotropic Photoresponse Property,” *Adv Funct Mater*, vol. 29, no. 43, 2019, doi: 10.1002/adfm.201904913.

[70] IRENA, “Renewable capacity statistics 2023,” Abu Dhabi, Mar. 2023. Accessed: Apr. 14, 2023. [Online]. Available: https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2023.pdf?rev=d2949151ee6a4625b65c82881403c2a7

[71] International Energy Agency, “Renewable Energy,” *https://www.iea.org/reports/renewable-electricity*, Sep. 2022.

[72] Greentech, “Silicon Module Super League: What is and who are the members,” *https://www.greentechmedia.com/articles/read/silicon-module-super-league-what-is-it-and-who-are-the-members*, Apr. 25, 2023.

[73] PV-Tech, “First solar and risen energy included in new SMSL for 2019,” *https://www.pv-tech.org/first-solar-and-risen-energy-included-in-new-smsl-for-2019*, Apr. 21, 2023.

[74] IHS Markit, “Super League Suppliers Manufacturing Milestones in 2020,” *https://ihsmarkit.com/research-analysis/super-league-suppliers-manufacturing-milestones-in-2020.html*, Apr. 21, 2023.

[75] S. Fichtner, “Jinko Solar tops global module shipment ranking in Q1 2023,” *SOLARBE GLOBAL, Market & Policy*, May 05, 2023. Accessed: May 16, 2023. [Online]. Available: https://www.solarbeglobal.com/jinko-solar-tops-global-module-shipment-ranking-in-q1-2023

[76] Trinasolar, “Summary of the 2021 Annual Report,” Apr. 2022. Accessed: Apr. 11, 2023. [Online]. Available: https://www.trinasolar.com/en-glb/investors?year=2022&category=335

[77] V. Wang, “JA Solar Announces Major Production Ramp Up Plan,” *SOLARBE GLOBAL, Manufacturing*, Dec. 13, 2022. Accessed: May 17, 2023. [Online]. Available: https://www.solarbeglobal.com/ja-solar-announces-major-production-ramp-up-plan

[78] LONGI, “LONGi Annual Report 2021,” Jun. 2022. Accessed: Apr. 14, 2023. [Online]. Available: https://static.longi.com/LON_Gi_Annual_Report_2021_2d90e5a304.pdf

[79] Jinko Solar, “Q1 2023 EARNINGS CALL PRESENTATION,” Apr. 2023. Accessed: Apr. 16, 2023. [Online]. Available: https://ir.jinkosolar.com/static-files/791c1017-a2ae-45b7-bfd5-443edde30673

[80] Hanwha Q Cells, “Financial Highlights: ‘Hanwha Brochure,’” *https://www.hanwha.com/content/dam/hanwha/download/Hanwha-Profile-2023-en.pdf*, 2023.

[81] First Solar, “First Solar Annual Report 2022,” Mar. 2023. Accessed: Apr. 14, 2023. [Online]. Available: https://s2.q4cdn.com/646275317/files/doc_financials/2022/ar/First-Solar-Inc-2022-Annual-Report-FINAL.pdf

[82] First Solar, “First Solar Annual Report 2021,” Feb. 2022. Accessed: Apr. 15, 2023. [Online]. Available: https://s2.q4cdn.com/646275317/files/doc_financials/2021/ar/First-Solar-Annual-Report-2021-Web-version-(final-from-Merrill).pdf

[83] Canadian Solar (CSIQ), “2021 Annual Report,” Washington D.C., Apr. 2022. Accessed: Apr. 17, 2023. [Online]. Available: https://investors.canadiansolar.com/static-files/808673f4-c99f-4345-a011-43ce03e0ffc4

[84] Canadian Solar (CSIQ), “About Us: Our History,” *https://www.canadiansolar.com/aboutus/#rwjs*, Apr. 28, 2023.

[85] MinEnergía, “Agenda de Energía 2022 - 2026,” Santiago, Aug. 2022. Accessed: May 09, 2023. [Online]. Available: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/agenda_energia_2022_-_2026.pdf

[86] SEA, “Ministerio del Medioambiente del Gobierno de Chile: ‘¿Quiénes Somos?,’” 2023. https://www.sea.gob.cl/sea/quienes-somos (accessed May 13, 2023).

[87] MinEnergía, “Ministerio de Energía del Gobierno de Chile: ‘Sobre el Ministerio,’” *https://energia.gob.cl/sobre-el-ministerio*, 2023.

[88] SEA, “Reporte Marzo 2023,” Santiago, Apr. 2023. Accessed: May 15, 2023. [Online]. Available: https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2023/04/12/Reporte%20de%20proyectos%20marzo%202023.pdf

[89] SEA, “PARQUE FOTOVOLTAICO MOMANO,” *SEIA*, Jun. 10, 2020. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2020/06/10/Cap_2_Descripcion_de_Proyecto_PF_Momano_Bid.pdf (accessed Jun. 27, 2023).

