
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



ESTUDIO DE PELÍCULAS DELGADAS DE VO_2 , MoO_3 Y ZnO SOBRE VIDRIO,
PARA SU APLICACIÓN COMO VENTANAS INTELIGENTES DE EDIFICIOS.

POR

JOSÉ ALBERTO MENDOZA JIMÉNEZ.

Como requisito parcial para obtener el Grado de DOCTOR EN INGENIERÍA
con Orientación en Materiales de Construcción.

Octubre, 2024

ESTUDIO DE PELÍCULAS DELGADAS DE VO₂, MoO₃ Y ZnO SOBRE VIDRIO,
PARA SU APLICACIÓN COMO VENTANAS INTELIGENTES DE EDIFICIOS.

Aprobación de la Tesis.

Dra. Mayra Zyzlila Figueroa Torres
Director de Tesis

Dr. Miguel Ángel Ruiz Gómez
Co-Director externo

Dr. Javier Rodrigo González López
Co-Director de Tesis

Dr. Antonio Alberto Zaldivar Cadena.
Sinodal

Dra. Aitzel Belem García Hernández
Evaluador de externo de Tesis

Dr. Gerardo de Jesús Fajardo San Miguel
SubDirector de Posgrado e Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil

ESTUDIO DE PELÍCULAS DELGADAS DE VO₂, MoO₃ Y ZnO SOBRE VIDRIO,
PARA SU APLICACIÓN COMO VENTANAS INTELIGENTES DE EDIFICIOS.

Este trabajo fue realizado en el laboratorio del Cuerpo Académico de Materiales Alternativos para Ingeniería (CAMAI) y los laboratorios de materiales de construcción pertenecientes a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, bajo la dirección de la Dra. Mayra Zyzlila Figueroa Torres.

Dra. Mayra Zyzlila Figueroa Torres

DEDICATORIA

En primer lugar, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a **Dios**, quien ha sido mi principal guía y apoyo en el transcurso de la realización de esta tesis. Su amor infinito y su sabiduría me han acompañado en cada paso del camino y sin duda alguna ha sido su mano la que ha guiado mis decisiones y acciones.

A mis papás José Guadalupe Mendoza Orozco y Oralia Jiménez Zambrano, por su amor incondicional, apoyo inquebrantable y guía invaluable. Agradezco profundamente los sacrificios que hicieron para criarme y convertirme en la persona que soy hoy.

A mis hermanos Imelda Patricia Mendoza Jiménez, Laura Isabel Mendoza Jiménez y Mario de la Cruz Robles por guiarme, cuidarme y ayudarme en todo momento.

A mis sobrinos Ángel de la Cruz Mendoza y Mario de la Cruz Mendoza, espero y este esfuerzo sea de motivación para ustedes para que lleguen mucho más lejos.

A Dulce Angelica Mendoza Jiménez, gracias por llamarme papá por primera vez en mi vida, te amo. Espero ser el mejor papá del mundo para ti.

A mi esposa, Perla Francisca Zavala Miranda, por apoyarme en cada locura que se me ocurría, por estar conmigo en las buenas y en las malas. Cada sacrificio que hiciste por mí, gracias por todo, te amo y espero ser un mejor esposo cada día.

A mi hijo Leonel, ya te quiero conocer y darle todo mi amor del mundo, te amo!!

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por el financiamiento de este trabajo de investigación, por medio de la beca de Doctorado CV 591308.

De igual forma, mi gratitud a la Facultad de Ingeniería Civil (FIC) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) por las facilidades otorgadas para la caracterización microestructural de los materiales uso de maquinaria y equipos, así como al personal de los laboratorios, por el apoyo brindado para realizar los experimentos.

También, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Dra. Mayra Zyzlila Figueroa Torres Asesor de mi tesis, gracias por tanta paciencia depositada en mí y por tanto conocimiento compartido. Así como al Dr. Miguel Ángel Ruiz Gómez y al Dr. Javier Rodrigo González López por formar parte del Comité, por sus valiosas sugerencias é interés, en la revisión del presente trabajo.

Índice de contenido

Capítulo	Página
RESUMEN	IX
LISTA DE TABLAS	X
LISTA DE FIGURAS	XI
ABREVIACIONES	XVIII
CAPITULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del Problema	3
1.3. Justificación del proyecto	5
1.4. Hipótesis	6
1.5. Objetivo General	6
1.6. Objetivos Específicos	6
CAPITULO II MARCO TEÓRICO	8
2.1. Espectro Solar	8
2.2. El vidrio y su interacción con el Espectro Solar	11
2.2.1. Transmitancia	12
2.2.2. Reflectancia	13
2.2.3. Absorbancia	14
2.3. Ventanas Inteligentes	15
2.4. Requerimientos mínimos para el uso de vidrios en edificaciones	16

2.5. Materiales Inteligentes	19
2.6. Materiales Electrocrómicos	22
2.7. Materiales Termocrómicos	23
2.8. Materiales Fotocrómicos	24
2.9. Métodos de deposición	26
2.9.1. Sistemas de dispersión.....	27
2.9.2. Fuerzas de Van der Waals.....	29
2.9.3. Enlace de dipolo inducido fluctuante.....	29
2.9.4. Enlace de dipolo inducido - molécula polar.....	30
2.9.5. Enlace con dipolos permanentes.....	30
<i>CAPITULO III ANTECEDENTES</i>	32
3.1. Envoltentes en edificios	32
3.2. Películas Delgadas	34
3.2.1. Películas Termocrómicas.....	36
3.2.2. Películas Fotocrómicas.....	40
3.2.3. Películas Termo-fotocrómicas.....	41
3.2.4. Métodos de deposición alternativos.....	42
<i>CAPITULO IV MATERIALES Y MÉTODOS</i>	44
4.1. Preparación de las dispersiones	45
4.2. Crecimiento de Películas	47
4.3. Caracterización Microestructural	48
4.4. Caracterización Óptica	49
4.5. Medición de Adherencia de las Películas	49

4.6. Simulación energética.....	50
<i>CAPITULO V RESULTADOS</i>	<i>51</i>
5.1. Etapa 1: Caracterización de las nanopartículas.....	51
5.1.1. Difracción de rayos X de las nanopartículas del MoO ₃	51
5.1.2. Difracción de rayos X de las nanopartículas del VO ₂	52
5.1.3. Difracción de rayos X de las nanopartículas del ZnO.....	53
5.2. Selección de dispersante.....	54
5.3. Etapa 1.- Preparación de las dispersiones.	55
5.3.1. Dispersión del MoO ₃	55
5.3.2. Dispersión del VO ₂	59
5.3.3. Dispersión del ZnO.....	62
5.4. Etapa 1: Caracterización de películas.	65
5.4.1. Película de MoO ₃	65
5.4.2. Película VO ₂	72
5.4.3. Película de ZnO.....	78
5.5. Etapa 2: Diseño de experimentos para el sistema de multicapa.....	84
5.6. Evaluación por MEB de las películas en multicapas.	85
5.7. Evaluación por MFA de las películas en multicapas.	91
5.8. Efecto óptico de las películas en multicapas.	97
5.9. Etapa 3: Estudio energético para la aplicación de las películas en multicapa en vidrios de edificios.	109
5.9.1. Diagrama de la trayectoria solar.....	111
5.9.2. Ganancia de calor.....	112

<i>CAPITULO VI CONCLUSIONES</i>	118
<i>CAPITULO VII BIBLIOGRAFÍA</i>	123

RESUMEN

M.C. José Alberto Mendoza Jiménez

Candidato para el Grado de Doctor de Ingeniería con Orientación en Materiales
de Construcción

Tesis: ESTUDIO DE PELÍCULAS DELGADAS DE VO₂, MoO₃ Y ZnO SOBRE
VIDRIO, PARA SU APLICACIÓN COMO VENTANAS INTELIGENTES DE
EDIFICIOS.

Número de Páginas: 157

Campo de Estudio: Materiales Avanzados de Construcción

Propósito y Método de Estudio: Hoy en día, la industria de la construcción es una de las industrias que más energía demanda durante todo el año, para mantener un buen confort térmico dentro de los edificios. Por lo que ha surgido la necesidad de construir edificios sustentables, desde su proceso de construcción, hasta su funcionalidad. Este trabajo se centra en el depósito de una película compuesta de nanopartículas crómicas de VO₂, MoO₃ y ZnO sobre el vidrio, a través de la técnica de spray la cual ofrece un método simple a baja temperatura, con el propósito de crear ventanas inteligentes termo-fotocrómicas, capaces reducir el paso de las radiaciones solares en función al calor y luz, con el objetivo de mejorar el confort térmico al interior de los edificios.

Contribuciones y Conclusiones: Dentro de las contribuciones más importantes fue el desarrollo de suspensiones con los 3 diferentes óxidos metálicos, que permitieran reducir su tamaño de partícula, mantener una buena estabilidad y que su evaporación fuera a baja temperatura. Así mismo, la combinación de estos tres elementos en forma de multicapas sobre el vidrio permitió evaluar su efecto termo-fotocrómico, y el ahorro económico que este brinda a un edificio de hasta un 25% en un edificio con el 100% de vidrio en su envolvente.

Firma de la asesora: _____

LISTA DE TABLAS.

Tabla	Página
<i>Tabla 1.- Clasificación para los materiales inteligentes [37].....</i>	<i>20</i>
Tabla 2.- Sistemas de dispersión en función de las combinaciones de estados o fases de la materia.	27
Tabla 3.- Efecto del dopaje en el VO ₂ (adaptado de [80])	38
Tabla 4.- Propiedades fisicoquímicas de los dispersantes y nanopartículas seleccionadas.	46
Tabla 5.- Tamaño de partícula promedio y el potencial zeta (Pz) a 30 días después de la preparación de la dispersión de MoO ₃	58
Tabla 6.- Tamaño de partícula promedio y el potencial zeta (Pz) a 30 días después de la preparación de la dispersión de VO ₂	61
Tabla 7. Tamaño de partícula promedio y el potencial zeta (Pz) a 30 días después de la preparación de la dispersión de ZnO.....	64
Tabla 8.- Diseño de experimentos para el sistema de multicapas.	84
Tabla 9.- Propiedades ópticas de los vidrios usados en la simulación.	111

LISTA DE FIGURAS.

Figura	Página
<i>Figura 1.- La naturaleza de onda de un haz de radiación electromagnética (adaptada de [18]).</i>	8
<i>Figura 2.- Clasificación del espectro electromagnético en función de la longitud de onda, frecuencia y energía [17].</i>	9
<i>Figura 3.- Características del espectro solar que incide sobre la superficie de la Tierra (adaptada de [19]).</i>	10
<i>Figura 4.- Propiedades ópticas del vidrio (adaptado de [24]).</i>	12
<i>Figura 5.- Esquema de la refracción y transmisión de un haz de luz en una superficie (adaptado de [27]).</i>	13
<i>Figura 6.- Características ópticas de la ventana inteligente (adaptado de [10]).</i>	15
<i>Figura 7.- Mapa de distintos climas en los Estados Unidos (adaptado de [31]).</i>	19
<i>Figura 8.- Esquema de estructura atómica del óxido de vanadio en fase R y M (adaptado de [22]).</i>	24
<i>Figura 9.- Efecto fotocromático del MoO₃ (adaptado de [24]).</i>	25
<i>Figura 10.- Esquema de un dipolo atómico o molecular (adaptado de [61]).</i>	29
<i>Figura 11.- Esquema de un dipolo inducido fluctuante (Adatado de [61]).</i>	30
<i>Figura 12.- Esquema de un dipolo inducido – molecular polar (adaptado de [61]).</i>	30
<i>Figura 13.- Enlace de hidrogeno</i>	31
<i>Figura 14.- Aplicación de un material termocrómico en la superficie de unos morteros. El cambio de color se midió (a) 25°C; (b) 100°C, (c) 200 °C, (d) 300 °C, (e) 400 °C y (f) 450 °C (adaptado de [75]).</i>	36

<i>Figura 15.- Transmitancia de una película de VO₂/ZnO con diferentes espesores (la línea sólida muestra los resultados a 25°C, mientras que la línea punteada representa los resultados a 100°C) (adaptado de [29]).....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 16.- Fotografías digitales de los materiales termo-fotocrómicos de PTCSW y de Hidroxipropil metilcelulosa (HPMC). De izquierda a derecha, las fotografías corresponden a un día de verano, luz suave del sol y un día nublado (adaptado de [9]).</i>	<i>42</i>
<i>Figura 17.- Diseño experimental para la evaluación de las películas inteligentes de VO₂, MoO₃ Y ZnO.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 18.- Diagrama del proceso de depósito de las películas mediante la técnica de espray.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 19.- Patrón de DRX de las nanopartículas de MoO₃ en fase ortorrómbica.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 20.- Patrón de DRX de las nanopartículas de VO₂ en fase monoclinica obtenidas por síntesis hidrotermal.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 21.- Patrón de DRX para las nanopartículas de ZnO en fase hexagonal.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 22.- Resultados del TGA del isopropanol, etilenglicol y PEG-400.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 23.- Potencial zeta y la distribución del tamaño de partícula del MoO₃ disperso en (a) el agua,(b) el etilenglicol, (c) el polietilenglicol 400 y (d) el isopropanol.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 24.- Efecto visual sobre las dispersiones del MoO₃ usando agua, isopropílico (Isp), etilenglicol (Etg) y polietilenglicol 400 (Peg 400).</i>	<i>58</i>
<i>Figura 25.- Potencial zeta y distribución del tamaño de partícula del VO₂ disperso en el (a) agua, (b) el etilenglicol, (c) el polietilenglicol 400 y (d) el isopropanol.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 26.- Efecto visual de dispersiones del VO₂ usando agua, isopropanol (Isp), etilenglicol (Etg) y polietilenglicol 400 (Peg 400).</i>	<i>61</i>
<i>Figura 27.- Potencial zeta y la distribución del tamaño de partícula del ZnO disperso en (a) el agua, (b) el etilenglicol, (c) el polietilenglicol 400 y (d) el isopropanol.</i>	<i>63</i>

<i>Figura 28.- Efecto visual de dispersiones del ZnO con dispersantes seleccionados. ...</i>	<i>64</i>
<i>Figura 29.- Caracterización del depósito de las nanopartículas de MoO₃ sobre el vidrio a mediante DRX.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 30.- FTIR de la película de MoO₃ a 15 capas y del isopropanol.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 31.- Resultados del microscopio de fuerza atómica del depósito de 1 capa de partículas de MoO₃ dispersados en isopropanol a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 32.- Resultados del microscopio de fuerza atómica del depósito de 15 capas de partículas de MoO₃ dispersados en isopropanol, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 33.- Mapeo de composición elemental obtenido por MEB-EDX del depósito de partículas de MoO₃ dispersado en isopropanol y etilenglicol a; a) 1, b) 5, c) 10 y d) 15 capas de esprayado.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 34.- Prueba de adherencia para el depósito de partículas de MoO₃ dispersado en isopropanol (Isp) a; a) antes y b) 15 despues.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 35.- Efecto óptico de la película de MoO₃ depositada sobre el vidrio, usando a) 1, b) 5, c) 10 y d) 15 capas.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 36.- Efecto óptico en función del número de capas después de 30 minutos de irradiación.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 37.- Efecto óptico de la película de MoO₃ en función de los tiempos de irradiación UV.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 38.- Patrón de DRX de la película de VO₂.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 39.- Espectroscopía FTIR del depósito de películas delgadas de nanopartículas de VO₂ utilizando isopropanol como dispersante.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 40.- Resultados de MFA para la película de VO₂, depositando 1 capa a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad.</i>	<i>75</i>

<i>Figura 41.- Resultados de MFA para la película de VO₂, depositando 5 capas, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad..</i>	75
<i>Figura 42.- Mapeo de la composición elemental para la película de VO₂, depositando a) 1, b) 3 y c) 5 capas de esprayado.....</i>	76
<i>Figura 43.- Prueba de adherencia para el depósito de 5 capas de las partículas de VO₂ disperso en isopropanol (Isp).....</i>	77
<i>Figura 44.- Efecto óptico de películas de VO₂, usando diferentes temperaturas de activación.....</i>	78
<i>Figura 45.- Patrón de DRX de la película de ZnO.....</i>	79
<i>Figura 46.- Espectroscopía FTIR de la película del ZnO.....</i>	79
<i>Figura 47.- Resultados de MFA para la película del ZnO, depositando 1 capa, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad.</i>	80
<i>Figura 48.- Resultados de MFA para la película del ZnO, depositando 5 capas, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad..</i>	81
<i>Figura 49.- Mapeo de composición elemental de la película de ZnO, depositando a) 1, b) 3 y c) 5 capas.</i>	82
<i>Figura 50.- Prueba de adherencia del depósito de partículas de ZnO disperso en isopropanol (Isp) a 5 capas de esprayado.</i>	83
<i>Figura 51.- Efecto óptico de películas de ZnO en función del número de capas.</i>	83
<i>Figura 52.-Mapeo de composición elemental por MEB-EDX para el diseño de multicapa 1; V(a), Mo(b), Zn (c) y % de depósito(d).....</i>	86
<i>Figura 53.Mapeo de composición elemental obtenida por MEB-EDX para el diseño de multicapa 2; V(a), Mo(b), Zn (c) y % de depósito(d).....</i>	87
<i>Figura 54.- Mapeo de composición elemental obtenido por MEB-EDX para el diseño de multicapa 3; V(a), Mo(b), Zn (c) y % de depósito(d).....</i>	88

<i>Figura 55.- Mapeo de composición elemental obtenido por MEB-EDX para el diseño de multicapa 4; V(a), Mo(b), Zn (c) y % de depósito(d).</i>	89
<i>Figura 56.- Mapeo de composición elemental obtenido por MEB-EDX para el diseño de multicapa 5; V(a), Mo(b), Zn (c) y % de depósito(d).</i>	90
<i>Figura 57.- Mapeo de composición elemental obtenido por MEB-EDX para el diseño de multicapa 6; V(a), Mo(b), Zn (c) y % de depósito(d).</i>	91
<i>Figura 58. Resultados de MFA para el diseño de multicapa 1, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad..</i>	92
<i>Figura 59.- Resultados de MFA del diseño de multicapa 2, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad.</i>	93
<i>Figura 60.- Resultados de MFA del diseño de multicapa 3, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad..</i>	94
<i>Figura 61.- Resultados de MFA para el diseño de multicapa 4, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad..</i>	95
<i>Figura 62.- Resultados de MFA para el diseño de multicapa 5, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad..</i>	96
<i>Figura 63.- Resultados de MFA del diseño de multicapa 6, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad..</i>	97
<i>Figura 64.- Efecto fotocrómico de la película con el diseño de multicapa 1 en función del tiempo de irradiación UV.</i>	98
<i>Figura 65.- Efecto termocrómico del diseño de multicapa 1 en función de la temperatura.</i>	99
<i>Figura 66.- Efecto fotocrómico del diseño de multicapa 2 en función del tiempo de irradiación UV.</i>	100
<i>Figura 67.- Efecto termocrómico del diseño de multicapa 2 en función de la temperatura.</i>	101

<i>Figura 68.- Efecto fotocromico del diseño de multicapa 3 en función del tiempo de irradiación UV.</i>	102
<i>Figura 69.- Efecto termocromico del diseño de multicapa 3 en función de la temperatura.</i>	103
<i>Figura 70.- Efecto fotocromico del diseño de multicapa 4 en función del tiempo de irradiación UV.</i>	104
<i>Figura 71.- Efecto termocromico del diseño de multicapa 4 en función de la temperatura.</i>	105
<i>Figura 72.- Efecto fotocromico del diseño de multicapa 5 en función del tiempo de irradiación UV.</i>	106
<i>Figura 73.- Efecto termocromico del diseño de multicapa 5 en función de la temperatura.</i>	107
<i>Figura 74.- Efecto fotocromico del diseño de multicapa 6 en función del tiempo de irradiación UV.</i>	108
<i>Figura 75.-Efecto termocromico del diseño de multicapa 6 en función de la temperatura.</i>	109
<i>Figura 76.- Diagrama de trayectoria solar del edificio propuesto del 100% en su envolvente</i>	111
<i>Figura 77.- Diagrama de trayectoria solar del edificio propuesto del 30% en su envolvente.</i>	112
<i>Figura 78.- Simulación de la ganancia de calor en un edificio usando un vidrio transparente (V 100%/30% Transparente) y un vidrio con película en multicapas tesis (V 100%/30% Tesis).</i>	113
<i>Figura 79.- Simulación de la demanda de energía del edificio usando un vidrio transparente (V 100% transparente) y un vidrio con película multicapa tesis (V 100% tesis).</i>	114

Figura 80.- Simulación de la demanda de energía del edificio usando un vidrio transparente (V 30% Transparente) y un vidrio con película multicapa tesis (V 30%Tesis)..... 115

Figura 81.- Simulación de las emisiones de CO₂ relacionadas con el uso de un vidrio transparente (V 100%/30% Transparente) y un vidrio con película en multicapas (V 100%/30% Tesis)..... 117

ABREVIACIONES

UV	Luz Ultravioleta
VIS	Luz Visible
NIR	Infrarrojo Cercano
VO ₂	Óxido de Vanadio
MoO ₃	Óxido de Molibdeno
ZnO	Óxido de Zinc
eV	Electron Volts
mV	Milivolts
nm	Nanometro
ASHRAE	Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción y Refrigeración y Aire Acondicionado
BTU	The British thermal unit is a traditional measure unit of energy, approximately equals 1055 joules.
MBTU	The unit MBtu is a measure unit of energy, defined as one thousand the British thermal unit (symbol: Btu). The "M" stands for one thousand.

CAPITULO I INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción.

El uso eficiente de la energía es cada vez más relevante a nivel mundial ya que diversas investigaciones [1] señalan que la energía eléctrica producida a partir de fuentes no renovables está relacionada con una gran variedad de efectos negativos al medio ambiente tales como la generación de gases de efecto invernadero, el consumo intensivo de combustibles fósiles, etc. En este contexto, los edificios son grandes consumidores de energía, requiriendo aproximadamente del 30% al 40% de la energía total generada en todo el mundo [1-3]. Esto se debe a que los principales materiales utilizados en las envolventes de los edificios como el concreto, la arcilla y el vidrio son buenos captadores de energía térmica, lo cual facilita la pérdida y/o ganancia de calor.

Por lo tanto, especialmente los vidrios para ventana convencionales elaborados con base en óxido de silicio (SiO_2) se han convertido actualmente en factores fundamentales para conseguir la eficiencia energética, ya que se ha reportado que al optimizar la pérdida y/o ganancia de calor a través de éstos se podría reducir el consumo de energía hasta un 50% [4]. No obstante, en respuesta a la poca eficiencia energética de los vidrios de ventana, se han propuesto distintas alternativas para mejorarla, tales como la modificación de su estructura atómica y el crecimiento de películas delgadas de distintos materiales en la superficie del vidrio, esto con el objetivo de reducir el paso del espectro solar al interior de los edificios [5].

Lo anterior requiere la determinación de variables y parámetros de referencia para evaluar la eficiencia energética de los vidrios de ventana. Así, el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE por sus siglas en inglés)

y la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) desarrollaron el programa ENERGY STAR para evaluar productos con consumo eficiente de energía, incluyendo el vidrio, el cual se evaluó utilizando variables térmicas como el Coeficiente de Conductividad (U), la Transmitancia de luz visible (Tvis) y el Coeficiente de Ganancia de Calor Solar (SHGC por sus siglas en inglés). Adicionalmente, se establecieron los requerimientos mínimos según la ubicación geográfica, p.ej., en climas fríos se requiere un $U < 0.27$ y un $SHGC > 0.32$, mientras que en un clima cálido se requiere un $U < 0.40$ y un $SHGC < 0.25$ [6]. Por su parte, la transmitancia solar (Tsol) también es una variable de interés en la evaluación de las ventanas inteligentes para conocer la cantidad porcentual de radiación solar que atraviesa un vidrio, por lo cual se han establecido parámetros de entre 0.30 a 0.50, dependiendo del clima y diseño del edificio. Por su parte, el Tvis se busca que sea lo más alto posible ya que influye directamente en el consumo de energía para iluminar al interior de los edificios, en la actualidad se han establecido parámetros de entre 0.50 a 0.70 [6].

Las películas delgadas termocrómicas y fotocromáticas son dos de las alternativas de mayor interés para la comunidad científica para cambiar las propiedades ópticas en los vidrios por su alta eficiencia, ya que generan un cambio de color a una temperatura e intensidad luminosa críticas, respectivamente, bloqueando el paso de la radiación ultravioleta (UV) e infrarrojo cercano (NIR por sus siglas en inglés). Por lo tanto, este tipo de mecanismo propicia una modulación térmica inteligente en los vidrios, diferenciando el clima al exterior y el clima al interior de los edificios. Sin embargo, el reporte de la combinación en multicapa de ambos tipos de materiales es limitado, la cual podría potenciar un efecto positivo sobre la eficiencia energética del vidrio [7].

Por lo tanto, la presente investigación propone una alternativa para mejorar la eficiencia energética del vidrio mediante el crecimiento de una película de óxidos metálicos que estimulen una respuesta dinámica termo-fotocrómica. La película fue compuesta por óxido de vanadio IV (VO_2), óxido de molibdeno VI

(MoO₃) y óxido de zinc (ZnO), los cuales se estructuraron en forma de multicapa. Se evaluó el efecto del orden del depósito de cada uno de los óxidos metálicos, así como su morfología y porosidad obtenidos mediante una técnica el spray de fácil escalabilidad, de equipamiento simple y de bajo consumo energético. El estudio del crecimiento de estas películas en el vidrio contribuye al estado del arte en materia de confort térmico dentro de las edificaciones, promoviendo la disminución del consumo de energía mediante sistemas de climatización.

1.2. Planteamiento del Problema.

Durante su vida útil de servicio, las edificaciones consumen grandes cantidades de energía para su operación, por ejemplo, en el año 2019 se reportó que 30% de la energía total producida en el mundo se emplea para la operación de las construcciones residenciales y no residenciales [8]; de hecho, en México este porcentaje alcanzó un 22% [3]. De esta demanda energética, se estableció que más del 50% se empleó para alimentar los sistemas de calefacción y enfriamiento, mientras que un 10% se consumió mediante la iluminación artificial [9]. Todo ello forma parte de los estándares de confort de las edificaciones para albergar a los seres humanos durante grandes periodos de tiempo.

En consecuencia, los vidrios convencionales utilizados para las ventanas son de interés al presentar grandes problemas de ganancia o pérdidas de calor de hasta un 40% [10], esto es debido a que interaccionan directamente con la radiación del espectro solar (Ultravioleta, Luz Visible e Infrarroja), permitiendo su paso al interior. Es decir, las ventanas convencionales no presentan propiedades ópticas que reduzcan la transmisión de estas radiaciones, pero sin limitar el paso de la luz visible.

De hecho, distintos estudios [9-11] demostraron que el vidrio convencional transmite hasta un 75% de radiación solar al interior de los edificios, propiciando una importante ganancia de calor. Por lo tanto, se han propuesto

distintas alternativas clasificadas según su comportamiento ante el espectro solar como absorbentes, reflejantes, de baja emisión y la combinación de estos, las cuales son denominadas en conjunto como soluciones estáticas, ya que no cambian en ninguna circunstancia. Por otro lado, las soluciones dinámicas surgieron después con el uso de materiales inteligentes, convirtiéndose en una buena alternativa debido a las necesidades variables que tiene una ventana hoy en día.

Por lo tanto, surgió el término “Ventana Ideal” para referirse al comportamiento de una ventana en función de las condiciones climatológicas circundantes, es decir: (i) en climas cálidos se requiere bloquear el paso de las radiaciones de NIR y UV por ser las principales generadoras del calor y energía respectivamente, dejando acceder únicamente la luz visible; (ii) en climas fríos se requiere bloquear las radiaciones UV, pero permitiendo el paso total de las NIR, y la luz visible para reducir el uso de equipos de calefacción y luz artificial [12].

El depósito de películas delgadas es una nueva alternativa para alcanzar las propiedades ópticas deseables de la ventana ideal. Una alternativa es el depósito de materiales crómicos que provocan un cambio de color supeditado a factores ambientales [13]. Por ejemplo, el óxido de vanadio (VO_2) en su fase monoclinica es uno de los materiales termocrómicos más utilizados en ventanas, el cual presenta un cambio de color a baja temperatura (68°C), demostrado una reducción en el paso de las radiaciones NIR en función del cambio dinámico del color de este material, sin embargo, también traen consigo algunas desventajas asociadas con su polimorficidad [14]. Por otro lado, el MoO_3 es uno de los materiales fotocromicos más estudiados debido a su cambio de color en un ancho de banda entre 2.5 eV y 3.2 eV [15], el cual puede utilizarse para mejorar su tiempo de coloración. Asimismo, la nano estructuración de estos materiales crómicos con el ZnO es una alternativa como escudo ante las radiaciones UV, brindando una mayor durabilidad a las películas delgadas [16].

Por lo tanto, el presente trabajo desarrolló un recubrimiento nanoestructurado en multicapas con propiedades termo-foto crómicas compuesta por $\text{VO}_2/\text{MoO}_3/\text{ZnO}$ con el fin de modular el comportamiento del vidrio frente a las radiaciones UV-VIS-NIR del espectro solar, utilizando la técnica de spray. Además, se estimó la contribución a la eficiencia energética en la película delgada a través de la modulación solar y la transmitancia visible.

1.3. Justificación del proyecto.

El bajo rendimiento energético del vidrio utilizado en las ventanas para las edificaciones ha provocado un crecimiento paulatino en esta línea de investigación a lo largo de los años. Esto trajo consigo el uso de materiales crómicos en forma de películas delgadas sobre los vidrios como una alternativa para dotarlos de sus propiedades ópticas dinámicas para modular las radiaciones solares en función del clima, pero sin afectar su visibilidad.

Uno de los principales enfoques de este trabajo es estudiar la preparación de una película termo-fotocrómica sobre el vidrio a través del uso de tres óxidos metálicos (VO_2 , MoO_3 y ZnO) con la finalidad de generar conocimiento con relación a las propiedades ópticas que pueden proporcionar al vidrio. Además, se evaluó el efecto de una metodología de deposición alternativa utilizando equipamiento simple y fácilmente escalabilidad con base en el método de spray. Esto con el fin de evidenciar el efecto del depósito de las películas inteligentes sobre el vidrio bajo la condición in situ, facilitando la modificación de la eficiencia energética en los edificios.

Por lo tanto, este estudio demostró que la aplicación de los tres óxidos redujo el paso de las radiaciones del espectro solar. Sin embargo, el efecto causado por la técnica de spray propuesta causó el depósito de películas porosas, provocando una baja modulación solar. No obstante, esto también permitió una rápida activación en las propiedades termocrómicas como fotocrómicas.

1.4. Hipótesis.

El crecimiento de películas delgadas de VO₂/MoO₃/ZnO sobre el vidrio mediante la estructuración en forma de multicapas utilizando la técnica del esprayado simple, permitirá desarrollar un recubrimiento termo-fotocrómico con el propósito de controlar el paso de las radiaciones del espectro solar de UV, VIS y NIR como una respuesta automática a los cambios de temperatura e intensidad luminosa ambiental, con la finalidad de brindar confort térmico y luminoso al interior de una edificación y contribuir al ahorro de energía.

1.5. Objetivo General

Desarrollar una película delgada multicapa de VO₂/MoO₃/ZnO sobre vidrio mediante la técnica de espray que module el comportamiento óptico del vidrio a través de una respuesta termo-fotocrómica automática ante las diferentes radiaciones del espectro solar en función de los cambios ambientales de temperatura e intensidad luminosa, para ser utilizadas como ventanas inteligentes en edificaciones.

1.6. Objetivos Específicos.

- Determinar un dispersante que mantenga en suspensión estables las nanopartículas de los óxidos de vanadio, molibdeno y zinc para la preparación de recubrimientos mediante la técnica de espray
- Evaluar la homogeneidad de las películas de los óxidos individuales y multicapa utilizando variables como el tiempo de esprayado y la cantidad de capas.
- Determinar la mejor respuesta termocrómica y fotocrómica en función a los distintos arreglos multicapa y las características microestructurales de los óxidos metálicos.

- Determinar la adhesión de las películas delgadas en función del tipo de óxido metálico y el número de capas depositadas mediante la técnica del spray.
- Valorar la eficiencia energética de una edificación mediante modelación, en función a las propiedades ópticas obtenidas para la película delgada con mejores características.

CAPITULO II MARCO TEÓRICO

2.1. Espectro Solar.

La radiación solar es un suministro de energía renovable para todo el planeta, lo cual es uno de los factores más importantes para nuestra evolución tecnológica. Las radiaciones electromagnéticas son una forma de energía transmitida a través del espacio a grandes velocidades y son clasificadas en función de la cantidad de energía que transmiten como radiación UV, Vis e infrarroja (cercana o lejana), etc. Cuando estudiamos fenómenos de reflexión, refracción, interferencia y difracción es conveniente modelar estas radiaciones en forma de campos magnéticos y eléctricos que oscilan perpendicularmente entre ellos, siendo el campo eléctrico representado como un vector de longitud proporcional a la fuerza del campo. El eje x de la Figura 1 representa el tiempo conforme la radiación recorre (i) un punto fijo en el espacio o (ii) la distancia en un tiempo fijo [17]

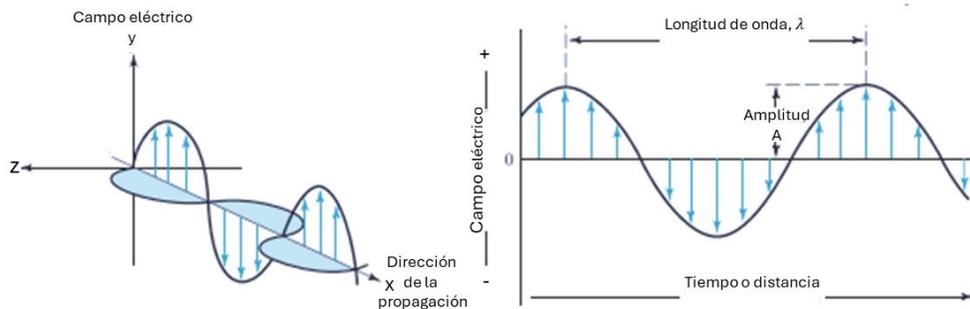


Figura 1.- La naturaleza de onda de un haz de radiación electromagnética (adaptada de [18]).

Estas radiaciones se catalogan en el espectro electromagnético como rayos gamma, rayos X, UV, Vis, infrarrojo, microondas y ondas de radio, lo cual se realiza en función de sus particularidades (Figura 2): (i) La longitud de la onda se define como la distancia lineal entre los máximos y mínimos sucesivos de una onda(ii) El periodo es el tiempo en segundos requeridos para recorrer los máximos o mínimos sucesivos a través de un punto fijo en el espacio. (iii) La frecuencia es el número de oscilaciones del vector del campo eléctrico por unidad de tiempo. La velocidad depende tanto del medio como de la frecuencia. (iv) La energía que contiene una onda, la cual será mayor conforme la longitud de onda es menor o la frecuencia es mayor.

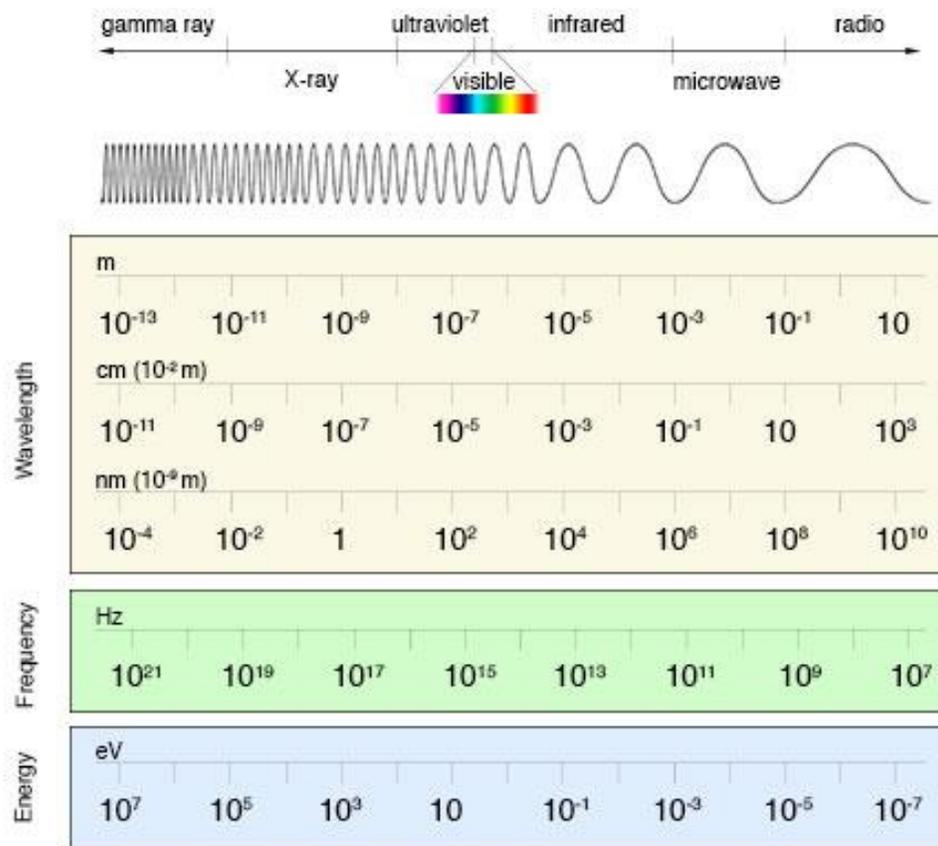


Figura 2.- Clasificación del espectro electromagnético en función de la longitud de onda, frecuencia y energía [17].

Dentro del espectro de la radiación electromagnética, la radiación solar abarca sólo las regiones del UV (100-400 nm), NIR (700-4000 nm) y Vis (400-700

nm). Estas radiaciones entran en contacto con la capa de ozono y las nubes, siendo afectadas por procesos de reflexión, absorción y difusión debido a su interacción con gases atmosféricos, disminuyendo en la intensidad de las radiaciones solares. Hoy en día, existen laboratorios encargados de determinar las características de la radiación que incide sobre la tierra, siendo el laboratorio nacional de energías renovables (NREL por sus siglas en inglés) uno de los más reconocidos a nivel mundial ya que cuentan con bancos de datos y modelos disponibles abiertamente para estimar la radiación solar. Estudios recientes [19] reportan que el espectro solar que incide sobre la tierra está compuesto por el 7% de radiación UV, 44% de radiación Vis, 37% de radiación del NIR, 11% de radiación del infrarrojo lejano (Figura 3).

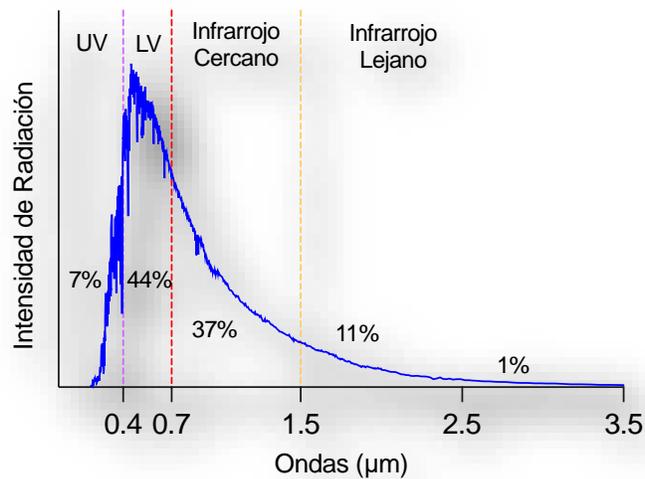


Figura 3.- Características del espectro solar que incide sobre la superficie de la Tierra (adaptada de [19]).

La radiación U (100-400 nm) es absorbida por los electrones de átomos y moléculas, aprovechándola para cambiar su estructura y producir profundos cambios químicos [20]. Por otro lado, la radiación Vis (400-700 nm) es la región del espectro electromagnético en que la radiación alcanza su máximo, destacando en la adaptación de los seres vivos por ser primordial para realización de las actividades humanas del día a día, haciendo deseable su presencia dentro de las edificaciones [20]. La radiación del NIR (700-4000 nm), no contiene energía suficiente para provocar reacciones químicas, pero induce movimientos de

vibración en las moléculas, lo cual se denomina absorción macroscópica de energía térmica y se manifiesta casi siempre como un incremento de temperatura [20]. También se deben mencionar las microondas $>1500\text{nm}$ (1.2 eV) porque inducen movimientos moleculares de rotación, ocasionando un incremento térmico. El agua las absorbe fuertemente, con el consiguiente calentamiento. Este hecho es importante en las transformaciones térmicas de mares y océanos [20].

2.2. El vidrio y su interacción con el Espectro Solar.

Los vidrios son frecuentemente utilizados en las envolventes de edificaciones debido a la conexión con el exterior que proveen a los usuarios, además de la versatilidad de forma y buena apariencia que ofrecen a las edificaciones de gran tamaño. Otros beneficios de los vidrios de ventana son: (i) En estética, brindan la percepción de modernismo a los edificios y de amplitud a sus espacios interiores, además de una abundante iluminación. (ii) En cuanto a sus propiedades físicas, el vidrio es un excelente aislante eléctrico, son fácilmente maleables, además de su resistencia a la abrasión, a las altas temperaturas, las inclemencias climáticas, al óxido y radiaciones solares sin comprometer su apariencia e integridad. (iii) Asimismo, es un material de fácil mantenimiento debido a que la superficie lisa del vidrio reduce la adherencia de polvo, es un material reciclable y reduce la carga muerta de los edificios [21].

Por otra parte, el vidrio tiene ciertas desventajas: (i) Es un excelente conductor de calor al interior del edificio al estar en contacto directo con el espectro solar y la ganancia de calor depende de los fenómenos de la radiación y la conducción. La primera puede ser difusa o directa, pero la radiación difusa incide sobre la superficie terrestre después de un cambio de dirección asociado con una dispersión de partículas en la atmósfera [22]; mientras que la radiación directa es la componente vectorial de la radiación solar absoluta que es perpendicular a la superficie del vidrio. Por otra parte, el efecto por conducción se produce debido a la diferencia de temperatura en ambas caras del vidrio de ventana, siendo positiva (ganancia de calor) o negativa (pérdida de calor) si la temperatura del aire exterior

es mayor que en el aire interior o si la temperatura del aire interior es mayor que en el exterior, respectivamente [23].

El vidrio produce distintos fenómenos ópticos al entrar en contacto con la radiación solar en forma directa o difusa (Figura 4), es decir, el rayo incidente puede reflejarse, mientras que la luz que no se refleja puede dispersarse y/o absorberse, pudiendo provocar el fenómeno de fluorescencia; asimismo, la luz que atraviesa el material y se logra transmitir al otro lado del vidrio [24]. Cabe mencionar que el componente absorbido aumenta la temperatura del vidrio, el cual se conduce lentamente hacia el exterior o al interior dependiendo de la diferencia de temperatura.

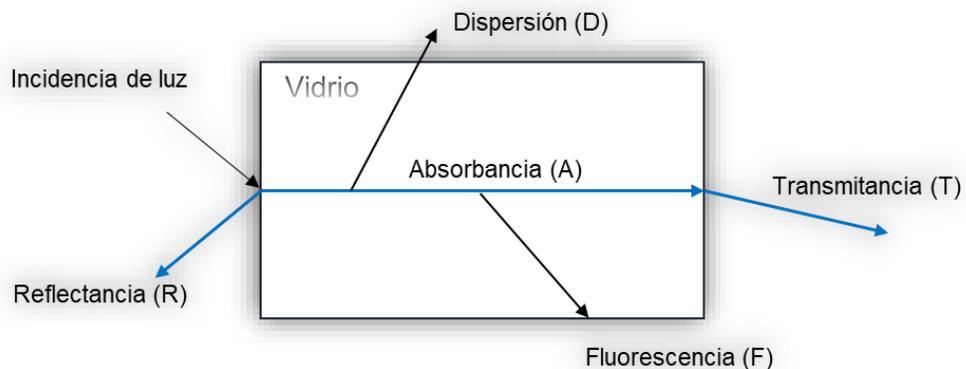


Figura 4.- Propiedades ópticas del vidrio (adaptado de [24]).

2.2.1. Transmitancia.

Desde el primer descubrimiento documentado por Leonardo da Vinci en 1497, el cual observó el fenómeno de descomposición de la luz del sol en un vaso de agua, hasta la primera publicación de la ley de absorción por Lambert en 1760, el estudio de la espectroscopia ha tomado cada vez más relevancia para estudiar los fenómenos de la materia y su utilidad práctica [25].

La transmitancia tiene un fenómeno preponderante en la evaluación del rendimiento energético en los vidrios, ya que permite evidenciar la cantidad de radiación solar que atraviesa el vidrio. Por otra parte, se ha demostrado que el

ángulo de incidencia afecta a las propiedades ópticas, es decir, mientras menor sea el ángulo de incidencia mayor será la absorbancia y viceversa.

La transmitancia es definida como la transmisión de la radiación que es análoga a la reflectancia o al flujo radiante incidente. A raíz de este concepto se establecieron otros como la transmitancia total (T_{total}), la cual está compuesta por la transmitancia regular (T_{reg}) y la transmitancia difusa (T_{dif}) (Figura 5). La primera puede predecirse a partir del ángulo de entrada de acuerdo con la ley de refracción de Snell [26]. Por otra parte, la T_{dif} ocurre cuando el flujo incidente se dispersa a través de la muestra (p.ej., por la rugosidad de la superficie) [27].

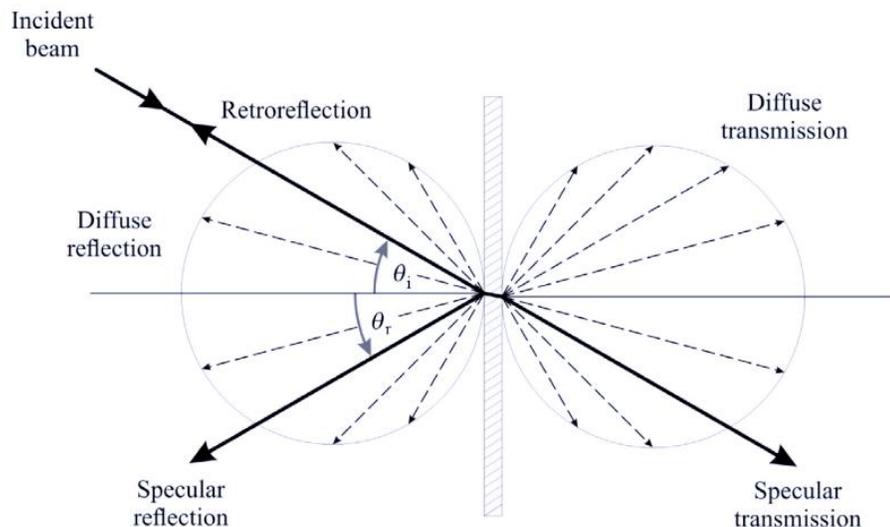


Figura 5.- Esquema de la refracción y transmisión de un haz de luz en una superficie (adaptado de [27]).

2.2.2. Reflectancia.

La reflectancia (ρ) es un número adimensional definido en función del flujo radiante (Φ), siendo expresada en Watts como la relación entre las radiaciones reflejadas (índice Φ_r) y las radiaciones incidentes (índice Φ_i) [27] escritas en una representación espectral como la Ecuación 1. Para materiales no fluorescentes se usan valores de $0 < \rho < 1$, dependiendo de la iluminación geométrica y de las condiciones de recolección.

$$p(\lambda) = \frac{\phi_r(\lambda)}{\phi_i(\lambda)} \dots\dots\dots \text{Ecuación (1)}$$

Otros autores [28] definen a la refracción como un cambio de trayectoria de un haz de luz cuando pasa de un medio transparente a otro. El cambio se debe a una diferencia en la velocidad de la radiación que se propaga a través de los dos medios. Generalmente, la reflectancia en cualquier longitud de onda puede considerarse como la suma de dos componentes: reflectancia regular (o de espejo) y la reflectancia difusa no direccional, las cuales contribuyen a la reflectancia total de la superficie (Figura 3) y cuya magnitud depende del tamaño de partícula, la estructura, la rugosidad y otras propiedades de la superficie [28].

2.2.3. Absorbancia.

La absorbancia se asocia con la interacción de vibraciones mediante las radiaciones solares y moleculares que dan lugar a procesos de absorción multifotónica que afectan las transiciones electrónicas entre la banda de valencia / banda de conducción y los niveles de excitación, dependiendo de la composición química del vidrio [26]. De esta forma, la absorbancia está relacionada con la transmitancia en forma logarítmica como se define en la Ecuación 2, es decir, la transmitancia disminuye a medida que la absorbancia incrementa. Asimismo, la transmitancia es la diferencia entre la radiación incidente y la radiación inicial como se muestra en la Ecuación 3.,

$$A = -\log T = \log \frac{I}{I_0} = \log \frac{I_0}{I} \dots\dots\dots \text{Ecuación (2)}$$

$$T = I/I_0. \dots\dots\dots \text{Ecuación (3)}$$

siendo A la absorbancia, T es la transmitancia, I₀ es la radiación inicial e I es la radiación resultante.

2.3. Ventanas Inteligentes.

Una ventana inteligente tiene la capacidad de alterar la cantidad de luz transmitida a través de materiales típicamente transparentes [22]. En la actualidad existe una gran variedad de desarrollos tecnológicos para mejorar la eficiencia energética de los vidrios de ventanas para los edificios, los cuales se han enfocado en proporcionar distintas propiedades ópticas a los vidrios: desde modificaciones a un nivel molecular a través la combinación del silicio y otros materiales (p.ej., el óxido de titanio) [29], hasta el crecimiento de películas delgadas de distintos materiales que modulen la radiación solar (UV-Vis-NIR).

Diversos estudios [5] han discutido los requerimientos de los vidrios de ventana según el medio ambiente circundante, por lo que una ventana ideal debe presentar un comportamiento dinámico que responda a las temporadas climática (Figura 6), p.ej.: en verano, no debe absorber radiaciones infrarrojas ni UV, pero debe ser lo suficientemente permisible a la luz visible; por otro lado, en temporada invernal debe ser totalmente reflejante de la radiación UV de la superficie exterior, permitiendo únicamente el paso de la irradiación solar, las cuales son las principales transportadoras de calor.

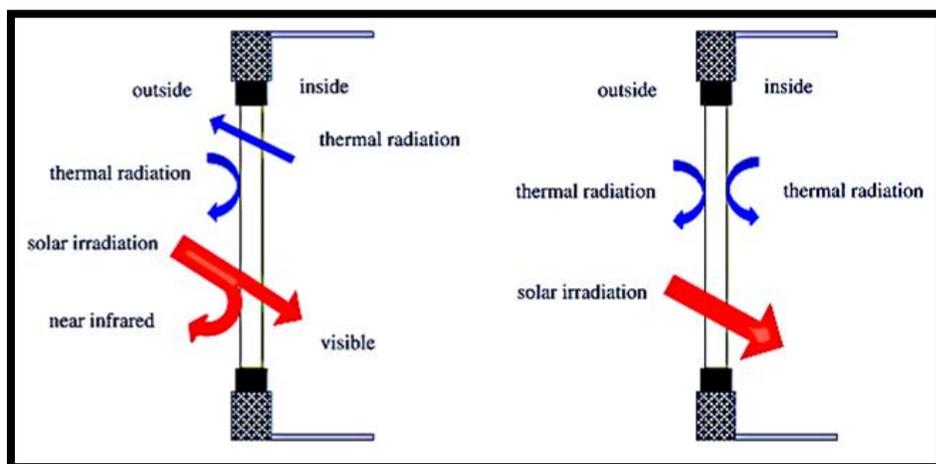


Figura 6.- Características ópticas de la ventana inteligente (adaptado de [10]).

La ganancia o pérdida de calor asociada con las ventanas promueve el uso intensivo de energía para mantener el confort térmico dentro de los edificios.

De hecho, en la actualidad los edificios no solo deben responder a las funciones y propósitos para lo que fueron diseñados, sino que se debe contar con un estudio profundo que incluye su planeación, tipos de materiales a utilizar y condiciones climáticas locales, con el fin de garantizar entornos saludables, sostenibles y con un confort térmico adecuado para los usuarios, evitando así la generación excesiva de contaminantes y la dependencia de la energía externa [30]. Por lo tanto, lo anterior es uno de los mayores retos para la industria de la construcción circular, ya que ha mostrado un avance tecnológico lento en comparación con otras industrias a pesar de su importancia a nivel mundial.

2.4. Requerimientos mínimos para el uso de vidrios en edificaciones.

Para mejorar la eficiencia energética del vidrio de ventanas es fundamental identificar los parámetros clave que determinan su comportamiento térmico y óptico. Estos parámetros proporcionan una base sólida para evaluar y comparar diferentes tipos de vidrio, así como para diseñar soluciones que maximicen su rendimiento energético. Por ejemplo:

(i) El U es la capacidad de un material para conducir el calor e indica la cantidad de calor que se transfiere en un período de tiempo dado por unidad de área para una diferencia de temperatura, lo cual se expresa en unidades de $W/(m \cdot K)$, siendo W los vatios (unidad de potencia), m los metros (unidad de longitud) y K los grados kelvin (unidad de temperatura) [30]. Por lo tanto, cuanto menor sea U más eficiente será la ventana en términos energéticos [31]. La estimación de U (Ecuación 4 [30]) para una configuración específica de vidrio depende de factores como el grosor del vidrio, el tipo de vidrio (simple, doble o triple), el tipo de gas (si se utiliza un espacio entre vidrios) y los revestimientos de baja emisividad que puedan aplicarse al vidrio.

$$U = \frac{1}{R_{total}} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación (4)}$$

(ii) El SHGC (Ecuación 5) es la relación entre el calor solar que pasa a través de un vidrio y el calor solar incidente en el vidrio, es decir, mientras menor sea SHGC mejor será el aislamiento térmico del vidrio, pero siendo afectado por el aire de circundante, así como otros factores como la capacidad de absorción. El calor radiante que ingresa a través del vidrio no afecta directamente el aire del espacio de la habitación a través del cual pasa, sino que es absorbido por las superficies interiores (paredes, piso, techo y muebles) del espacio. Este calor absorbido se libera al aire en el espacio por conducción y convección debido a la diferencia de temperatura [23].

$$SHGC = T_{solar} + \frac{A_{solar}U}{h_o} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación (5)}$$

(iii) El T_{vis} ó T_{lum} (Ecuación 6) es una fracción del espectro visible de la luz solar (380nm a 720 nanómetros) que se expresa como un número entre 0 y 1, esta ponderada por la sensibilidad del ojo humano y se transmite a través del acristalamiento de una ventana. Un vidrio con una transmitancia visible más alta es mejor para el confort visual dentro de los edificios. T_v [31].

$$T_{lum} = \frac{\int \Phi_{lum}(\lambda) T d\lambda}{\int \Phi_{lum}(\lambda) d\lambda}, \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación (6)}$$

(iv) T_{sol} o Transmitancia Solar (Ecuación 7) es un parámetro importante para la evaluación del rendimiento de las ventanas y otros acristalamientos en términos de control solar, midiendo la fracción de radiación solar total incidente que se transmite a través del vidrio y entra en un espacio interior, contribuyendo al calentamiento de este. En resumen, T_{sol} indica el calor solar que entra en un edificio a través del vidrio y se expresa como un valor adimensional entre 0 y 1,

donde 0 significa que no se transmite radiación solar a través del vidrio y 1 significa que se transmite toda la radiación solar incidente.

$$T_{sol} = \frac{\int \Phi_{sol}(\lambda) T d\lambda}{\int \Phi_{sol}(\lambda) d\lambda}, \quad \dots\dots \text{Ecuación (7)}$$

donde λ representa una longitud de onda específica y Φ_{lum} y Φ_{sol} denotan el espectro de luminancia e irradiancia solar para una masa atmosférica 1,5 (AM 1,5) en la misma longitud de onda (para estos cálculos se consideró que el sol estaba a 37° sobre el horizonte).

(v) La modulación solar (Ecuación 8) se muestra el cálculo para encontrar la modulación solar, dicho parámetro se calcula haciendo la resta de la transmitancia solar en su estado normal, es decir a 25°C contra la transmitancia solar cuando el efecto de bloqueo este activo a 80°C, dando el resultado de la modulación o reducción del paso del sol, a través de la ventana.

$$\Delta T_{sol} = T_{sol} (25^\circ C) - T_{sol} (80^\circ C), \quad \dots\dots \text{Ecuación (8)}$$

La American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE 90.1) especifica distintos rendimientos energéticos en función del clima en los Estados Unidos (Figura 7). El comportamiento de una ventana debe estar en función del clima según la ubicación del edificio, es decir, en la zona 1, 2 y 3 se requiere de una $U < 3.69$ y un $SHGC < 0.25$ ya que el clima cálido y se requiere el menor paso de calor al interior de los edificios. En un clima más frío como la zona 4, 5 y 6, se propone un valor para $U = 3.84$ y un $SHGC < 0.40$ [32].

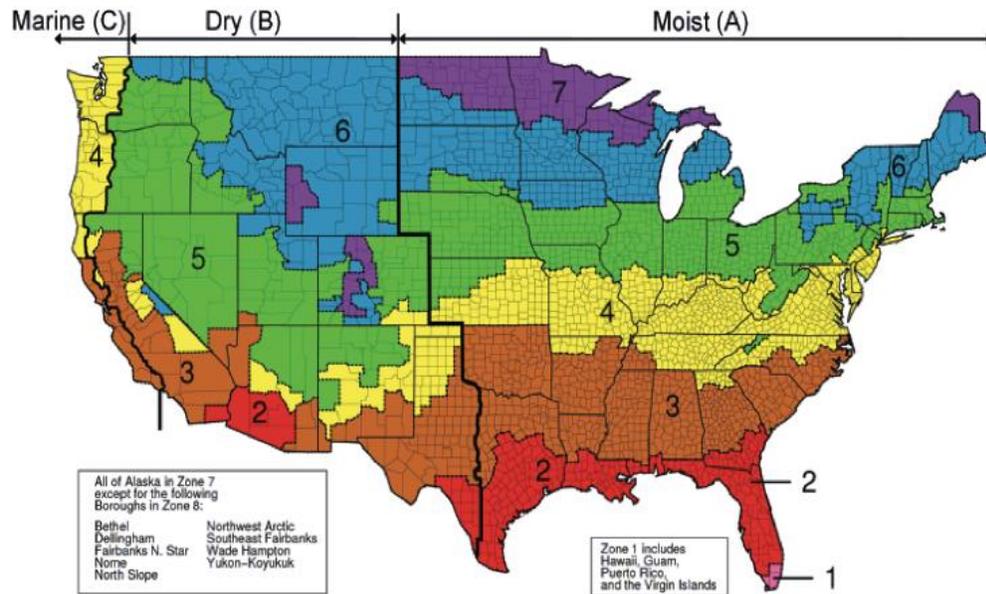


Figura 7.- Mapa de distintos climas en los Estados Unidos (adaptado de [31]).

Por otra parte, la guía de diseño de edificios completos (WBDG por sus siglas en inglés) es un esfuerzo de colaboración entre agencias federales, empresas del sector privado, organizaciones sin fines de lucro e instituciones educativas, con la finalidad de ser la principal fuente de acceso a información actualizada sobre técnicas y tecnologías de diseño de edificios completos. Esta guía se desglosa en cuatro categorías principales: recomendaciones de diseño, gestión de proyectos/operaciones y mantenimiento, criterios de instalaciones federales y educación continua. En la categoría de diseño, se han propuesto algunas recomendaciones energéticas para ventanas tales como: (i) un U es deseable que sea menor a 0.40; (ii) se ha propuesto que SHGC no sean mayores a 0.40; (iii) la transmitancia visible se espera que sea mayor al 70% [33].

2.5. Materiales Inteligentes.

Uno de los primeros informes registrados sobre materiales inteligentes proviene del autor Edgar Allan Poe a inicios del siglo XVIII, quien describía que ciertos materiales cambiaban de color para embellecer sus historias. Pero no fue

sino hasta 1854 cuando Virchow's Myelin los describió por primera vez [34]. Inicialmente, existió controversia para denominar a los materiales como "Inteligentes", pues este término se asociaba con sistemas más complejos compuestos por sensores, actuadores y sistemas de conversión de datos, cuyas propiedades integrales se pueden alterar favorablemente para responder a las necesidades específicas de desempeño [35]. Sin embargo, en la década de los 70's la oficina de investigación del ejército de los Estados Unidos definió como los materiales inteligentes a los que poseen la capacidad de cambiar sus propiedades físicas de manera específica (p.ej., la forma, la rigidez, la viscosidad y la amortiguación) en respuesta a un estímulo específico (p.ej., presión, temperatura, campos eléctricos y magnéticos, productos químicos o radiación nuclear) [36]. Esta definición se ha consolidado con el paso del tiempo con el incremento de los nuevos descubrimientos en este campo de estudio, diversificando el número de clasificaciones. Por ejemplo, existe la clasificación según su tipo de función (sensores y actuadores) o por su naturaleza (orgánicos, inorgánicos, materiales compuestos y biomateriales) [37]. En la actualidad, no hay una clasificación general establecida para enlistar a este tipo de materiales, pero las clasificaciones más usadas se definen en función del tipo de respuesta y al estímulo al que responden (Tabla 1).

Tabla 1.- Clasificación para los materiales inteligentes [37].

	Tipo de Materiales	Estímulo	Respuesta
Sensores	Fotoactivos	Campo eléctrico, luz, estímulo químico y temperatura	Emisión de luz
	Cromoactivos	Campo eléctrico, temperatura, luz y estímulo químico	Color
	Materiales bioactivos	Temperatura, luz, campo eléctrico	Varias
	Magnetostrictivos	Deformación mecánica, campo magnético/eléctrico	Campos magnético/eléctrico/deformación mecánica
	Electrostrictivos	Deformación mecánica	Polarización Eléctrica.

	Electrocerámicas	Deformación mecánica/corriente eléctrica	Corriente eléctrica/deformación mecánica
	Polímeros electroactivos	Deformación mecánica	Polarización eléctrica.
	Piroeléctricos	Temperatura	Polarización eléctrica.
Actuadores	Termoeléctricos	Calor	Corriente eléctrica
	Piezoeléctricos	Deformación mecánica y corriente eléctrica	Corriente eléctrica/ deformación mecánica.
	Electrostrictivos	Deformación mecánica	Polarización eléctrica.
	Magnetostrictivos	Deformación mecánica y campo magnético/eléctrico	Campo magnético/eléctrico/deformación mecánica
	Polímeros electroactivos	Campo eléctrico/pH	Deformación mecánica
	Magnetoreológicos	Campo magnético	Viscosidad
	Electroreológicos	Campo eléctrico	Viscosidad
	Materiales con memoria de forma	Temperatura/Campo Magnético	Deformación Mecánica

Por su parte, las primeras aplicaciones de materiales inteligentes en el sector de la construcción sucedieron a partir del año 1993, a través de la Fundación Nacional de Ciencia (NSF por sus siglas en inglés). En un inicio, fueron enfocados en el campo de las estructuras para el monitoreo y detección de fallas inminentes, así como en el control de daños y como actuadores que resistan vibraciones violentas [35].

Los materiales inteligentes más usados en este campo son los piezoeléctricos, los electroreológicos y los de memoria de forma, ya que estos permiten evidenciar cualquier tipo de movimiento al interior de la estructura al combinarse con elementos de detección, procesamiento y ejecución, además de su fácil incorporación dentro de materiales estructurales tradicionales, como el acero, el concreto u otros compuestos [13,15], haciéndolos ideales para su aplicación en este ramo de la construcción. No obstante, los materiales fotocromáticos y termocromáticos son de mayor interés en el campo de aplicación

del vidrio de ventana y la mejora de la eficiencia energética [36-38]. Cabe resaltar que uno de los mayores retos para lograr la aplicación de estos materiales consiste en el desarrollo de métodos de deposición que sean relativamente fáciles y económicos [38].

2.6. Materiales Electrocrómicos.

Los materiales electrocrómicos son aquellos que cambian de color en respuesta al paso de campos eléctricos y se pueden dividir en tres grupos según su estado físico a temperatura ambiente: (i) Materiales electrocrómicos que son solubles en estado neutro, así como después de la transferencia de electrones; p.ej., los colorantes moleculares como el etil viológeno. (ii) Materiales electrocrómicos que son solubles en estado neutro y se forman sólidos en la superficie del electrodo después de la transferencia de electrones; p.ej.: heptil viológeno. (iii) Materiales electrocrómicos que son sólidos en estado neutro y permanecen en estado sólido después de la transferencia de electrones; p.ej., los óxidos metálicos y los polímeros conductores [40].

Entre los óxidos metálicos más relevantes se encuentra el óxido de tungsteno (WO_3), sus primeros reportes datan de 1969 por S. K. Deb [41] y destacan debido a su eficaz coloración explicada con una simple reacción (Ecuación 9):



donde $M^+ = H^+, Li^+, Na^+$ o K^+ . De esta manera, cuando se incorporan electrones al WO_3 , pueden transformarse reversiblemente en un material con propiedades radicales, los cuales llevan al menos un electrón en su última capa, siendo de esta forma más absorbente si el material está desordenado y/o es reflectante de radiación infrarroja si es muy cristalino [42].

Este cambio sucede debido a la estructura cúbica del WO_3 y puede describirse como un tipo de perovskita vacía que forma octaedros de WO_6 ; asimismo, se genera WO_5 al reducirse mediante la inyección y extracción de electrones de Li^+ H^+ , etc., propiciando un cambio de coloración de transparente a un color azulado [42]. De esta manera, el cambio de coloración puede ser controlado de mejor manera mediante el paso de corriente a través de un sistema electrónico conectado a las películas, lo cual es funcional en ventanas inteligentes, ya que absorbe la radiación infrarroja al cambiar de color, pero sin permitir su transporte al otro lado de la ventana.

2.7. Materiales Termocrómicos.

Los materiales termocrómicos también destacan en el ámbito de las ventanas inteligentes, siendo aquellos que cambian de color en función de la temperatura, pero además pueden reducir el paso de la radiación infrarroja. La temperatura de transición de fase de estos materiales es de suma importancia por el tipo de aplicación, ya que debe ser lo suficientemente baja para bloquear la radiación cuando el ambiente sea demasiado caliente para los seres humanos y lo suficientemente alta para evitar el bloqueo de la radiación cuando el ambiente sea frío.

Entre los materiales termocrómicos más prometedores para ventanas inteligentes se encuentra el óxido de vanadio (VO_2). Su cambio de coloración de verde claro a verde oscuro ocurre por un cambio de fase reversible de aislante (fase monoclinica, $a= 5.75 \text{ \AA}$, $b= 4.52 \text{ \AA}$, $c= 5.38 \text{ \AA}$, $\alpha = \gamma = 90^\circ$, $\beta = 122.6^\circ$) a metal (fase tetragonal y/o Rutilio, $a=b= 4.55 \text{ \AA}$, $c= 2.86 \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) a los 68°C (341K). En la fase Tetragonal/Rutilio, los átomos de V ocupan el punto reticular de la estructura cúbica centrada en el cuerpo, ubicándose en el centro de un octaedro inclinado VO_6 con cuatro de los seis átomos de oxígeno localizados cerca del átomo de V a una distancia de 1.92 \AA y 1.93 \AA , mientras que la distancia entre átomos de V es de 2.851 \AA . Durante el cambio de fase, los átomos de V

producen dos movimientos: alargamiento en los octaedros VO_6 y acercamiento entre átomos del V (3.125 \AA Y 2.654 \AA) como se muestra en la Figura 8 [43].

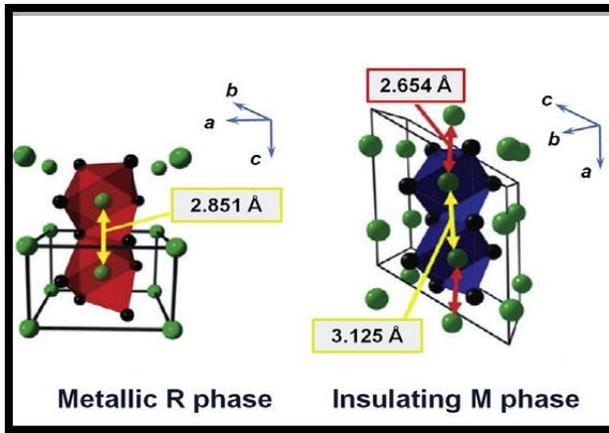


Figura 8.- Esquema de estructura atómica del óxido de vanadio en fase R y M (adaptado de [22]).

Las propiedades ópticas de las partículas de óxido de Vanadio depositadas en un vidrio como material termocrómico pueden ser caracterizadas en términos de: (i) transmitancia luminosa (T_{lum} de $380\text{--}780\text{nm}$); (ii) modulación de energía solar (ΔT_{sol} de $240\text{--}2500 \text{ nm}$), que se refiere a la diferencia entre la transmitancia de energía solar antes y después del cambio de fase; (iii) la energía solar transmitida (T_{sol}). La T_{lum} contribuye al ahorro de energía en iluminación, mientras que la ΔT_{sol} determina la eficiencia de la conservación de la energía; sin embargo, estas dos variables tienen una relación de compensación, dificultando que ambos alcancen un valor aceptable, por lo cual la mayoría de los estudios de dispositivos termocrómicos se han centrado en este aspecto. Las soluciones reportadas involucran tres enfoques: (i) la optimización de las películas, (ii) el diseño de la microestructuración de la película y (iii) la formación de nanocompuestos, siendo el (i) el más interesante debido a que permite utilizar (ii) y (iii) para maximizar el desempeño energético de las películas, los procesos de elaboración, etc. [43].

2.8. Materiales Fotocrómicos.

Estos materiales presentan la habilidad de cambiar de color debido a la inyección de carga eléctrica, la irradiación de luz y el cambio de temperatura. Asimismo, el fotocromismo depende de la interacción de los electrones con los fotones y se basa en la disponibilidad de agua, mientras que el termocromismo depende de la interacción entre los electrones y los fonones [44]. El óxido de molibdeno (MoO_3) es un óxido metálico con propiedades cromogénicas (termocrómicas, fotocromicas y electrocromicas) que cambia de color transparente a azul grisáceo y se aprovecha en aplicaciones de electrónica, óptica, fenómenos catalíticos, así como en la fabricación de baterías de litio y en celdas solares [45].

La irradiación de MoO_3 con luz (2.7 eV) genera el movimiento de los electrones de valencia a la banda de conducción, resultando en la generación de pares de electrones huecos. Los protones necesarios para la coloración son proporcionados por una reacción con el agua ambiental absorbida en la superficie o en el interior de la película y la porosidad disponible (Figura 9). Posteriormente, los protones producidos se difunden en la estructura del MoO_3 bajo el campo eléctrico producido por el resto de los electrones en la película. Finalmente, los electrones fotogenerados se posicionan en la banda de conducción del MoO_3 y los protones dan como resultado el cambio de color [46] el cual se presenta a partir de los 40 minutos de irradiación [47].

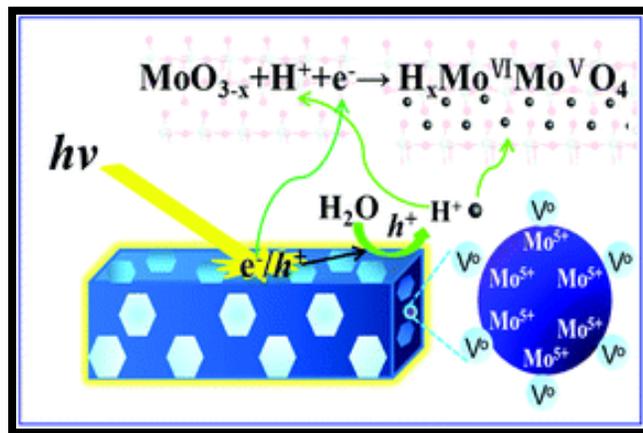


Figura 9.- Efecto fotocromico del MoO_3 (adaptado de [24]).

2.9. Métodos de deposición.

Debido a los problemas de cambio climático, actualmente destacan los métodos y técnicas optimizados para el desarrollo de materiales que minimizan la energía utilizada y, por lo tanto, la disminución de gases de efecto invernadero y el consumo intensivo de recursos naturales [48]. Esto incluye los métodos para el crecimiento de películas, ya sean de origen físico, fisicoquímico, químico, mecánico o combinaciones de estas, p.ej.: la técnica sputtering [49-50], deposición por vapor químico [51], sol-gel [52] y la deposición por láser [53], las cuales fueron las primeras que se utilizaron para el crecimiento de películas. Sin embargo, presentan desventajas como el requerimiento de equipo especializado requerido que consumen las grandes cantidades energía para propiciar el depósito de los materiales. A raíz de esto, existe la necesidad de desarrollar nuevas alternativas para el depósito de películas.

La técnica de spray se ha destacado en el campo de los nanomateriales funcionalizados para varias aplicaciones, ya que se puede controlar la distribución de tamaño partícula y la forma, así como algunas propiedades como consecuencia. Adicionalmente, existen diferentes métodos de deposición basadas en soluciones tales como la fundición por gota, fundición por inmersión, recubrimiento por inmersión, recubrimiento por rotación [54], las cuales no requieren de equipos especializados para su depósito y, por lo tanto, consumen menos energía.

El estudio de sistemas para lograr la dispersión de los materiales es parte fundamental para la aplicación de la técnica de spray por ser el medio de transporte de las partículas hasta la superficie a depositar. Este sistema considera la dispersión de partículas en periodos prolongados de tiempo, así como la fácil modificación de los tamaños de partículas mediante ultrasonido. Asimismo, las propiedades de los materiales en dispersión se ven influenciadas por los solventes utilizados, ya que estos propician fuerzas de polarización o de van der Waals entre

las nanopartículas, condicionando la dispersión y en la distribución de los tamaños de partícula.

2.9.1. Sistemas de dispersión.

Un sistema de dispersión es una mezcla física de dos o más sustancias, siendo la fase dispersa distribuida en forma de partículas en el medio de dispersión. Este sistema resulta de las todas las posibles combinaciones de los estados o fases de la materia (sólido, líquido y gas) (Tabla 2) [55] y su estudio se ha intensificado en industrias como la alimentaria y la medicina debido a las necesidades de estas industrias para la creación nuevos productos [56].

Tabla 2.- Sistemas de dispersión en función de las combinaciones de estados o fases de la materia.

Medio de dispersión	Fase dispersa	Ejemplos
Gas	Líquido	Aerosol y Niebla
Gas	Sólido	Humo y Aerosol
Líquido	Gas	Espuma
Líquido	Líquido	Emulsión
Líquido	Sólido	Solución, Coloide y Suspensión
Sólido	Gas	Espuma dura
Sólido	Líquido	Gel y Emulsión sólida
Sólido	Sólido	Aleación

Los sistemas de dispersión son clasificados en función al tamaño de partícula de la fase dispersante en soluciones (0.1-1.0nm), coloides (1-100nm) y dispersiones (Mayor a 100nm) [57]. Sus características particulares son:

(i) Las disoluciones son mezclas homogéneas con tamaño de partícula igual a un átomo de 1-100 nm, son traslúcidas, no sedimentan en reposo y no pueden ser separadas por filtración [57], P.ej., la mezcla de sal (NaCl) y agua H₂O, aunque inicialmente el Na y el Cl están ligados en conjunto bajo la forma de un cristal, estos son disueltos por las moléculas del agua al mezclarse debido a los

enlaces electrostáticos que existen entre las partículas cargadas y/o polarizadas. Las moléculas de agua son eléctricamente neutras, pero su geometría las hace polarizables, provocando que los iones de Na^+ y Cl^- se separen bajo la fuerte atracción de las moléculas de agua [58].

(ii) Los coloides son mezclas intermedias entre las homogéneas y las heterogéneas con tamaño de partícula de 100-1000 nm que no se ven a simple vista, no se sedimentan en reposo ni se pueden separar por filtración y presentan el efecto Tyndall (dispersan la luz al intentar atravesarlas con un haz). Asimismo, los coloides se clasifican de acuerdo con la fase dispersa y el medio de dispersión: algunos ejemplos son las nubes, la crema batida, la mayonesa, las jaleas y la mantequilla [57].

(iii) Las dispersiones son mezclas heterogéneas con tamaños de partícula superiores a los 1000 nm que se pueden observar a simple vista y se pueden sedimentar, ya que las partículas suspendidas son más densas que el fluido, separándose por gravedad después de un tiempo suficiente. Algunos ejemplos son los antiácidos, los jugos de frutas naturales y los antibióticos en suspensión [57].

El estudio de los sistemas de dispersión depende de factores que influyen a un nivel molecular como la solubilidad, la cual es la capacidad que posee una sustancia para disolverse en otra para formar un sistema homogéneo. Este término designa cuantitativamente al fenómeno cualitativo del proceso de disolución mediante la concentración de las soluciones. Cabe resaltar que no todas las sustancias se disuelven en los mismos disolventes, p.ej., el agua es solvente de la sal, pero no del aceite [59].

Por otra parte, las sustancias polares o apolares son relevantes en los sistemas de dispersión, ya que determinan la capacidad de solubilidad, es decir, una sustancia polar se disuelve en un solvente polar, mientras que una sustancia apolar se disuelve en una sustancia apolar. Por esta razón las sustancias orgánicas como los ácidos o las sales que son polares se disuelven en el agua,

la cual es un solvente polar; por el contrario, sustancias como la parafina (orgánico apolar) se disuelve en la gasolina (solvente orgánico apolar) [59]. Este fenómeno depende de las fuerzas intermoleculares, es decir, una solución se produce porque las moléculas del disolvente superan las fuerzas de enlace intermolecular de la fase dispersa, rodeándolas y generando diferenciales en las fuerzas de atracción. Las moléculas se quedarán juntas si son fuertemente atraídas, excluyendo a las moléculas débilmente atraídas, en las cuales ocurre la inmiscibilidad (p.ej., el agua y el aceite) [60].

2.9.2. Fuerzas de Van der Waals

Este tipo de enlaces también se denominan secundarios o físicos, los cuales son débiles en comparación con los enlaces primarios o químicos, siendo su energía de enlace del orden de los 10 kJ/mol (0.1 eV/átomo). Estos enlaces surgen de los dipolos atómicos o moleculares y aparecen si hay alguna separación entre las regiones positivas y negativas de un átomo o molécula (Figura 10), siendo el resultado de la atracción entre el extremo positivo de un dipolo y la región negativa del dipolo contiguo como en el caso de la interacción entre los dipolos inducidos y los dipolos permanentes [61].

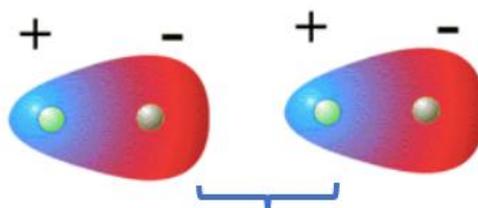


Figura 10.- Esquema de un dipolo atómico o molecular (adaptado de [61]).

2.9.3. Enlace de dipolo inducido fluctuante.

En una molécula con carga eléctrica simétrica se puede crear un dipolo inducido por la distribución espacial de los electrones con respecto de los núcleos cargados positivamente, causando distorsiones instantáneas en la simetría eléctrica de los átomos y moléculas que provocan pequeños dipolos eléctricos

temporales (Figura 11). Además, los dipolos suelen desplazar la distribución electrónica de átomos o moléculas próximas generando otro dipolo que se enlaza débilmente al primero, pero con una magnitud que fluctúa con el tiempo [61].

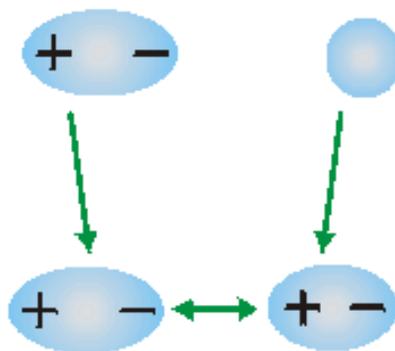


Figura 11.- Esquema de un dipolo inducido fluctuante (Adatado de [61]).

2.9.4. Enlace de dipolo inducido - molécula polar.

En las moléculas polares existen dipolos permanentes como consecuencia de la distribución asimétrica de regiones cargadas positiva y negativamente, las cuales pueden inducir dipolos en las moléculas apolares próximas (Figura 12) [61].

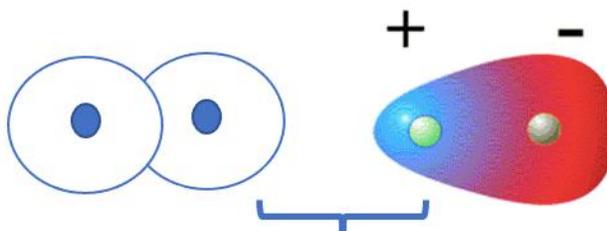


Figura 12.- Esquema de un dipolo inducido – molecular polar (adaptado de [61]).

2.9.5. Enlace con dipolos permanentes.

Este enlace se da entre moléculas polares adyacentes y las energías de enlace asociadas son significativamente mayores de comparación con los enlaces entre dipolos inducidos. De hecho, el enlace por puente de hidrógeno es un caso particular del enlace de una molécula polar que ocurre entre hidrógenos unidos al oxígeno en el enlace de dos moléculas de agua. Así, el hidrógeno de enlace en un extremo de la molécula es esencialmente un protón que genera una elevada fuerza de atracción con el extremo negativo de una molécula adyacente (Figura 13). En este caso, la energía de enlace es generalmente mayor que otros tipos de enlaces secundarios (51 kJ/mol o 0.52 eV/molécula), afectando directamente las temperaturas de fusión y ebullición [61].

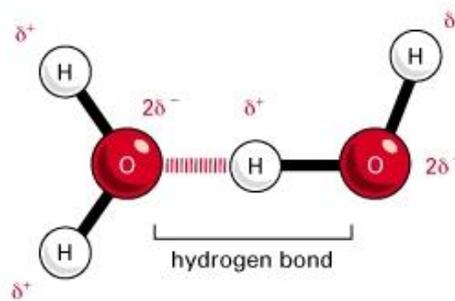


Figura 13.- Enlace de hidrogeno

CAPITULO III ANTECEDENTES

3.1. Envolventes en edificios.

Desde la prehistoria, los primeros habitantes de las cavernas utilizaban estos espacios naturales para protegerse de las inclemencias climáticas y de los enemigos, utilizando el fuego para cocinar y para calentarse, lo cual fue el primer sistema para modular el confort térmico debido al clima frío del exterior. Estos sistemas de confort fueron evolucionando, siendo una necesidad prioritaria en regiones con condiciones climáticas relativamente extremas; no obstante, lamentablemente en nuestros días estas condiciones extremas se están normalizando en más regiones debido a los efectos de cambio climático [48]. Por lo tanto, la eficiencia energética de las edificaciones es un tema central para buscar un equilibrio entre la industria de la construcción y el desarrollo sostenible de las ciudades, lo que llevó a la comunidad científica e industrial a desarrollar estrategias como el diseño eficiente y optimización de los materiales y elementos constructivos para incidir positivamente en las envolventes de las edificaciones [62].

Las envolventes se pueden definir como la separación del clima del interior con el exterior de una edificación, propiciando un confort térmico adecuado en el interior frente a las inclemencias del ambiente exterior. Por lo tanto, una envolvente abarca todo el sistema de construcción exterior, el cual se compone principalmente de materiales elaborados con base en arcillas, concreto y vidrio. El estudio de la eficiencia energética de los elementos constructivos requiere de un mejor entendimiento del comportamiento de los materiales utilizados en las envolventes ante los cambios del clima [62].

En general, el efecto de interés de los materiales que afectan el desempeño energético de las envolventes depende de las interacciones

asociadas con los fotones. Estas partículas de luz transmiten la radiación electromagnética solar, lo cual modifica los niveles de energía de los electrones de los materiales, es decir, cuando los fotones penetran en el material y los electrones se excitan, obtienen una energía suficiente para saltar de nivel; este salto de nivel electrónico consume la energía conforme el haz de fotones llega al otro lado del área irradiada. En el caso de sistemas transparentes, la energía irradiada no es suficiente para promover el cambio del nivel electrónico, por esta razón la energía no se consume y el haz de fotones atraviesa a través del mismo material sin pérdidas significativas de energía.

Por otra parte, es importante mencionar que la búsqueda de soluciones para reducir el consumo de energía en las edificaciones también presenta retos a nivel industrial ya que los diseñadores de proyectos sostenibles, los constructores e inversores tienen objetivos económicos contradictorios. La fase de diseño conceptual de un edificio proporciona oportunidades significativas para que los diseñadores minimicen la subjetividad en la toma de decisiones para que el diseño sea sostenible, considerando la selección de materiales alternativos para las envolventes para lograr edificios de alta eficiencia energética. Incluso, se debe mencionar que la modelación es una herramienta potente que ya está disponible en este campo y permite predecir el comportamiento energético de un edificio a lo largo de su vida útil [63]. No obstante, en países en desarrollo como México, los constructores e inversionistas aún perciben estas tecnologías como inasequibles y complicadas de utilizar, por lo que se requiere trabajar en tres ejes principales: (i) una mayor difusión de los beneficios de estas tecnologías, lo cual requiere de complementar el estado del arte en este campo; (ii) desarrollar tecnologías de fácil aplicación, disminuyendo los costos de fabricación de materiales y su implementación a escala industrial, lo cual también favorece el desarrollo de sistemas de capacitación más sencillos y atractivos; (iii) optimizar los modelos de negocio para minimizar los tiempos de retorno de inversión al implementar estas tecnologías [64]. Cabe resaltar que esta investigación contribuye principalmente al desarrollo del estado del arte en el campo de los materiales alternativos para lograr la eficiencia energética de los edificios de fácil elaboración y aplicación.

A nivel internacional, existen diversas investigaciones que demostraron los beneficios técnicos y económicos asociados con la optimización de la eficiencia energética con énfasis en los sistemas de ventanas de envolventes en edificios. Por ejemplo, Yalçın Yasbaş y col. [65] evaluaron la influencia de distintos tipos de ventanas en el consumo de energía de los edificios y su efecto económico, concluyendo que un vidrio completamente transparente asoció un 40% más de energía para enfriar la zona de estudio en temporadas de calor. Por su parte, Hassouneh y col. [66] estudiaron el efecto del vidrio transparente de diferentes áreas en un edificio, encontrando que la pérdida de energía varió entre un 25% y 50% en función de la superficie por el vidrio. Además, algunos estudios recomiendan que el área cubierta por vidrio en las envolventes debe ser del 10% al 20% en climas moderados [67].

Por otra parte, la calidad de iluminación de los espacios juega un papel muy importante en los aspectos psicológicos relacionados con la productividad, el sueño y la salud en general, impactando en el estado de ánimo de los individuos [68]. Por esta razón, la presencia de la iluminación natural es objeto de estudio en el mejoramiento del confort térmico dentro de los edificios. Por ejemplo, está reportado que el consumo de iluminación representa del 25% al 35% del consumo total de energía de los edificios [69], mientras que otros estudios demostraron que el paso de la luz natural reduce este consumo de energía entre un 50% y 80% [70]. Por lo tanto, promover la eficiencia energética en los vidrios de las ventanas representa un impacto importante tanto a nivel económico como social, por lo que se requieren nuevas tecnologías que optimicen el aprovechamiento de la gran cantidad de energía que incide sobre estos, sobre todo en las envolventes de los edificios de gran altura.

3.2. Películas Delgadas.

Los primeros reportes del uso de películas delgadas datan de hace más de 5000 años en la edad de bronce y es atribuido a los egipcios, los cuales

utilizaban recubrimientos de oro para aplicaciones decorativas, básicamente porque este metal es muy blando como para fabricar herramientas o armas. Posteriormente, en el año 100 a.C se desarrolló en Perú un baño de oro en ausencia de una fuente de electricidad, aprovechando reacciones autocatalíticas [71].