[90] SEA, “Parque Solar Paihuen,” *SEIA*, Mar. 24, 2021. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2021/03/18/DDP_CL-MA-20-0125-001-C01.pdf (accessed Jun. 27, 2023).

[91] SEA, “Peñon Solar II,” *SEIA*, May 20, 2021. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2021/04/30/Capi__769_tulo_01_Descripcio__769_n_del_Proyecto.pdf (accessed Jun. 27, 2023).

[92] SEA, “Parque Fotovoltaico Cerrillos,” *SEIA*, Aug. 18, 2021. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2021/08/18/d7a_Capitulo_1._Descripcion_del_Proyecto_Cerrillos.pdf (accessed Jun. 27, 2023).

[93] SEA, “Parque Fotovoltaico El Peñón,” *SEIA*, Nov. 18, 2021. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2021/11/18/Cap_1-Descripcion_de_Proyecto_DIA_PFV_FDET_Rev_0.pdf (accessed Jun. 27, 2023).

[94] SEA, “Parque Fotovoltaico El Peñón,” *SEIA*, Oct. 18, 2022. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2022/10/18/Capitulo_1._Descripcion_del_Proyecto.pdf (accessed Jun. 27, 2023).

[95] SEA, “Parque Fotovoltaico Chirihue,” *SEIA*, Mar. 10, 2023. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2023/03/08/CAP_1_Descripcion_de_Proyecto_Rev.0.pdf (accessed Jun. 27, 2023).

[96] SEA, “Proyecto Fotovoltaico Taruca,” *SEIA*, Mar. 25, 2020. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2020/03/18/Capitulo_2-Descripcion_de_Proyecto.pdf (accessed Jun. 27, 2023).

[97] SEA, “Planta Fotovoltaica Arica 9 MW,” *SEIA*, Dec. 18, 2019. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2019/12/18/GRP3970_Cap_1_Descripcion_de_Proyecto_rev02.pdf (accessed Jun. 27, 2023).

[98] SEA, “Proyecto Fotovoltaico Las Chilcas,” *SEIA*, Feb. 18, 2021. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2021/02/18/Capitulo_II_Descripcion_del_Proyecto.pdf (accessed Jun. 27, 2023).

[99] SEA, “Planta Fotovoltaica Alto Norte 9 MW,” *SEIA*, Apr. 16, 2020. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2020/04/16/Cap_1_DDP_Alto_Norte_Ver1.pdf (accessed Jun. 27, 2023).

[100] SEA, “Parque Solar Fotovoltaico Chungungo Solar,” *SEIA*, May 15, 2020. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2020/05/14/7da_Capitulo_1_Descripcion_de_proyecto_CHU.pdf (accessed Jun. 27, 2023).

[101] SEA, “Parque Solar Fotovoltaico Don Esteban,” *SEIA*, May 14, 2020. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2020/05/14/Capitulo_1_Descripcion_de_proyecto_DE.pdf (accessed Jun. 27, 2023).

[102] SEA, “Parque Fotovoltaico Antilco,” *SEIA*, Nov. 18, 2020. https://seia.sea.gob.cl/elementosFisicos/enviados.php?id_documento=2149093374 (accessed Jun. 27, 2023).

[103] SEA, “Parque Fotovoltaico Titan Solar,” *SEIA*, Apr. 16, 2021. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2021/05/07/210071-001-C01-00_Descripcion_de_Proyecto.pdf (accessed Jun. 27, 2023).

[104] SEA, “Parque Fotovoltaico Titan Solar,” *SEIA*, May 07, 2021. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2021/05/07/210071-001-C01-00_Descripcion_de_Proyecto.pdf (accessed Jun. 27, 2023).

[105] SEA, “Parque Fotovoltaico Titan Solar,” *SEIA*, May 07, 2021. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2021/05/07/c7f_Capitulo_I.pdf (accessed Jun. 27, 2023).

[106] SEA, “Parque Fotovoltaico Titan Solar,” *SEIA*, May 07, 2021. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2021/05/07/c7f_Capitulo_I.pdf (accessed Jun. 27, 2023).

[107] SEA, “Parque Fotovoltaico Lince Solar,” *SEIA*, Oct. 07, 2021. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2021/10/07/Adenda_PFV_Lince_Solar.pdf (accessed Jun. 27, 2023).

[108] SEA, “Parque Fotovoltaico Socompa Solar,” *SEIA*, May 18, 2022. https://seia.sea.gob.cl/archivos/2022/05/18/Capitulo_1._Descripcion_de_Proyecto.pdf (accessed Jun. 27, 2023).

[109] National Renwable Energy Laboratory of United States (NREL), “How NREL Uses Minimum Sustainable Price to Understand the Solar Industry Video (Text Version),” *https://www.nrel.gov/analysis/minimum-sustainable-price-text.html*, Oct. 15, 2019.

[110] M. Woodhouse, B. Smith, A. Ramdas, and Robert Margolis, “Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Roadmap,” 2019.

[111] Z. Liu *et al.*, “Revisiting thin silicon for photovoltaics: A technoeconomic perspective,” *Energy Environ Sci*, vol. 13, no. 1, 2020, doi: 10.1039/c9ee02452b.