No obstante, la evolución en este campo hasta la actualidad existe la necesidad de desarrollar materiales modificados superficialmente con el propósito de controlar su desempeño y alcanzar unos requerimientos de diseño específicos. Esto dio lugar a la ingeniería de superficies como la rama de la ciencia que se enfocó en el desarrollo de las tecnologías para modelar y controlar el acabado superficial de los materiales, logrando el desempeño óptimo de las propiedades en la superficie, ya sean magnéticas, químicas, eléctricas, electrónicas, físicas o mecánicas.

Entre las aplicaciones de las películas delgadas, destacan las relacionadas con su buena resistencia al desgaste y a la corrosión, las cuales se realizan mediante el depósito de películas en las superficies de los materiales, promoviendo el avance de industrias como la aeroespacial, biomédica, energética, militar, mecánica, etc. De igual forma, el recubrimiento con películas delgadas es esencial para lograr diversos efectos ópticos como filtrar interferencias en los paneles solares mediante el uso de materiales con un alto coeficiente de refracción y absorción, permitiendo soportar una intensidad de radiación extremadamente alta, pero sin degradarse o llegar a la fallar, incluso aumentando su eficiencia durante su uso [72]. Asimismo, el depósito de películas en el vidrio también representa una buena alternativa para inducir un cambio en las propiedades ópticas útiles en su aplicación como ventanas, esto con la finalidad de mejorar la eficiencia energética dentro de los edificios mediante el uso de materiales termocrómicos, fotocromicos o termofotocromicos tal como se describe a continuación.

3.2.1. Películas Termocrómicas.

El uso de materiales termocrómicos se ha reportado en distintos campos del conocimiento, p.ej., Joseph y col. [73] desarrollaron en el año 2020 una mezcla polimorfa con base en el molibdato de cobre (CuMoO_4) que se utilizó como sensor para la detección del punto de ebullición del agua. Asimismo, en China se desarrolló un nuevo reactor solar utilizando un autoregulator de temperatura elaborado con micro alambres de yoduro de cesio y plomo (CsPbI_3) debido a su sensibilidad de respuesta [74]. Por otro lado, en el ámbito de la construcción también se han usado materiales termocrómicos para visualizar las variaciones de temperatura mediante el cambio de coloración en la superficie de los especímenes de mortero fabricados con base en cemento Portland (Figura 14). El compuesto inorgánico que se utilizó fue Pyrofosfato de Manganeso III de Amonio ($\text{MnNH}_4\text{P}_2\text{O}_7$), el cual presentó un cambio de color reversible entre los 120°C y 340°C , así como una fase irreversible de 340°C - 460°C [75].

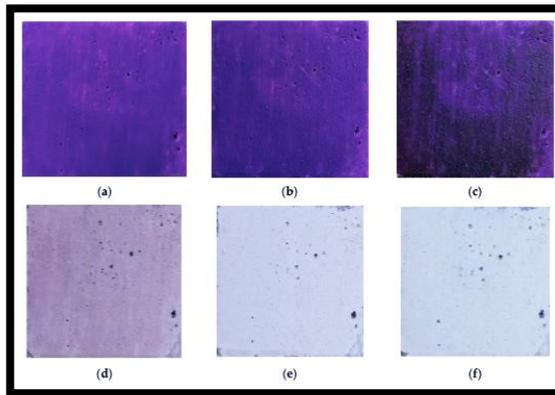


Figura 14.- Aplicación de un material termocrómico en la superficie de unos morteros. El cambio de color se midió (a) 25°C ; (b) 100°C , (c) 200°C , (d) 300°C , (e) 400°C y (f) 450°C (adaptado de [75]).

Cabe señalar que la temperatura de transición de materiales termocrómicos es la característica de principal interés durante el estudio de los materiales termocrómicos, ya que permite determinar una posible aplicación industrial. Sin embargo, los materiales que presentan una a temperatura de transición baja no son muy comunes, por lo que su desarrollo permitiría nuevas aplicaciones. Por ejemplo, el hexabromuro de tetraesio y plomo (Cs_4PbBr_6), el

tetraiodomercurato de plata (Ag_2HgI_4) y el yoduro de mercurio cuproso (Cu_2HgI_4) y son materiales termocrómicos con una temperatura de transición baja de 25, 50 y 70 °C, respectivamente, lo cual es atribuido a un cambio en su estructura cristalina [76].

Interesantemente, los materiales termocrómicos con baja temperatura de transición también permiten la optimización de propiedades ópticas como la transmitancia y modulación solar en las ventanas, siendo objeto de estudio en el campo de la eficiencia energética de los edificios [77]. Por lo tanto, el VO_2 es un material termocrómico de mayor importancia para la comunidad científica debido a su baja temperatura de transición de 68°C. No obstante, esta temperatura puede disminuir cerca de los 53° a 58°C dependiendo de las características microestructurales como el tamaño de partícula depositado en el vidrio, el cual puede llegar a los 40 nm [78]. Incluso algunos autores, han alcanzado una la temperatura de transición a los 20°C mediante el dopaje con distintos materiales (Tabla 3) [49,79-80].

De esta forma, el uso de VO_2 es una alternativa prometedora para ser aplicado en el vidrio de ventanas, sin embargo, también presenta algunas desventajas relacionadas con elevado su estado de oxidación, el cual limita la eficacia de su deposición directa. Así, algunos autores han combinado el VO_2 con otros materiales, p.ej.,, Huaijuan Zhou y col. [81] desarrollaron una película compuesta de VO_2 y ZnO por medio de pulverización catódica sobre un sustrato de vidrio; esta película delgada aumentó notablemente la eficiencia de la T_{sol} de 7.7% a 12.2%, alcanzando además una buena T_{lum} de 50.3% (Figura 15). En este caso, la capa superficial de ZnO funcionó como una barrera de protección tanto antibacteriana como ante la oxidación del VO_2 , disminuyendo la liberación de iones V [81]. Otro estudio evaluó las propiedades del VO_2 dopado con ZnO , exhibiendo un efecto positivo en la T_{sol} que alcanzó un 15.27%, pero además se logró reducir la temperatura de transición [82]. Por otro lado, G. Pan y col. [83] desarrollaron mezclas de $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$, ZnO/SiO_2 y TiO_2/ZnO para evaluar su durabilidad y transmitancia en función de la temperatura, siendo TiO_2/ZnO la que presentó una alta actividad antioxidante. Estos resultados sugieren que la

durabilidad de una película de VO₂ adicionados con ZnO depositados sobre un sustrato de vidrio es prometedora para aplicaciones como las ventanas inteligentes, los sensores de radiación infrarroja, y la formación de imágenes a partir de radiación infrarrojas. Por lo tanto, estos estudios muestran el efecto positivo del uso de ZnO en forma de multicapas, esto sienta bases importantes para su exploración en combinación con otros materiales y su posible efecto positivo que puedan brindar a este campo de estudio.

Tabla 3.- Efecto del dopaje en el VO₂ (adaptado de [80])

Grupo	Dopante	Nivel de dopaje (%)	Tlum (%)	ΔT Sol (%)
IA	H	3	-	-
	Li	3	-	-
	NA	3	-	-
	K	3	-	-
IIA	Be	3	-	-
	Mg	5	82.1	4.8
	Ca	1.3	-	7.6
	Sr	9.6	54.3	5
	Sr	6.8	50.3	6.5
	Ba	8.3	-	7.5
IIIA	B	-	-	-
VIIA	F	2.93	48.7	10.7
Metal de Transición	W	2	45.1	6.9
	Mo	2	-	-
	Nb	2-3	-	-
	Zr	9.8	60.4	14.1
	Ti	1.1	53	17.2
Tierras Raras	Eu	4	54	6.7
	Tb	4	65.9	4.6
	La	4	50.1	10.3
Co-dopamiento	Mg+W	4%Mg + 2%W	81.3	4.3
	F+W	2.1%F + 1.8%W	-	-
	Zr+W	8.5%Zr + 0.6%W	56.4	12.3
	Mo+W	1.02%Mo + 0.36%W	-	-

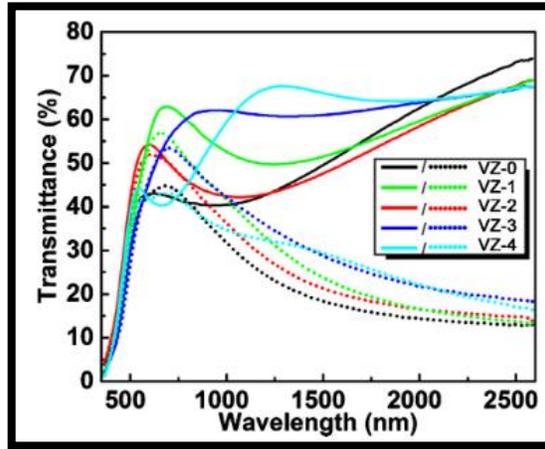


Figura 15.- Transmittancia de una película de VO₂/ZnO con diferentes espesores (la línea sólida muestra los resultados a 25°C, mientras que la línea punteada representa los resultados a 100°C) (adaptado de [29]).

En este contexto, Powell y col. [84] evaluaron un arreglo en multicapas usando como base el sistema VO₂/SiO₂/TiO₂, alcanzando una T_{sol} del 35% al 50% asociada con la NIR, así como una alta transparencia y resistencia a la abrasión en comparación con utilizar capas de VO₂. Por otro lado, se reportó el efecto del dopaje del ZnO con aluminio (Al), Vanadio (V) y Niobio (Nb), resultando en una transmittancia del 95% en la radiación visible, pero con un bloqueo total de radiación UV [85]. Lo anterior sugiere que la combinación de los óxidos permite una regulación adecuada de la radiación infrarroja, además del acceso de la mayor cantidad de luz visible al interior de los edificios, lo cual es de interés por la reducción potencial de los costos por iluminación artificial durante las horas de tiempo en el día. No obstante, falta investigación en el uso de dos o más óxidos en forma de multicapa y evaluar el efecto que tendrían entre los tres por separado e incluso juntos.

Con respecto de la evaluación de los índices energéticos, los reportes relacionados con VO₂ son relativamente recientes. Por ejemplo, Laaksonen y col. [86] evaluaron las nanopartículas de TiO₂ y VO₂, obteniendo una T_{lum} del 60%, una T_{sol} del 35% y un cambio de coloración a los 30 °C [80]. Por otro lado, Liu y col. [87] estudiaron el efecto de un sistema multicapa de SnO₂/VO₂/SnO₂, alcanzando una T_{lum} del 50.2% y una T_{sol} del 15.3%. Asimismo, se han estudiado

las constantes ópticas del índice de refracción de los materiales con base en VO₂, resultando en valores entre 1.6 y 2.3 [88]. En conclusión, en esta sección se pudo observar avances en cuanto a la aplicación de ventanas inteligentes, así como los sus índices energéticos que estos podrían aportar, sin embargo, también se muestran algunos huecos en el conocimiento que este trabajo tiene a la tarde de investigar para el beneficio del campo de estudio.

3.2.2. Películas Fotocrómicas.

Los materiales fotocromicos son de interés para su aplicación en ventanas inteligentes debido a su pasividad y cambio de color, el cual es reversible con la incidencia de la radiación del sol, p.ej., en los anchos de banda de 1.5 a 3 eV para el MoO₃ [89]. Este óxido resalta como uno de los primeros materiales estudiados en este campo por sus propiedades electrocromicas [90] y fotocromicas [91], que han funcionado para la fabricación de sensores (p.ej., para la detección del amoniaco y otros gases) [45,92]. Asimismo, el MoO₃ se ha utilizado en conjunto con TeO₂, AgI, Ag₂O, P₂O₅, etc. [93-95], para la fabricación de vidrio con una conductividad térmica mejorada, siendo la aplicación de películas delgadas de MoO₃ la mejor opción actualmente. Se ha observado que la combinación con dos óxidos ha dado buenos resultados al efecto fotocromico del MoO₃, ya que esto puede ayudar a mejorar sus propiedades e incluso dotar de otras propiedades que no se tienen.

Con respecto de materiales compuestos de MoO₃/ZnO, se ha estudiado su desempeño, p.ej., Andron y col. [96] reportaron que el efecto del ZnO como semiconductor fue cederle electrones requiriendo una cantidad de energía comparativamente menor con respecto del MoO₃, acelerando el cambio de color. Otros materiales como el CdSe generaron este fenómeno al formar multicapas con el MoO₃, resultando en una energía requerida de 1.7eV [97]. Igualmente, al dopar el MoO₃ con tungsteno (W) se redujo la intensidad de radiación solar requerida de 3.56 eV a 3.32 eV para lograr el cambio de coloración, así como una transmitancia de luz visible de un 50% y una T_{sol} hasta por un 35% [98]. En

cuando a estas combinaciones, ha faltado explorar la forma en cómo se combinan estos materiales y conocer cómo influye cada una de ellas en las respuestas fotocromáticas del MoO₃.

Sabbarayudu y col. [99] estudiaron la influencia de la deposición por sputtering en las propiedades estructurales, eléctricas y ópticas del MoO₃, alcanzando una transmitancia óptica de un 85% en los rangos de luz visible. Otros estudios mostraron que el efecto fotocromático del MoO₃ depende de las características microestructurales como el espesor de la película y el tamaño de partícula [100]. Con respecto del efecto de utilizar multicapas, D Jung y col. [101] estructuraron materiales de MoO₃/Ag/MoO₃, obteniendo una transmitancia visible y una T_{sol} de hasta 80% y 40%, respectivamente. El estudio microestructural de los materiales depositados se ha vuelto muy importante para dilucidar el efecto causado por cada material, lo cual debe considerarse como un estudio fundamental al combinar distintos elementos en el vidrio.

3.2.3. Películas Termo-fotocromáticas.

Esta opción de películas delgadas implica el crecimiento en un sustrato de vidrio usando dos materiales crómicos distintos que se activen por estímulos independientes, es decir, combinando los efectos térmico y fotocromáticos; no obstante, resalta que existen pocos reportes del estudio de películas que utilicen tres óxidos para lograr el efecto termo-fotocromático al ser un campo en desarrollo actual conforme a la bibliografía revisada. Por ejemplo, Zhang y col. [102] evaluaron una monocapa de hidruro de itrio (YHx:O) y óxido de tungsteno (WO₃), alcanzando tiempos de 10 minutos bajo iluminación para el cambio de coloración, lo cual es muy eficiente considerando su aplicación en ventanas, igualmente el efecto termo-fotocromático resultó interesante ya que la T_{sol} ocurrió como función de la iluminación y el calentamiento del material. Por otro lado, Ding Cao y col [4] desarrollaron una película termo-fotocromática conocida como PTCSWs (por sus siglas en inglés), usando como base el alcohol polivinílico (PVA), tintas termocrómicas, nanocristales y nano tiras de oro. Esto permitió un

efecto combinado de coloración en respuesta a la temperatura y la luz solar (Figura 16). La coloración en la película se puede ajustar modificando la composición química y el prototipo de la ventana se evaluó en condiciones exteriores reales. Sin duda alguna, la combinación de dos materiales que efectos distintos mecanismos de coloración se vuelve muy interesante para el campo de estudio, ya que no solo aportarían distintas propiedades, sino que probablemente sean benéficas para su coloración.

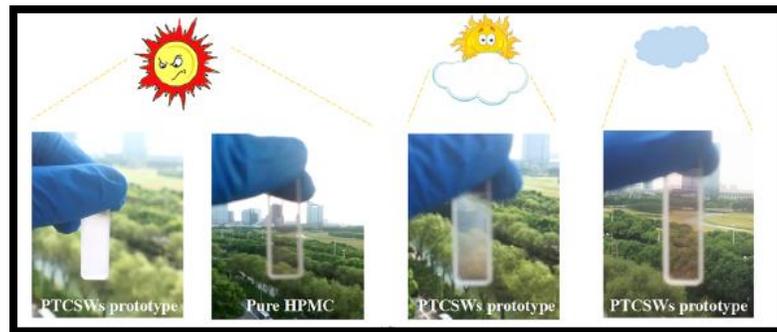


Figura 16.- Fotografías digitales de los materiales termo-fotocrómicos de PTCSW y de Hidroxipropil metilcelulosa (HPMC). De izquierda a derecha, las fotografías corresponden a un día de verano, luz suave del sol y un día nublado (adaptado de [9]).

3.2.4. Métodos de deposición alternativos.

El método de deposición modifica las características de las películas elaboradas con base en nanopartículas, influyendo directamente en el espesor y la porosidad, además del tamaño de las nanopartículas depositadas [103]. Específicamente la porosidad afecta la T_{sol} , ya que el paso de la radiación solar sin cambio alguno en la modulación será mayor conforme la concentración y el tamaño de los poros sean mayores.

No obstante, se debe mencionar que las técnicas de deposición como sputtering, deposición química de vapor, entre otras, son relativamente costosas y requieren equipo especializado, lo cual dificulta su aplicación industrial. Por lo tanto, es necesario el desarrollo de técnicas de deposición más sencillas para elaborar películas delgadas en sustratos de vidrio de ventana con el fin de

volverlas más asequibles y de fácil aplicación. Así, la técnica de espray es un método versátil y simple para la deposición de materiales que minimiza la cantidad de energía requerida en el proceso. Para usar esta técnica se requiere preparar una dispersión estable de los materiales a depositar, usando el menor tamaño de partícula que sea posible, lo cual puede lograrse mediante la aplicación de energía ultrasónica. De este modo, la selección de los dispersantes es fundamental ya que permitirán una mayor o menor dispersión de las partículas. Existen reportes de que el etilenglicol e isopropanol son dispersantes adecuados para óxidos metálicos como el Al_2O_3 [104], el TiO_2 [105], entre otros, lo cual sugiere que podrían utilizarse para dispersar MoO_3 , VO_2 y ZnO .

CAPITULO IV MATERIALES Y MÉTODOS

En general, este trabajo se dividió en tres etapas (Figura 17):

(i) La primera etapa se centró en encontrar el dispersante que proporcionó la mejor estabilidad a los óxidos metálicos de VO_2 , MoO_3 Y ZnO a fin de lograr un depósito homogéneo por la técnica del espray. Por lo tanto, se desarrollaron y caracterizaron diferentes dispersiones, considerando la evaluación del tamaño máximo de partícula y su potencial zeta. Además, se evaluó el efecto de distintos dispersantes con una temperatura de evaporación baja a diferentes horas de sonicación con el objetivo de encontrar las condiciones adecuadas para lograr la aplicación de la técnica y evaluar su efecto sobre las propiedades ópticas de las películas obtenidas posteriormente.

(ii) La segunda etapa consistió en estructurar las películas delgadas en multicapas, intercalando los óxidos metálicos con las fases cristalinas adecuadas para garantizar su funcionalidad termo-fotocrómica.

(iii) En la tercera etapa se analizaron las propiedades térmicas del vidrio + película delgada tales como la conductividad del material (U), el coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC) y la transmitancia de luz visible (T_{vis}). Posteriormente, se realizó una evaluación de la eficiencia energética del vidrio + película delgada aplicado considerando las envolventes de los edificios utilizando el software de simulación energética DesignBuilder.



Figura 17.- Diseño experimental para la evaluación de las películas inteligentes de VO₂, MoO₃ Y ZnO.

4.1. Preparación de las dispersiones.

Una de las propiedades importantes en el estudio de las dispersiones es la interacción atómica entre el dispersante y el compuesto, lo cual varía según la carga o el voltaje de cada partícula en su última capa debido a su naturalidad, este fenómeno se comporta distinto para cada caso [106]. Por esta razón, se analizaron distintos dispersantes para cada uno de los óxidos metálicos a una concentración de 10 mg/mL. Las dispersiones se prepararon mediante un baño ultrasónico a 1, 2, 3, 4, 6 y 8 horas, mientras que la temperatura se mantuvo entre 30-40 °C, usando un baño ultrasónico Branson CPX5800H (40 kHz y 115 V). Después de la sonicación, las dispersiones se centrifugaron durante 30 minutos a 4000 rpm, usando una máquina centrífuga (CF-800-1) de Hardware Factory Store.

Los dispersantes seleccionados fueron: agua destilada (referencia), isopropanol (marca Alatov, con 99% de pureza), etilenglicol (marca DEQ, con 99% de pureza), polietilenglicol 400 (marca DEQ, con 99% de pureza). Cabe mencionar que existen otras variables de importancia que están relacionadas con el fenómeno de dispersión (Tabla 4), p. ej., (i) la solubilidad, el cual es la capacidad de una sustancia para disolverse en otra. Específicamente, es la cantidad máxima

de una sustancia que puede disolverse en un disolvente a una temperatura y presión dada, esto con el objetivo de formar una solución estable. (ii) La tensión superficial que está relacionada con la fuerza necesaria para romper o estirar la superficie de un líquido. (iii) La energía superficial o energía interfacial es la energía necesaria para aumentar la superficie de separación entre dos fases de un material. (iv) La viscosidad, que es el nivel de cohesión de las moléculas de un fluido. (v) La densidad de cada nanopartícula.

Con relación a los óxidos metálicos, se decidió utilizar materiales comerciales para asegurar el control de las fases requeridas en el estudio: El MoO₃ de 99.5% de pureza fue de la marca sigma-aldrich, el ZnO de 99.84% de pureza fue de la marca U.S Research nanomaterials Inc., pero VO₂ se obtuvo mediante una síntesis usando la técnica hidrotermal, la cual consistió en mezclar a una temperatura de 220 °C por 24 horas la cantidad de 1.2 gramos de pentóxido de vanadio (V₂O₅) del 99.6% de pureza (marca sigma-aldrich), 33.33ml de agua destilada, 6.6 ml de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) purificado al 30% (marca fermont) y 0.255 µL de hidrazina monohidratada con un 98% de pureza (marca sigma-aldrich).

Tabla 4.- Propiedades fisicoquímicas de los dispersantes y nanopartículas seleccionadas.

Dispersantes	Solubilidad ^a (Mpa ^{1/2})	Tensión superficial (mN/M) ^a	Conductividad térmica W/(cm ² k)	Viscosidad ^a (cP)	Densidad g/cm ³
Agua (A)	48	72.0	—	0.9	1 ^a
Isopropanol (IPA)	23.8	21.9	—	2.0	0.78 ^a
Etilenglicol (EG)	34.9	48.0	—	16.1	1.10 ^a
Polietilenglicol-400	21.6	42	—	90	0.9880 ^a
^b MoO ₃	20.7 ^c	—	1.2 ^d	—	4.69 ^b
VO ₂ (M)	—	—	0.2 ^e	—	2.75 ^b
ZnO	—	—	0.6 ^e	—	5.6 ^b

^aDatos obtenidos de [107], [108], [109], [110]

^bDatos obtenidos de [111]

^cDatos obtenidos de [112]

^dDatos obtenidos de [113]

^eDatos obtenidos de [114]

La distribución del tamaño de partícula (PSD por sus siglas en inglés) y el potencial zeta (ZP por sus siglas en inglés) de las diferentes dispersiones basadas en la dispersión dinámica de la luz (DLS por sus siglas en inglés) se determinaron utilizando un equipo Zetasizer Nano ZS (Malvern Panalytical Ltd) con un láser HeNe que emite una longitud de onda de 633 nm. Cada medición se realizó por triplicado y se presentó mediante del valor medio. La temperatura de evaporación de los dispersantes se determinó mediante análisis termogravimétrico (ATG) utilizando un equipo SDT Q600 TA INSTRUMENTS bajo un flujo de aire y con una rampa de calentamiento desde la temperatura ambiente hasta 350 °C a una velocidad de 5 °C/min.

4.2. Crecimiento de Películas.

Antes del proceso de recubrimiento, los sustratos de vidrio de 2.5 x 2.5 cm se limpiaron minuciosamente con acetona durante 15 minutos utilizando ultrasonido para eliminar impurezas. Luego, se colocaron en una solución de KOH 4 M a 80 °C durante 30 minutos para producir especies oxigenadas en el sustrato de vidrio, seguido de una limpieza con agua destilada y etanol para posteriormente secarse a 100 °C. El proceso de recubrimiento por esprayado se llevó a cabo añadiendo las dispersiones al recipiente de atomización de una pistola NanoFlow Pro Touch para producir gotas finas de aerosol que fueron transportadas a los sustratos mediante un flujo de aire. Específicamente, el sustrato de vidrio se colocó verticalmente a 50 cm delante de la pistola NanoFlow sobre una superficie a 60°C. Las películas se formaron esprayando repetidamente la dispersión de los óxidos metálicos sobre la superficie del vidrio durante 10 s (una capa), es decir, se depositaron diferentes películas con 1, 5, 10 o 15 capas. Después de cada esprayado, se dejó secar el sustrato con el depósito durante 5 min para asegurar la evaporación del dispersante antes de aplicar la siguiente aspersion. Asimismo, se realizó un tratamiento térmico en las películas delgadas depositadas a 200 °C durante 2 h en condiciones ambientales para eliminar cualquier impureza volátil y promover la adhesión sobre el sustrato de vidrio. En la Figura 18 se muestra un diagrama del proceso del depósito.

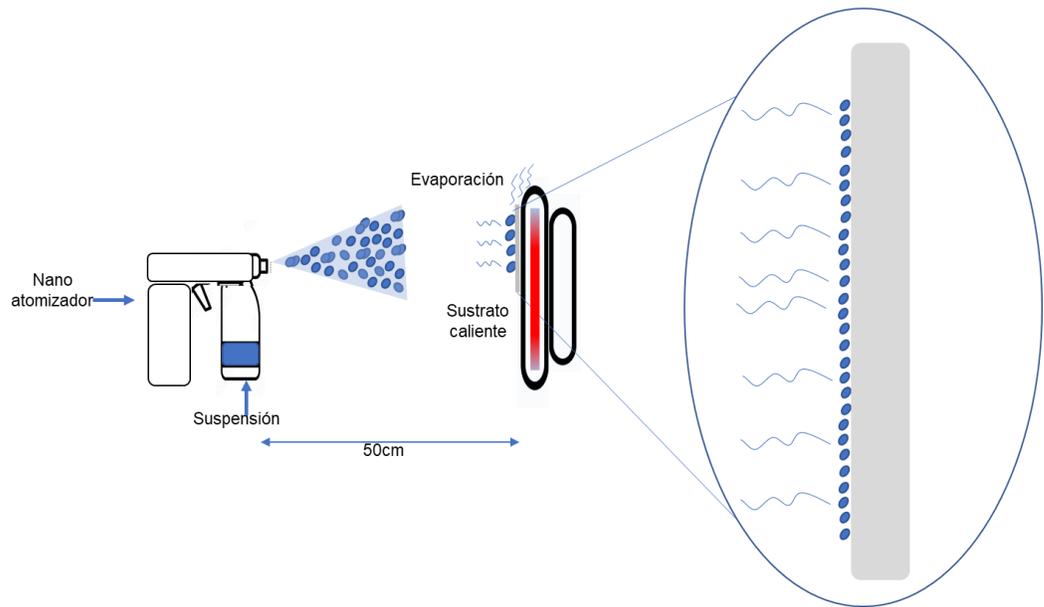


Figura 18.- Diagrama del proceso de depósito de las películas mediante la técnica de spray.

4.3. Caracterización Microestructural.

Para caracterizar el crecimiento de las películas delgadas se identificaron de las estructuras cristalinas con el fin de asegurar un efecto sobre la modulación óptica en los vidrios. Esto se realizó mediante difracción de rayos X (DRX) usando una radiación Cu- α y un rango de 10° a 90° en el ángulo 2Θ , siendo estos los rangos en que se encuentran las señales características de la fase monoclinica del óxido de vanadio (JCPDS 00-043-1051), el óxido de zinc (JCPDS 01-089-1397) y el óxido de molibdeno (JCPDS 01-074-7383). El equipo utilizado fue de la marca PANAlitycal modelo Empryean, mientras que el software del equipo tiene por nombre Data Colector. La identificación de fases fue realizada con el software High Score Plus usando la base de datos del Centro Internacional para Datos de Difracción (CIDD).

Por otra parte, se identificaron las bandas características de los enlaces para los óxidos metálicos en las películas para asegurar la evaporación total de los dispersantes mediante FTIR-ATR usando un equipo Thermo Electron Nicolet 380, realizando un barrido en el rango de los 400 a 4000 cm^{-1} .

Igualmente, se realizó un análisis a través del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) utilizando un equipo marca JEOL modelo JSM-6510LV, mientras que el software para visualizar las micrografías fue el SEM Main. Cabe señalar que también se realizaron análisis con Espectroscopía de Energía Dispersa de rayos X (EDX) para identificar la composición química elemental presente en el en las películas en función del número de capas.

Por otra parte, la morfología de la superficie y la rugosidad en la película delgada se evaluaron mediante microscopía de fuerza atómica (MFA) con un equipo AFM Asylum Research, MFP-3D AFM, realizando escaneos en áreas de $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$, $2 \times 2\mu\text{m}$, $5 \times 5\mu\text{m}$, $10 \times 10\mu\text{m}$ y $40 \times 40\mu\text{m}$, Asimismo, el análisis de las imágenes digitales de las películas se realizó mediante el software Gwyddion v.2.65.

4.4. Caracterización Óptica.

El espectrofotómetro UV-VIS-NIR fue utilizado para medir la interacción entre las distintas radiaciones electromagnéticas y las películas delgadas depositadas en el vidrio, usando una longitud de onda de 300 a 2500 nm. Consecuentemente, también se determinó la transmitancia solar (T_{sol}) y la transmitancia visible (T_{vis}), los cuales son parámetros que se usaron para la evaluación energética. El equipo utilizado fue un micro espectrofotómetro UV-VIS-NIR marca MSP500RT fabricado por Angstrom Sun Technologies con un objetivo de 40X y un spot size de 10.

4.5. Medición de Adherencia de las Películas.

El estudio de la adherencia de las películas delgadas está relacionado con la durabilidad y otras propiedades que dependen de la interacción entre la capa y el sustrato. Además, los métodos de medición de la adherencia se clasifican en mecánicos y no mecánicos, siendo el primero el método de la cinta adhesiva que

corresponde a la norma ASTM-D3359 [115], el cual consistió en realizar cortes perpendiculares en el sustrato con la finalidad de formar cuadrículas para posteriormente aplicar la cinta, asegurando una adecuada adherencia en todas las zonas. Después de 90 segundos, la cinta se retiró en un ángulo de 180° [116] y se identificó el grado de adherencia de la película al comparar el resultado con la Figura 1 de la norma ASTM-D3359, la cual abarca desde el grado 0B de la de menor adherencia hasta el grado 5B de la mayor adherencia de la película. El tipo de cinta utilizada en este ensayo fue la 3M 640 Scotch [56-57].

4.6. Simulación energética.

La evaluación energética se realizó a través del software Design Builder versión 7.0, el cual consta de 11 módulos que sirven para proporcionar un análisis profundo de cualquier edificio modulado, dentro de los cuales se incluye demanda de energía, comodidad, HVAC, iluminación natural, costos, optimización de diseños, los cuales cumplen con varias regulaciones de construcción y estándares de certificación.

CAPITULO V RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados experimentales conforme a la metodología propuesta, es decir, se abarca la caracterización de las materias primas, la selección del dispersante, la preparación de las dispersiones, la caracterización de las películas, así como la evaluación de los sistemas en multicapa por SEM, AFM y el efecto óptico, brindando adicionalmente un estudio de eficiencia energética. A su vez, mediante estos análisis se evidencia la viabilidad y el impacto científico del presente trabajo.

5.1. Etapa 1: Caracterización de las nanopartículas.

A continuación, las nanopartículas que se usaron para formar las capas simples y multicapa se evaluaron mediante la DRX con el objetivo de asegurar la presencia de las fases que promueven los fenómenos crómicos del VO_2 y del MoO_3 .

5.1.1. Difracción de rayos X de las nanopartículas del MoO_3 .

Las nanopartículas de MoO_3 mostraron las difracciones más intensas en los planos cristalográficos de (200), (101), (400), (210), (600), ubicadas en el ángulo de difracción 2θ de 12.75° , 23.32° , 25.68° , 27.31° y 38.94° , respectivamente, confirmando la presencia de la fase ortorrómbica del MoO_3 (JCPDS: 01-074-7383) (Ver Figura 19). Esto es de interés ya que sólo la fase ortorrómbica permite el efecto fotocromico en las nanopartículas de MoO_3 [14].

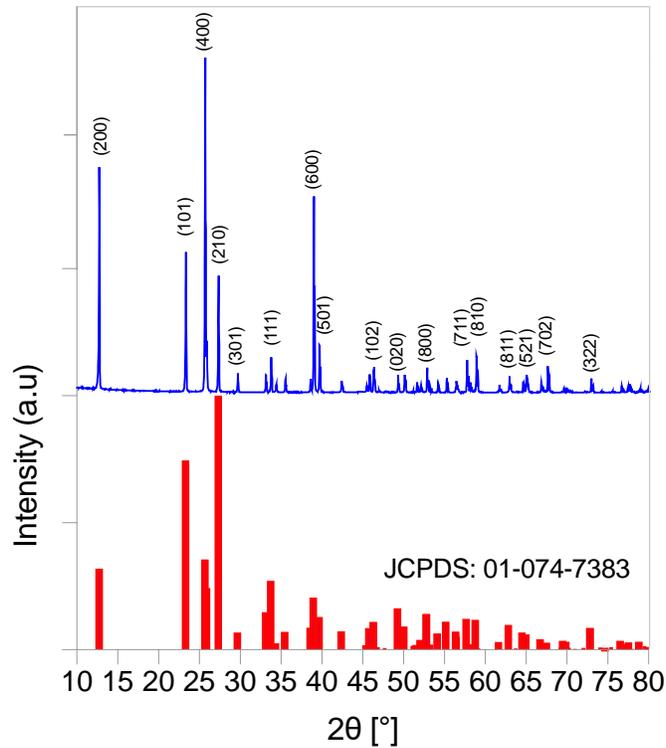


Figura 19.- Patrón de DRX de las nanopartículas de MoO₃ en fase ortorrómbica.

5.1.2. Difracción de rayos X de las nanopartículas del VO₂.

La DRX de las nanopartículas de VO₂ obtenidas por síntesis hidrotérmica mostró los picos de difracción en los planos cristalográficos de (011), (-211), (020), (-212), (220), (022), (-313), (031), (-231), correspondiente a los ángulos de difracción 2θ de 27.79°, 36.98°, 42.07°, 55.45°, 57.42°, 64.97° y 70.25°, respectivamente, confirmando la presencia de la fase monoclinica del VO₂ (JCPDS: 00-043-1051) (Ver Figura 20). Esto es de interés ya que la fase monoclinica permite el efecto termocrómico en las nanopartículas de VO₂ [83].

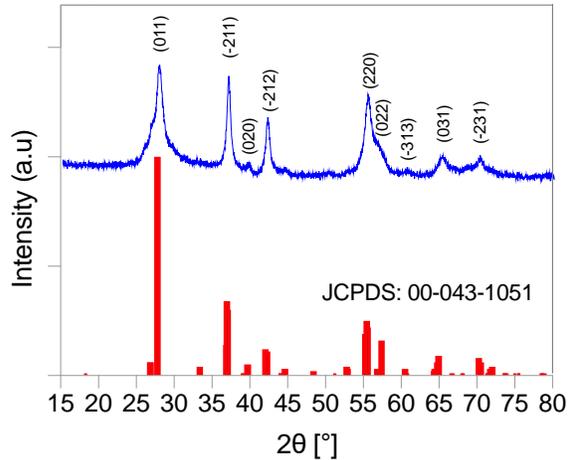


Figura 20.- Patrón de DRX de las nanopartículas de VO₂ en fase monoclinica obtenidas por síntesis hidrotermal.

5.1.3. Difracción de rayos X de las nanopartículas del ZnO.

El patrón de DRX de las nanopartículas del ZnO mostró los picos de difracción en los planos cristalinos de (100), (002), (101), (102), (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004), (202) que corresponden a los ángulos de difracción 2θ de 31.73° , 34.37° , 36.21° , 47.48° , 56.53° , 62.77° , 66.30° , 67.86° , 69.00° , 72.46° y 76.86° , respectivamente, confirmando la presencia de del ZnO en fase hexagonal (JCPDS: 01-089-1397) (Ver Figura 21). Esto es de interés ya que la fase hexagonal en las nanopartículas de ZnO favorece la cedencia de los electrones a los otros óxidos con el objetivo de mejorar el efecto termocrómico y fotocromático [94].

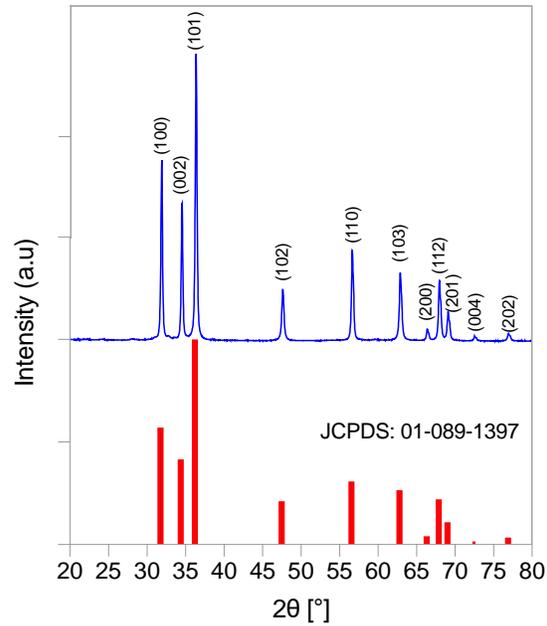


Figura 21.- Patrón de DRX para las nanopartículas de ZnO en fase hexagonal.

Con los análisis anteriores también se corroboró que no se presentó ningún tipo de impureza que altere los efectos esperados en las capas fotocromáticas y termocromáticas.

5.2. Selección de dispersante.

Como parte del proceso de selección del dispersante más adecuado, se realizaron pruebas de TGA para conocer los puntos de evaporación de cada uno de los dispersantes seleccionados (Figura 22). Esto es importante porque se busca que el dispersante se evapore después de la deposición por spray de las capas sobre el sustrato de vidrio, permaneciendo únicamente las nanopartículas.

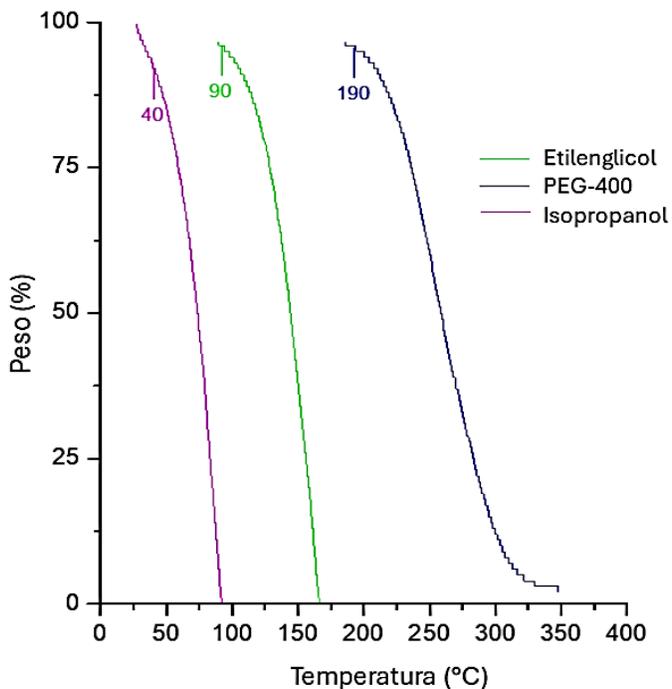


Figura 22.- Resultados del TGA del isopropanol, etilenglicol y PEG-400.

La Figura 22 muestra que el isopropanol, el etilenglicol y el PEG-400 iniciaron su evaporación a los 40, 90 y 190 °C y la terminaron a los 90, 170 y 350 °C, respectivamente. Este comportamiento puede estar influenciado por factores como su volatilidad, ya que el isopropanol es más volátil que el etilenglicol y el PEG-400 debido a una energía cinética mayor que ocasiona que un cambio de estado líquido a gaseoso fácilmente[119]. Por otro lado, el peso molecular del isopropanol es menor a la del etilenglicol y al PEG-400, siendo otro factor que influye en su rápida evaporación [105-107].

5.3. Etapa 1.- Preparación de las dispersiones.

5.3.1. Dispersión del MoO₃

Uno de los objetivos principales del presente trabajo es obtener el menor tamaño de partícula posible y una buena estabilidad en una solución acuosa en largos periodos de tiempo, lo cual depende de la optimización de las dispersiones.

La Figura 23 muestra los resultados para los diferentes tiempos de sonicado del tamaño de partícula obtenido para el MoO_3 y su potencial zeta, usando agua como una prueba de referencia. En general, todas las partículas se re-aglomeraron a partir de las 3 horas de sonicado, incrementando el tamaño de partícula. En el caso del agua (Figura 23a), se presentaron inicialmente tamaños de partícula de 436 nm que decrecieron a 379 nm a las 3 horas de sonicado, pero crecieron hasta los 966 nm para tiempos posteriores. Esto se puede atribuir a que no existen fuerzas que limiten el movimiento de las partículas y su posterior aglomeración [120] ya que la viscosidad del agua es de 0.9 cp y su solubilidad de $48 \text{ MPa}^{1/2}$, la cual es casi dos veces superior a la del MoO_3 ($20.7 \text{ MPa}^{1/2}$). Para el etilenglicol (Figura 23b), se obtuvo un menor tamaño partícula disperso para todos los tiempos de ultrasonido, variando de 150 a 106 nm, mientras que el potencial zeta se mantuvo entre los 20 y 37 mV durante todos los tiempos de ultrasonido, sugiriendo una dispersión estable [121]. Esto se debe a que la solubilidad del etilenglicol ($34.9 \text{ MPa}^{1/2}$) es mayor en comparación con el MoO_3 , favoreciendo su miscibilidad, mientras que su viscosidad (16.1 cp) evita el movimiento excesivo, resultando en una buena estabilidad [112]. Para PEG-400 (Figura 23c), se obtuvieron tamaños de partícula que variaron entre los 1203 y 1443 nm, aunque en algunos casos incluso se redujo su tamaño, lo cual se puede deber a la similitud de las solubilidades, siendo de $21.6 \text{ MPa}^{1/2}$ para el PEG-400 [104-107]. Además, el potencial zeta se mantuvo cerca del cero, indicando una baja estabilidad de la dispersión, probablemente debido a la alta viscosidad que limitó el movimiento de las partículas [123]. Para el isopropanol (Figura 23d), se obtuvo un tamaño de partícula entre los 135 y 141 nm durante los primeros tiempos de sonicado, lo cual se debe a la buena solubilidad del isopropanol ($23.8 \text{ MPa}^{1/2}$), siendo ligeramente alta en comparación con el MoO_3 , por lo que promueve una buena dispersión. En cuanto al potencial zeta, se obtuvo una baja estabilidad conforme a los valores entre -1 y -14 mV, lo cual es debido al carácter aniónico del dispersante [111] y su baja viscosidad (2 cp).

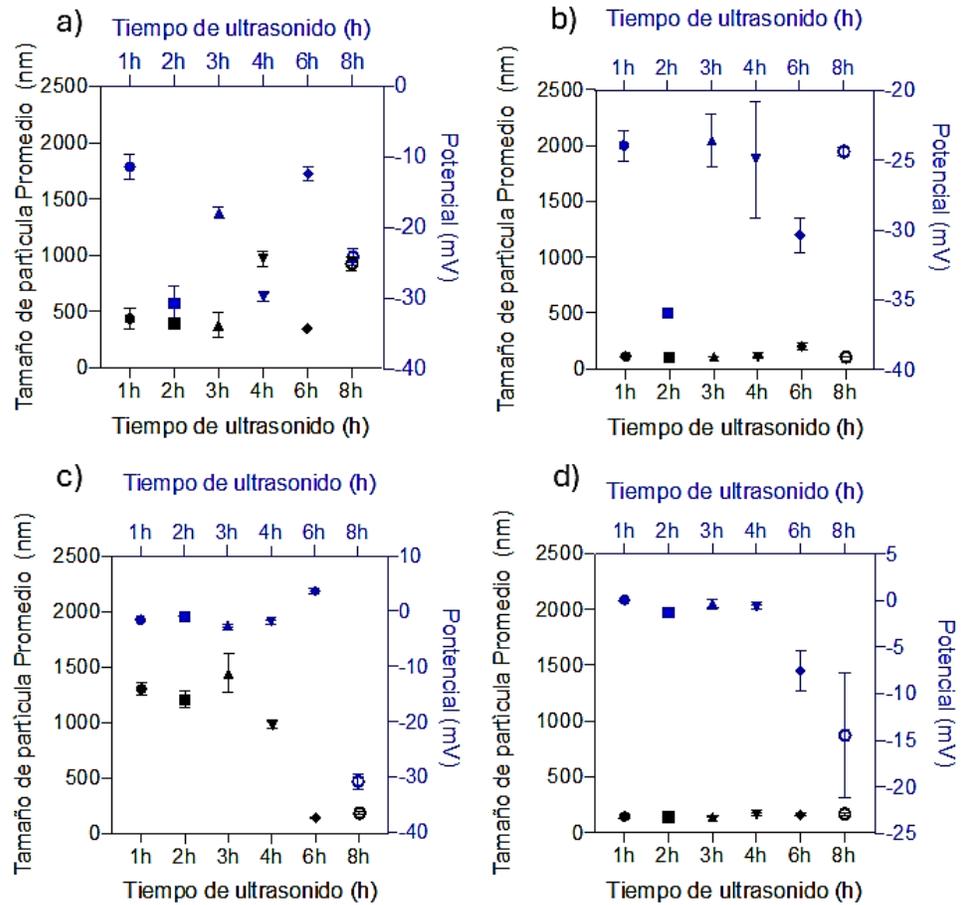


Figura 23.- Potencial zeta y la distribución del tamaño de partícula del MoO₃ disperso en (a) el agua, (b) el etilenglicol, (c) el polietilenglicol 400 y (d) el isopropanol.

La Figura 24 presenta el efecto visual de los dispersantes, mostrando una transparencia muy similar en todos los casos, lo cual se debe a una baja concentración de nanopartículas de MoO₃ en la dispersión. Este efecto puede relacionarse con su densidad de 4.69 g/cm³, siendo más denso que el dispersante, lo cual promovió un asentamiento con mayor rapidez.

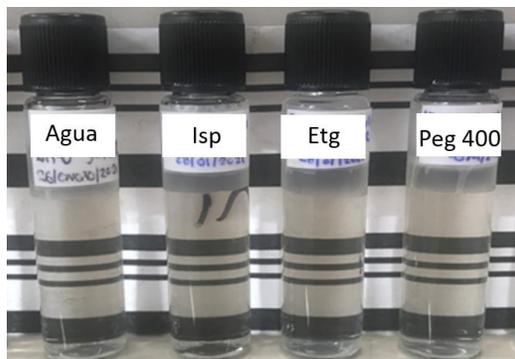


Figura 24.- Efecto visual sobre las dispersiones del MoO₃ usando agua, isopropílico (Isp), etilenglicol (Etg) y polietilenglicol 400 (Peg 400).

Posteriormente, se evaluaron las propiedades a largo plazo de las suspensiones para verificar la estabilidad de las nanopartículas en el dispersante. Por lo tanto, la Tabla 5 presenta el tamaño de partícula y el potencial zeta después de 30 días de la preparación de las dispersiones, resaltando que el último se mantuvo variaciones mínimas, lo que indica la estabilidad de las nanopartículas suspendidas. El potencial zeta es un indicador de la capacidad para interactuar de las moléculas dispersantes y las nanopartículas de MoO₃, manteniendo una carga electrostática suficiente en el tiempo que evite la aglomeración [106].

Tabla 5.- Tamaño de partícula promedio y el potencial zeta (Pz) a 30 días después de la preparación de la dispersión de MoO₃.

Tiempo de Ultrasonido (horas)	Agua		Isopropanol		Etilenglicol		PEG 400	
	Tamaño de Partícula (nm)	Pz (mV)	Tamaño de Partícula (nm)	Pz (mV)	Tamaño de Partícula (nm)	Pz (mV)	Tamaño de Partícula (nm)	Pz (mV)
1	612.23	-6.21	190.21	-7.81	106.54	34.73	91.32	-14.75
2	349.23	-18.65	190.86	-7.21	164.23	11.13	68.23	-12.40
3	389.54	-9.63	220.12	14.23	161.5	14.22	54.34	-39.10
4	342.23	-5.53	396.54	-5.52	173.23	22.03	60.23	-37.79
6	386.23	-12.12	255.39	-13.2	295.43	-12.34	53.49	-70.23
8	295.34	-9.41	295.42	-9.41	220.32	-16.20	190.23	-47.92

Conforme a los resultados de la Tabla 5, los dispersantes de etilenglicol e isopropanol forman las dispersiones más estables sin mostrar sedimentación y con un tamaño de partícula menor que en el agua y el PEG-400. Por el contrario,

las dispersiones de PEG-400 mostraron una sedimentación después de 5 días. Así, considerando el tamaño de partícula, el potencial Z, el tiempo de sonicación, la estabilidad a largo plazo y el punto de ebullición de los dispersantes, se determinó que la dispersión de isopropanol fue la mejor opción para una aplicación de baja temperatura, obteniendo una dispersión estable usando 2 h de tiempo de sonicación para alcanzar un tamaño de partícula promedio de 146 nm y logrando la evaporación completa a ~80 °C. Por lo tanto, la dispersión de isopropanol se usó para preparar las películas de MoO₃ mediante deposición por esprayado.

5.3.2. Dispersión del VO₂

La Figura 25 presenta los resultados del tamaño de partícula de las nanopartículas del VO₂ y el potencial zeta para cada uno de los dispersantes seleccionados. Para el agua (Figura 25a), se alcanzó un tamaño de partícula entre los 130 y 2100 nm, así como un potencial zeta entre los 20 y -20 mV, asociando una baja estabilidad de las partículas de VO₂ debido a que su solubilidad es menor en comparación con el agua [8], mientras que su baja viscosidad provocó una variabilidad en la homogeneidad de la dispersión de las partículas de VO₂. Para el etilenglicol (figura 25b), se presentaron buenos resultados de dispersión, obteniendo un tamaño de partícula de 120 nm para todos los tiempos de sonificado, así como potenciales zeta entre los -20 y -40 mV, esto se debe a que la solubilidad del etilenglicol es mayor en comparación con el VO₂ y su viscosidad es ideal para mantener la estabilidad de las nanopartículas. Para el PEG-400 (Figura 25c), se obtuvieron tamaños de partícula entre los 100 y 500 nm, así como un potencial zeta entre -20 y -35 mV, esto fue debido a la baja solubilidad del PEG-400 y a su viscosidad (90 Cp) que limitaron la interacción entre las partículas del VO₂. Para el isopropanol (Figura 25d), se obtuvo un tamaño de partícula de 110 nm en todos los casos y un potencial zeta entre -5 y -20 mV para 1,6 y 8 horas de sonicación, esto ocurrió porque la solubilidad del isopropanol es mayor en comparación con el VO₂, favoreciendo una buena dispersión; sin embargo, también se presentó una variabilidad

importante en el potencial zeta, probablemente debido a la baja viscosidad que permitió un cambio de cargas electrostáticas entre las nanopartículas.

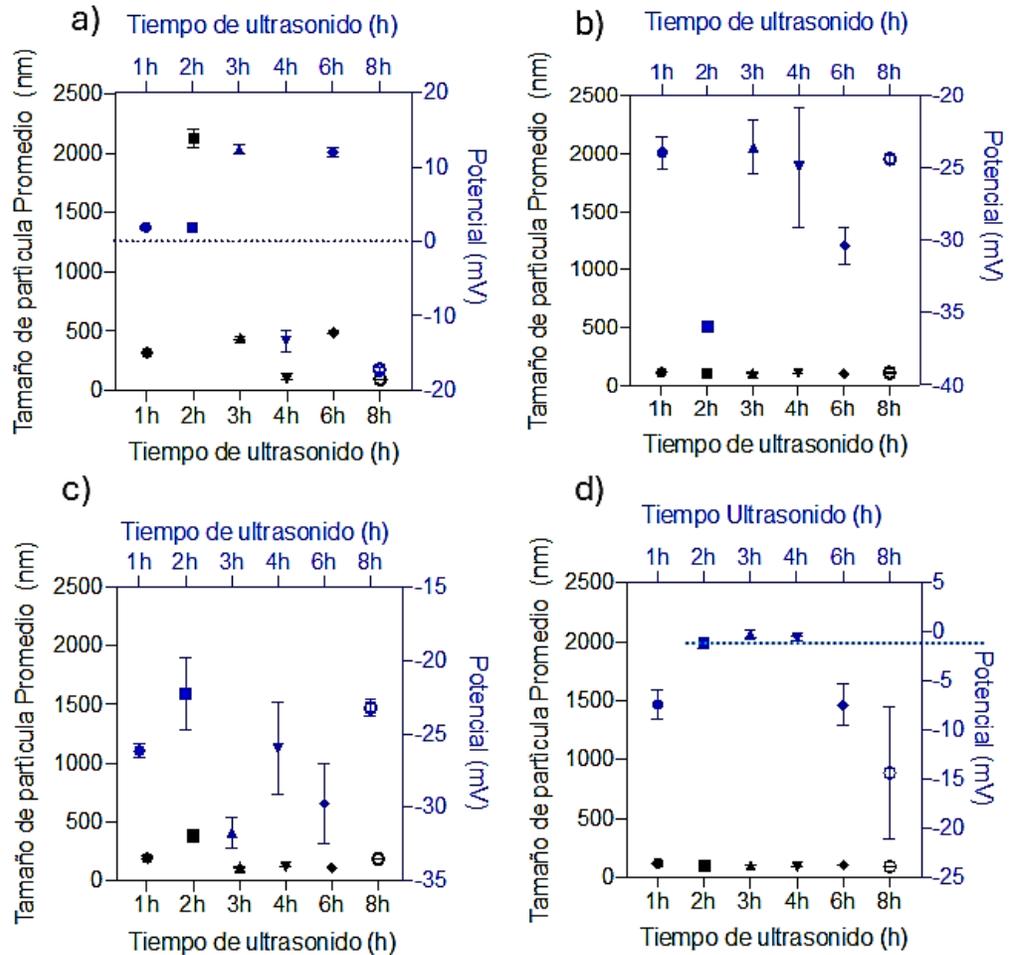


Figura 25.- Potencial zeta y distribución del tamaño de partícula del VO₂ disperso en el (a) agua, (b) el etilenglicol, (c) el polietilenglicol 400 y (d) el isopropanol.

La Figura 26 presenta el efecto visual causado por los dispersantes, mostrando una transparencia similar en todos los casos. Esto se debe a una alta dispersión del VO₂, lo cual puede relacionarse con su densidad, ya que una menor densidad en el dispersante suele promover una dispersión más eficaz.

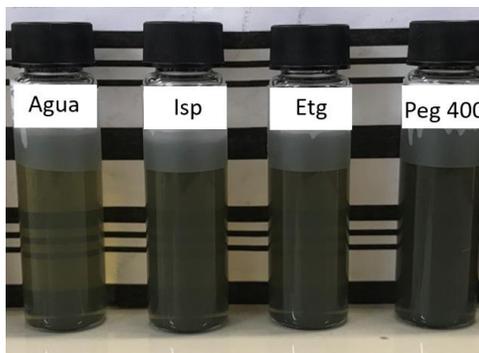


Figura 26.- Efecto visual de dispersiones del VO₂ usando agua, isopropanol (Isp), etilenglicol (Etg) y polietilenglicol 400 (Peg 400).

Asimismo, la evaluación de las propiedades de la dispersión a largo plazo es de suma importancia debido a su conexión directa con la estabilidad de las nanopartículas, por lo que la Tabla 6 presenta el tamaño de partícula y el potencial zeta después de 30 días de la preparación de las dispersiones, destacando que ambos se mantuvieron con variaciones mínimas, lo cual indica la estabilidad sostenida en el tiempo de las nanopartículas suspendidas.

Tabla 6.- Tamaño de partícula promedio y el potencial zeta (Pz) a 30 días después de la preparación de la dispersión de VO₂.

Tiempo de Ultrasonido (horas)	Agua		Isopropanol		Etilenglicol		PEG 400	
	Tamaño de Partícula (nm)	Pz (mV)						
1	294	-3	132	14	120	18	112	-12
2	195	-3.8	140	-13	125	22	101	-18
3	188	5	122	-11	118	28	106	-10.5
4	150	-3	117	-8	130	31	96	-9
6	250	6.3	109	-5.3	111	22	103	-17
8	122	-2.5	115	-7	115	30	95	-15

Conforme a los resultados de la Tabla 6, los dispersantes de etilenglicol e isopropanol forman las dispersiones más estables con una sedimentación mínima y un tamaño de partícula menor que el agua y el PEG-400. Así, considerando el tamaño de partícula, el potencial Z, el tiempo de sonicación, la estabilidad a largo plazo y el punto de ebullición de los dispersantes, se determinó que la dispersión de isopropanol representó la mejor opción para una aplicación

de baja temperatura, obteniendo una dispersión estable para 1 h de sonicación y un tamaño de partícula promedio de 110 nm, pero logrando que el isopropanol se evapore por completo a los ~80 °C. Por lo tanto, la dispersión de isopropanol se seleccionó para preparar las películas de VO₂ mediante deposición por esprayado.

5.3.3. Dispersión del ZnO

La Figura 27 presenta el tamaño de partícula y el potencial zeta en función del tiempo de ultrasonido para la dispersión de partículas de ZnO. Para el agua (Figura 27a), se observaron tamaños de partícula entre los 400 y 1000 nm en todos los casos, sin embargo, el potencial zeta estuvo cerca del cero absoluto, variando entre 10 y -5 mV, indicando una baja estabilidad en la dispersión. Esto se puede asociar con la alta solubilidad del agua (48 Mpa^{1/2}) y a su baja viscosidad, ocasionando una buena dispersión y re-aglomeración de partículas. Para el etilenglicol (Figura 27b), se presentaron tamaños de partícula entre 230 y 170 nm a partir de 2 horas de ultrasonido, siendo el dispersante asociado con los tamaños de partícula más pequeños y la mejor estabilidad conforme a un potencial zeta entre los 20 y 30 mV. Esto responde a la buena solubilidad del etilenglicol (34.9 Mpa^{1/2}), logrando una buena dispersión del ZnO [125]. Para el PEG-400 (Figura 27c), se alcanzaron tamaños de partícula entre 500 y 2500 nm, siendo este el mayor tamaño de partícula de los tres óxidos evaluados, lo cual se debe a la alta solubilidad del ZnO en comparación con el PEG-400 (21.6 Mpa^{1/2}), aunado a su alta viscosidad. Para el isopropanol (Figura 27d), se obtuvieron tamaños de partícula entre 350 y 1300 nm, presentando un incremento gradual hasta las 6 horas de sonicación, mientras que el potencial zeta varió entre 5 y 10 mV durante las primeras 4 horas de ultrasonido, lo cual representó una estabilidad media. En este caso, probablemente la solubilidad del dispersante (23.8 Mpa^{1/2}) no fue suficiente para dispersar las nanopartículas del ZnO.

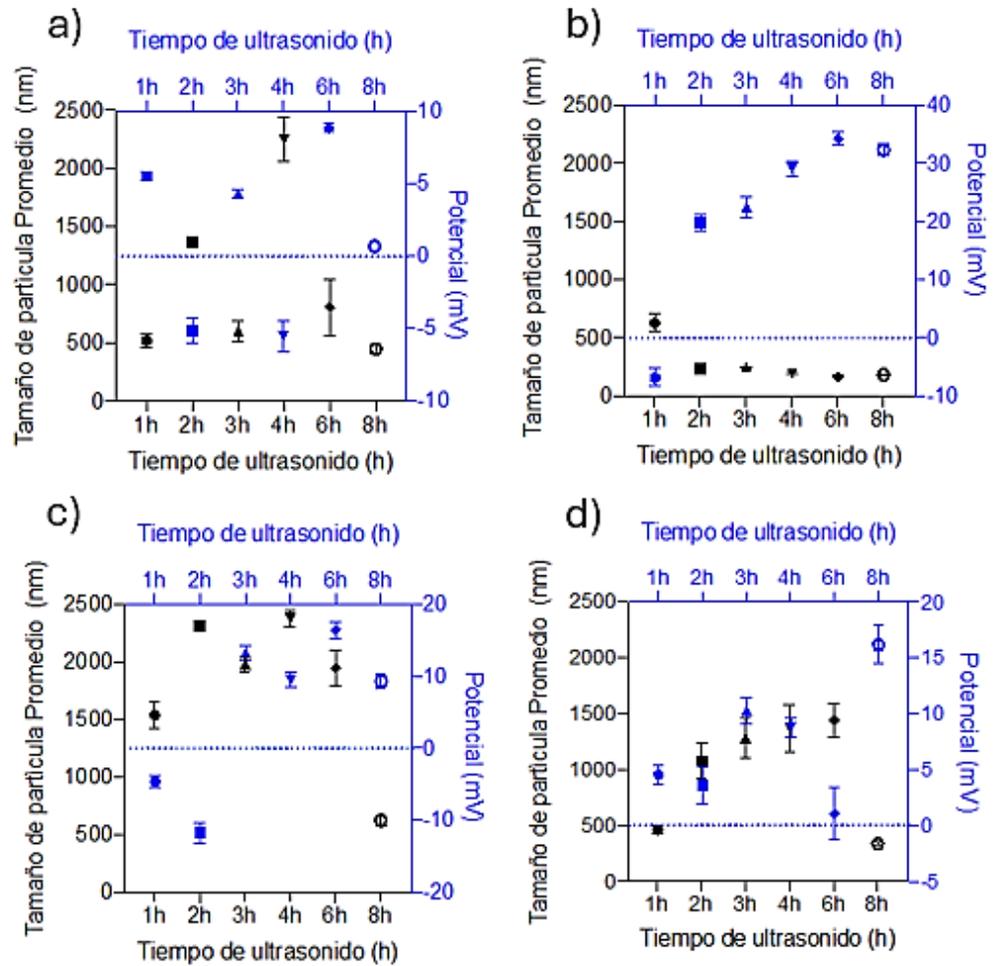


Figura 27.- Potencial zeta y la distribución del tamaño de partícula del ZnO disperso en (a) el agua, (b) el etilenglicol, (c) el polietilenglicol 400 y (d) el isopropanol.

La Figura 28 presenta el efecto visual causado por los dispersantes, mostrando un color blanquecino muy similar en todos los casos. Esto se debe a una buena dispersión del ZnO que se puede relacionar con su densidad de 5.6 g/cm^3 , ya que un dispersante con una relativamente menor densidad suele producir una dispersión con mayor eficacia[126].

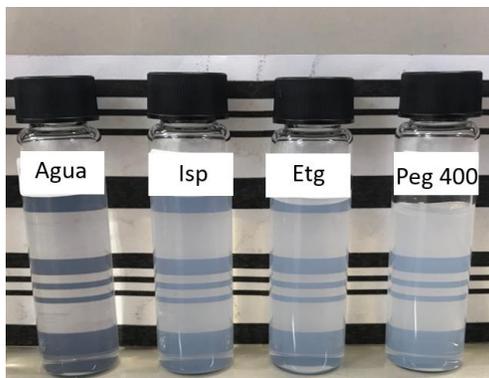


Figura 28.- Efecto visual de dispersiones del ZnO con dispersantes seleccionados.

Respecto de la evaluación de las propiedades de la suspensión a largo plazo, la Tabla 7 presenta el tamaño de partícula y el potencial zeta después de 30 días de la preparación de las dispersiones, destacando que ambos se mantuvieron con variaciones mínimas, lo que indica la estabilidad sostenida en el tiempo de las nanopartículas suspendidas.

Tabla 7. Tamaño de partícula promedio y el potencial zeta (Pz) a 30 días después de la preparación de la dispersión de ZnO.

Tiempo de Ultrasonido (horas)	Agua		Isopropanol		Etilenglicol		PEG 400	
	Tamaño de Partícula (nm)	Pz (mV)						
1	320	-2	850	11	230	-3	254	3
2	350	5	750	-6	320	-15	350	4
3	290	-2	200	2	250	-13	480	-2
4	400	4	310	4	270	-6	671	2
6	280	7	250	-8	220	-8	1200	4
8	350	6	210	7	210	-17	1500	7

Conforme los resultados de la Tabla 7, los dispersantes de etilenglicol e isopropanol formaron las dispersiones más estables con una sedimentación mínima y un tamaño de partícula menor que el agua y el PEG-400. Así, considerando el tamaño de partícula, el potencial Z, el tiempo de sonicación, la estabilidad a largo plazo y el punto de ebullición de los dispersantes, se determinó que la dispersión de isopropanol fue la mejor opción para una aplicación de baja temperatura, obteniendo una dispersión estable para 1 h de sonicación y

alcanzando un tamaño de partícula promedio de 480 nm, mientras que la evaporación completa del isopropanol se obtuvo a ~ 80 °C. Por lo tanto, esta dispersión de isopropanol se seleccionó para preparar las películas de ZnO mediante deposición por esprayado.

5.4. Etapa 1: Caracterización de películas.

5.4.1. Película de MoO₃

La Figura 29 presenta la caracterización estructural de la película delgada de MoO₃ depositada sobre el vidrio, mostrando los picos de difracción que indican la presencia del MoO₃ en fase ortorrómbica (JCPDS,01-074-7383) ubicados en los ángulos de difracción 2θ de 12.74° , 25.66° y 38.93° relacionados con los planos cristalográficos de (020), (040) y (060) [113]. Esto corroboró que el proceso de deposición no alteró las fases presentes en las partículas de MoO₃, lo cual es importante para obtener el efecto fotocromático.

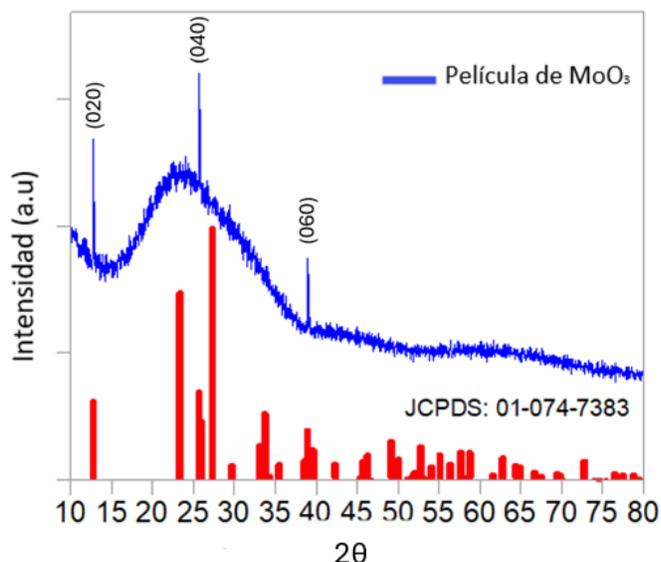


Figura 29.- Caracterización del depósito de las nanopartículas de MoO₃ sobre el vidrio a mediante DRX.

Asimismo, se realizó una prueba de FTIR (Figura 30) para asegurar que el dispersante de la suspensión se haya evaporado completamente, en la cual se

podieron identificar los enlaces característicos del MoO_3 . A. Chithambararaj reportó unas bandas de absorción entre los 1000 y 400 cm^{-1} correspondientes a las vibraciones de estiramiento y flexión de los enlaces característicos del metal-oxígeno, mientras que en este estudio se encontró una banda a los 999.12 cm^{-1} que coincidió con el doble enlace del Mo con el O ($\text{Mo}=\text{O}$), así como las bandas alrededor de los 534.28 , 860.25 , 812.03 y 981.76 cm^{-1} son características del enlace de O-Mo-O [121,128-129].

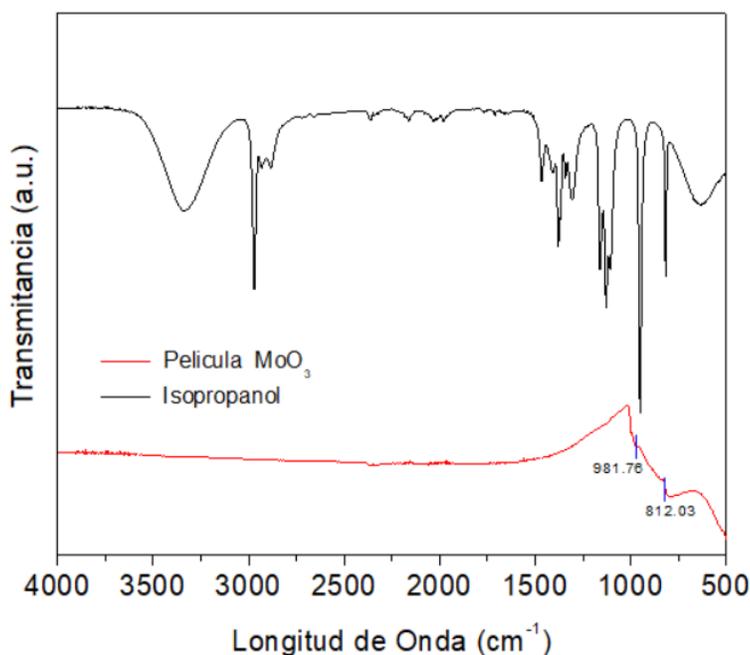


Figura 30.- FTIR de la película de MoO_3 a 15 capas y del isopropanol.

La Figura 31 presenta los resultados obtenidos mediante la MFA, el cual muestra la morfología de las películas de MoO_3 depositadas en el vidrio que fueron dispersos en isopropanol para 1 capa (31a). Así, se observó que el espesor promedio de las películas fue de 250 nm , mientras que la morfología de las partículas fue esférica (31b), lo cual es característico del MoO_3 en su fase ortorrómbica [116]. Igualmente, se obtuvo una rugosidad promedio de 7.44 nm , indicando una continuidad en el depósito de la película de MoO_3 (31c).

La Figura 32 presenta los resultados de MFA para el depósito de la película de MoO_3 para 15 capas (32a), mostrando una máxima altura de rugosidad de 68.49 nm , con un espesor promedio de las películas de 290 nm ,

mientras que la morfología de las partículas fue esférica (32b), además se observó una mayor cantidad de partículas pequeñas que redujeron la porosidad con respecto del depósito de 1 capa como se muestra en la figura (32c). Lo anterior sugiere que mientras mayor sea el número de capas, menor será la porosidad de la película. Por lo tanto, el efecto de dispersión causado por el baño ultrasónico promovió partículas con un mayor tamaño en la suspensión debido a que no tuvieron un tiempo suficiente para sedimentarse totalmente [131].

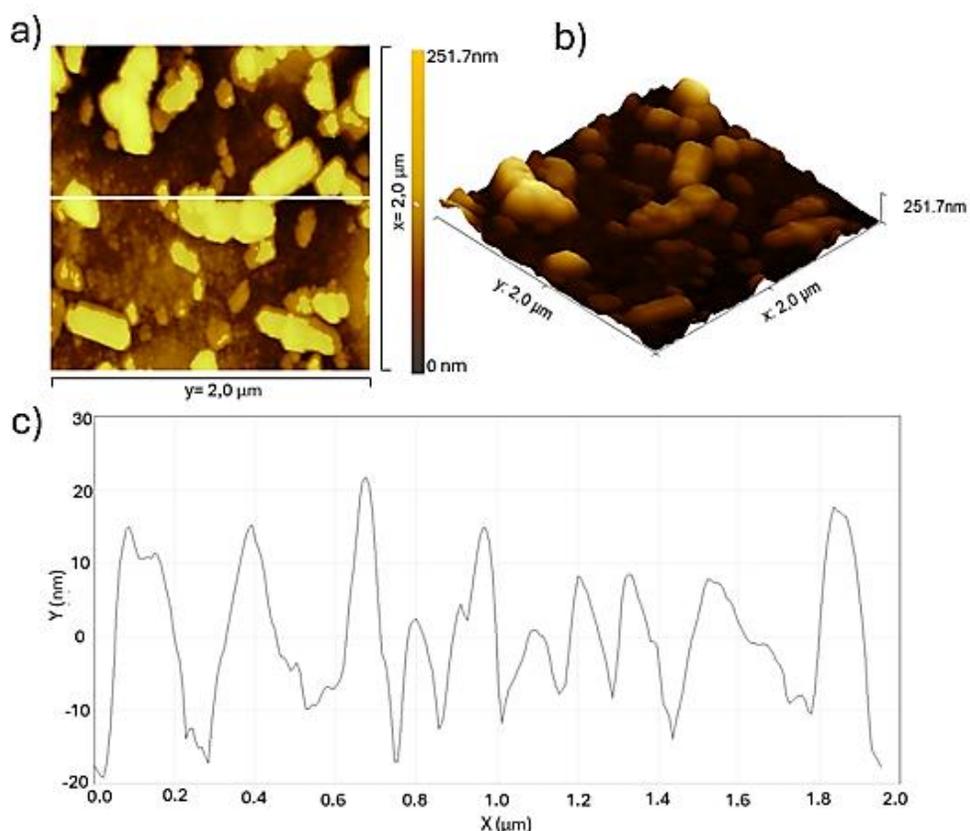


Figura 31.- Resultados del microscopio de fuerza atómica del depósito de 1 capa de partículas de MoO_3 dispersados en isopropanol a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad.

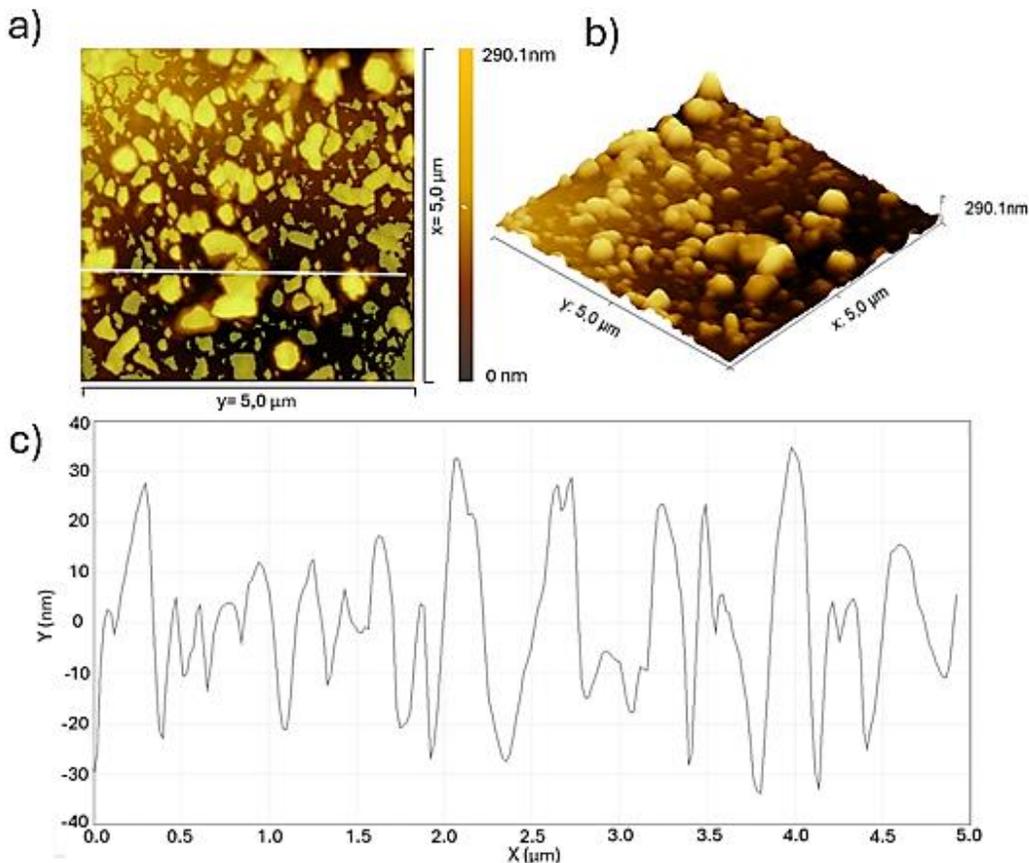


Figura 32.- Resultados del microscopio de fuerza atómica del depósito de 15 capas de partículas de MoO_3 dispersados en isopropanol, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad.

La Figura 33 presenta un mapeo de composición elemental obtenido por MEB-EDX a 1, 5, 10 y 15 capas del depósito en vidrio de las partículas de MoO_3 . Se encontró una distribución homogénea de Mo en cada una de las capas depositadas, incrementándose ligeramente su concentración del 0.2% al 0.3% en cada capa evaluada. La diferencia entre capas podría relacionarse con la estabilidad de la dispersión observada mediante los resultados del potencial zeta, lo que indicó una baja concentración de MoO_3 en las dispersiones y la capacidad de dispersión del 2-propanol sobre estas nanopartículas. Cabe señalar que Wei y col. [46] obtuvieron resultados similares para la homogeneidad de la deposición, pero utilizando la técnica de AFM. No obstante, se debe mencionar que la relación entre el número de capas y la concentración de Mo de las películas delgadas no había sido reportada previamente. Por otro lado, cabe destacar que el área de análisis reportada por otros autores fue de hasta $1 \mu\text{m}$ [46-47], mientras que en este trabajo se evaluó un área de $100 \mu\text{m}$ con el fin de comprobar la

eficiencia de la técnica para cubrir grandes áreas, lo cual es de interés en términos de aplicabilidad, considerando el uso de estas películas en ventanas previamente instaladas.

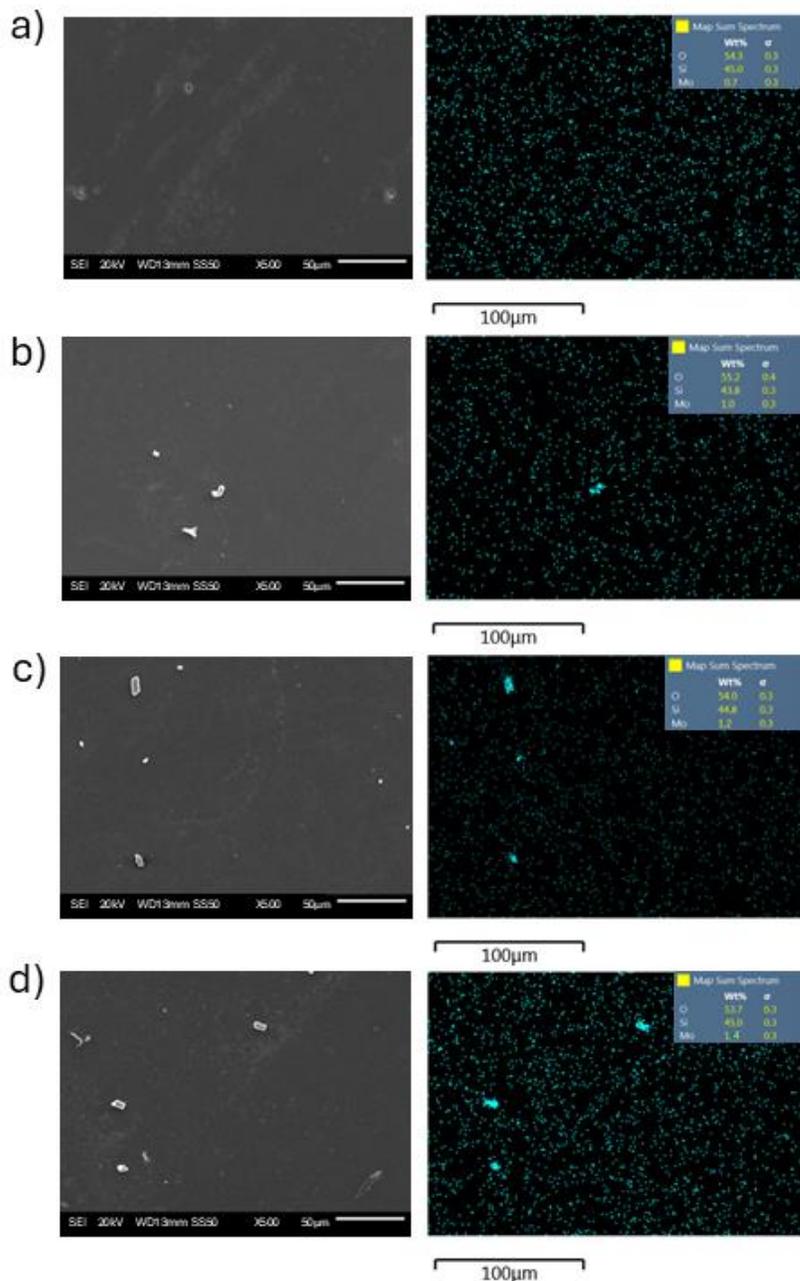


Figura 33.- Mapeo de composición elemental obtenido por MEB-EDX del depósito de partículas de MoO₃ dispersado en isopropanol y etilenglicol a; a) 1, b) 5, c) 10 y d) 15 capas de esprayado.

La Figura 34 presenta las imágenes correspondientes a la prueba de adherencia, indicando el antes (34a) y después (34b) de la aplicación de la cinta

sobre el vidrio con las partículas de MoO_3 depositadas para 15 capas, observándose pequeñas aglomeraciones que se mantuvieron después de la prueba de la aplicación de la cinta. Por lo tanto, esta película se clasifica como 3B conforme a la norma ASTM-D3359, ya que se desprendió entre un 5% y 15% de material.

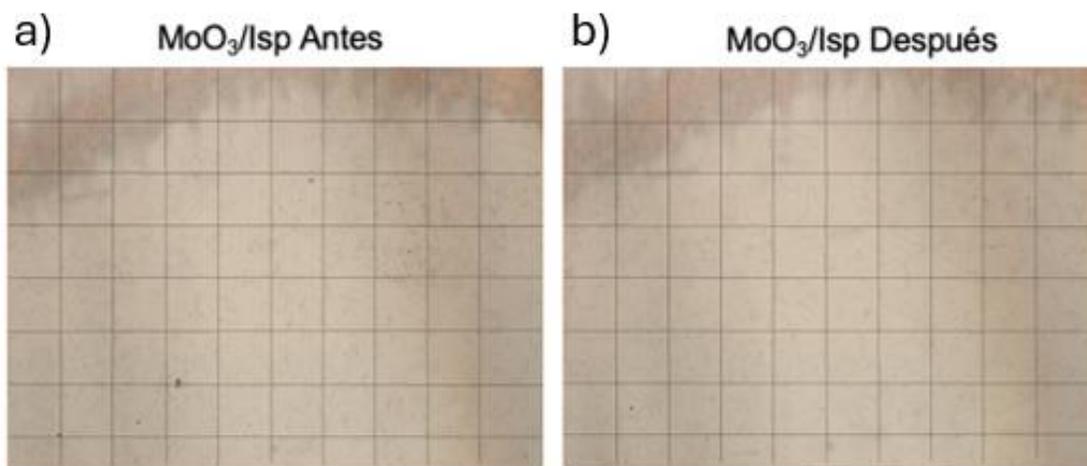


Figura 34.- Prueba de adherencia para el depósito de partículas de MoO_3 dispersado en isopropanol (Isp) a; a) antes y b) 15 después.

La Figura 35 presenta el efecto óptico de las películas de MoO_3 después de 10, 20 y 30 minutos de irradiación con lámpara de UV, en el cual se observó un efecto de reducción en el paso de la radiación visible, alcanzando una transmitancia visible de 99%, 99%, 98.5% y 98%, mientras que la modulación solar (considerando de 10 a 30 min de irradiación UV) alcanzó de 0 a 0.34%, 0.24% a 0.61%, 0.43% a 0.87 y 0.42% a 1% para a) 1, b) 5, c) 10 y d) 15 capas, respectivamente. Por lo tanto, se observó que la reducción de la transmitancia fue mayor con el paso del tiempo, siendo más pronunciada a los 30 minutos de irradiación. Cabe mencionar que el efecto observado fue en una magnitud baja debido a la cantidad de material depositado (Figura 33), generando poros en toda la superficie que dejaron pasar las radiaciones sin entrar en contacto con las partículas del MoO_3 . No obstante, la activación del efecto fotocromático se puede evidenciar a partir de los 10 minutos, el cual crece conforme pasa el tiempo debido a que la separación uniforme de las partículas favorece a su área

superficial, permitiéndoles entrar en contacto con la radiación UV, lo que provoca esta rápida activación.

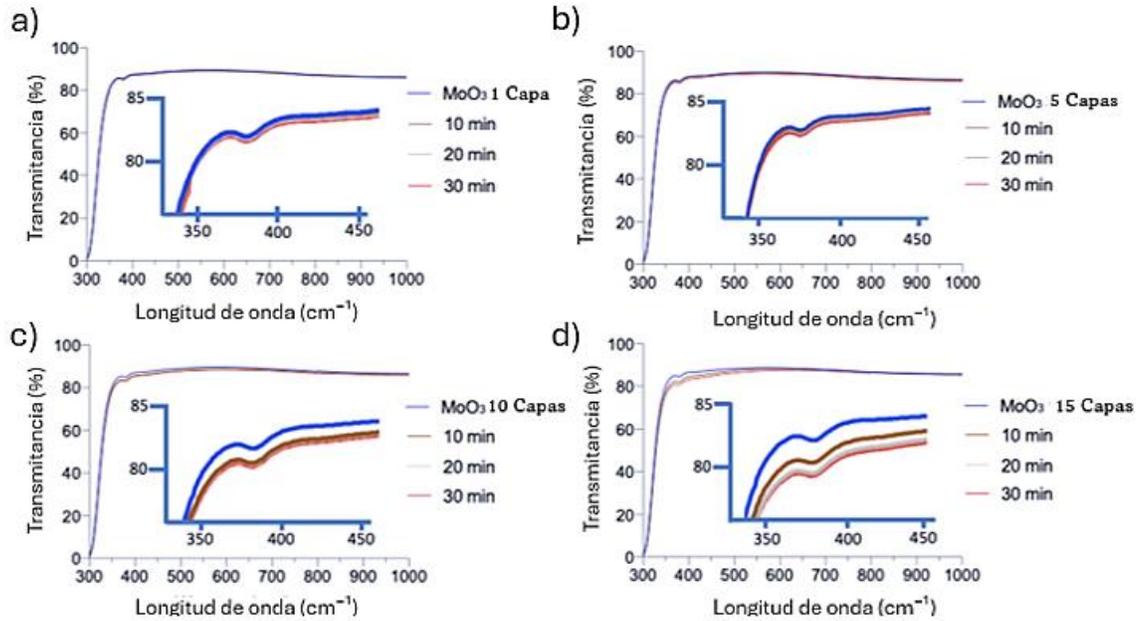


Figura 35.- Efecto óptico de la película de MoO₃ depositada sobre el vidrio, usando a) 1, b) 5, c) 10 y d) 15 capas.

La Figura 36 se presenta el efecto de reducción del paso de las radiaciones en función a la cantidad de capas depositadas de MoO₃ en el vidrio después de 30 minutos de irradiación, observándose una disminución del paso de la luz visible en un 2% al comparar el uso de 1 y 15 capas.