[112] S. E. Sofia, H. Wang, A. Bruno, J. L. Cruz-Campa, T. Buonassisi, and I. M. Peters, “Roadmap for cost-effective, commercially-viable perovskite silicon tandems for the current and future PV market,” *Sustain Energy Fuels*, vol. 4, no. 2, 2020, doi: 10.1039/c9se00948e.

[113] MinEnergia, “Reporte Mensual Sector Energético,” Santiago, May 2023. Accessed: Jun. 25, 2023. [Online]. Available: https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2023/05/RMensual_v202305.pdf

[114] M. Peters S. and K. Timmerhaus D., *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, 4th ed. McGRALL-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1991.

ANEXOS

ANEXO A: Ficha Técnica de las Mallas para Bastidores.

Anexo 1. Primera Parte del Anexo A.

SEFAR® PET 1500

Hochmodulgewebe aus monofilem Polyester | High modulus mesh of monofilament polyester
Tissu haut module de polyester monofil | Tela de alto módulo a partir de monofilamentos de poliéster
Tessuto ad elevata modularità con poliestere monofilo | Tecidos de poliéster monofilamento de alto módulo

Range of mesh	Mesh number cm|inch		Weave		Tolerance of mesh-count ±n / cm	Mesh-opening µm	Thread diameter nominal µm	Open area %	Mesh thickness µm	Tol. of mesh thickness ± µm	Theoretical ink volume cm³ / m²
PET 1500	8/20-300	W	PW	1:1	1.0	950	300	57.8	560	28	323.5
PET 1500	10/25-260	W	PW	1:1	1.0	739	260	54.6	498	35	272.0
PET 1500	10/25-350	W	PW	1:1	1.0	643	350	41.3	621	44	256.8
PET 1500	12/30-140	W	PW	1:1	1.0	688	140	68.2	256	18	174.6
PET 1500	12/30-300	W	TW	2:1	1.0	520	300	39.0	607	43	236.6
PET 1500	15/40-200	W	PW	1:1	1.0	465	200	48.6	353	25	171.5
PET 1500	15/40-250	W	PW	1:1	1.0	417	250	39.1	425	30	166.0
PET 1500	18/45-180	W	PW	1:1	1.0	375	180	45.5	330	22	150.0
PET 1500	18/45-250	W	TW	2:1	1.0	306	250	30.3	490	34	148.3
PET 1500	21/54-140	W	PW	1:1	1.0	333	140	49.0	250	13	122.4
PET 1500	24/60-120	W	PW	1:1	1.0	294	120	49.7	210	11	104.3
PET 1500	24/60-120	Y	PW	1:1	1.0	294	120	49.7	210	11	104.3
PET 1500	24/60-140	W	PW	1:1	1.0	270	140	41.9	250	13	104.7
PET 1500	27/70-120	W	PW	1:1	1.0	249	120	45.3	210	11	95.2
PET 1500	27/70-140	W	PW	1:1	1.0	222	140	36.1	245	12	88.3
PET 1500	30/76-120	W	PW	1:1	1.2	211	120	40.2	212	11	85.2
PET 1500	32/83-70	W	PW	1:1	1.2	240	70	58.7	117	6	68.7
PET 1500	32/83-70	Y	PW	1:1	1.2	240	70	58.7	117	6	68.7
PET 1500	32/83-100	W	PW	1:1	1.2	209	100	44.5	166	8	73.9
PET 1500	32/83-100	Y	PW	1:1	1.2	209	100	44.5	166	8	73.9