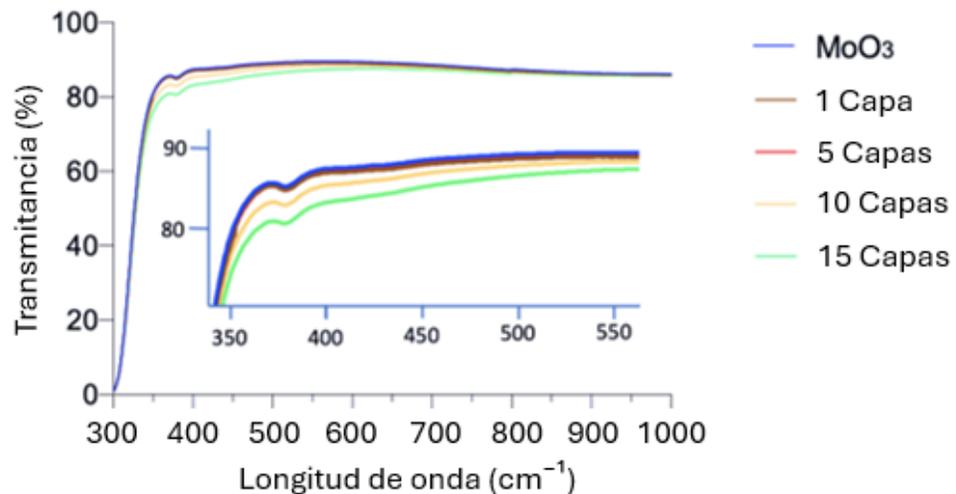


Figura 36.- Efecto óptico en función del número de capas después de 30 minutos de irradiación.

La Figura 37 presenta el efecto de modulación solar para 15 capas de depósito, el cual fue la condición que mostró el mayor efecto. Así, se encontró una reducción de hasta 1.6% de transmitancia solar al comparar la película de MoO_3 sin irradiación y aplicando 30 minutos de irradiación UV. Aunque esta reducción porcentual puede apreciarse como limitada, considerando la técnica de aplicación fácil propuesta en este estudio, la cantidad de energía usada para realizar el depósito y el potencial de la técnica para aplicarlo en extensas áreas de ventanas ya instaladas, esto podría representar una buena alternativa para mejorar la eficiencia energética en edificios antiguos como se discutirá en la sección 5.9.

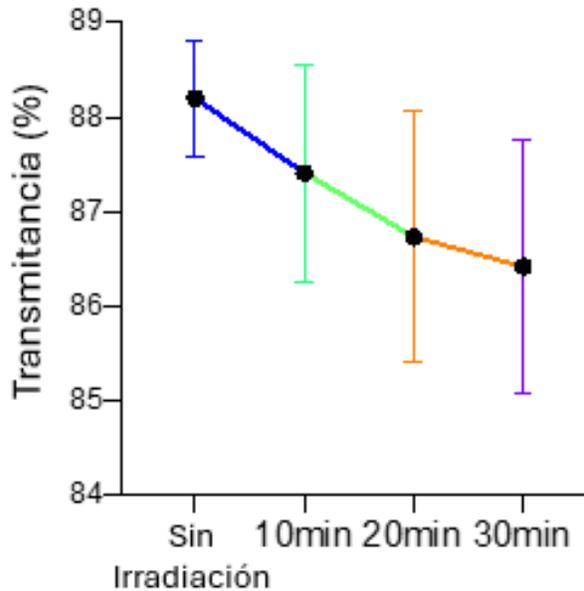


Figura 37.- Efecto óptico de la película de MoO_3 en función de los tiempos de irradiación UV.

5.4.2. Película VO_2 .

La Figura 38 presenta la caracterización estructural de la película delgada de VO_2 depositada sobre vidrio obtenida por DRX, el cual muestra los cuatro picos de difracción principales que se correspondieron con la fase monoclinica del VO_2 (JCPDS:00-043-1051), ubicándose en los ángulos de difracción 2θ de 27.8° , 37.0° , 42.2° y 55.4° , relacionados con los planos cristalinos de (011), (-211), (-

212) y (220) respectivamente [16]. Esto confirma que el VO₂ no sufrió una alteración en su fase cristalina durante la deposición.

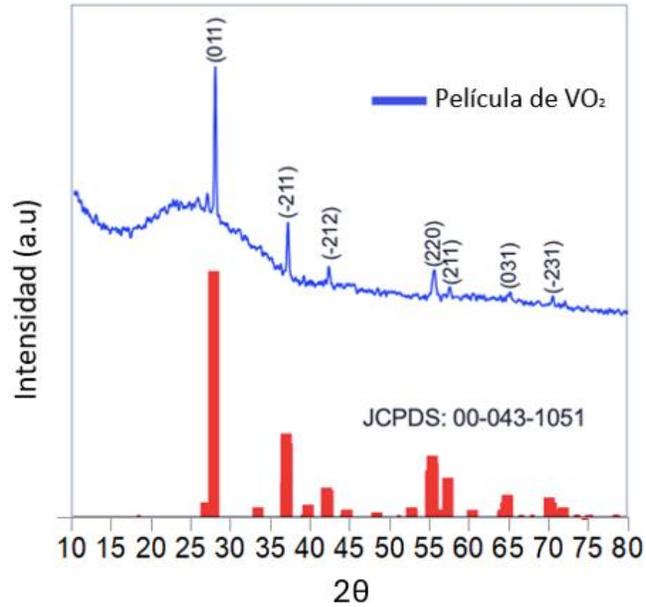


Figura 38.- Patrón de DRX de la película de VO₂.

Además, se corroboró la evaporación del isopropanol y la presencia de la fase monoclinica del VO₂ mediante espectroscopía FTIR (Figura 39), el cual mostró la vibración principal del VO₂(M) a 991 cm⁻¹ [17], mientras que las bandas correspondientes al isopropanol no se observaron. Estos resultados confirmaron la efectividad de la técnica de preparación y deposición de la suspensión del VO₂, sin que cambie su estructura cristalina.

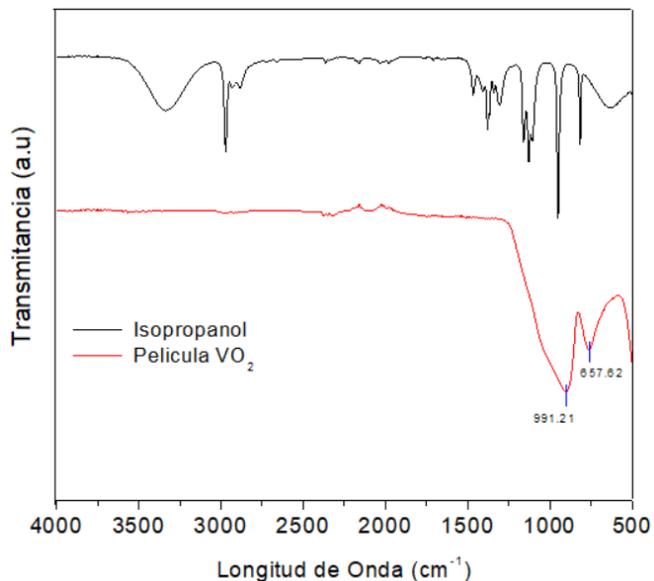


Figura 39.- Espectroscopía FTIR del depósito de películas delgadas de nanopartículas de VO₂ utilizando isopropanol como dispersante.

Las Figuras 40 y 41 presentan los resultados de MFA para las películas delgadas de VO₂ a 1 y 5 capas, respectivamente, en las cuales se encontró una distribución uniforme de las partículas depositadas de VO₂. Asimismo, la distribución del tamaño de las partículas fue uniforme, variando entre los 50 y 150 nm en ambas imágenes. Además, se observó una morfología de granos redondeados no uniformes, los cuales son comunes en el VO₂(M) [4]; mientras que el perfil de rugosidad mostró un promedio de 10 nm que indicó una buena uniformidad durante la deposición. La diferencia reside en la cantidad de partículas depositadas, viéndose reducida influenciada en la rugosidad.

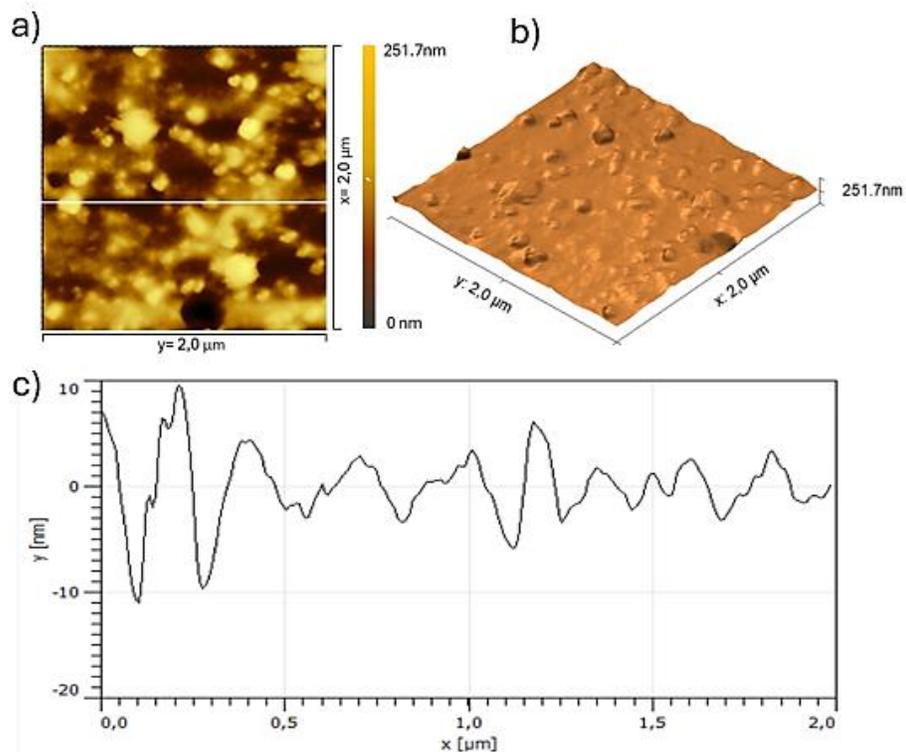


Figura 40.- Resultados de MFA para la película de VO₂, depositando 1 capa a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad.

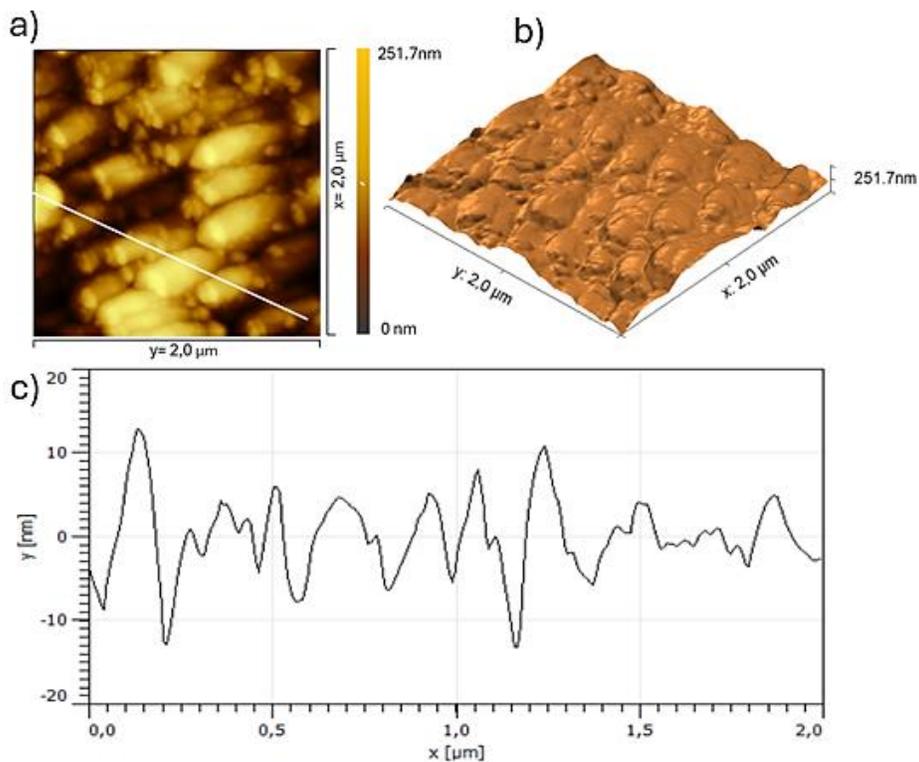


Figura 41.- Resultados de MFA para la película de VO₂, depositando 5 capas, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad..

La Figura 42 presenta un mapeo composicional elemental obtenido mediante MEB-EDX del depósito de las partículas de VO₂ en el cual se muestra una distribución homogénea del V usando a) 1, b) 3 y c) 5 capas, favoreciendo un incremento en la cantidad de V depositado de 3.3%, 8.9% y 23.1%, respectivamente, conforme la cantidad de capas fue mayor. Estos resultados se pueden atribuir a una buena dispersión de las partículas de VO₂ mediante el isopropanol.

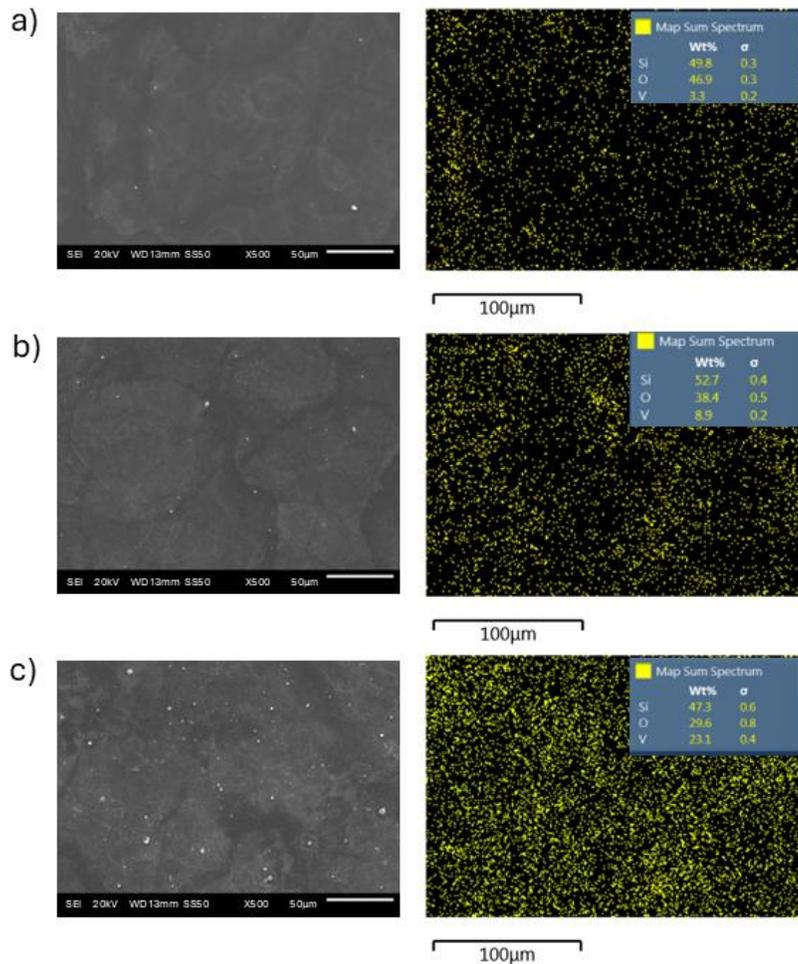


Figura 42.- Mapeo de la composición elemental para la película de VO₂, depositando a) 1, b) 3 y c) 5 capas de esprayado.

La Figura 43 presenta los resultados del ensayo de adhesión, mostrando imágenes del antes (43a) y después (43b) de la aplicación de la cinta sobre el vidrio con 5 capas depositadas de las partículas de VO₂, observándose pequeñas

aglomeraciones que se mantuvieron después del ensayo. Esta película se clasifica como una 5B conforme a la norma ASTM-D3359, ya que el 100% de material se desprendió.

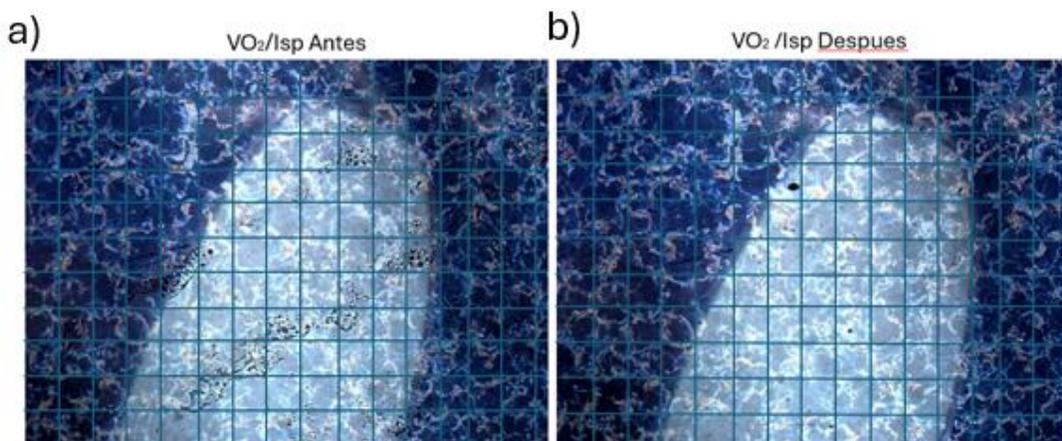


Figura 43.- Prueba de adherencia para el depósito de 5 capas de las partículas de VO₂ disperso en isopropanol (Isp)

La Figura 44 presenta los resultados de UV-VIS-NIR para las películas delgadas de VO₂ depositando 1, 3 y 5 capas, las cuales fueron evaluadas a una temperatura de activación a de 23, 70 y 90 °C. En general, las tres condiciones mostraron un comportamiento similar, es decir, el efecto sobre la transmitancia fue mayor a medida que aumentó el número de capas y la temperatura de activación; de hecho, el efecto más importante estuvo relacionado con la deposición de 5 capas y una temperatura de 70 °C. Respecto a la ΔT_{Sol} , se obtuvo un valor máximo de 1.2%, 2.4% y 3.9% depositando 1, 3 y 5 capas, respectivamente, todas utilizando 70 °C para la temperatura de activación.

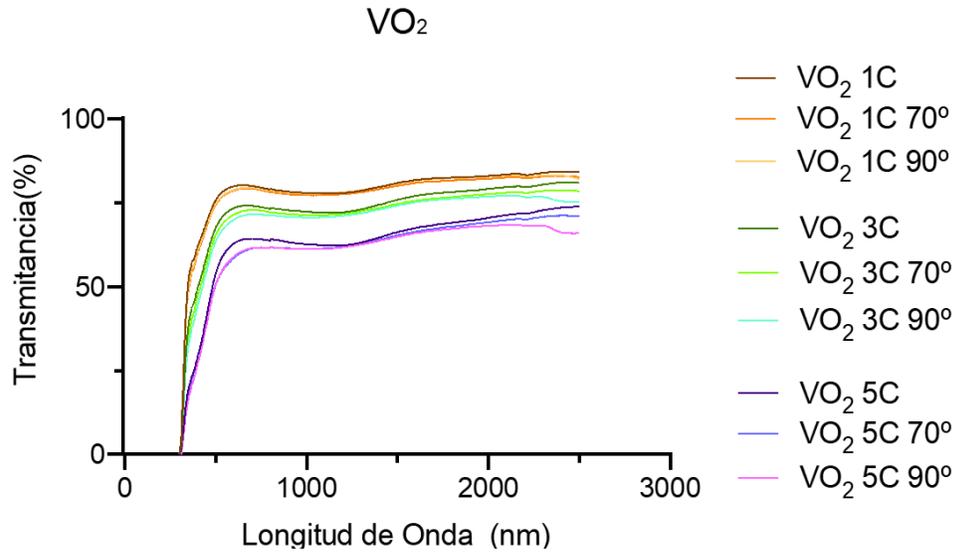


Figura 44.- Efecto óptico de películas de VO₂, usando diferentes temperaturas de activación.

5.4.3. Película de ZnO.

La Figura 45 presenta el patrón de DRX de la película delgada de ZnO depositada sobre el vidrio, mostrando los picos de difracción que indican la presencia del ZnO en fase cristalina hexagonal (JCPDS 01-089-1397); es decir, se observaron los picos de difracción ubicados en los ángulos de difracción 2θ de 31.90°, 34.58°, 36.39°, 47.87°, 57.35°, 64.12° y 68.90° relacionados con los planos cristalográficos de (100), (002), (101), (102), (110), (103) y (112) respectivamente. Esto confirma que no ocurrió un cambio de fase cristalina en el ZnO durante la deposición.

La Figura 46 presenta la caracterización por espectrometría FTIR para la película de ZnO depositadas en el vidrio, en la cual se encontraron las bandas de los 921 y 781.78 cm⁻¹ [118] que son características del enlace de Zn-O en fase hexagonal [119-121,136]

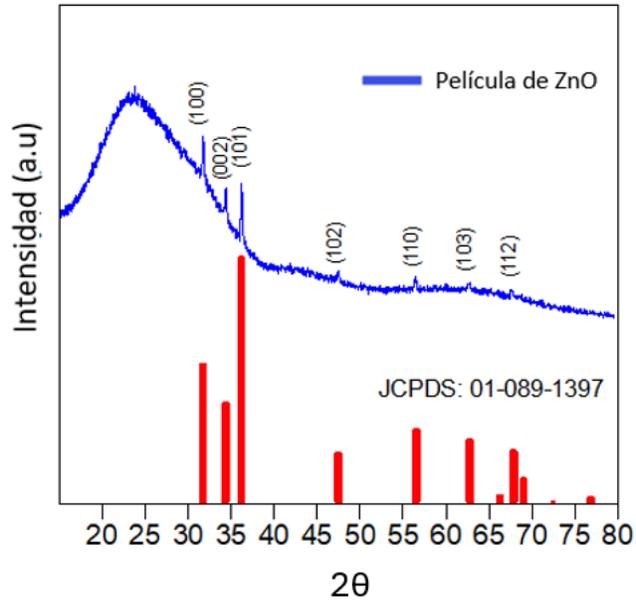


Figura 45.- Patrón de DRX de la película de ZnO.

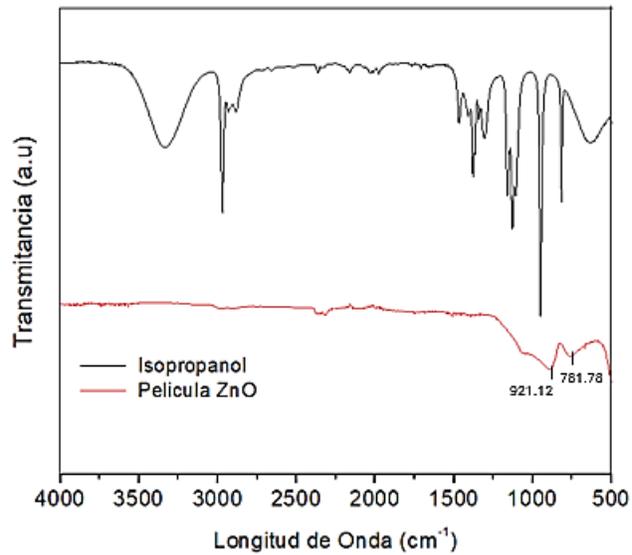


Figura 46.- Espectroscopía FTIR de la película del ZnO.

La Figura 47 y 48 presentan los resultados de MFA para la película de ZnO, depositando 1 y 5 capas, mostrando una distribución homogénea, pero siendo en su gran mayoría partículas con tamaños entre los 35 y 450 nm; además, se observó una morfología esférica en las partículas depositadas, lo cual se corresponde con los reportes para las partículas de ZnO en su fase hexagonal [123-124].

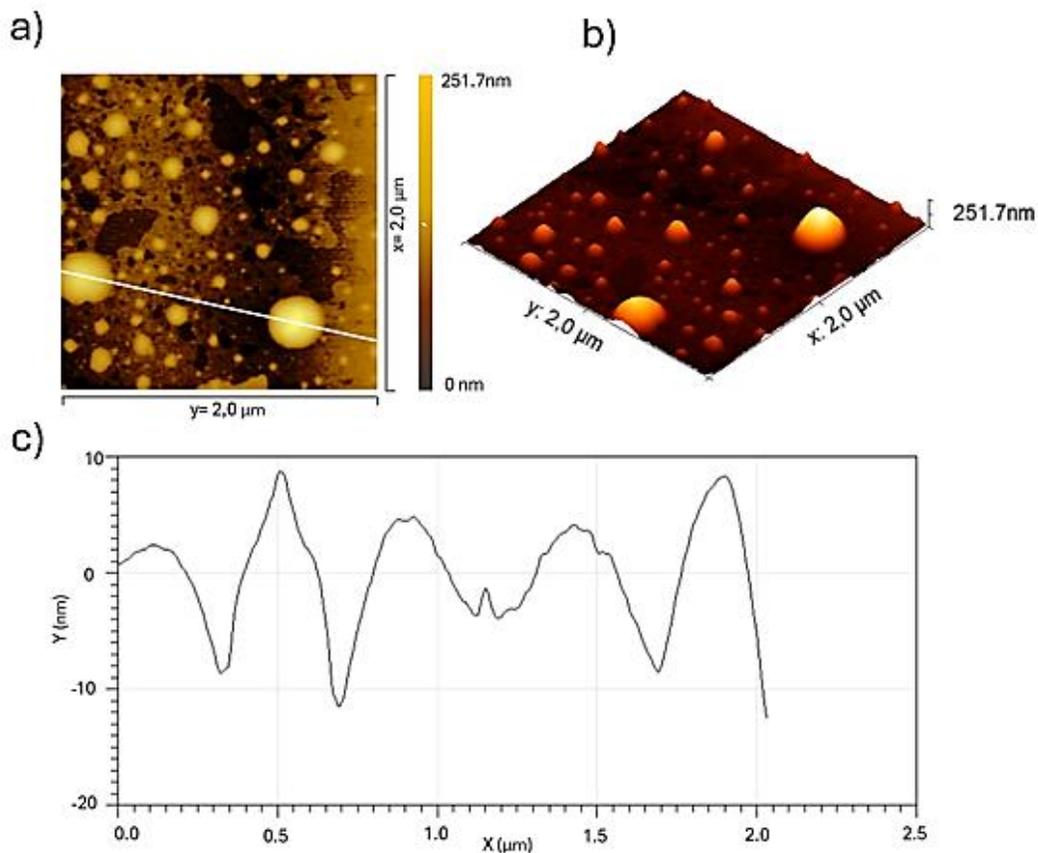


Figura 47.- Resultados de MFA para la película del ZnO, depositando 1 capa, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad.

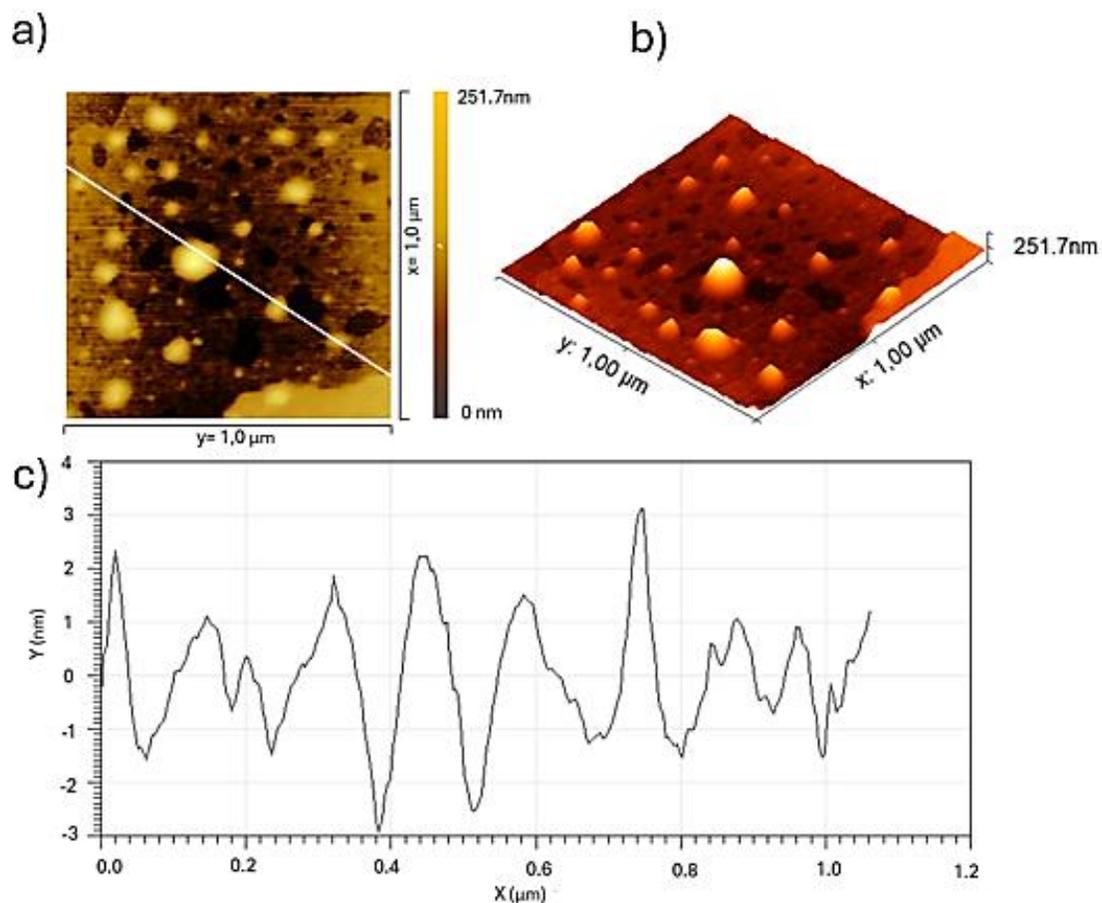


Figura 48.- Resultados de MFA para la película del ZnO, depositando 5 capas, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad..

La Figura 49 presenta un mapeo de composición elemental para el depósito en vidrio de las partículas de ZnO usando a) 1, b) 3 y c) 5 capas, mostrando una distribución homogénea del Zn sin importar el incremento en el número de capas, dando como resultado un aumento casi nulo en la cantidad de Zn depositado. Esto se debe a la morfología esférica de las partículas de ZnO que propicia un área de contacto pequeña, ocasionando que las partículas no permanezcan depositadas en el vidrio [139].

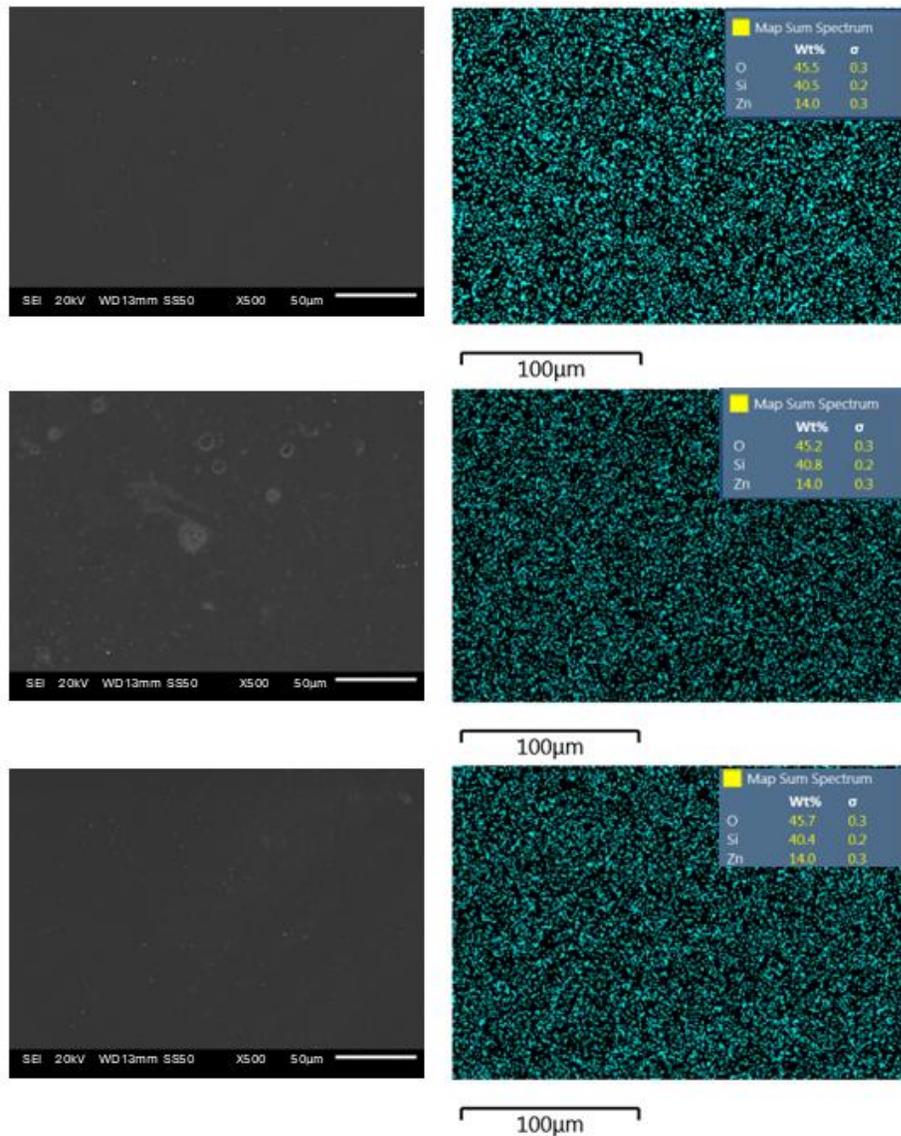


Figura 49.- aseo de composición elemental de la película de ZnO, depositando a) 1 , b) 3 y c) 5 capas.

La Figura 50 presenta el ensayo de adherencia para la película de ZnO a 5 capas, mostrando imágenes del a) antes y d) después de la aplicación de la cinta sobre el vidrio observándose pequeñas aglomeraciones, en las cuales se mantuvo una cantidad considerable del material depositado después de la prueba de la cinta, clasificando esta película como 1B conforme a la norma ASTM-D3359, ya que se removió entre un 35% y 65% de la película.

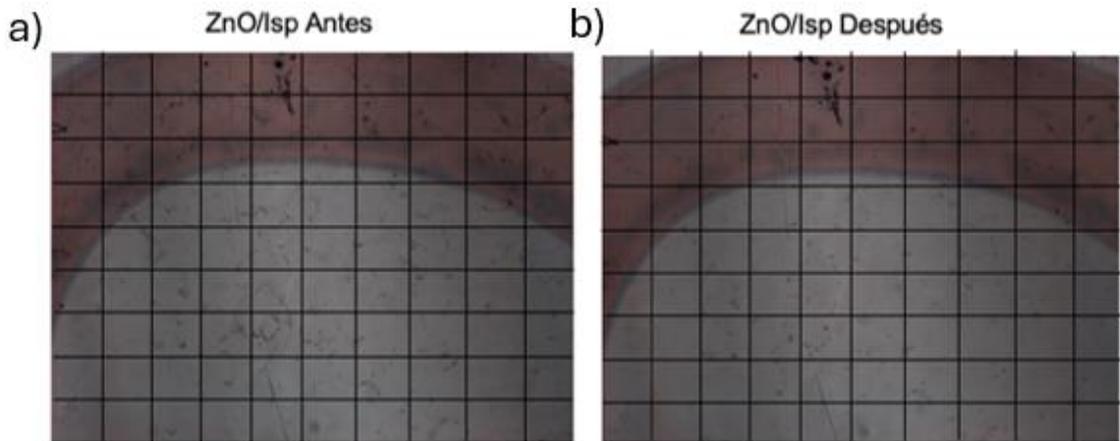


Figura 50.- Prueba de adherencia del depósito de partículas de ZnO disperso en isopropanol (Isp) a 5 capas de esprayado.

La Figura 51 presenta el efecto óptico de la película de ZnO en función de la cantidad de capas depositadas en el vidrio, observándose una variabilidad mínima conforme aumenta el número de capas depositadas de ZnO, lo cual había sido reportado con anterioridad [140]

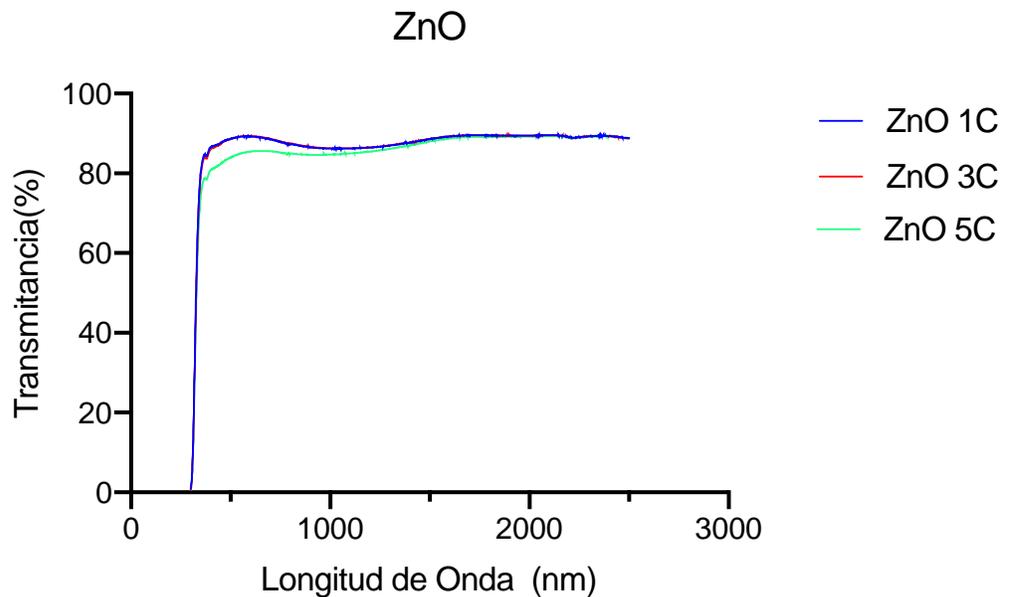


Figura 51.- Efecto óptico de películas de ZnO en función del número de capas.

En la etapa 1, se sientan precedentes muy importantes, en cuanto a la dispersión de los 3 óxidos evaluados por separado. En los 3 casos se obtuvo que el isopropanol mantenía estables las propiedades de cada uno, permitía un

menor tamaño de partícula posible y un bajo punto de evaporación, lo que facilitó significativamente la aplicación, ya que de manera casi instantánea se depositaba al vidrio y se evaporaba, evitando efectos de escurrimiento sobre el vidrio. Por otra parte, la técnica de aplicación resultó ser una técnica de uso simple, la cual requiere una muy baja cantidad de energía para propiciar su aplicación de películas sobre el vidrio. También se constató el efecto termocrómico del VO₂ y fotocromático del MoO₃, el cual depende de otras propiedades como su morfología, la cantidad del depósito de cada material y los espacios que quedan entre partículas depositadas sobre el vidrio.

5.5. Etapa 2: Diseño de experimentos para el sistema de multicapa.

Una vez caracterizados cada uno de los óxidos metálicos seleccionados, se procedió a intercalar el orden del depósito de los óxidos como se muestra en la Tabla 8, obteniéndose seis arreglos experimentales con el fin de evidenciar el efecto que cada uno aportaría a las propiedades ópticas de interés en esta investigación (transmitancia del espectro visible y modulación solar).

Tabla 8.- Diseño de experimentos para el sistema de multicapas.

Diseño de Exp	Sistema Multicapa 1	Sistema Multicapa 2
Capa Superior	ZnO	ZnO
Capa Media	MoO ₃	VO ₂
Capa Inferior	VO ₂	MoO ₃
Diseño de Exp	Sistema Multicapa 3	Sistema Multicapa 4
Capa Superior	MoO ₃	MoO ₃
Capa Media	ZnO	VO ₂
Capa Inferior	VO ₂	ZnO
Diseño de Exp	Sistema Multicapa 5	Sistema Multicapa 6
Capa Superior	VO ₂	VO ₂
Capa Media	MoO ₃	ZnO
Capa Inferior	ZnO	MoO ₃

5.6. Evaluación por MEB de las películas en multicapas.

A continuación, se muestran los análisis por MEB realizados con la finalidad de conocer la distribución del depósito de las películas en multicapas, además de determinar la cantidad de depósito de cada óxido metálico mediante los mapeos de composición química elemental obtenidos por EDX para correlacionarla con los resultados de las propiedades ópticas.

Por lo tanto, la Figura 52 presenta los resultados para el diseño de multicapa 1, mostrando una distribución homogénea de cada óxido depositado y una cantidad de depósito del 4.6% de V (a), 1.5% de Mo (b) y 14.5% de Zn (c). Estas cantidades para los elementos de Zn, V y Mo presentaron variaciones con respecto del depósito realizado individualmente para cada material. No obstante, es posible que la reducción de la cantidad de V depositado ocurrió debido a un apantallamiento durante el mapeo, ya que posteriormente se depositó el MoO_3 y el ZnO , lo cual podría haber cubierto algunas partículas del VO_2 depositado, evitando su detección por EDX. En el caso del Mo, su concentración se mantuvo muy similar debido a la poca cantidad depositada, por lo que es más complicado que el depósito posterior del ZnO lo cubra.

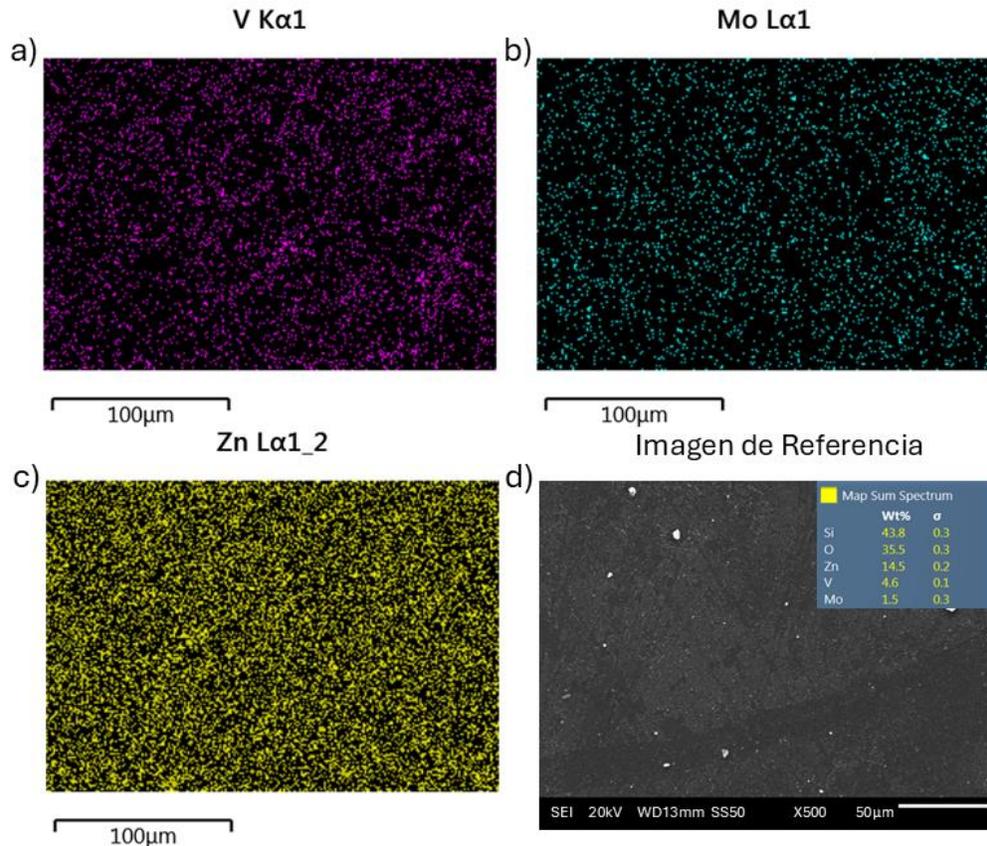


Figura 52.-Mapeo de composición elemental por MEB-EDX para el diseño de multicapa 1; V(a), Mo(b), Zn (c) y % de depósito(d).

La Figura 53 presenta el mapeo de composición para el diseño de multicapa 2, en el cual se aprecia una distribución homogénea del depósito para los tres óxidos V (a), Mo (b) y ZnO (c). En el caso del Zn se depositó 14.7%, para V se depositó un 6.4%, mientras que del Mo se obtuvo un 0.8%, siendo esta estructuración de multicapa la más cercana a las cantidades que se depositaron de manera individual; esto se debe probablemente al orden en el que se depositaron las capas. En el caso del MoO₃, la concentración se vio reducida con respecto de la película individual, pero sin una variación significativa. Para el VO₂, también se presentó una reducción, pero su variación fue menor con respecto del el diseño de multicapa 1, probablemente debido a que en este caso sólo el ZnO está depositado encima.

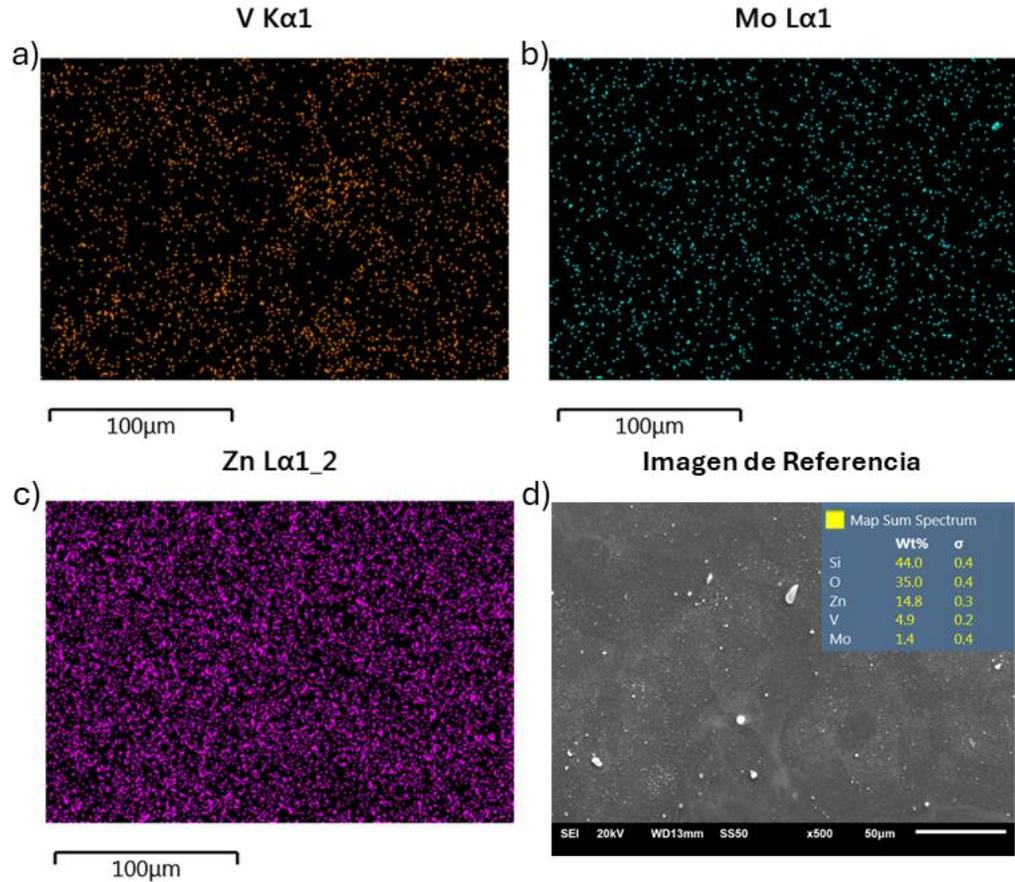


Figura 53. Mapeo de composición elemental obtenida por MEB-EDX para el diseño de multicapa 2; V(a), Mo(b), Zn (c) y % de depósito(d).

La Figura 54 presenta el mapeo composicional para el diseño de multicapa 3, mostrando una distribución homogénea del depósito de los óxidos V(a), Mo(b) y ZnO (c). En la cual se depositó una cantidad de 14.8%, 4.9% y 1.4% de Zn, V y Mo. En general, el único material que tuvo una reducción en su depósito fue el VO_2 , siendo influenciado por la capa del ZnO que fue depositada por encima, es decir, debido a que la cantidad que se depositó de ZnO fue mayor que el VO_2 , presentando una mayor probabilidad de ser cubierto por el depósito

superior, lo que ocasiona un efecto de apantallamiento que reduce la cantidad detectada por el EDX.

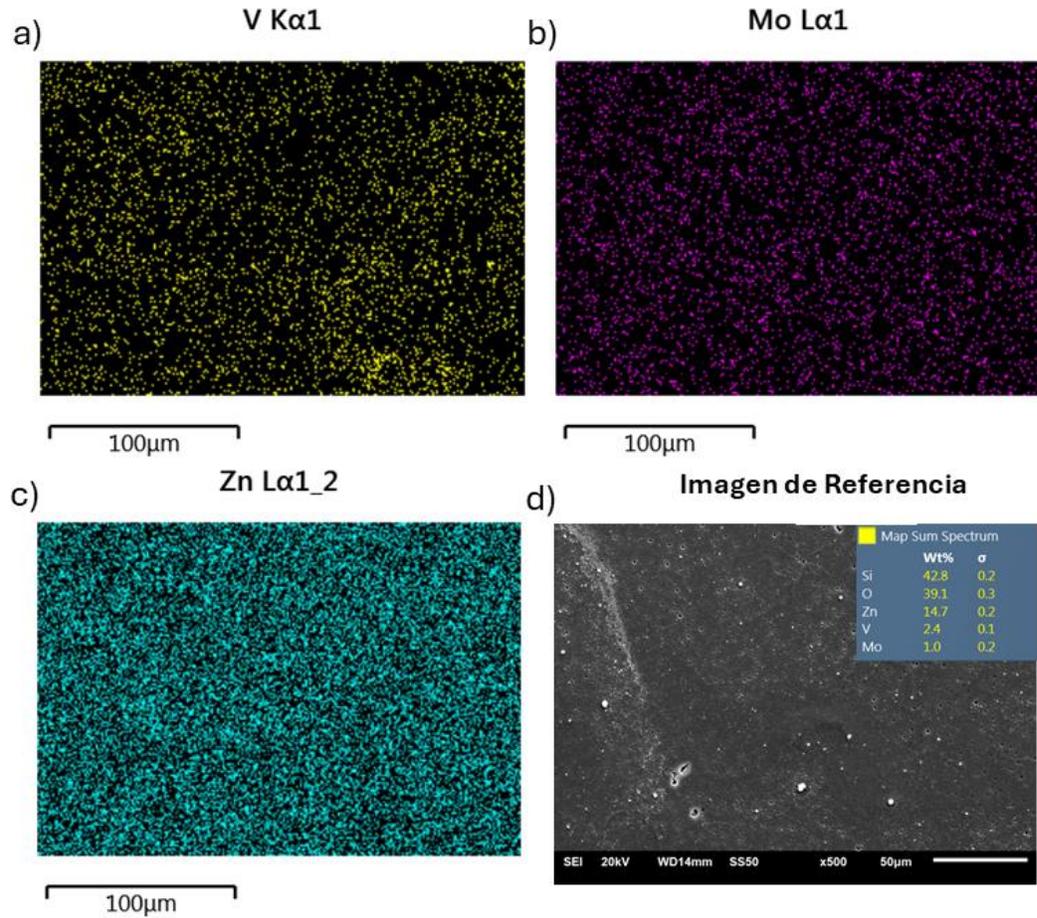


Figura 54.- Mapeo de composición elemental obtenido por MEB-EDX para el diseño de multicapa 3; V(a), Mo(b), Zn (c) y % de depósito(d).

La Figura 55 presenta el mapeo composicional para el diseño de multicapa 4, el cual muestra un depósito homogéneo para los tres óxidos, V(a), Mo(b) y ZnO (c), alcanzando una concentración de 14.5%, 5.8% y 1.1% para el Zn, el V y el Mo, respectivamente. A diferencia de la estructuración con el diseño de multicapa 3, la cantidad de depósito del V aumentó debido a que la capa de ZnO se encuentra por debajo, mientras que la capa de MoO₃ se encuentra por encima, lo cual no tuvo un efecto significativo en la variación de la cantidad de material depositado de los otros óxidos.

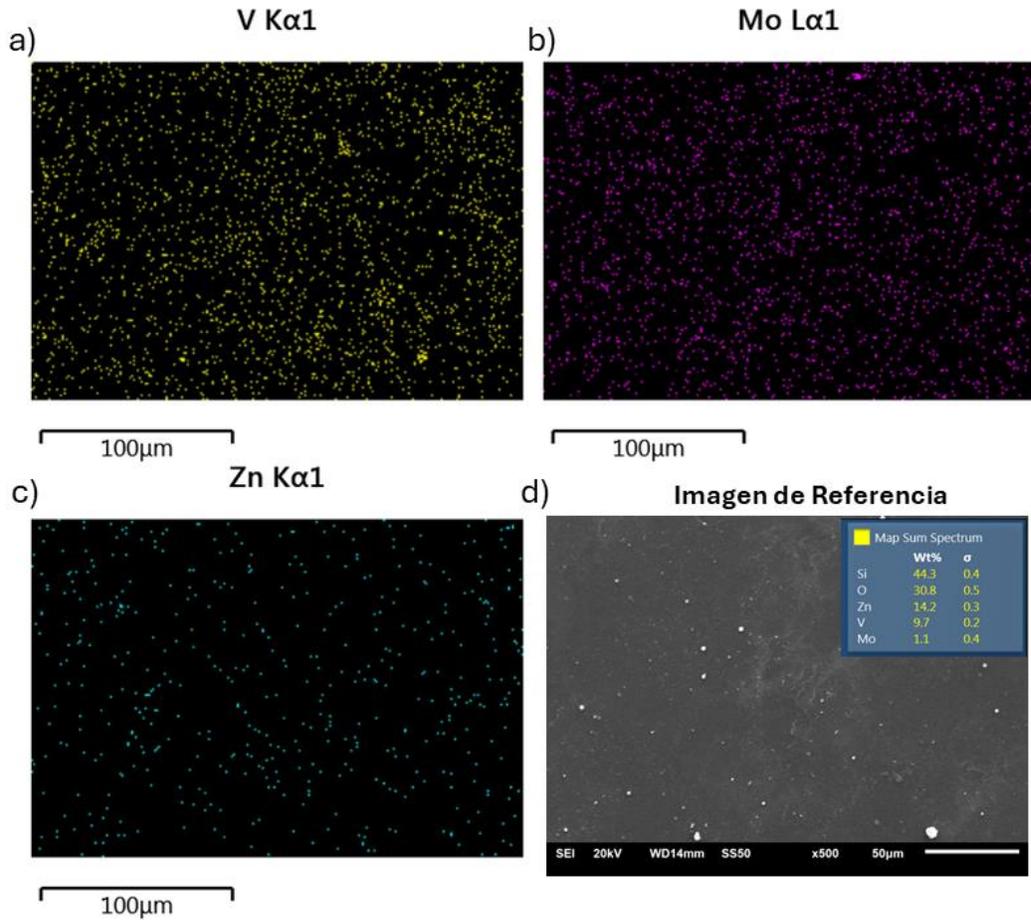


Figura 55.- Mapeo de composición elemental obtenido por MEB-EDX para el diseño de multicapa 4; V(a), Mo(b), Zn (c) y % de depósito(d).

La Figura 56 presenta el mapeo composicional para el diseño de multicapa 5 de los tres óxidos V(a), Mo(b) y ZnO (c), mostrando un depósito homogéneo y una concentración de 14.4%, 6.5% y 2.3% para el Zn, V y Mo. Cabe mencionar que el crecimiento del depósito del VO_2 y MoO_3 se ve influenciado directamente por la ubicación de la capa del ZnO que aporta la mayor cantidad del depósito en la multicapa, por lo que no tiene ningún efecto de reducción para los otros óxidos cuando se utiliza como la base para las otras capas.

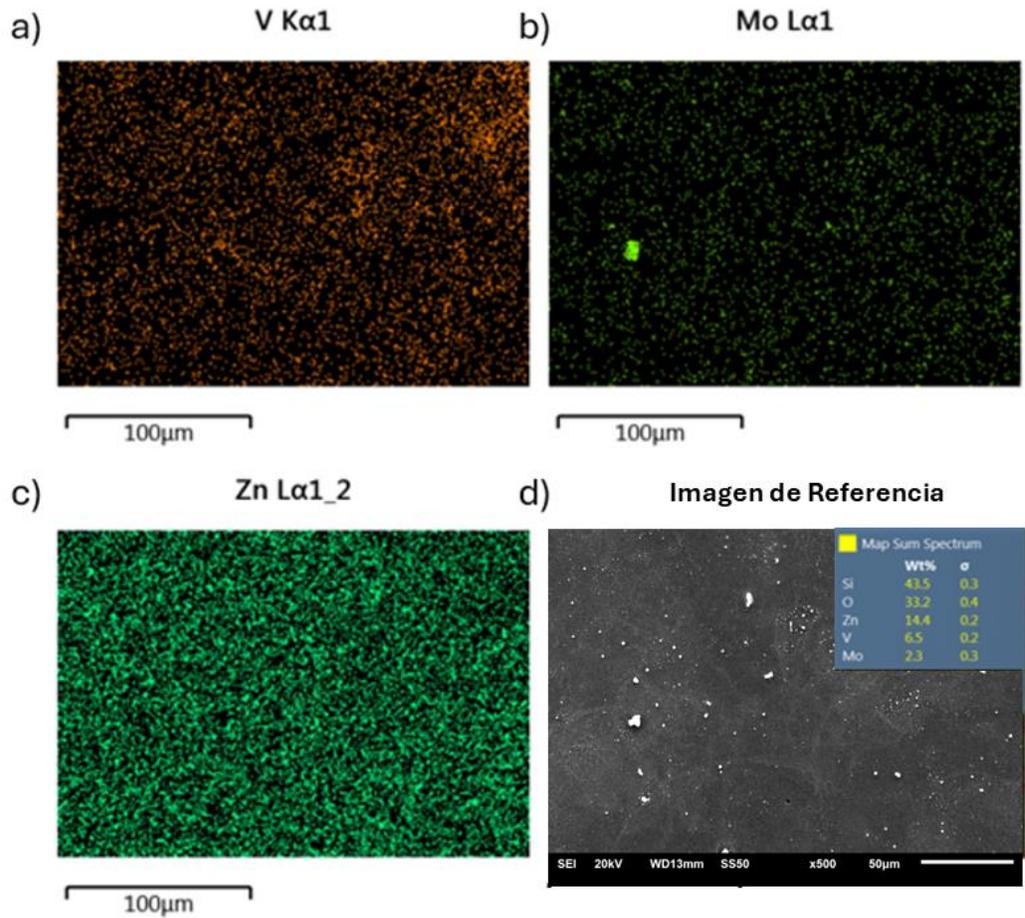


Figura 56.- Mapeo de composición elemental obtenido por MEB-EDX para el diseño de multicapa 5; V(a), Mo(b), Zn (c) y % de depósito(d).

La Figura 57 presenta el mapeo composicional del diseño de multicapa 6, mostrando un depósito homogéneo de cada óxido depositado V(a), Mo(b) y ZnO (c), manteniendo una cantidad similar al depósito individual, es decir, se alcanzó un 14.3%, 6.7% y 1.9% de Zn, V y Mo, respectivamente. De manera análoga que el diseño de multicapa 5, este caso no se ve influenciado por el depósito de ZnO; asimismo, el VO₂, tampoco se ve afectado al estar por encima de los otros óxidos.

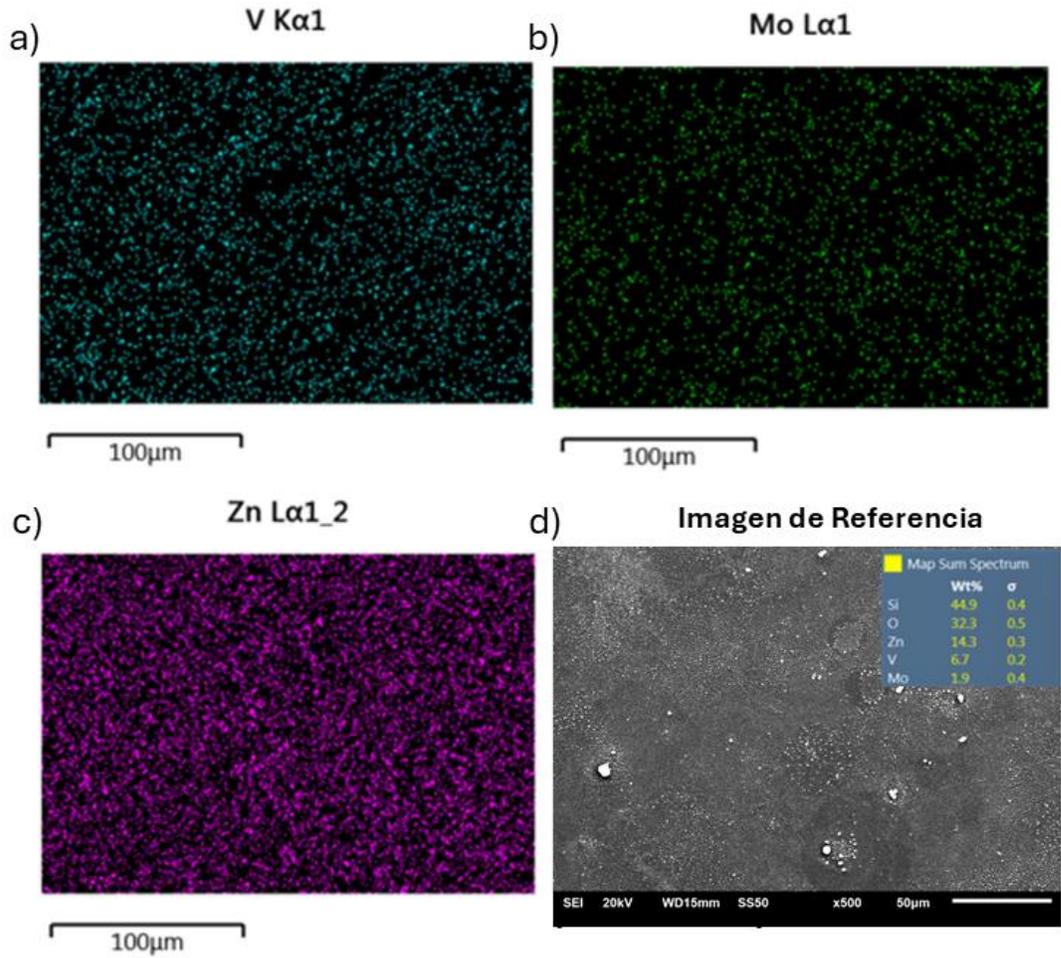


Figura 57.- Mapeo de composición elemental obtenido por MEB-EDX para el diseño de multicapa 6; V(a), Mo(b), Zn (c) y % de depósito(d).

5.7. Evaluación por MFA de las películas en multicapas.

A continuación, se muestran los resultados de MFA con el propósito de identificar la morfología y la homogeneidad de la estructuración para las películas en multicapas. La Figura 58a presenta los resultados para el diseño de multicapa 1, entre los cuales se encontró una altura de partícula 214.3 nm y una rugosidad de 8.459 nm 58c, indicando que los tamaños de partícula para todos los óxidos metálicos fueron muy similares. Asimismo, se observaron distintos cúmulos de material distribuidos uniformemente que indicaron la formación de los depositos de dos o tres óxidos, propiciando un crecimiento de los cúmulos que sobresalen en la distribución de partículas 58b. Esto puede atribuirse a que la última capa de

óxido metálico fue de ZnO, por lo tanto, la probabilidad de generar esta doble o triple capa es mayor.

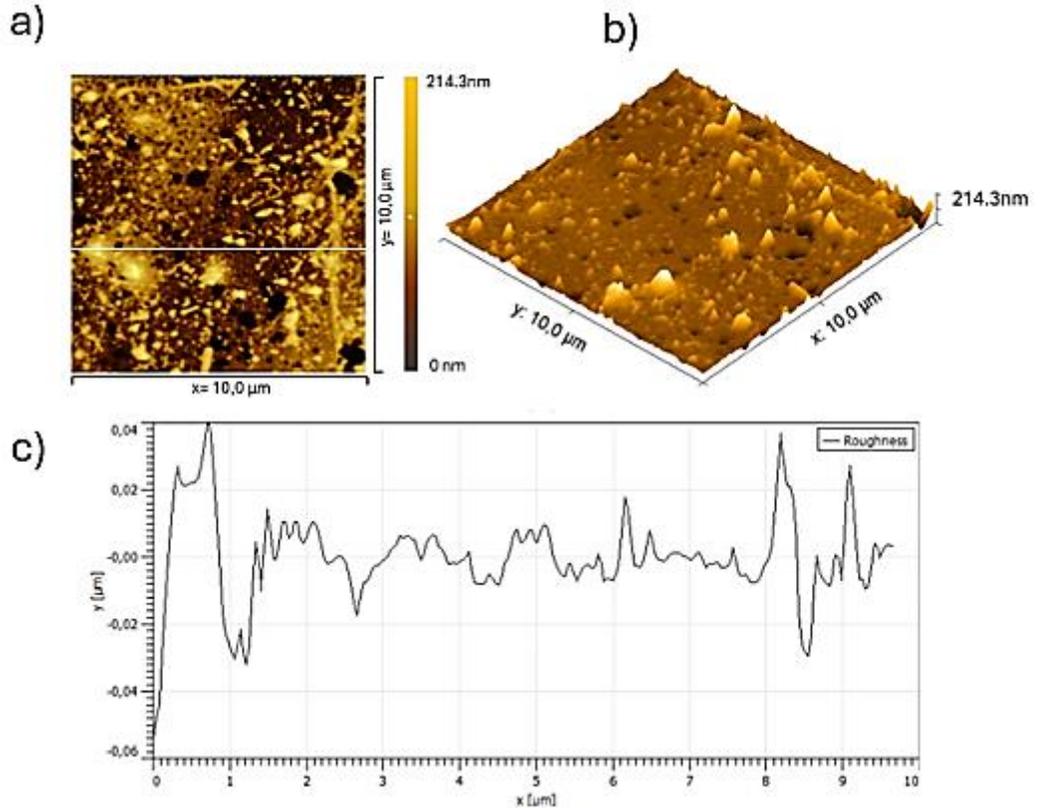


Figura 58. Resultados de MFA para el diseño de multicapa 1, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad..

La Figura 59a presenta los resultados de MFA para el diseño de multicapa 2, los cuales muestran una altura de partícula 251.7 nm y una rugosidad de 9.065 nm 59c, indicando que los tamaños de partícula de cada óxido metálico fueron muy parecidos. También, se observaron algunos cúmulos de material distribuidos uniformemente que son indicativos de la formación de un depósito con una doble o triple capa de los óxidos, propiciando que destaquen en la uniformidad de la película 59b. Esto puede atribuirse a que la última capa de óxido metálico depositado fue el ZnO, promoviendo una alta probabilidad para la formación de los cúmulos de doble y triple capa de óxidos.

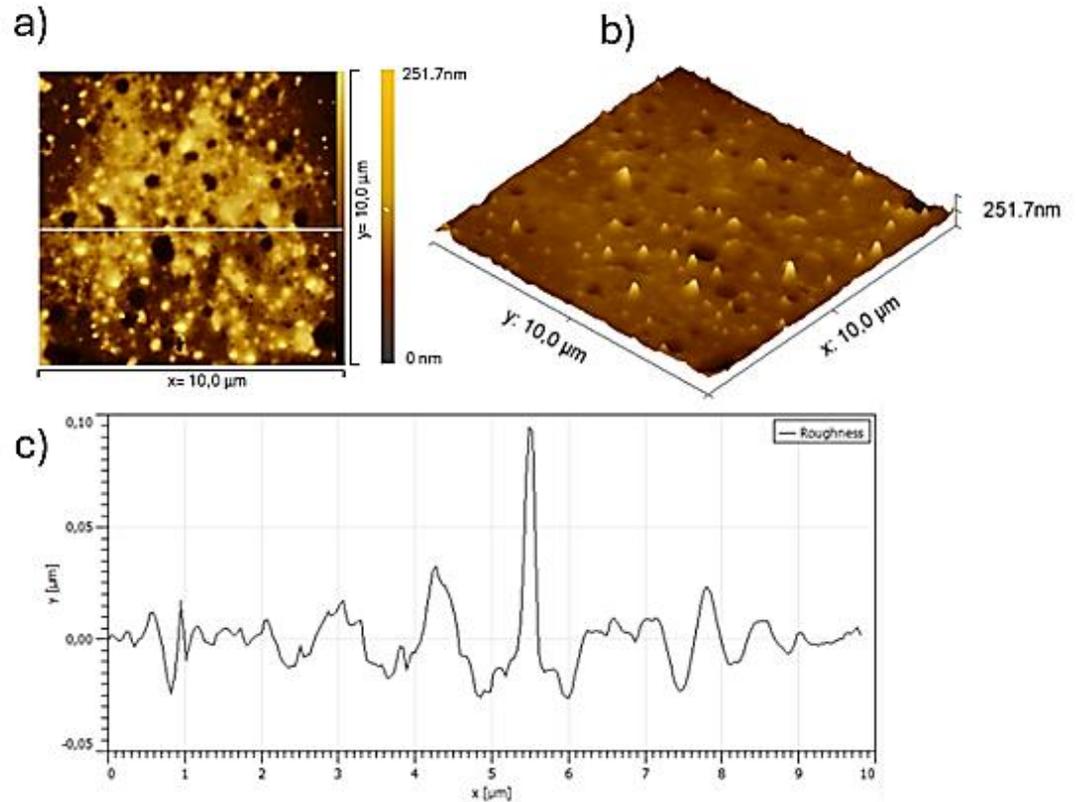


Figura 59.- Resultados de MFA del diseño de multicapa 2, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad.

La Figura 60a presenta los resultados de MFA del diseño de multicapa 3, mostrando una altura de partícula 251.7 nm y una rugosidad de 10.29 nm (60c), lo cual indica que los tamaños de partícula de cada óxido metálico fueron muy parecidos. En este caso, se observaron pocos cúmulos de material distribuidos uniformemente que indicaron la formación de un depósito con una doble o triple capa de los óxidos, propiciado que sobresalgan en la uniformidad de la película (60b). Esto se debió a que el ZnO fue depositado en la capa media, causando menos cúmulos de material porque el VO₂ se que se utilizó para la capa inferior no contiene una gran cantidad de partículas, promoviendo una reducida cantidad de cúmulos.

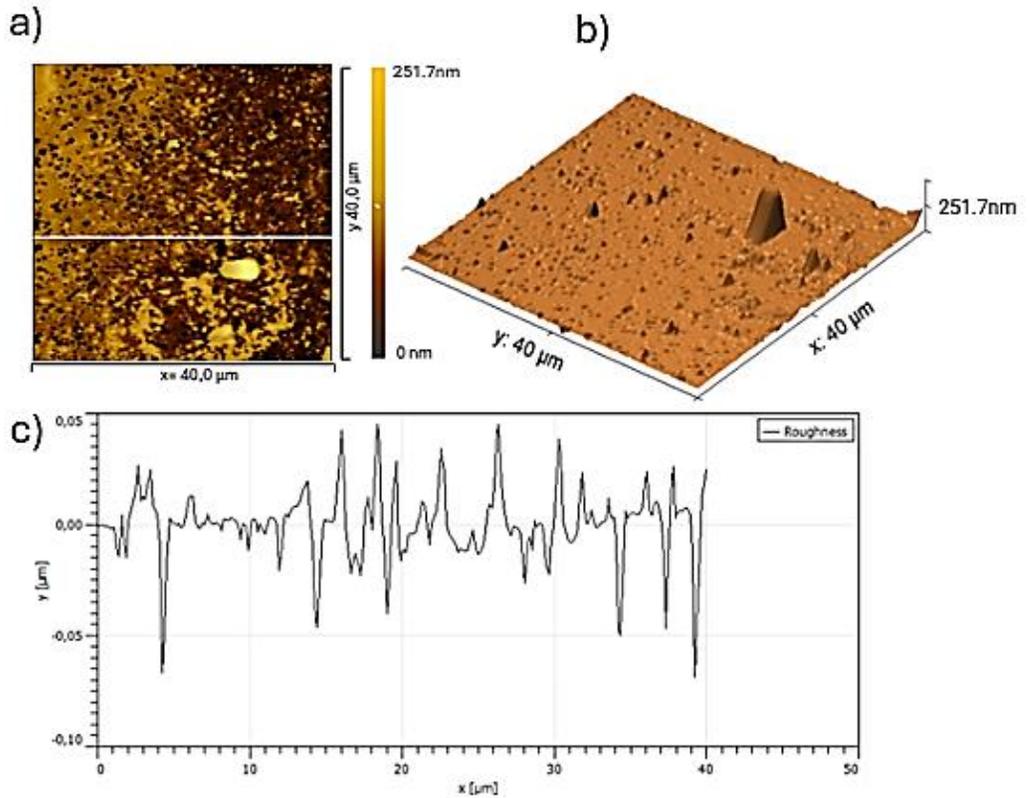


Figura 60.- Resultados de MFA del diseño de multicapa 3, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad..

La Figura 61a presenta los resultados de MFA para el diseño de multicapa 4, el cual muestra una altura de partícula 285.0 nm y una rugosidad de 10.76 nm (61c), indicando que los tamaños de partícula de cada óxido metálico fueron muy parecidos. También, se observaron algunos cúmulos de material distribuidos uniformemente que son indicativos de la formación de depósitos con una capa doble o triple de los óxidos, propiciando que sobresalgan en la uniformidad de la película (61b). Esto se debió a que el ZnO fue depositado en la primera capa, lo cual significa que se tuvo un área suficiente para que el MoO₃ y el VO₂ se depositara sobre el ZnO para promover una mayor cantidad de cúmulos de partículas.

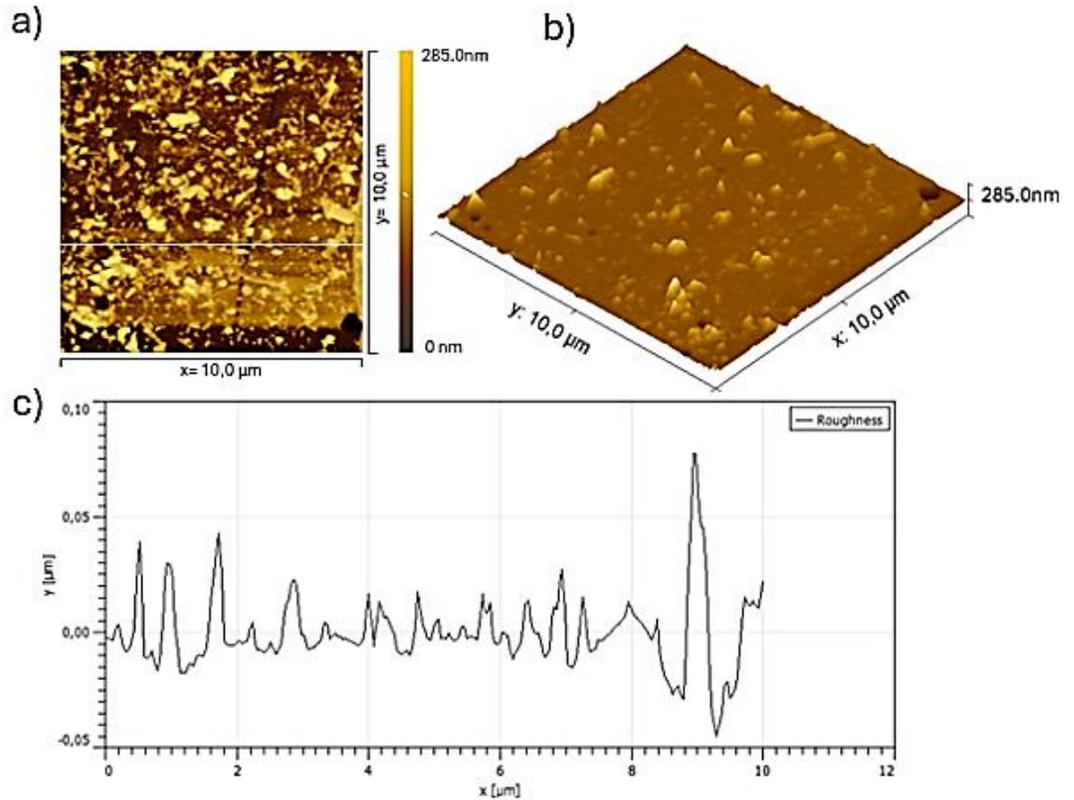


Figura 61.- Resultados de MFA para el diseño de multicapa 4, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad..

La Figura 62a presenta los resultados de MFA para el diseño de multicapa 5, mostrando una altura de partícula 285.0 nm y una rugosidad de 13.96 nm 62c, lo cual indica que los tamaños de partícula de cada óxido metálico fueron muy parecidos. Asimismo, se observó una buena cantidad de cúmulos de material distribuidos uniformemente que son indicativos de la formación de un depósito de capa doble o triple de los óxidos, propiciando que sobresalgan en la uniformidad de la película 62b. Esto se debió a que el ZnO fue depositado en primera la primera capa, brindando una base adecuada para que el MoO₃ y el VO₂ se depositen, promoviendo una mayor cantidad de cúmulos.

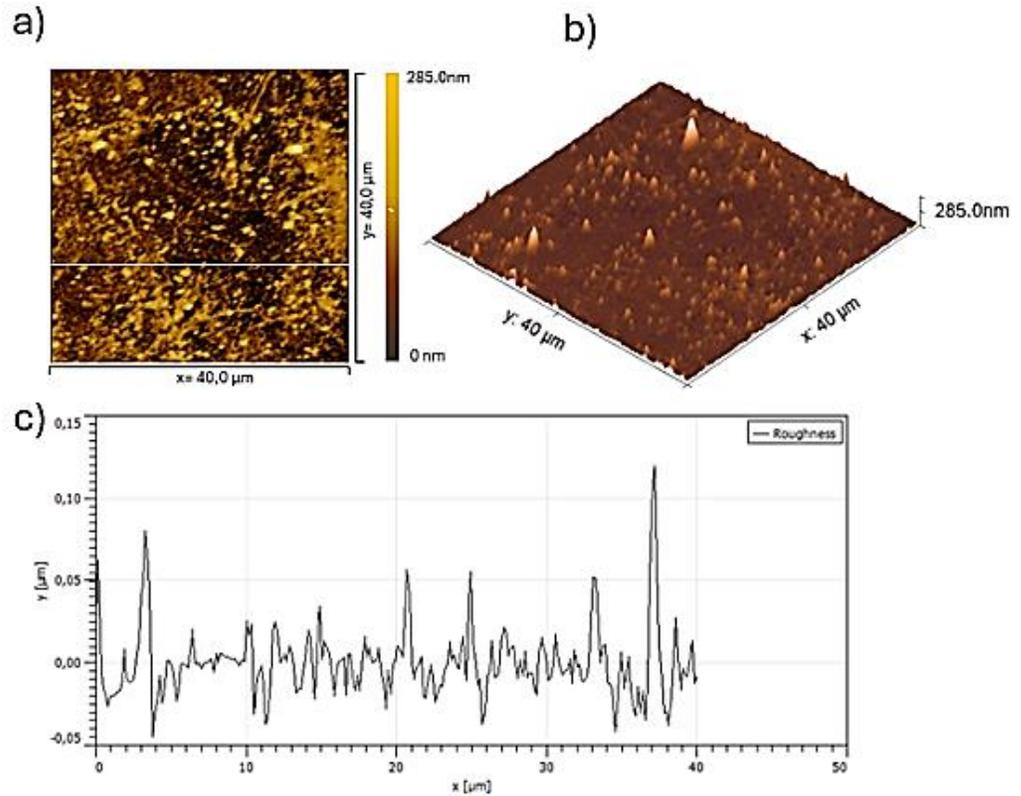


Figura 62.- Resultados de MFA para el diseño de multicapa 5, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad..

La Figura 63a presenta los resultados de AFM para el diseño de multicapa 6, mostrando una altura de partícula $0.8 \mu\text{m}$ y una rugosidad de 37.87 nm (63c), lo cual indica que los tamaños de partícula de cada óxido metálico fueron muy parecidos. Además, se observó una baja cantidad de cúmulos de material distribuidos uniformemente que indicaron la formación de un depósito de capa doble o triple de los óxidos, propiciando que sobresalgan en la uniformidad de la película (63b). Esto se debió a que el ZnO fue depositado en la capa media, provocando una cantidad reducida de cúmulos, lo cual se presentó también en la estructuración del diseño de multicapa 3.

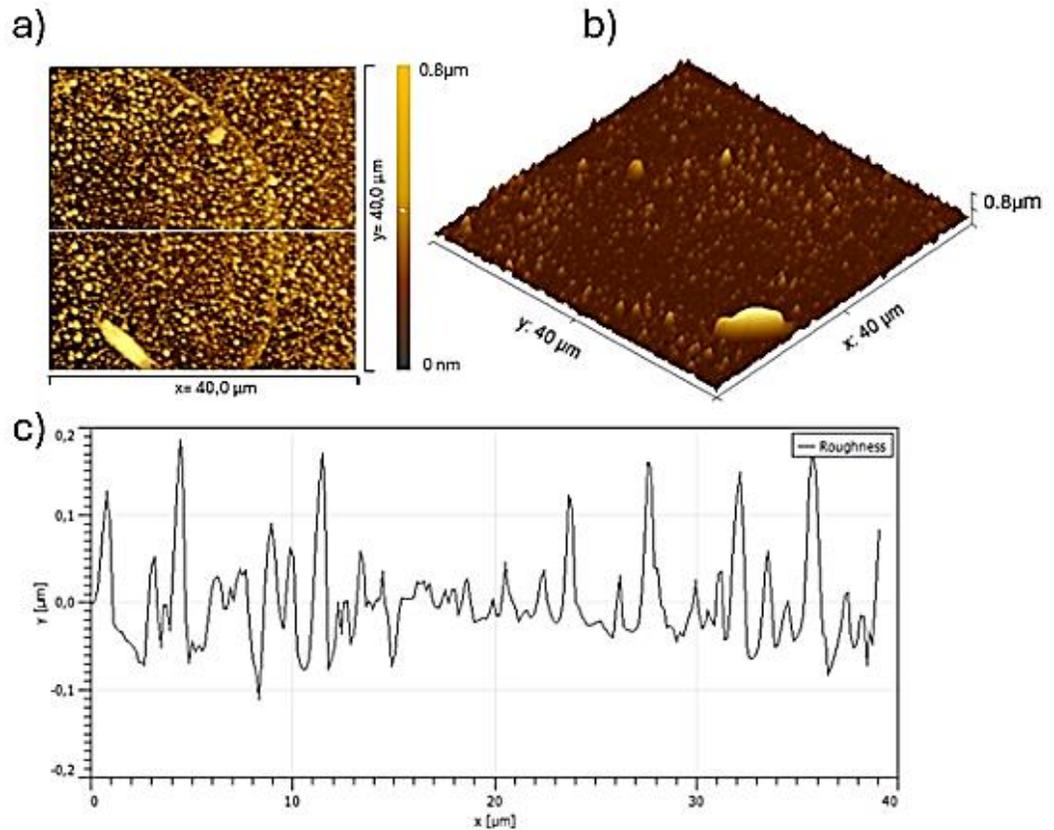


Figura 63.- Resultados de MFA del diseño de multicapa 6, a) Imagen, b) Imagen 3D y c) Grafica de Rugosidad..

5.8. Efecto óptico de las películas en multicapas.

La Figura 64 presenta el efecto fotocromico del diseño de multicapa 1 debido al tiempo de irradiación UV, mostrando una reducción uniforme en el rango de la radiación VIS y NIR, siendo más notorio en el primero. Además, se observó que el paso de la radiación solar va disminuyendo conforme es mayor el tiempo de irradiación con la lampara UV, alcanzando entre 0% y 1% para un tiempo entre 10 y 180 min, brindando un paso de luz visible de $T_{vis}= 56\%$ al considerar como referencia el vidrio con la película sin irradiación. Para el caso de la ΔT_{sol} , se observó una reducción del 0 al 1% desde los 10 hasta los 180 min de irradiación UV, con lo cual se alcanzó una $T_{sol}= 66\%$. Esto se debió a que la primera capa de ZnO entra en contacto con la radiación electromagnética, permitiendo la transferencia de electrones a la capa de inferior que causó un mejoramiento en el efecto fotocromico de las partículas del MoO_3 .

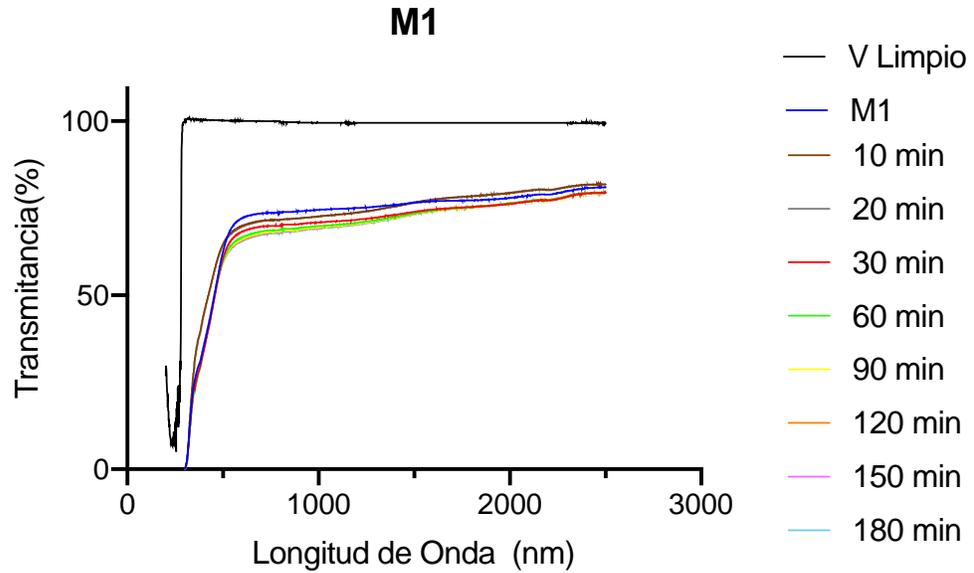


Figura 64.- Efecto fotocromático de la película con el diseño de multicapa 1 en función del tiempo de irradiación UV.

La Figura 65 presenta el efecto termocrómico del diseño de multicapa 1, en el cual hubo una ligera reducción uniforme para el rango de las radiaciones VIS y NIR en comparación con el efecto fotocromático; además, el incremento de la temperatura hasta los 90°C generó un ligero aumento en el efecto termocrómico. Para el caso de la T_{vis} se obtuvo un valor del 58%, tomando como referencia el vidrio limpio sin previa irradiación. Respecto de la ΔT_{sol} , se obtuvo un valor de 0.8% a los 90°C, alcanzando un 67% de transmitancia solar. Este efecto se vió limitado como en el caso del efecto fotocromático a pesar de que el ZnO transfiere los electrones al MoO₃, ya que el último generó el mismo efecto para las capas del VO₂.

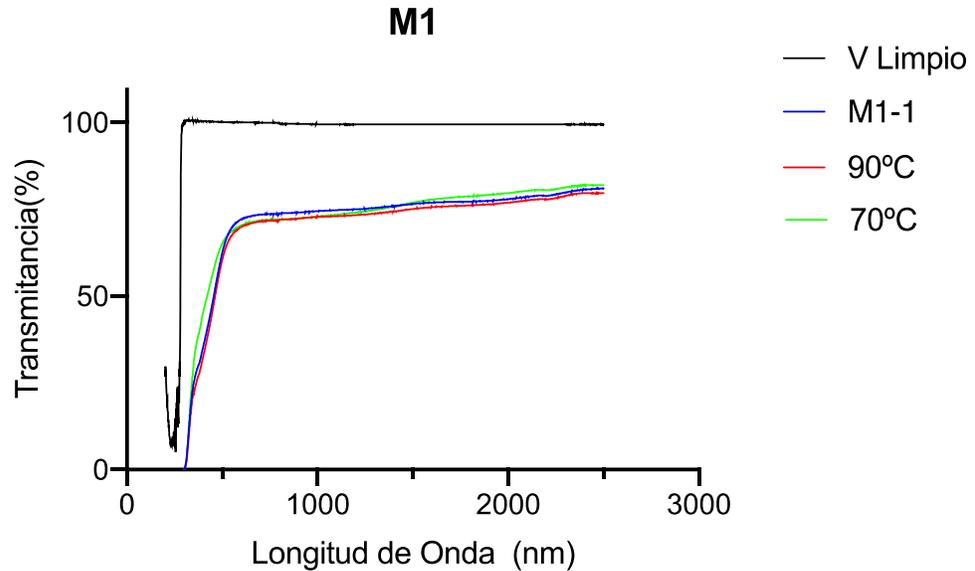


Figura 65.- Efecto termocrómico del diseño de multicapa 1 en función de la temperatura.