PET 1500	32/83-120	W	PW	1:1	1.2	191	120	37.2	210	11	78.0
PET 1500	36/92-100	W	PW	1:1	1.2	174	90	39.1	162	8	63.4
PET 1500	36/92-100	Y	PW	1:1	1.2	174	90	39.1	162	8	63.4
PET 1500	36/92-90	W	PW	1:1	1.2	183	100	43.3	147	7	63.7
PET 1500	40/103-80	W	PW	1:1	1.2	166	80	44.1	133	7	58.6
PET 1500	43/110-80	W	PW	1:1	1.2	149	80	40.8	134	7	54.7
PET 1500	43/110-80	Y	PW	1:1	1.2	149	80	40.8	134	7	54.7
PET 1500	43/110-90	W	PW	1:1	1.2	136	90	34.0	150	8	51.0
PET 1500	45/115-70	W	PW	1:1	1.2	150	70	45.7	115	6	52.5
PET 1500	45/115-80	W	PW	1:1	1.2	138	80	38.7	130	7	50.3
PET 1500	48/123-55	W	PW	1:1	1.2	151	55	52.7	90	5	47.5
PET 1500	48/123-55	Y	PW	1:1	1.2	151	55	52.7	90	5	47.5
PET 1500	48/123-70	W	PW	1:1	1.2	133	70	40.9	113	6	46.3
PET 1500	48/123-70	Y	PW	1:1	1.2	133	70	40.9	113	6	46.3
PET 1500	48/123-80	W	PW	1:1	1.2	122	80	34.5	130	7	44.8
PET 1500	51/131-70	W	PW	1:1	1.5	121	70	38.1	114	6	43.5
PET 1500	51/131-70	Y	PW	1:1	1.5	121	70	38.1	114	6	43.5
PET 1500	51/131-80	W	PW	1:1	1.5	109	80	31.0	130	7	40.2
PET 1500	54/137-64	W	PW	1:1	1.5	115	64	38.7	103	5	39.9
PET 1500	54/137-64	Y	PW	1:1	1.5	115	64	38.7	103	5	39.9
PET 1500	54/137-70	W	PW	1:1	1.5	109	70	34.8	112	6	38.9
PET 1500	54/137-70	Y	PW	1:1	1.5	109	70	34.8	112	6	38.9
PET 1500	61/156-64	W	PW	1:1	1.5	90	64	30.1	101	5	30.4
PET 1500	61/156-64	Y	PW	1:1	1.5	90	64	30.1	101	5	30.4
PET 1500	61/156-70	W	PW	1:1	1.5	86	70	27.5	114	6	31.3
PET 1500	68/175-55	W	PW	1:1	1.5	85	55	33.5	87	4	29.1
PET 1500	68/175-55	Y	PW	1:1	1.5	85	55	33.5	87	4	29.1
PET 1500	68/175-64	W	PW	1:1	1.5	78	64	28.2	98	5	27.6
PET 1500	68/175-70	W	TW	2:1	1.5	70	70	22.7	125	6	28.4
PET 1500	71/180-55	W	PW	1:1	2.0	79	55	31.3	90	5	28.2
PET 1500	71/180-55	Y	PW	1:1	2.0	79	55	31.3	90	5	28.2
PET 1500	73/186-55	W	PW	1:1	2.0	75	55	30.0	89	5	26.7
PET 1500	73/186-55	Y	PW	1:1	2.0	75	55	30.0	89	5	26.7
PET 1500	77/195-48	W	PW	1:1	2.0	77	48	35.1	80	4	28.0
PET 1500	77/195-48	Y	PW	1:1	2.0	77	48	35.1	80	4	28.0
PET 1500	77/195-55	W	PW	1:1	2.0	67	55	26.5	87	4	23.1
PET 1500	77/195-55	Y	PW	1:1	2.0	67	55	26.5	87	4	23.1
PET 1500	77/195-64	W	TW	2:1	2.0	59	64	20.6	110	6	22.6
PET 1500	81/206-48	W	PW	1:1	2.0	69	48	30.8	79	4	24.3
PET 1500	90/230-40	W	PW	1:1	2.5	68	40	37.6	65	3	24.4
PET 1500	90/230-40	Y	PW	1:1	2.5	68	40	37.6	65	3	24.4
PET 1500	90/230-48	W	PW	1:1	2.5	55	48	24.6	78	4	19.2
PET 1500	90/230-48	Y	PW	1:1	2.5	55	48	24.6	78	4	19.2
PET 1500	90/230-55	W	TW	2:1	2.5	46	55	17.2	97	5	16.7