La Figura 66 presenta el efecto óptico del diseño de multicapa 2 debido al tiempo de irradiación UV, mostrando el efecto fotocromático y una reducción en el rango de la radiación visible; además, se observó que el paso de la radiación solar va disminuyendo conforme el tiempo de irradiación de UV es mayor, variando desde 0% hasta 2% entre los 10 y 180 min, dando una T_{vis} del 57% al considerar como referencia el vidrio con una película depositada sin irradiación. Para el caso de la ΔT_{sol} se observó una reducción que varió del 0 al 2% entre los 10 y los 180 min, alcanzando un 65% del paso de la radiación solar. Esto se debió a que a la estructuración en la cual el ZnO está en la capa superior, transfiriendo electrones al VO₂ y al MoO₃, causando un mayor efecto fotocromático con respecto de la película individual de MoO₃, incrementando el efecto fotocromático en la parte inferior de la estructuración en multicapa.

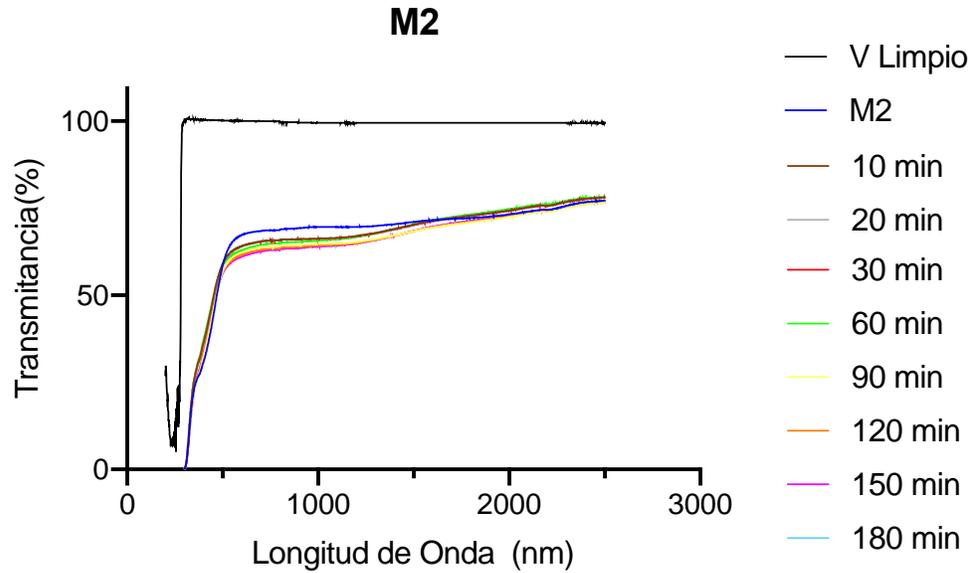


Figura 66.- Efecto fotocromático del diseño de multicapa 2 en función del tiempo de irradiación UV.

La Figura 67 presenta el efecto óptico del diseño de multicapa 2 debido a la temperatura, mostrando el efecto termocrómico más pronunciado en el rango de radiación visible, muy similar al efecto fotocromático; además, el incremento de temperatura sucedió desde los 70°C, propiciando una reducción importante del paso de la radiación VIS y NIR. Para el caso de la T_{vis} se obtuvo un valor del 60% al compararlo con el vidrio totalmente limpio. Respecto de la ΔT_{sol} , se obtuvo un valor del 2% a los 90°C, alcanzando un 66% del paso de la radiación solar. Esto se debió a que la capa de ZnO es la primera que se encuentra con la radiación solar al estar en la parte superior de las multicapas, haciendo un efecto de transición de electrones a la capa de VO₂ depositada por debajo y causando un mejoramiento del efecto termocrómico.

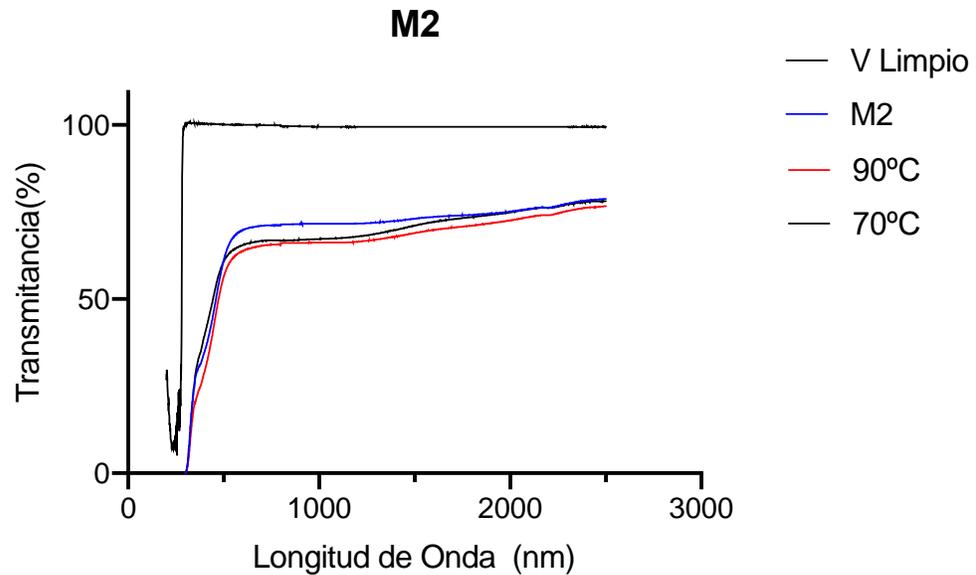


Figura 67.- Efecto termocrómico del diseño de multicapa 2 en función de la temperatura.

La Figura 68 presenta el efecto óptico del diseño de multicapa 3 en función del tiempo de irradiación UV, mostrando el efecto fotocromático y una reducción mínima que se acentuó en el rango de la radiación VIS; además, se observó que el tiempo de irradiación UV no causó un efecto significativo, manteniendo constante el valor de la T_{vis} al 68% al considerar como referencia el vidrio con una película depositada sin previa estimulación. Respecto de la ΔT_{sol} , se observó una reducción de tan sólo un 1%, alcanzando una transmitancia solar de 74%. Esto sugiere que la cantidad del depósito del MoO_3 fue insuficiente para generar un efecto importante, a pesar de encontrarse en la capa superior.

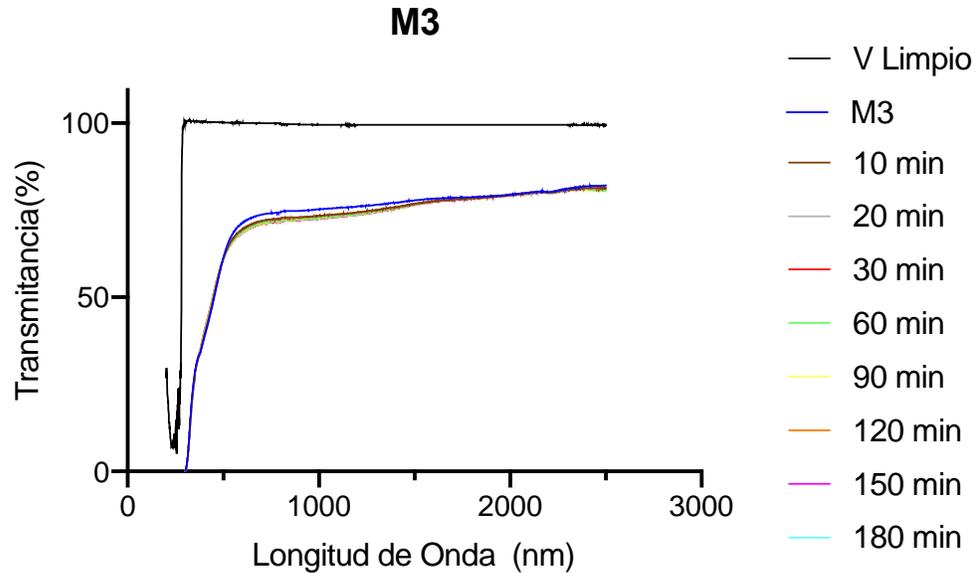


Figura 68.- Efecto fotocromático del diseño de multicapa 3 en función del tiempo de irradiación UV.

La Figura 69 presenta el efecto óptico del diseño de multicapa 3 en función de la temperatura, mostrando el efecto termocrómico y una reducción mínima que se acentuó en el rango de la radiación VIS; además, se observó que el cambio de temperatura no causó un efecto significativo, manteniendo constante el valor de la T_{vis} al 68%, tomando como referencia el vidrio totalmente limpio. Respecto de la ΔT_{sol} , se observó una reducción cercana al 0% y alcanzando un 75% de transmitancia solar. Esto se debió a que el VO_2 estuvo en la capa más baja de la estructuración, resultando en un nulo efecto termocrómico debido al apantallamiento ocasionado por los otros óxidos.

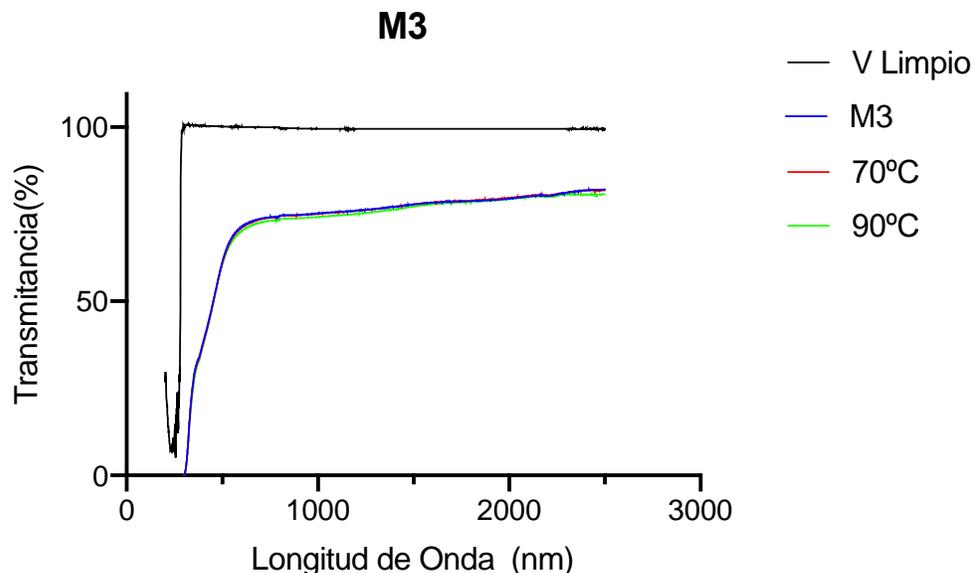


Figura 69.- Efecto termocrómico del diseño de multicapa 3 en función de la temperatura.

La Figura 70 presenta el efecto óptico del diseño de multicapa 4 debido al tiempo de irradiación UV, mostrando el efecto fotocromático y una reducción que se acentuó en el rango de la radiación VIS, variando del 2% al 55% para los tiempos de irradiación entre los 10 y los 180 min, alcanzando un 55% de transmitancia visible al tomar como referencia el vidrio totalmente limpio sin irradiación UV. Respecto de la ΔT_{sol} , se observó una reducción en el rango de la VIS, variando de 3.14% hasta 3.66% para unos tiempos de irradiación entre los 10 y los 180 minutos, alcanzando un 65% de transmitancia solar. Esto se debió a que la capa superior del MoO_3 entra en contacto directo con las partículas depositadas previamente, favoreciendo la modulación del paso de la radiación solar.

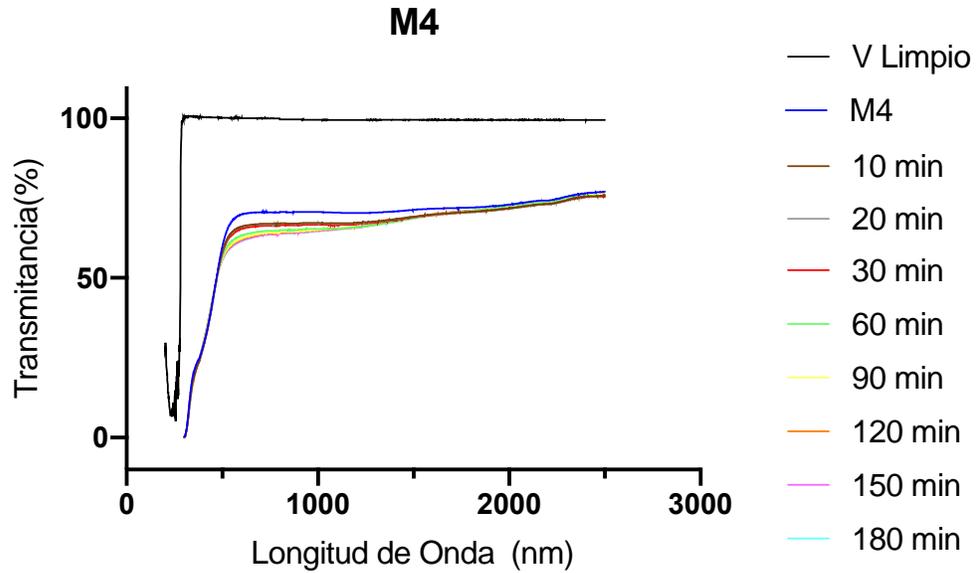


Figura 70.- Efecto fotocromico del diseño de multicapa 4 en función del tiempo de irradiación UV.

La Figura 71 presenta el efecto óptico del diseño de multicapa 4 en función de la temperatura, mostrando el efecto termocrómico y una reducción mínima que se acentuó en el rango de la radiación VIS; además, se observó un crecimiento gradual para una temperatura entre 70 y 90 °C, alcanzando una T_{vis} entre el 56% y 55%, respectivamente, al tomar como referencia el vidrio totalmente limpio. Respecto de la ΔT_{sol} , se redujo un 1%, alcanzando un 66% de transmitancia solar. Esto se debió a que el VO_2 formó la capa media de la estructuración en multicapa, por lo que no generó una sinergia con el óxido de ZnO, propiciando una pobre respuesta termocrómica.

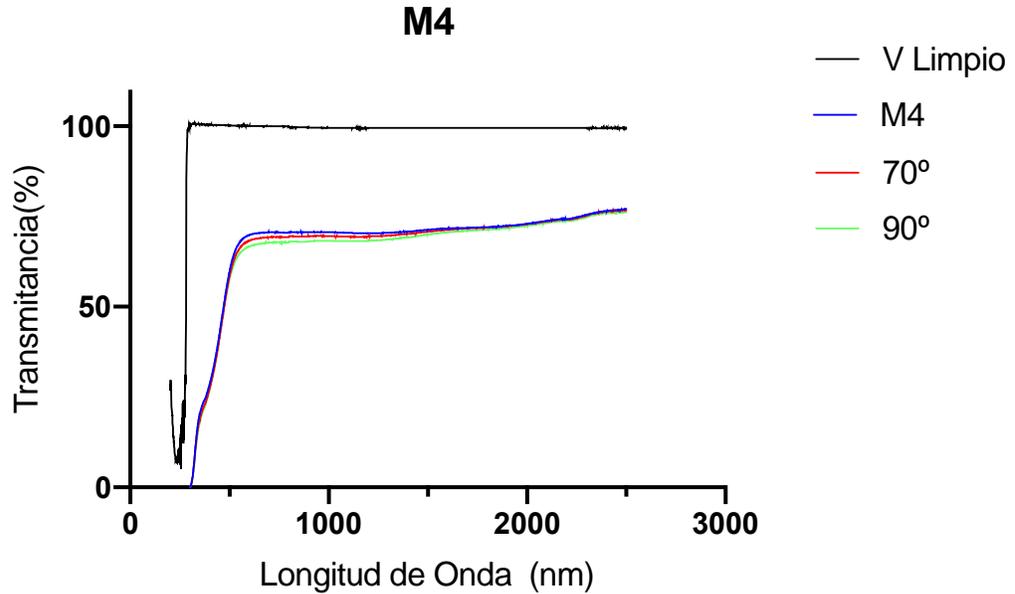


Figura 71.- Efecto termocromico del diseño de multicapa 4 en función de la temperatura.

La Figura 72 presenta el efecto óptico del diseño multicapa 5 en función de la irradiación UV, mostrando el efecto fotocromico y una reducción que se acentuó pronunciadamente en el rango de la radiación VIS y ligeramente en el rango de la NIR; además, se observó un T_{vis} que varió del 46% al 42% para los tiempos de irradiación UV entre los 10 y los 180 minutos, considerando como referencia el vidrio totalmente limpio sin irradiación. Respecto de la ΔT_{sol} , se observó una reducción en el rango de la VIS que varió de 2.3% hasta 56% para los tiempos de irradiación UV entre los 10 y los 180 minutos, alcanzando una transmitancia solar de 56%. Esto se debió a que la capa del MoO_3 se ubicó en medio de los otros óxidos, ocasionando esta buena modulación solar.

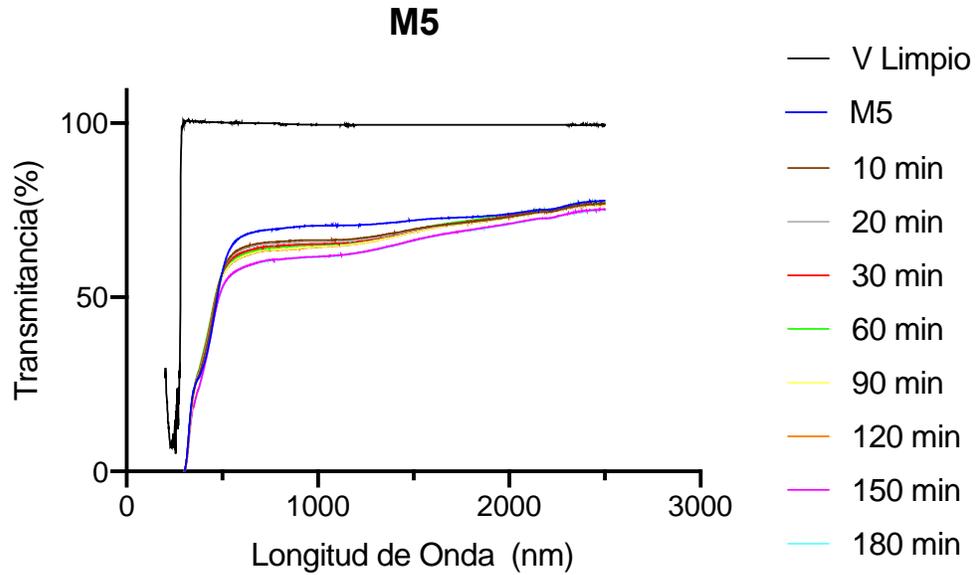


Figura 72.- Efecto fotocromico del diseño de multicapa 5 en función del tiempo de irradiación UV.

La Figura 73 presenta el efecto óptico del diseño de multicapa 5 en función de la temperatura, mostrando el efecto termocrómico y una reducción mínima que se acentuó en el rango de la radiación VIS; además, se observó un crecimiento gradual para una temperatura entre los 70 y los 90°C, alcanzando una T_{vis} entre el 48% y el 45%, respectivamente, tomando como referencia el vidrio completamente limpio sin previa estimulación. Respecto de la ΔT_{sol} , se observó una reducción entre el 1% y 3% para una temperatura de 70°C y 90°C, respectivamente, alcanzando una transmitancia solar del 58%. Esto se debió a que el VO₂ se depositó en la capa superior, propiciando una modulación cercana a la obtenida para la película individual de VO₂.

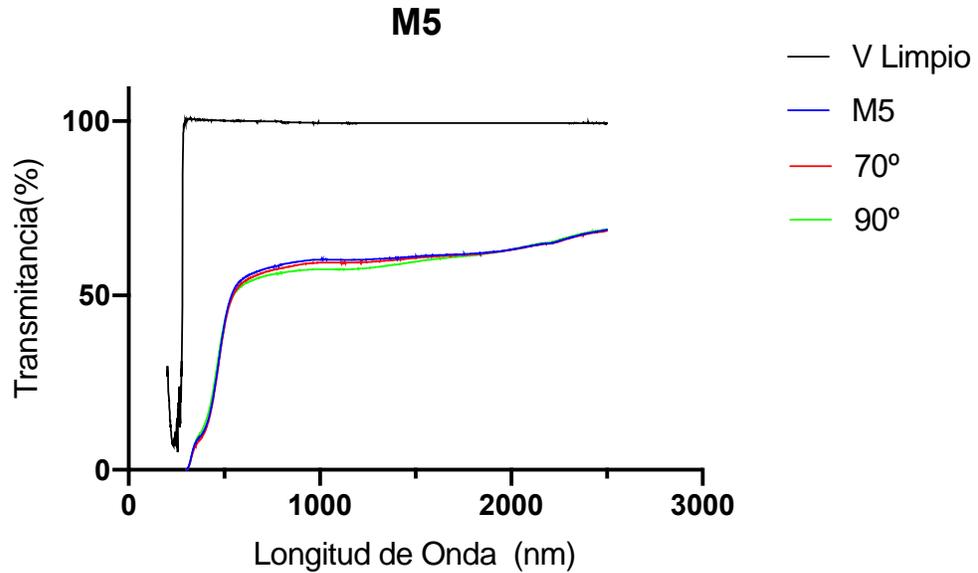


Figura 73.- Efecto termocromico del diseño de multicapa 5 en función de la temperatura.

La Figura 74 presenta el efecto óptico del diseño de multicapa 6 en función del tiempo de irradiación UV, mostrando el efecto fotocromico y una reducción que se acentuó pronunciadamente en el rango de la radiación VIS y ligeramente en el rango de la NIR; además, se observó un T_{vis} que varió del 44% al 43% para un tiempo de irradiación UV entre los 10 y los 180 minutos, tomando como referencia el vidrio con película depositada sin irradiación. Respecto de la ΔT_{sol} , se observó una reducción en el rango de la VIS que varió del 56% al 55% para un tiempo de irradiación entre los 10 y los 180 minutos. Esto se debió a que la capa de MoO_3 estuvo debajo de la capa del ZnO , provocando un mejoramiento del efecto fotocromico por la cedencia de electrones del ZnO a las partículas del MoO_3 , mejorando su modulación solar para alcanzar hasta un 7%.

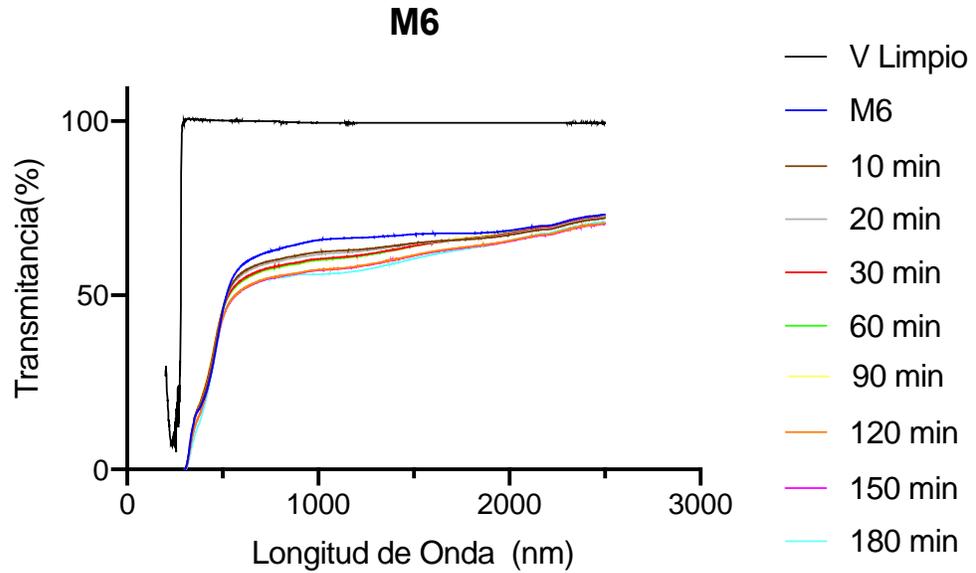


Figura 74.- Efecto fotocromico del diseño de multicapa 6 en función del tiempo de irradiación UV.

La Figura 75 presenta el efecto óptico del diseño de multicapa 6 en función de la temperatura, mostrando el efecto termocrómico y una reducción mínima que se acentuó en el rango de la radiación VIS; además, se observó un crecimiento significativo para una variación de la temperatura de 70 a 90°C, obteniendo una T_{vis} entre el 45% al 41%, respectivamente, tomando como referencia el vidrio completamente limpio. Respecto de la ΔT_{sol} , se observó una reducción entre el 1% y 4% para una temperatura de 70 y 90 °C, respectivamente, alcanzando un 53% de transmittancia solar. Esto se debió a que la capa superior de VO₂ permitió una mejor interacción con la radiación electromagnética, provocando un mejor comportamiento para modular el paso de la radiación solar.

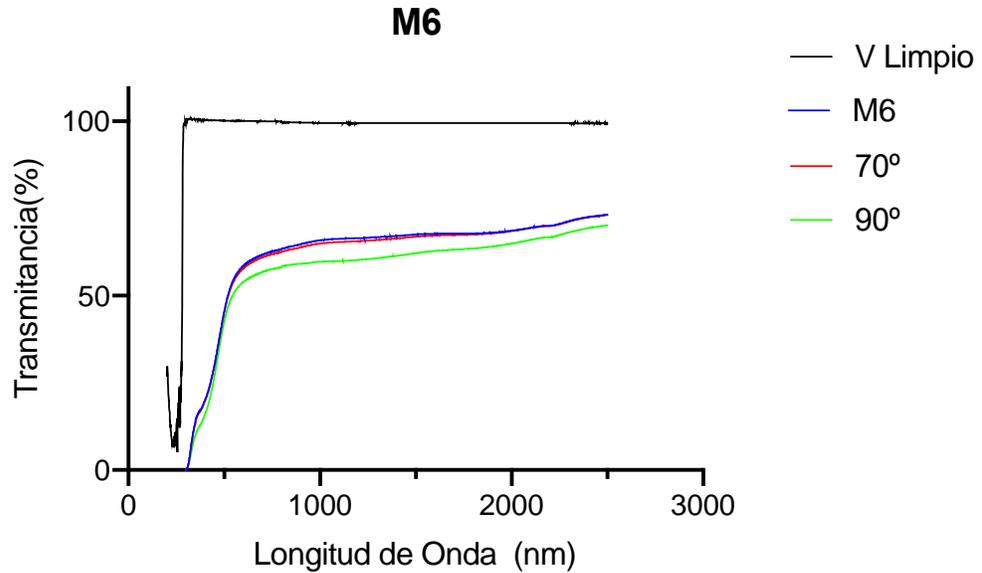


Figura 75.-Efecto termocromico del diseño de multicapa 6 en función de la temperatura.

En la etapa 2, se muestra la originalidad e innovación en el presente trabajo, dado que se realizó la combinación entre los 3 óxidos previamente estudiados, buscando un efecto termo-fotocrómico, los cuales no habían sido estudiados con anterioridad. De esta forma se establece que el orden del depósito influye directamente en el efecto de cada óxido, tal es el caso del VO₂, el cual resulto ser más importante estar en la parte superior, ya que al estar en medio o en la parte baja, este se ve bloqueado y no presente el mismo efecto termocrómico. Por otra parte, el MoO₃ si se ve influenciado al estar debajo del ZnO y del VO₂, demostrando mejoras en su efecto fotocrómico. Los parámetros obtenidos T_{vis} 54% promedio y T_{Sol} 42% promedio del M6 en su respuesta termo-fotocrómica, son comparables con los obtenidos por otros autores [81]VO₂/ZnO, [86]TiO₂/VO₂, [98] MoO₃, [101] MoO₃/Ag/MoO₃, sin embargo ninguno de ellos logran el doble efecto, es decir solo son fotocrómicos o solo son termocrómicos, lo cual es una ventaja frente a estudios previos.

5.9. Etapa 3: Estudio energético para la aplicación de las películas en multicapa en vidrios de edificios.

Para efectos de este estudio, se consideró un edificio de oficinas cilíndrico con una altura de 45 metros, el cual estuvo compuesto de 12 pisos y que abarcó un área por piso de 90 m², ubicado en el centro de la ciudad de Monterrey, Nuevo León. Además, se modelaron 2 tipos de edificios uno con el 100% de vidrio en su envolvente y el segundo con el 30% de vidrio en su envolvente, este último se tomó con base al artículo 122 del reglamento de construcción del distrito federal, buscando que esta segunda propuesta sirva para conocer el aporte de este estudio en edificios más antiguos. En cuanto a las variables que se consideraron para esta modelación estuvieron relacionadas sólo con el vidrio, es decir, el coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC por sus siglas en inglés), la transmitancia visible (T_{vis}), la transmitancia Solar (T_{sol}) y el valor de la conductividad (U). Los valores de la U se proporcionaron con fines indicativos para los informes y para su comparación con otros componentes de acristalamiento. Asimismo, es importante mencionar que estos valores no se utilizaron durante las simulaciones de EnergyPlus, en las cuales se calculó la transferencia de calor a través de las ventanas, utilizando algoritmos más sofisticados basados en coeficientes de transferencia de calor por convección de variación dinámica, así como la simulación basada en la física de la transferencia de calor a través de las capas de gas y panel.

Por lo tanto, se evaluaron dos variables en los vidrios: (i) V 100%/30% transparente, que se refiere al vidrio que permite el paso de la radiación solar casi en su totalidad; (ii) V 100%/30% Tesis, que se refiere a los mejores resultados obtenidos para las películas en multicapa de la sección 5.8; es importante aclarar que la forma y la altura del vidrio fueron variables fijas con la finalidad de centrarse en el efecto que aportan las propiedades ópticas de las películas en multicapa para el presente caso de estudio.

Tabla 9.- Propiedades ópticas de los vidrios usados en la simulación.

Variables	V 100% Transparente	V 100% Tesis	V 30% Transparente	V 30% Tesis
SHGC	0.991	0.55	0.998	0.584
T _{sol}	0.99	0.55	0.99	0.55
T _{vis}	0.99	0.43	0.99	0.43
U (ISO10292)	0.551	1.078	0.551	1.078

5.9.1. Diagrama de la trayectoria solar.

El estudio de la trayectoria solar es importante porque permite estimar el sombreado proporcionado por los distintos elementos estructurales que tendrían un impacto en las envolventes de los edificios, también ayuda a entender el impacto de la trayectoria solar en zonas específicas dentro de los edificios. En la Figura 76 y 77 se muestra la trayectoria solar en cada zona horaria y en los diferentes meses del año a los que están expuestos los dos diferentes tipos de edificios 100% de envoltente de vidrio y 30% de envoltente de vidrio respectivamente.

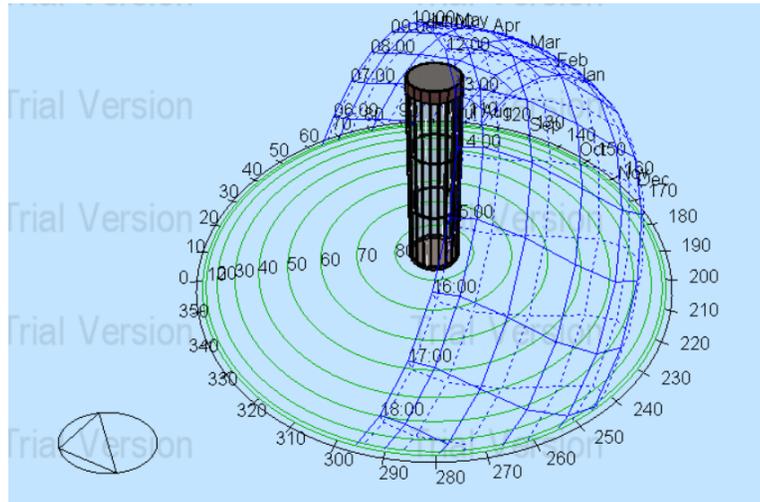


Figura 76.- Diagrama de trayectoria solar del edificio propuesto del 100% en su envoltente

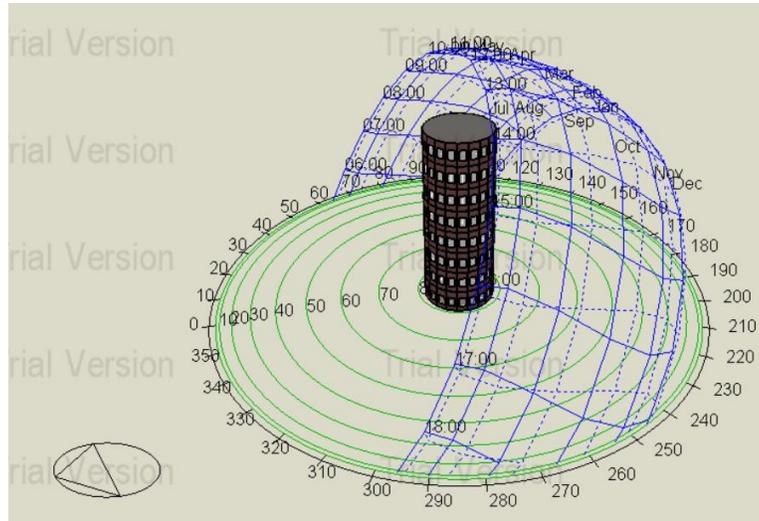


Figura 77.- Diagrama de trayectoria solar del edificio propuesto del 30% en su envolvente.

5.9.2. Ganancia de calor.

La ganancia de calor se refiere al aumento de la energía calorífica que se produce dentro de un edificio. Este concepto es fundamental en la climatización de edificios y en la gestión eficiente de la energía. En la Figura 78 se muestra la ganancia de calor para los dos tipos de ventanas propuestas en este estudio. En el caso del edificio con un vidrio transparente (V 100% Transparente), se observó un incremento en la ganancia de calor entre los meses de mayo a septiembre, lo cual responde principalmente a la estación del verano de la ciudad de Monterrey en la que se alcanza una ganancia de calor máxima de 365 MBtu en el mes de julio. Por otra parte, con la película de multicapas (V 100% Tesis), se observó una reducción del 60% en la ganancia de calor todos los meses; además, no hubo incrementos pronunciados en los meses más calurosos, por lo que se alcanzó un máximo de 144 MBtu en el mes de julio para este caso. Esta reducción de la ganancia de calor tiene una relación directa con la reducción del paso de la radiación solar de casi un 50% obtenida en este trabajo. Además, también se puede ver la ganancia de calor con el (V 30% Transparente), en donde se observa que en los meses de julio y agosto es cuanto se presenta una ganancia de los 63 MBtu y 61 MBtu respectivamente, sin embargo, no se presenta gran diferencia con los otros meses ya que pueden llegar a bajar hasta los 40MBtu.

En cuanto al (V 30% Tesis), se ve reducido hasta en un 60% con respecto a (V 30% Transparente), en todos los meses alcanzando una ganancia de calor 22MBtu en su punto máximo, de igual manera no hubo mucha diferencia con los demás meses de menor ganancia de calor alcanzando hasta un 14MBtu.

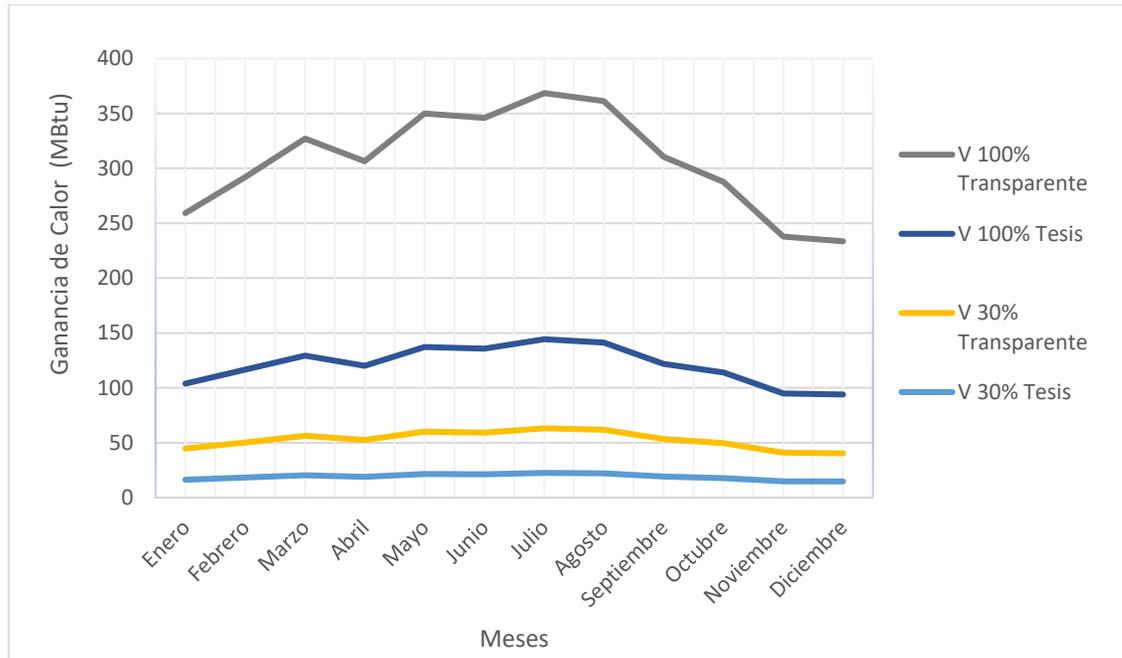


Figura 78.- Simulación de la ganancia de calor en un edificio usando un vidrio transparente (V 100%/30% Transparente) y un vidrio con película en multicapas tesis (V 100%/30% Tesis).

En cuanto a la demanda de energía, esta se refiere a la cantidad energética necesaria en un edificio para mantener en su interior un adecuado confort térmico para las personas. Este concepto es fundamental para la planificación energética y la gestión de recursos, ya que permite a los gobiernos, empresas y consumidores anticiparse para satisfacer las necesidades de energía de manera efectiva. En la Figura 79 se muestra la demanda de energía de HVAC, en el cual se presentó una disminución de la demanda de energía por HVAC usando el (V 100% Tesis) con respecto del (V 100% Transparente), encontrándose una disminución del 30% en primavera-verano y un 60% en otoño-invierno. En cuanto a la demanda de energía por calefacción, el (V 100% Transparente) aumentó en comparación con el (V 100% Tesis) en un porcentaje del 45 al 48% en los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre. Esto se

debió a la reducción del paso de la radiación solar de casi un 50% en comparación con el (V 100% Transparente), lo cual ocasiona una reducción en el paso de calor al interior del edificio. Por otra parte, no existe diferencia para los dos tipos de ventana en los meses de marzo a octubre; esto se debió a que son los meses más calurosos en la ciudad de monterrey, por lo que no se utilizan equipos de calefacción.

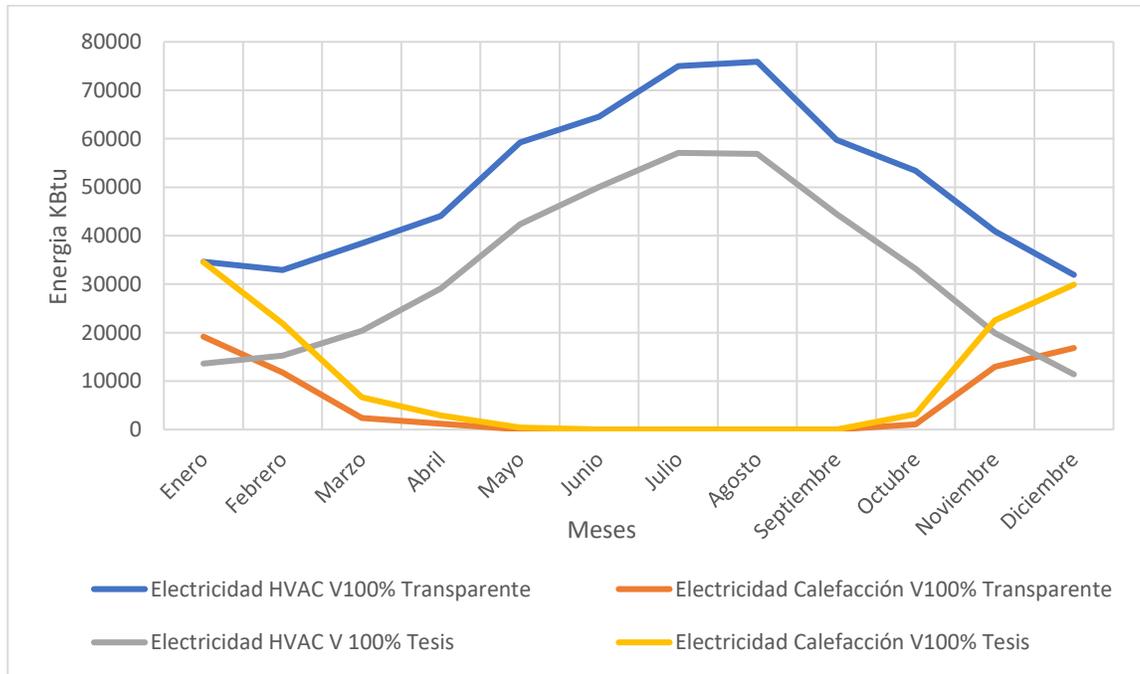


Figura 79.- Simulación de la demanda de energía del edificio usando un vidrio transparente (V 100% transparente) y un vidrio con película multicapa tesis (V 100% tesis).

En la figura 80, se muestra la demanda de energía, en la propuesta de 30% de vidrio en la envolvente. Se puede observar una reducción significativa entre (V 100% Transparente) a (V30% Transparente) de 23,000 kBtu entre sus puntos más altos de demanda de energía. Por otra parte, se presentó una reducción entre (V 30% Transparente) y (V 30% Tesis) con respecto a la demanda de energía por HVAC de entre 17% a 26% en los meses más calurosos, esto debido a la reducción de la transmitancia solar en el sistema multicapa. En cuanto a la demanda de energía por calefacción, este tuvo un comportamiento inverso, es decir la demanda de energía creció un 77% en comparación de (V 30% Transparente) y (V 30% Tesis) en los meses más fríos enero y diciembre,

esto debido a la reducción de ganancia de calor al interior de los edificios, sin embargo en los demás meses fue casi nulo este gasto de energía debido a las altas temperaturas en la ciudad de monterrey.