1127 06/2010

Anexo 2. Segunda Parte del Anexo A.

SEFAR® **PET 1500**

Hochmodulgewebe aus monofilem Polyester | High modulus mesh of monofilament polyester
Tissu haut module de polyester monofil | Tela de alto módulo a partir de monofilamentos de poliéster
Tessuto ad elevata modularità con poliestere monofilo | Tecidos de poliéster monofilamento de alto módulo

Range of mesh	Mesh number cm⁻¹/inch⁻¹		Weave		Tolerance of mesh-count ±n / cm	Mesh-opening µm	Thread diameter nominal µm	Open area %	Mesh thickness µm	Tol. of mesh thickness ± µm	Theoretical ink volume cm³ / m²
PET 1500	**95/240-40**	**Y**	PW	1:1	2.5	62	40	35.0	63	3	22.1
PET 1500	**95/240-48**	**W**	PW	1:1	2.5	50	48	22.8	81	4	18.5
PET 1500	**100/255-40**	**W**	PW	1:1	2.5	57	40	32.5	64	3	20.8
PET 1500	**100/255-40**	**Y**	PW	1:1	2.5	57	40	32.5	64	3	20.8
PET 1500	**100/255-48**	**W**	TW	2:1	2.5	45	48	20.3	88	4	17.8
PET 1500	**100/255-48**	**Y**	TW	2:1	2.5	45	48	20.3	88	4	17.8
PET 1500	**110/280-34**	**W**	PW	1:1	3.0	54	34	35.2	55	3	19.3
PET 1500	**110/280-34**	**Y**	PW	1:1	3.0	54	34	35.2	55	3	19.3
PET 1500	**110/280-40**	**W**	PW	1:1	3.0	47	40	26.6	65	3	17.3
PET 1500	**110/280-40**	**Y**	PW	1:1	3.0	47	40	26.6	65	3	17.3
PET 1500	**120/305-31**	**W**	PW	1:1	3.0	49	31	35.0	49	3	17.1
PET 1500	**120/305-31**	**Y**	PW	1:1	3.0	49	31	35.0	49	3	17.1
PET 1500	**120/305-34**	**W**	PW	1:1	3.0	45	34	29.6	55	3	16.3
PET 1500	**120/305-34**	**Y**	PW	1:1	3.0	45	34	29.6	55	3	16.3
PET 1500	**120/305-40**	**W**	PW	1:1	3.0	37	40	20.0	64	3	12.8
PET 1500	**120/305-40**	**Y**	PW	1:1	3.0	37	40	20.0	64	3	12.8
PET 1500	**130/330-34**	**W**	PW	1:1	3.5	40	34	26.9	55	4	14.8
PET 1500	**130/330-34**	**Y**	PW	1:1	3.5	40	34	26.9	53	3	14.3
PET 1500	**140/355-31**	**W**	PW	1:1	3.5	36	31	26.0	48	2	12.5
PET 1500	**140/355-31**	**Y**	PW	1:1	3.5	36	31	26.0	48	2	12.5
PET 1500	**140/355-34**	**W**	PW	1:1	3.5	31	34	19.3	55	3	10.6
PET 1500	**140/355-34**	**Y**	PW	1:1	3.5	31	34	19.3	55	3	10.6
PET 1500	**150/380-27**	**Y**	PW	1:1	4.0	36	27	28.6	42	2	11.7
PET 1500	**150/380-31**	**W**	PW	1:1	4.0	32	31	23.3	47	2	11.0
PET 1500	**150/380-31**	**Y**	PW	1:1	4.0	32	31	23.3	47	2	11.0
PET 1500	**150/380-34**	**W**	PW	1:1	4.0	23	34	12.1	55	3	6.7
PET 1500	**150/380-34**	**Y**	PW	1:1	4.0	23	34	12.1	55	3	6.7
PET 1500	**165/420-27**	**W**	PW	1:1	4.0	29	27	22.3	43	2	9.6
PET 1500	**165/420-27**	**Y**	PW	1:1	4.0	29	27	22.3	43	2	9.6
PET 1500	**165/420-31**	**W**	PW	1:1	4.0	23	31	14.5	48	2	7.0
PET 1500	**165/420-31**	**Y**	PW	1:1	4.0	23	31	14.5	48	2	7.0
PET 1500	**165/420-34**	**W**	TW	2:2	4.0	23	34	13.9	62	3	8.6
PET 1500	**165/420-34**	**Y**	TW	2:2	4.0	23	34	13.9	62	3	8.6
PET 1500	**180/460-27**	**Y**	PW	1:1	4.5	22	27	15.1	43	2	6.5
PET 1500	**180/460-31**	**W**	TW	2:2	4.5	23	31	16.5	56	4	9.3
PET 1500	**180/460-31**	**Y**	TW	2:2	4.5	23	31	16.5	55	3	9.1
PET 1500	**180/460-34**	**W**	PA	2:2	5.0	40	34	52.1	65	3	33.9
PET 1500	**190/480-31**	**W**	TW	2:2	5.0	16	31	9.0	55	3	5.0
PET 1500	**190/480-31**	**Y**	TW	2:2	5.0	16	31	9.0	55	3	5.0

Anexo 3. Tercera Parte del Anexo A.

Legende / Legend / Légende / Leyenda / Leggenda / Legenda

Legende *(deutsch)*

● = Vorzugsartikel, in der Regel ab Lager lieferbar (Zwischenverkauf vorbehalten)
○ = Artikel auf Anfrage
● = Artikel mit Mindestbestellmenge

W = weiss
Y = gelb

PW = Bindung Taffet 1:1
TW = Bindung Köper 2:1, 2:2
AW= Panama-Bindung 1:1, Faden doppelt geführt.

Breiten ohne Webkanten,
+ 6 cm / – 0 cm, + 2.4" / – 0"

Änderungen vorbehalten

Legend *(english)*

● = Priority item, usually on stock (subject to prior sales)
○ = Item on request
● = Articles with minimum order quantity

W = white
Y = yellow

PW = Plain Weave 1:1
TW = Twill Weave 2:1, 2:2
AW= Panama weave 1:1, Two threads positioned one beside the other.
Widths without selvedges,
+ 6 cm / – 0 cm, + 2.4" / – 0"

Subject to change without notice

Légende *(français)*

● = Article prioritaire, normalement livrable du stock (sauf vente intermédiaire)
○ = Article sur demande
● = Articles disponibles seulement à partir d'une certaine quantité d'achat minimum

W = blanc
Y = jaune

PW = Armure taffetas 1:1
TW = Armure sergé 2:1, 2:2
AW= Panama 1:1, Fil utilisé à double.

Largeurs sans lisières,
+ 6 cm / – 0 cm, + 2.4" / – 0"

Sous réserve de changements

Leyenda *(español)*

● = Artículo prioritário, normalmente disponible ex-stock (salvoventa previa)
○ = Artículo a pedido
● = Artículos con cantidad de pedido mínimo

W = blanco
Y = amarillo

PW = Ligamento tafetán 1:1
TW = Ligamento sarga 2:1, 2:2
AW= Panama 1:1, Hilo doble

Anchos sin orillos,
+ 6 cm / – 0 cm, + 2.4" / – 0"

Salvo alteraciones eventuales

Leggenda *(italiano)*

● = Articolo prioritario,disponibile normalmente da magazzino (salvo vendita intermediaria)
○ = Articolo su richiesta
● = Articoli con quantità di ordine minimo

W = bianco
Y = giallo

PW = Armatura taffetà 1:1
TW = Armatura spiega 2:1. 2:2
AW= Panama 1:1,Filo a passaggio doppio.
Altezze senza cimose,
+ 6 cm / – 0 cm, + 2.4" / – 0"

Salvo modifiche

Legenda *(português)*

● = Item prioritário, normalmente disponível em estoque (salvo venda prévia)
○ = Tipo sob consulta
● = Artigos com quantidade de encomenda mínima

W = branco
Y = amarelo

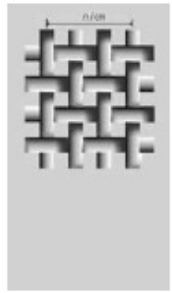
PW = Ligamento tafetá 1:1
TW = Ligamento sarja 2:1, 2:2
AW= Panama 1:1, Fio duplo

Larguras sem aurelas
+ 6 cm / – 0 cm, + 2.4" / – 0"

Salvo eventuais alterações



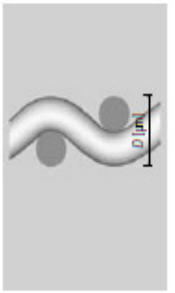




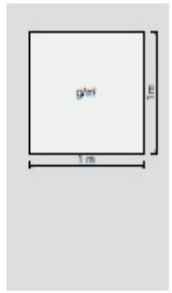












deutsch — Definitionen

Die Kurzzeichen entsprechen DIN 16 611

Gewebenummer
Die Gewebenummer erklärt sich wie folgt:
Fadenzahl n — **110**-80W PW
Garn-Ø d_f — 110-**80**W PW
Gewebebreite — 110-80**W** PW
(weiss = W, gelb = Y)
Bindung — 110-80W **PW**
(Taffet = PW)

Bindung
Die Bindung ist PW (Taffet 1:1), TW (Köper 2:1, 2:2 usw.) oder AW (Panama-Bindung 1:1, Faden doppelt geführt).

Fadenzahl n [n/cm]
Die Fadenzahl n nennt die Anzahl Fäden pro cm. Die Fadenzahltoleranz ist die zulässige Abweichung der arithmetischen Mittelwerte zum Nennwert.

Maschenweite w [µm]
Die Maschenweite w ist der Abstand zwischen zwei benachbarten Kett- oder Schussfäden.
Prüfgerät:
Elektronisches Bildanalysesystem.

Garndurchmesser nominal $d_{f\,nom}$ [µm]
Der Garndurchmesser $d_{f\,nom}$ wird in unverwobenem Zustand angegeben.

Siböffnungsgrad α_o [%]
Der Siböffnungsgrad α_o ist der Anteil in % aller Siböffnungen an der gesamten Sieбfläche. Er wird aus den Mittelwerten der Maschenweite und der effektiven Gambreite berechnet.

$$\alpha_o\,[\%] = \frac{w^2 \cdot 100}{(w+d)^2} \qquad d\,[\mu m] = \frac{10\,000}{n} - w$$

Siebdicke D [µm]
Die Siebdicke D wird gemessen mit der Prüfmethode DIN 53 855, Teil 1.
Prüfgerät: Digitales Langwegmessgerät mit Ziffernanzeige.
Die Siebdickentoleranz ist die zulässige Bandbreite der statistisch erhobenen Mittelwerte.

Theoretisches Farbvolumen
V_F [cm³/m²]
Das theoretische Farbvolumen V_F errechnet sich aus der Siebdicke D und dem Siböffnungsgrad α_o.
Die Berechnungsformel lautet:

$$V_F\,[cm^3/m^2] = \frac{\alpha_o \cdot D}{100}$$

Gewebegewicht [g/m²]
Das Gewebegewicht wird in g/m² angegeben.
Prüfmethode: DIN 53 854

english — Definitions

The short keys correspond with DIN Norm 16 611

Fabric number
The fabric number is composed of:
Mesh-count n — **110**-80W PW
Thread Ø d_f — 110-**80**W PW
Fabric colour — 110-**80**W PW
(white = W, yellow = Y)
Type of weave — 110-80W **PW**
(Plain Weave = PW)

Weave
The type of weave is either PW (plain weave 1:1), TW (twill weave 2:1, 2:2 etc.) or AW (Panama weave 1:1, Two threads positioned one beside the other).

Mesh-count n [n/cm]
The mesh-count n stands for the number of threads per cm. The tolerance is the accepted band-width of the statistically ascertained mean values of mesh-counts.

Mesh-opening w [µm]
The mesh-opening w is the distance between two contiguous warp or weft threads.
Measuring equipment:
Electronic picture scanning system.

Thread diameter nominal
$d_{f\,nom}$ [µm]
The diameter $d_{f\,nom}$ is measured on the thread before weaving.

Percentage of open area
α_o [%]
The percentage of open area α_o is the cumulation of all the mesh-openings expressed in % of the total screen area. It is calculated from the mean value of mesh-openings and the actual thickness of the threads.

$$\alpha_o\,[\%] = \frac{w^2 \cdot 100}{(w+d)^2} \qquad d\,[\mu m] = \frac{10\,000}{n} - w$$

Fabric thickness D [µm]
The fabric thickness D is measured according to DIN Norm 53 855, part 1.
Measuring equipment:
Digital with numerical display.
The tolerance is the accepted band-width of the statistically ascertained mean values of fabric thickness.

Theoretical ink volume
V_F [cm³/m²]
The theoretical ink volume V_F is calculated from the fabric thickness D and the percentage of open area α_o.
The formula is:

$$V_F\,[cm^3/m^2] = \frac{\alpha_o \cdot D}{100}$$

Weight of fabric [g/m²]
The weight of the fabric is indicated in g/m².
Testing method: DIN 53 854

français — Les définitions

Les symboles correspondent à la norme DIN 16 611

Numéro du tissu
Le numéro se compose de:
Nombre de fils n — **110**-80W PW
Ø du fil d_f — 110-**80**W PW
Couleur du tissu — 110-**80**W PW
(blanc = W, jaune = Y)
Armure — 110-80W **PW**
(taffetas = PW)

Armure
Soit PW (taffetas 1:1) soit TW (sergé 2:1, 2:2 etc.) ou AW (Panama 1:1, Fil utilisé à double).

Nombre de fils n [n/cm]
Le terme nombre de fils n indique le compte des fils par cm.
La tolérance est la variation admissible des valeurs moyennes résultant de la statistique des comptes individuels.

Ouverture de maille w [µm]
L'ouverture de maille w est la distance mesurée entre deux fils de chaîne ou de trame voisins.
Appareil de mesure:
Système électronique d'analyse d'images.

Diamètre du fil nominal
$d_{f\,nom}$ [µm]
Le diamètre du fil d_f est mesuré avant le tissage.

Surface libre α_o [%]
La surface libre α_o est le total d'ouvertures de mailles exprimé en % par rapport à la surface totale de l'écran.
Elle est calculée sur la base des valeurs moyennes des ouvertures de mailles et de l'épaisseur des fils.

$$\alpha_o\,[\%] = \frac{w^2 \cdot 100}{(w+d)^2} \qquad d\,[\mu m] = \frac{10\,000}{n} - w$$

Epaisseur du tissu D [µm]
L'épaisseur D est déterminée selon la norme DIN 53 855, section 1.
Equipement de mesure: Digital avec indicateur numérique.
La tolérance est la variation admissible des valeurs moyennes résultant de la statistique des mesures individuelles d'épaisseur du tissu.

Volume théorique d'encre
V_F [cm³/m²]
Le dépôt théorique d'encre V_F se calcule de l'épaisseur D de l'écran et du pourcentage de surface libre α_o.
La formule est:

$$V_F\,[cm^3/m^2] = \frac{\alpha_o \cdot D}{100}$$

Poids du tissu [g/m²]
Il est indiqué en g/m².
Méthode de pesage:
DIN 53 854

español — Definiciones

Las abreviaciones corresponden a la norma DIN 16 611

Número de tejido
El número de tejido se explica de la siguiente manera:
Número de hilos n — **110**-80W PW
Ø de hilo d_f — 110-**80**W PW
Color del tejido — 110-80**W** PW
(blanco = W o amarillo = Y)
Ligamento — 110-80W **PW**
(tafetán = PW)

Ligamento
El ligamento es PW (tafetán 1:1), TW (sarga 2:1, 2:2, etc.) o AW (Panama 1:1, Hilo doble).

Número de hilos n [n/cm]
El número de hilos n indica la cantidad de hilos por cm.
La tolerancia del número de hilos es la banda admisible de los valores estadísticos medios obtenidos.

Abertura de malla w [µm]
La abertura de malla w es la distancia entre los hilos contiguos de trama o de urdimbre.
Aparato de medición:
Sistema de análisis óptico electrónico.

Diámetro nominal del hilo
$d_{f\,nom}$ [µm]
El diámetro de hilo $d_{f\,nom}$ corresponde al del hilo aún no tejido.

Superficie libre α_o [%]
La superficie libre α_o es la cantidad en % de todas las aberturas de mallas respecto la superficie total del tejido.
Se la calcula partiendo de los valores medios correspondientes a las aberturas de malla y a los anchos efectivos de hilo.

$$\alpha_o\,[\%] = \frac{w^2 \cdot 100}{(w+d)^2} \qquad d\,[\mu m] = \frac{10\,000}{n} - w$$

Espesor de tela D [µm]
El espesor de tela D se mide según el método DIN 53 855, parte 1.
Aparato de medición: Sonda digital con visor. La tolerancia del espesor de la tela es la banda admisible de los valores estadísticos medios obtenidos.

Volumen teórico de tinta
V_F [cm³/m²]
El volumen teórico de tinta V_F se calcula partiendo del espesor de la tela D y de la superficie libre α_o.
La fórmula del cálculo es:

$$V_F\,[cm^3/m^2] = \frac{\alpha_o \cdot D}{100}$$

Peso del tejido [g/m²]
El peso del tejido viene indicado en g/m².
Método de medición:
DIN 53 854

italiano — Le definizioni

I simboli corrispondono alla norma DIN 16 611

Numero del tessuto
Il numero si compone di:
Numero di fili n — **110**-80W PW
Ø del filo d_f — 110-**80**W PW
Colore del tessuto — 110-80**W** PW
(bianco = W; giallo = Y)
Armatura — 110-80W **PW**
(taffettà = PW)

Armatura
PW (taffettà 1:1), TW (a spina 2:1, 2:2 ecc.) oppure AW (Panama 1:1, Filo a passaggio doppio).

Numero di fili n [n/cm]
Questo termine n si riferisce al numero di fili per cm.
La tolleranza è la deviazione ammissibile dai valori medi che risultano dalla statistica dei numeri di fili contati.

Apertura maglia w [µm]
L'apertura maglia w è la distanza misurata tra due fili contigui della catena o della trama.
Apparecchio di controllo:
Sistema elettronico d'analisi d'immagine.

Diametro del filo nominale
$d_{f\,nom}$ [µm]
Il diametro del filo $d_{f\,nom}$ è misurato prima della tessitura.

Superficie libera α_o [%]
La superficie libera α_o è il totale delle aperture maglie espresso in % della superficie totale del tessuto. La superficie libera è calcolata in base dei valori medi della statistica delle aperture maglie e dello spessore dei fili.

$$\alpha_o\,[\%] = \frac{w^2 \cdot 100}{(w+d)^2} \qquad d\,[\mu m] = \frac{10\,000}{n} - w$$

Spessore del tessuto D [µm]
Lo spessore del tessuto D è determinato secondo la norma DIN 53 855, parte 1.
Apparecchio di misura: Digitale con indicatore numerico.
La tolleranza è la deviazione ammissibile dai valori medi che risultano dalla statistica degli spessori misurati.

Volume teorico inchiostro
V_F [cm³/m²]
Il deposito teorico di colore V_F si calcola dallo spessore del tessuto D e dalla percentuale di superficie libera α_o.
La formula è:

$$V_F\,[cm^3/m^2] = \frac{\alpha_o \cdot D}{100}$$

Peso del tessuto [g/m²]
Il peso è indicato in g/m².
Metodo di pesare: DIN 53 854

português — Definições

As abreviações correspondem à norma DIN 16 611

Número do tecido
O número do tecido se explica da seguinte forma:
Número de fios n — **110**-80W PW
Ø do fio d_f — 110-**80**W PW
Cor do tecido — 110-80**W** PW
(branco = W ou amarelo = Y)
Ligamento — 110-80W **PW**
(tafetá = PW)

Ligamento
O ligamento é PW (tafetá 1:1), TW (sarja 2:1, 2:2 etc.) ou AW (Panama 1:1, Fio duplo).

Número de fios n [n/cm]
O número de fios n indica a quantidade de fios por cm.
A tolerância do número de fios é a variação admissível dos valores estatísticos médios obtidos.

Abertura da malha w [µm]
A abertura da malha w é a distância entre os fios contíguos de trama ou de urdume.
Aparelho de medição:
Sistema de análise óptico eletrônico.

Diâmetro nominal do fio
$d_{f\,nom}$ [µm]
O diâmetro de fio $d_{f\,nom}$ corresponde ao fio ainda de ser tecido.

Superfície livre α_o [%]
A superfície livre α_o é a quantidade em % de todas as aberturas de malhas em relação à superfície total do tecido.
É calculada a partir dos valores médios correspondentes às aberturas de malha e às larguras efetivas do fio.

$$\alpha_o\,[\%] = \frac{w^2 \cdot 100}{(w+d)^2} \qquad d\,[\mu m] = \frac{10\,000}{n} - w$$

Espessura do tecido D [µm]
A espessura da tela D é medida segundo o método DIN 53 855, parte 1.
Aparelho de medição: Sonda digital com visor.
A tolerância da espessura da tela é a variação admissível dos valores estatísticos médios obtidos.

Volume teórico de tinta
V_F [cm³/m²]
O volume teórico de tinta V_F é calculado a partir da espessura da tela D e da superfície livre α_o.
A fórmula de cálculo é:

$$V_F\,[cm^3/m^2] = \frac{\alpha_o \cdot D}{100}$$

Peso do tecido [g/m²]
O peso do tecido vem indicado em g/m².
Método de medição:
Segundo DIN 53 854