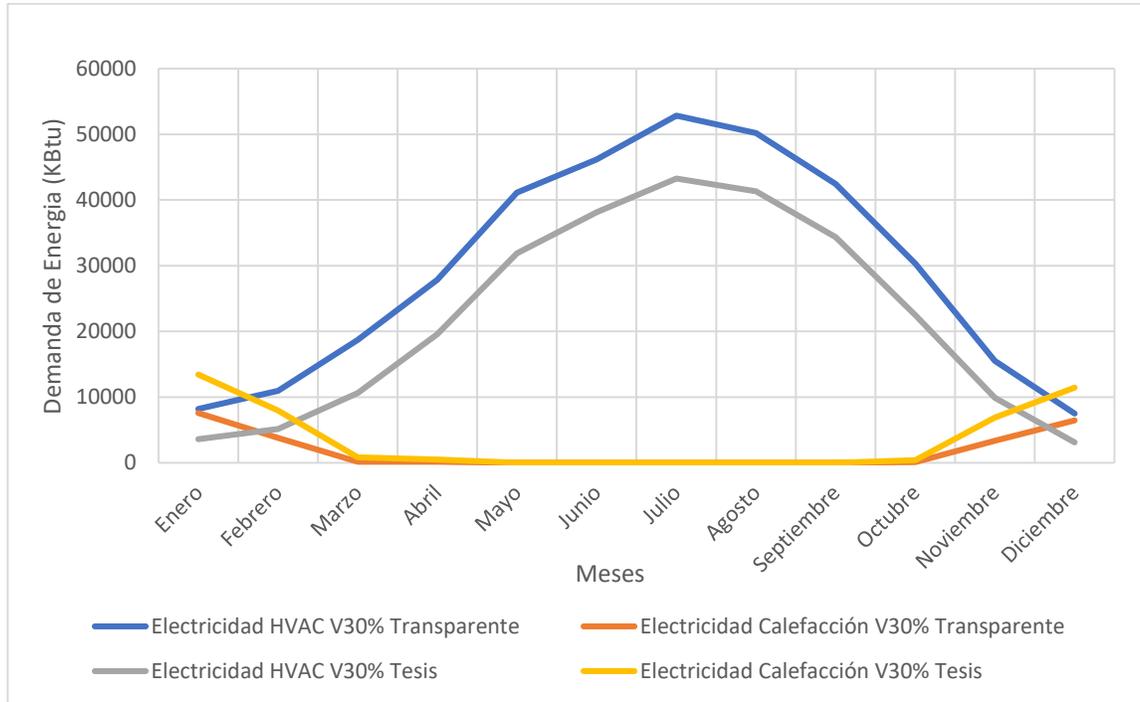


Figura 80.- Simulación de la demanda de energía del edificio usando un vidrio transparente (V 30% Transparente) y un vidrio con película multicapa tesis (V 30%Tesis).

Así, el mes de agosto se asoció con el máximo consumo energético de 75,882.69 kBTu al utilizar el (V 100% Transparente), que al convertirlo en un consumo por hora equivale a 30.88 kW/h. Luego, si tomamos en cuenta las tarifas de electricidad de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para el sector comercial o de negocio éstas pueden ser catalogadas por su consumo mensual, el tipo de tensión o el uso comercial; por lo tanto, para fines de este estudio de eligió la tarifa DGBT, la cual está determinada por requerir más de 25 kW/h al mes, variando entre los \$2.5 a \$4.50 pesos por kW/h. Entonces, esto nos da como resultado un costo a pagar en el mes de agosto de \$100,075.59 pesos, considerando la tarifa más alta. En consecuencia, al realizar el mismo calculo utilizando los 56,856.52 kBTu obtenidos para el (V 100% Tesis) en el mismo mes de agosto, esto nos da un monto a pagar de \$74,983.51 pesos, lo cual representa

un ahorro de \$25,092.09, es decir, el uso del (V 100% Tesis) propuesto en este estudio llevaría a un ahorro económico de aproximadamente el 25%.

En cuanto al modelo del 30% de vidrio en las envolventes se tomó como un máximo consumo energético para el (V 30% Transparente) de 52,846 kBtu y para el (V 30% Tesis) 43,272.02kBtu. Estos datos al convertirlos a Kw/h dan como resultado 15,487.63kw/h y 12,681.8 kw/h que se requieren al mes. Estos datos al multiplicarse por \$4.50 pesos, da como resultado para el (V 30% Transparente) un costo mensual de \$69,694.35 pesos, por otra parte, el (V 30% Tesis) da un costo de \$57,067.97pesos, es decir para este caso da un ahorro de \$12,000.00 pesos, un 19% aproximadamente.

Por otro lado, la creciente preocupación por el cambio climático ha generado la necesidad urgente de reducir las emisiones de CO₂, uno de los principales gases de efecto invernadero que son responsables del calentamiento global. De esta forma, el evaluar la generación de emisiones del CO₂ es fundamental, ya que la presente investigación no solo busca proponer nuevos materiales en sectores clave como la industria de la construcción, la energía y la tecnología, sino también mitigar el impacto ambiental de las edificaciones relacionado con su operación, promoviendo así un futuro más sostenible y resiliente para nuestras ciudades. Por lo tanto, en la Figura 81 se presenta la generación de emisiones de CO₂ asociadas con el consumo energético del edificio, mostrando una disminución que varía entre el 22% y 27% para los meses de mayo a septiembre, respectivamente, al comparar (V 100% Transparente) con (V 100% Tesis); esta ligera disminución se asoció con las temporadas más calurosas en la ciudad de Monterrey, lo que provoca el aumento en el uso de sistemas de ventilación HVAC. Por otra parte, durante los meses de enero a abril y de octubre a diciembre, la disminución aumentó entre un 31% y 42%, respectivamente, al comparar (V 100% Transparente) con (V 100% Tesis). Esto se debió a un clima más templados en estos meses del año, por lo tanto, el uso de sistemas de ventilación HVAC se ve reducido. Por otra parte, el (V 30% Transparente), se vio reducido en la generación de emisiones de CO₂ en temporada de calor de entre un 15% a un 5% en comparación contra el (V 30%

Transparente), esto se debe a los ahorros causados por la reducción del uso de HVAC. En el caso del (V 30% Tesis) y el (V 100% Tesis) se mantienen muy parecidos en cuanto a la generación de emisiones de CO₂, esto responde a que, en temporadas de calor, es muy poca diferencia entre la cantidad de energía que se requiere para enfriar en ambos casos, por lo que esto propicia casi la misma generación de emisiones de CO₂.

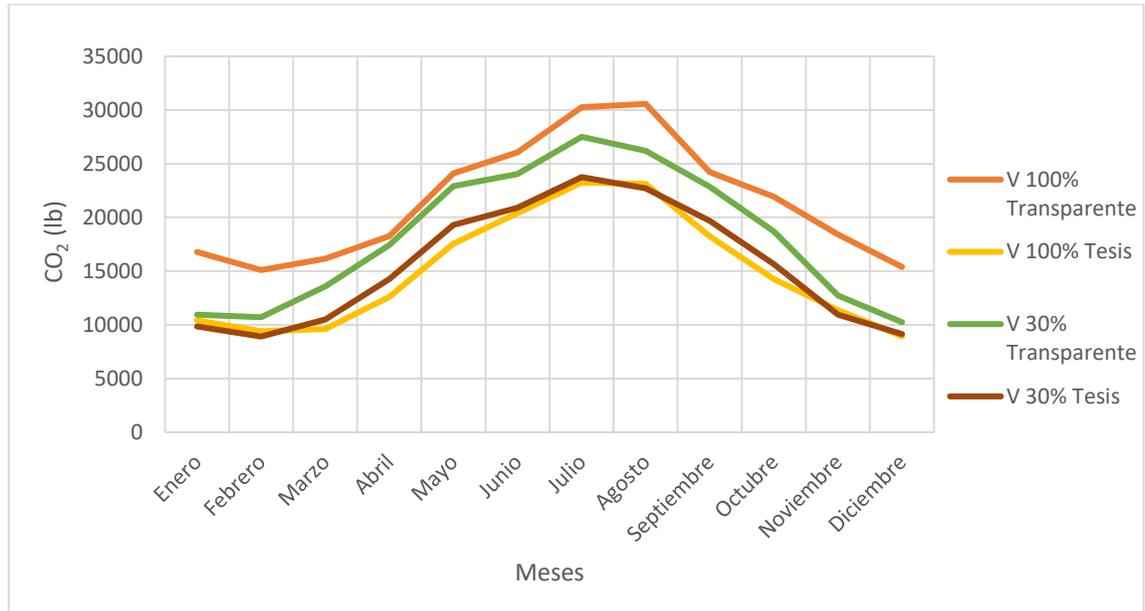


Figura 81.- Simulación de las emisiones de CO₂ relacionadas con el uso de un vidrio transparente (V 100%/30% Transparente) y un vidrio con película en multicapas (V 100%/30% Tesis).

El aporte energético que ofrecen estos tres diferentes óxidos metálicos es muy prometedor en la industria. Se pudo corroborar que el efecto óptico que se obtuvo no solo evidencia la reducción del paso de la radiación solar, sino también en el ahorro económico que estos pueden representar en los edificios que van desde un 25% (V100%) hasta un 19% (V30%), e incluso en la reducción de emisiones de CO₂, de hasta un 20% (V100%) y un 5% (V30%), siendo esto viable en su aplicación y benéfico para nuestro medio ambiente. De esta forma, ir sumando esfuerzos para la reducción de la temperatura para el año 2050, según los acuerdos firmados en París en el año 2015.

CAPITULO VI CONCLUSIONES

En este trabajo, se puede resaltar que tanto el isopropanol como el etilenglicol resultaron ser buenos dispersantes para las nanopartículas de MoO_3 , ZnO y el VO_2 , consiguiendo propiedades físicas adecuadas tales como propiciar el menor tamaño posible de partícula y una estabilidad adecuada a 30 días de su elaboración. En este caso, la solubilidad representó un factor para asegurar que las nanopartículas se distribuirían uniformemente en el medio, reduciendo su tamaño de partícula; además, tener una la viscosidad adecuada significó que las fuerzas internas en el medio permitieran esta distribución para evitar las aglomeraciones y re-aglomeraciones del material. Asimismo, la densidad de las nanopartículas fue otra propiedad que condicionó la facilidad de su sedimentación, reduciendo significativamente la cantidad de material disperso en el medio.

Para la dispersión de las partículas de MoO_3 se eligieron tiempos de 2 horas de sonicación en el caso del dispersante de isopropanol, mientras que el etilenglicol requirió 1 hora, obteniéndose unos tamaños de partícula promedio entre 135 y 140 nm, así como de 100 a 150 nm, respectivamente. En el caso del VO_2 se eligieron los tiempos de 1 hora de ultrasonido para el isopropanol y para el etilenglicol, obteniéndose unos tamaños de partícula entre 100 a 120 nm para ambos casos. Para el ZnO usando el dispersante de isopropanol se eligió el tiempo de 1 hora, mientras que para el etilenglicol se fueron 2 horas, obteniendo unos tamaños de partícula promedio entre 480 nm y 240 nm, respectivamente. En cuanto al potencial zeta, en todos los casos se buscó un rango cercano al cero de -8 a 5 mV como sus límites extremos. A los 30 días de su elaboración, las películas no presentaron cambios significativos en relación con el tamaño de partícula y los potenciales zeta, manteniendo un valor medio entre los 150 y 200 nm en el caso del MoO_3 , de 120 nm en el caso del VO_2 y entre los 200 a 300 nm en el caso del ZnO , manteniendo sus potenciales zeta entre los -8 y 10 mV.

En particular el etilenglicol fue el dispersante que asoció el mejor efecto, sin embargo, se eligió el isopropanol como dispersante para realizar el depósito de las películas debido a su baja temperatura de evaporación de 70°C, lo cual representa una ventaja al implicar la reducción en el uso de energía para realizar el depósito de las películas en comparación con otras técnicas (p.ej., la deposición química de vapor). Este bajo requerimiento de energía también facilita el proceso de aplicación práctica, siendo una técnica viable para su potencial aplicación a un nivel industrial.

Por otra parte, la técnica del spray resultó ser adecuada para lograr un depósito homogéneo en áreas relativamente grandes según el estudio realizado por la técnica de MEB-EDX, dado que se evaluaron zonas de 100 micras. Esto sugiere una potencial capacidad de la técnica para cubrir homogéneamente grandes áreas de vidrio de ventana, lo cual es muy importante para acercar estos materiales a su aplicación en edificios en servicio. En cuanto al crecimiento de las películas que se obtuvo en función a la cantidad de capas depositadas, se evidenció que esto depende de la dispersión de las nanopartículas en la suspensión. Es decir, la cantidad de material depositado aumentó siempre y cuando el medio de dispersión presentó una buena distribución de nanopartículas. En el caso del MoO_3 , su crecimiento entre capas fue muy limitado, es decir, de 0.7%, 1%, 1.2% y 1.4% para 1, 5, 10 y 15 capas, respectivamente, lo cual se debió a la poca cantidad de MoO_3 dispersa en el isopropanol. En el caso del VO_2 , su crecimiento entre capas fue significativo, es decir, de 3.3%, 8.9% y 23.1% para 1, 3 y 5 capas, respectivamente, observándose un aumento de la cantidad de VO_2 que dependió del tipo de dispersión utilizada para esprayar la película. Por su parte, el ZnO no presentó un cambio sin importar el número de las capas, es decir, se mantuvo en promedio un 14% para 1, 3 y 5 capas; esto ocurrió a pesar de tener una buena distribución en el medio dispersante, probablemente debido a la morfología esférica de las partículas presentes que redujo el área de contacto con el vidrio, promoviendo cierta repulsión a la adherencia de las partículas.

En cuanto a las propiedades ópticas, primero se corroboró el efecto de los óxidos metálicos de manera individual. En el caso del MoO_3 , a pesar de ser el óxido con la menor cantidad de material depositado, se observó que su efecto se activó desde los primeros 10 minutos de irradiación UV. En general se obtuvo una reducción en la radiación visible del 2% a 15 capas depositadas, mientras que la ΔT_{sol} alcanzó hasta 1.6% también a 15 capas. Esta modulación se vio reducida por dos factores primordiales: (i) la cantidad de material depositado, y (ii) por los poros presentes entre las partículas, permitiendo el paso de la radiación solar a través del vidrio. En cuanto al VO_2 el incremento de propiedades ópticas se vio favorecido principalmente por la cantidad de material depositado, alcanzando una ΔT_{sol} de 1.2%, 2.4% y 3.9% para 1, 3 y 5 capas.

En cuanto a los diseños en multicapa, se lograron fabricar películas termo-fotocrómicas. En general, el depósito del ZnO sobre el MoO_3 y/o el VO_2 incrementó la ΔT_{sol} , alcanzando modulaciones de hasta un 4%. En el caso de la capa del MoO_3 , esto fue ventajoso siempre y cuando tuviera una capa superior de cualquiera de los otros dos óxidos, lo cual mejoró su desempeño de dos formas: (i) al cederle electrones en el caso del ZnO ; (ii) al bloquear la radiación solar en el caso del VO_2 . Por su parte, la capa de VO_2 se vio beneficiado siempre que formó la capa superior o inferior a la película del ZnO , alcanzando una ΔT_{sol} entre el 53%. Considerando estas variables, una estructuración multicapa de $\text{VO}_2/\text{ZnO}/\text{MoO}_3$ logró el mejor resultado, alcanzando una T_{vis} del 45-41% y una T_{sol} del 53% y una ΔT_{sol} de hasta un 7%.

En cuanto a los resultados obtenidos en la simulación energética realizada mediante el programa desing builder, del edificio con el 100% de vidrio en la envolvente, se destacó lo siguiente: la reducción de la ganancia de calor fue de hasta un 50%, trayendo consigo una reducción de energía para el sistema de enfriamiento al interior del edificio de un 40% a 45%, así como un aumento de energía de calefacción de un 20%. En cuanto al ahorro de los costos, se realizó una estimación en función al mes más caluroso del año (agosto), usando un vidrio completamente transparente se estimó un costo por el sistema de enfriamiento de \$100,000.00 pesos; por el contrario, usando un vidrio con una película en

multicapas se estimó un costo de \$75,000.00 pesos, lo cual representó un ahorro del 25%, brindando una importante ventaja competitiva. Para el modelo con el 30% de vidrio en la envolvente del edificio, se obtuvo una reducción de ganancia de calor de un 60% en el mes julio. En cuanto a los ahorros para los sistemas de enfriamiento, se obtuvo un ahorro aproximado de \$12,000.00 pesos, el cual representa un 19% de ahorro en este caso.

Por otro lado, los resultados obtenidos mostraron una reducción significativa del 20% (V100%) y un 5% (V30%) en las emisiones de CO₂, lo cual es alentador y refleja un paso positivo hacia la sostenibilidad ambiental de las edificaciones. Estos datos subrayan la efectividad del depósito de películas en multicapas para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y pueden servir como un modelo para futuras iniciativas de reducción de la huella de carbono en la industria de la construcción. Sin embargo, es crucial mantener y fortalecer estos esfuerzos para alcanzar objetivos más ambiciosos en la lucha contra el cambio climático y reducir sus impactos globales.

Productos generados

- Participación en la conferencia #LatinXChem Twitter Conference 2021 el 20 de septiembre, 2021 con poster #Mat076.
- Presentación del trabajo titulado “Películas de óxidos metálicos sobre el vidrio para su aplicación como ventanas inteligentes de edificios” en el 2do encuentro de Ciencia, Tecnología e Ingeniería de Estudiantes de Posgrado llevado a cabo los días 11, 12 y 13 de octubre del 2021 en la ciudad de San Nicolas de los Garza Nuevo León, México.
- Participación en los Seminarios de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil con el tema “Películas de óxidos metálicos sobre el vidrio para su aplicación como ventanas inteligentes de edificios” desarrollados en el semestre enero-junio 2022 en la ciudad de San Nicolás de los Garza Nuevo León, México.
- Patente con número de expediente MX/a/2023/006425, titulada “Película nanoestructurada transparente a base de óxidos metálicos, su uso como agente de recubrimiento termofotocrómico y su proceso de aplicación” Fecha de presentación ante el IMPI: 31 de mayo del 2023.
- Publicación de artículo científico “Characterization of VO₂ thin films deposited by simple and sustainable spray technique” Titulo de Journal: MRS Advances, Recibido: 9 Septiembre 2023 / Aceptado: 29 Noviembre 2023 / Publicado en línea: 12 Diciembre del 2023, DOI:10.1557/s43580-023-00738-4

CAPITULO VII BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Gorgolis and D. Karamanis, “Solar energy materials for glazing technologies,” Jan. 01, 2016, *Elsevier*. doi: 10.1016/j.solmat.2015.09.040.
- [2] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, “A review on buildings energy consumption information,” *Energy Build*, vol. 40, no. 3, pp. 394–398, 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
- [3] SENER, “SENER | Sistema de Información Energética | Consumo final de energía por sector,” México, 2018.
- [4] D. Cao, C. Xu, W. Lu, C. Qin, and S. Cheng, “Sunlight-Driven Photo-Thermochromic Smart Windows,” *Solar RRL*, vol. 2, no. 4, p. 1700219, 2018, doi: 10.1002/solr.201700219.
- [5] H. Ye, X. Meng, L. Long, and B. Xu, “The route to a perfect window,” *Renew Energy*, vol. 55, pp. 448–455, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.renene.2013.01.003.
- [6] “Energy Efficient Window & Door Criteria | ENERGY STAR.”
- [7] *Multilayer Thin Films*. 2012. doi: 10.1002/9783527646746.
- [8] IEA, *Global Status Report for Buildings and Construction 2019*. 2019. doi: <https://doi.org/10.1038/s41370-017-0014-9>.
- [9] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, *Renewables 2020 Global Status Report*. 2020.
- [10] W. J. Hee *et al.*, “The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings,” 2015, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2014.09.020.

- [11] S. D. Rezaei, S. Shannigrahi, and S. Ramakrishna, “A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 159, pp. 26–51, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.solmat.2016.08.026.
- [12] M. Aburas, V. Soebarto, T. Williamson, R. Liang, H. Ebendorff-Heidepriem, and Y. Wu, “Thermochromic smart window technologies for building application: A review,” Dec. 01, 2019, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113522.
- [13] W. Cui and W. P. Hu, “Study on application of intelligent chromic material to the interior design,” in *Advanced Materials Research*, 2013. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.820.80.
- [14] T. C. Chang, X. Cao, S. H. Bao, S. D. Ji, H. J. Luo, and P. Jin, “Review on thermochromic vanadium dioxide based smart coatings: from lab to commercial application,” *Adv Manuf*, vol. 6, no. 1, pp. 1–19, 2018, doi: 10.1007/s40436-017-0209-2.
- [15] G. P. Nagabhushana, D. Samrat, and G. T. Chandrappa, “ α -MoO₃ nanoparticles: Solution combustion synthesis, photocatalytic and electrochemical properties,” *RSC Adv*, vol. 4, no. 100, pp. 56784–56790, 2014, doi: 10.1039/c4ra05135a.
- [16] D. Kim and J. Y. Leem, “Crystallization of ZnO thin films via thermal dissipation annealing method for high-performance UV photodetector with ultrahigh response speed,” *Sci Rep*, vol. 11, no. 1, 2021, doi: 10.1038/s41598-020-79849-z.

- [17] J. W. Gooch, "Electromagnetic Spectrum," *Encyclopedic Dictionary of Polymers*.
- [18] D. A. Skoog, D. M. West, J. Holler, and S. R. Crouch, *Preparación de disoluciones estándar básicas*. 2015.
- [19] I. Yildiz, "Solar Energy," *SystemsComprehensive Energy*, vol. 1–5, pp. 638–664, 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-809597-3.00117-6.
- [20] "Radiation Spectrum," IUPAC Compendium of Chemical Terminology.
- [21] Tobias Michael, "Why Is Glass so Common in Commercial Buildings?" [Online]. Available: www.ny-engineers.com
- [22] V. Belessiotis, S. Kalogirou, and E. Delyannis, "Solar Distillation—Solar Stills," *Thermal Solar Desalination*.
- [23] T. Varkie, "Heat gains and losses: windows and skylights (glass)," *EnergyModels.com*. [Online]. Available: <http://energy-models.com/heat-gains-and-losses-windows-and-skylights-glass>
- [24] M. C. Gonçalves and M. Fernanda, *Materials for construction and civil engineering: Science, processing, and design*. 2015. doi: 10.1007/978-3-319-08236-3.
- [25] M. González and L. Montaña, "La espectroscopia y su tecnología: Un repaso histórico y su importancia para el siglo XXI," *Latin-American Journal of Physics Education*, vol. 9, no. 4, pp. 1–14, 2015.
- [26] M. J. Weber, "Optical Properties of Glasses," *Materials Science and Technology*, 2006, doi: 10.1002/9783527603978.mst0101.
- [27] A. Höpe, "Diffuse Reflectance and Transmittance," *Experimental Methods in the Physical Sciences*.

- [28] “Soil reflectance,” Wageningen, The Netherlands, 1997, ch. II, pp. 1–68.
- [29] T. H. AlAbdulaal and I. S. Yahia, “TiO₂-nanoparticles enhances the structure and optical behaviors of PMMA/glass polymeric films: Kramers-Kroning analysis,” *Phys Scr*, vol. 96, no. 3, 2021, doi: 10.1088/1402-4896/abcef7.
- [30] S. Boemi, O. Irulegi, M. Santamouris, and E. Efficiency, *Energy Performance of Buildings*. 2016. doi: 10.1007/978-3-319-20831-2.
- [31] U. S. D. O. ENERGY, “Energy Performance Ratings for Windows, Doors, and Skylights | Department of Energy.” [Online]. Available: <http://energy.gov/energysaver/energy-performance-ratings-windows-doors-and-skylights>
- [32] S. I. Edition *et al.*, “Energy standard for buildings except low-rise residential buildings,” *ASHRAE Standard*, vol. 2013, no. 90.1-2013 (I-P), pp. 404–636, 2013.
- [33] F. Gregg D. Ander, “Windows and Glazing | WBDG - Whole Building Design Guide,” Souther California Edison. [Online]. Available: <https://www.wbdg.org/resources/windows-and-glazing>
- [34] H. Kelker, *History of Liquid Crystals.*, vol. 21, no. 1–2. 1973. doi: 10.1080/15421407308083312.
- [35] G. N and F. M, “Smart Materials and Structures: State of the Art and Applications,” *Nanotechnology & Applications*, vol. 1, no. 2, pp. 1–5, 2018, doi: 10.33425/2639-9466.1015.
- [36] P. T. Gardiner, “Smart Structures and Materials Systems,” *Automatic Control in Aerospace 1992*, no. 1987, pp. 127–135, 1993, doi: 10.1016/b978-0-08-041715-8.50022-5.

- [37] Xunta de Galicia, “Estado del Arte de Materiales Inteligentes,” *Oportunidades Industria 4.0 en Galicia*, 2017.
- [38] K. P. Chong, S. C. Liu, and O. W. Dillon, “Engineering Research on Smart Materials and Structural Systems,” *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 41–44, 1996, doi: 10.1061/(asce)1076-0342(1996)2:2(41).
- [39] J. Gardan, “Smart materials in additive manufacturing: state of the art and trends,” *Virtual Phys Prototyp*, vol. 14, no. 1, pp. 1–18, 2019, doi: 10.1080/17452759.2018.1518016.
- [40] A. For, “Materials for,” vol. 31, no. April, pp. 314–317, 2006.
- [41] A. Mehmood, X. Long, A. A. Haidry, and X. Zhang, “Trends in sputter deposited tungsten oxide structures for electrochromic applications: A review,” *Ceram Int*, vol. 46, no. 15, pp. 23295–23313, 2020, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.06.035.
- [42] J. S. E. M. Svensson and C. G. Granqvist, “Electrochromic coatings for ‘smart windows,’” *Solar Energy Materials*, vol. 12, no. 6, pp. 391–402, 1985, doi: 10.1016/0165-1633(85)90033-4.
- [43] Y. Cui *et al.*, “Thermochromic VO₂ for Energy-Efficient Smart Windows,” Sep. 19, 2018, *Cell Press*. doi: 10.1016/j.joule.2018.06.018.
- [44] S. A. Tomás, M. A. Arvizu, O. Zelaya-Angel, and P. Rodríguez, “Effect of ZnSe doping on the photochromic and thermochromic properties of MoO₃ thin films,” *Thin Solid Films*, vol. 518, no. 4, pp. 1332–1336, Dec. 2009, doi: 10.1016/j.tsf.2009.05.054.
- [45] S. Farzi-kahkesh, M. B. Rahmani, and A. Fattah, “Growth of novel α -MoO₃ hierarchical nanostructured thin films for ethanol sensing,” *Mater Sci*

- Semicond Process*, vol. 120, no. May, p. 105263, 2020, doi: 10.1016/j.mssp.2020.105263.
- [46] T. He and J. Yao, "Photochromism of molybdenum oxide," *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, vol. 4, no. 2, pp. 125–143, 2003, doi: 10.1016/S1389-5567(03)00025-X.
- [47] B. A. Samad, "The effect of coloration on optical properties of molybdenum trioxide thin films prepared by thermal evaporation technique," *2020 Photonics North, PN 2020*, pp. 3–8, 2020, doi: 10.1109/PN50013.2020.9166937.
- [48] T. Nocke, T. Sterzel, M. Böttinger, and M. Wrobel, "Visualization of Climate and Climate Change Data: An Overview," *Digital earth summit on geoinformatics 2008: tools for global change research*, vol. 1999, 2008.
- [49] T. Bárta *et al.*, "Pulsed Magnetron Sputtering of Strongly Thermochromic VO₂-Based Coatings with a," *Coatings*, vol. 10, p. 1258, 2020.
- [50] M. Kumar, J. P. Singh, K. H. Chae, J. Park, and H. H. Lee, "Annealing effect on phase transition and thermochromic properties of VO₂ thin films," *Superlattices Microstruct*, vol. 137, no. September 2019, p. 106335, 2020, doi: 10.1016/j.spmi.2019.106335.
- [51] N. D. Papadopoulos, P. E. Tsakiridis, and E. Hristoforou, "Structural and electrical properties of undoped SnO₂ films developed by a low cost CVD technique with two different methods: Comparative study," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 7, no. 5, 2005.

- [52] S. Nazari and P. A. Charpentier, “Stabilizing vanadyl acetylacetonate using Imidazolium Ionic liquids for VO₂ thermochromic thin films,” *Thin Solid Films*, 2021, doi: 10.1016/j.tsf.2021.138640.
- [53] D. Katsube, H. Yamashita, S. Abo, and M. Abe, “Combined pulsed laser deposition and non-contact atomic force microscopy system for studies of insulator metal oxide thin films,” *Beilstein Journal of Nanotechnology*, vol. 9, no. 1, 2018, doi: 10.3762/bjnano.9.63.
- [54] Y. Park, H. Kang, W. Jeong, H. Son, and D. H. Ha, “Electrophoretic deposition of aged and charge controlled colloidal copper sulfide nanoparticles,” *Nanomaterials*, vol. 11, no. 1, pp. 1–13, 2021, doi: 10.3390/nano11010133.
- [55] P. C. Hiemenz, “Principles of Colloid and Surface Chemistry,” 1997.
- [56] Dr. Dmitri Kopeliovich, “Classification of dispersions [SubsTech],” Creative Commons Attribution-Noncommercial-Share Alike 3.0 License. [Online]. Available:
http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=classification_of_dispersions
- [57] René Arango, “sistemas dispersos : Química 10º y 11º.” Accessed: Nov. 21, 2021. [Online]. Available: <https://ciencias-quimica-y-biologia.webnode.es>
- [58] eduMEdia, “Disolución del NaCl en el agua – simulation, animation – eduMedia,” 2017.
- [59] A. Castro, “Significado de Solubilidad (Qué es, Concepto y Definición) - Significados.” [Online]. Available: <https://www.significados.com/solubilidad/>

- [60] J. Burke, “Solubility Parameters: Theory and Application.” [Online]. Available: [file:///Users/jose/Documents/Tesis/Dispersiones/Solubility Parameters: Theory and Application.webarchive](file:///Users/jose/Documents/Tesis/Dispersiones/Solubility%20Parameters:%20Theory%20and%20Application.webarchive)
- [61] J. William D. Callister, *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Editorial. Utah, 1985.
- [62] C. Morales *et al.*, “Earth Map: A Novel Tool for Fast Performance of Advanced Land Monitoring and Climate Assessment,” 2023. doi: 10.34133/remotesensing.0003.
- [63] A. Al-Saggaf, H. Nasir, and M. Taha, “Quantitative approach for evaluating the building design features impact on cooling energy consumption in hot climates,” *Energy Build*, vol. 211, p. 109802, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109802.
- [64] J. B. H. Yap, C. G. Y. Lam, M. Skitmore, and N. Talebian, “BARRIERS TO THE ADOPTION OF NEW SAFETY TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION: A DEVELOPING COUNTRY CONTEXT,” *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 28, no. 2, 2022, doi: 10.3846/jcem.2022.16014.
- [65] Y. Yaşar and S. M. Kalfa, “The effects of window alternatives on energy efficiency and building economy in high-rise residential buildings in moderate to humid climates,” *Energy Convers Manag*, vol. 64, pp. 170–181, 2012, doi: 10.1016/j.enconman.2012.05.023.
- [66] K. Hassouneh, A. AlShboul, and A. Al-Salaymeh, “Energy Rating Windows for Residential Buildings,” *International Journal of Thermal and Environmental Engineering*, vol. 1, no. 2, 2010, doi: 10.5383/ijtee.01.02.002.

- [67] M. Alwetaishi, "Impact of glazing to wall ratio in various climatic regions: A case study," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 31, no. 1, pp. 6–18, 2019, doi: 10.1016/j.jksues.2017.03.001.
- [68] Department of Energy (DOE), "Chapter 5: Increasing Efficiency of Building Systems and Technologies," *Quadrennial Technology Review, An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities*, no. September, pp. 143–181, 2015.
- [69] M. Zhen, Y. Du, F. Hong, and G. Bian, "Simulation analysis of natural lighting of residential buildings in Xi'an, China," *Science of the Total Environment*, vol. 690, pp. 197–208, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.353.
- [70] M. Bodart and A. De Herde, "Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting," *Energy Build*, vol. 34, no. 5, pp. 421–429, 2002, doi: 10.1016/S0378-7788(01)00117-7.
- [71] J. E. Greene, "Tracing the 5000-year recorded history of inorganic thin films from ~3000 BC to the early 1900s AD," *Appl Phys Rev*, vol. 1, no. 4, p. 041302, 2014, doi: 10.1063/1.4902760.
- [72] O. O. Abegunde, E. T. Akinlabi, O. P. Oladijo, S. Akinlabi, and A. U. Ude, "Overview of thin film deposition techniques," *AIMS Mater Sci*, vol. 6, no. 2, pp. 174–199, 2019, doi: 10.3934/MATERSCI.2019.2.174.
- [73] N. Joseph, J. Varghese, M. Teirikangas, and H. Jantunen, "A Temperature-Responsive Copper Molybdate Polymorph Mixture near to Water Boiling Point by a Simple Cryogenic Quenching Route," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 12, no. 1, pp. 1046–1053, 2020, doi: 10.1021/acsami.9b17300.

- [74] S. Pan, Z. Rao, Y. Wu, Z. Liu, J. Ge, and S. Zhang, "Ultrahigh detectivity ultraviolet photodetector based on orthorhombic phase CsPbI₃ microwire using temperature self-regulating solar reactor," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 209, no. January, p. 110477, 2020, doi: 10.1016/j.solmat.2020.110477.
- [75] R. S. Rajadurai, J. H. Lee, E. Choi, and J. W. Kang, "MnNH₄P₂O₇-based coating for high temperature assessment on the surfaces of cement composites," *Coatings*, vol. 10, no. 4, 2020, doi: 10.3390/coatings10040396.
- [76] J. W. Choi *et al.*, "Investigation of high contrast and reversible luminescence thermochromism of the quantum confined Cs₄PbBr₆ perovskite solid," *Nanoscale*, vol. 11, no. 12, pp. 5754–5759, 2019, doi: 10.1039/c8nr10223f.
- [77] H. R. Zeller and H. U. Beyeler, "Applied Physics Electrochromism and Local Order in Amorphous WO₃," *Applied Physics*, vol. 237, 1977.
- [78] J. Zhao *et al.*, "Low pressure thermal annealed fabrication of VO₂ on glass with excellent optical properties," *Mater Sci Semicond Process*, vol. 126, 2021, doi: 10.1016/j.mssp.2021.105658.
- [79] L. Calvi *et al.*, "A comparative study on the switching kinetics of W/VO₂ powders and VO₂ coatings and their implications for thermochromic glazing," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 224, 2021, doi: 10.1016/j.solmat.2021.110977.
- [80] and Y. Long. Yuanyuan Cui, Yujie Ke, Chang Liu, Zhang Chen, Ning Wang, Liangmiao Zhang, Yang Zhou, Shancheng Wang, Yanfeng Gao, "Thermochromic VO₂ for Energy-Efficient Smart Windows," *Joule*, vol. 2, no. 9, pp. 1707–1746, 2018, doi: 10.1016/j.joule.2018.06.018.

- [81] H. Zhou, J. Li, S. Bao, J. Li, X. Liu, and P. Jin, "Use of ZnO as antireflective, protective, antibacterial, and biocompatible multifunction nanolayer of thermochromic VO₂ nanofilm for intelligent windows," *Appl Surf Sci*, vol. 363, pp. 532–542, 2016, doi: 10.1016/j.apsusc.2015.12.045.
- [82] J. Kang, J. Liu, F. Shi, Y. Dong, and S. Jiang, "The thermochromic characteristics of Zn-doped VO₂ that were prepared by the hydrothermal and post-annealing process and their polyurethane composite films," *Ceram Int*, 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2021.02.133.
- [83] G. T. Pan, Y. L. Yang, S. Chong, N. Arjun, T. C. K. Yang, and Y. C. Lai, "The durability study of thermochromic vanadium dioxide films with the addition of barrier coatings," *Vacuum*, vol. 145, pp. 158–168, 2017, doi: 10.1016/j.vacuum.2017.08.028.
- [84] M. Jiang *et al.*, "Room temperature optical constants and band gap evolution of phase pure M1-VO₂ thin films deposited at different oxygen partial pressures by reactive magnetron sputtering," *J Nanomater*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/183954.
- [85] O. Angelov, K. Lovchinov, and D. Dimova-Malinovska, "Optical and electrical properties of ZnO thin films doped with Al, V and Nb," *Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics*, vol. 10, no. 4, pp. 709–712, 2013, doi: 10.1002/pssc.201200559.
- [86] K. Laaksonen *et al.*, "Nanoparticles of TiO₂ and VO₂ in dielectric media: Conditions for low optical scattering, and comparison between effective medium and four-flux theories," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 130, pp. 132–137, 2014, doi: 10.1016/j.solmat.2014.06.036.

- [87] H. Liu *et al.*, “SnO₂/VO₂/SnO₂ tri-layer thermochromic films with high luminous transmittance, remarkable solar modulation ability and excellent hydrophobicity grown on glass substrates,” *Infrared Phys Technol*, vol. 113, 2021, doi: 10.1016/j.infrared.2021.103648.
- [88] I. of shell materials on the optical performance of V. core-shell nanoparticle-based thermochromic films Y. M. Xie, X. P. Zhao, S. A. Mofid, J. Y. Tan, B. P. Jelle, and R. G. Yang, “Influence of shell materials on the optical performance of VO₂ core-shell nanoparticle-based thermochromic films,” *Mater Today Nano*, vol. 13, 2021, doi: 10.1016/j.mtnano.2020.100102.
- [89] Y. Song, Y. Zhao, Z. Huang, and J. Zhao, “Aqueous synthesis of molybdenum trioxide (h-MoO₃, α-MoO₃-H₂O and h-/α-MoO₃composites) and their photochromic properties study,” *J Alloys Compd*, vol. 693, pp. 1290–1296, 2017, doi: 10.1016/j.jallcom.2016.10.092.
- [90] Q. Han, R. Wang, H. Zhu, M. Wan, and Y. Mai, “The preparation and investigation of all thin film electrochromic devices based on reactively sputtered MoO₃ thin films,” *Mater Sci Semicond Process*, vol. 126, 2021, doi: 10.1016/j.mssp.2021.105686.
- [91] O. Oderinde, M. Kang, M. Kalulu, F. Yao, and G. Fu, “Facile synthesis and study of the photochromic properties of deep eutectic solvent-templated cuboctahedral-WO₃/MoO₃ nanocomposites,” *Superlattices Microstruct*, vol. 125, pp. 103–112, 2019, doi: 10.1016/j.spmi.2018.10.023.
- [92] T. Thomas *et al.*, “Room temperature ammonia sensing of α-MoO₃ nanorods grown on glass substrates,” *Thin Solid Films*, vol. 722, 2021, doi: 10.1016/j.tsf.2021.138575.

- [93] Y. Dimitriev, V. Dimitrov, J. C. J. Bart, and M. Arnaudov, "Structure of Glasses of the TeO₂ – MoO₃ System," *ZAAC - Journal of Inorganic and General Chemistry*, vol. 479, no. 8, pp. 229–240, 1981, doi: 10.1002/zaac.19814790828.
- [94] T. MINAMI, H. NAMBU, and M. TANAKA, "Formation of Glasses with High Ionic Conductivity in the System AgI-Ag₂O-MoO₃," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 60, no. 5–6, pp. 283–284, 1977, doi: 10.1111/j.1151-2916.1977.tb14130.x.
- [95] M. Elahi, M. H. Hekmat-Shoar, C. A. Hogarth, and K. A. K. Lott, "Electron spin resonance study in P₂O₅-MoO₃ and P₂O₅-MoO₃-CaO glasses," *J Mater Sci*, vol. 14, no. 8, pp. 1997–2000, 1979, doi: 10.1007/BF00551042.
- [96] I. Andron, L. Marichez, V. Jubera, A. Fargues, C. Frayret, and M. Gaudon, "Improvement of the photochromism taking place on ZnO/MoO₃ combined material interfaces ," *Mater Adv*, vol. 2, no. 2, pp. 782–792, 2021, doi: 10.1039/d0ma00896f.
- [97] M. Morales-Luna, M. A. Arvizu, M. Pérez-González, and S. A. Tomás, "Effect of a CdSe Layer on the Thermo- And Photochromic Properties of MoO₃ Thin Films Deposited by Physical Vapor Deposition," *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 123, no. 28, pp. 17083–17091, 2019, doi: 10.1021/acs.jpcc.9b02895.
- [98] A. Kumar, C. S. Prajapati, and P. P. Sahay, "Results on the microstructural, optical and electrochromic properties of spray-deposited MoO₃ thin films by the influence of W doping," *Mater Sci Semicond Process*, vol. 104, no. July, 2019, doi: 10.1016/j.mssp.2019.104668.

- [99] S. Subbarayudu, K. V. S. Reddy, and S. Uthanna, "Sputtering pressure influenced structural, electrical and optical properties of RF magnetron sputtered MoO₃ films," *Materials Science- Poland*, 2020, doi: 10.2478/msp-2020-0001.
- [100] D. Dixit, B. Ramachandran, M. Chitra, K. V. Madhuri, and G. Mangamma, "Photochromic response of the PLD-grown nanostructured MoO₃ thin films," *Appl Surf Sci*, vol. 553, no. March, p. 149580, 2021, doi: 10.1016/j.apsusc.2021.149580.
- [101] D. H. Jung, H. S. So, H. Lee, J.-Y. Park, and H.-K. Kim, "Optical properties of MoO₃/Ag/MoO₃ multilayer structures determined using spectroscopic ellipsometry," *Journal of Vacuum Science & Technology A*, vol. 37, no. 3, p. 031515, 2019, doi: 10.1116/1.5095958.
- [102] Q. Zhang *et al.*, "Photo-thermochromic properties of oxygen-containing yttrium hydride and tungsten oxide composite films," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 200, no. March, p. 109930, 2019, doi: 10.1016/j.solmat.2019.109930.
- [103] D. Hanlon *et al.*, "Production of molybdenum trioxide nanosheets by liquid exfoliation and their application in high-performance supercapacitors," *Chemistry of Materials*, vol. 26, no. 4, pp. 1751–1763, 2014, doi: 10.1021/cm500271u.
- [104] W. Safiei, M. M. Rahman, W. H. Azmi, W. Safiei, M. A. Hadi, and M. N. Arifin, "Experimental Investigation on Preparation and Stability of Al₂O₃ Nanofluid In Deionized Water and Ethylene Glycol," *Journal of Advanced Research in*

- Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 77, no. 2, 2020, doi: 10.37934/arfmts.77.2.4762.
- [105] E. Paradisi *et al.*, “Effect of isopropanol co-product on the long-term stability of TiO₂ nanoparticle suspensions produced by microwave-assisted synthesis,” *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 159, 2021, doi: 10.1016/j.cep.2020.108242.
- [106] Z.-M. Inc., “Potencial Zeta,” *Zeta-Meter Inc.*, 2008.
- [107] M. M. Y. A. Alsaif *et al.*, “Exfoliation solvent dependent plasmon resonances in two-dimensional sub-stoichiometric molybdenum oxide nanoflakes,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 8, no. 5, 2016, doi: 10.1021/acsami.5b12076.
- [108] R. Martínez-Flores, G. Rodríguez-Gattorno, S. Obregón, A. Vázquez, and M. A. Ruiz-Gómez, “Fabrication of graphitic carbon nitride films by inkjet printing,” *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 610, no. November 2020, 2021, doi: 10.1016/j.colsurfa.2020.125919.
- [109] C. A. Hone, A. O’Kearney-McMullan, R. Munday, and C. O. Kappe, “A Continuous-Flow Process for Palladium-Catalyzed Olefin Cleavage by using Oxygen within the Explosive Regime,” *ChemCatChem*, vol. 9, no. 17, pp. 3298–3302, Sep. 2017, doi: 10.1002/cctc.201700671.
- [110] L. Wang *et al.*, “A facile transesterification route to polysulfone-poly(ethylene glycol) amphiphilic block copolymers with improved protein resistance,” *Polym Chem*, vol. 5, no. 8, pp. 2836–2842, Apr. 2014, doi: 10.1039/c3py01619f.
- [111] *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 2016. doi: 10.1201/9781315380476.

- [112] G. Eranna, *Metal Oxide Nanostructures as Gas Sensing Devices*. 2016. doi: 10.1201/b11367.
- [113] Y. Yamashita *et al.*, “Thermal conductivity across the van der Waals layers of α -MoO₃ thin films composed of mosaic domains with in-plane 90° rotations,” *J Appl Phys*, vol. 130, no. 8, 2021, doi: 10.1063/5.0052015.
- [114] S. Alvarez-Guerrero, J. Ordonez-Miranda, R. de Coss, and J. J. Alvarado-Gil, “Determination of the effective thermal conductivity of particulate composites based on VO₂ and SiO₂,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 172, 2022, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107278.
- [115] L. PASCUAL, P. MAZON, and A. DURAN, “Adherencia de capas delgadas a vidrios: mecanismos y metodos de medina,” *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 27, no. 3, pp. 137–144, 1988.
- [116] C. Coatings, R. C. Products, E. Applica-, S. Tape, T. Paint, and R. Materials, “Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test 1,” pp. 1–8, 2012, doi: 10.1520/D3359-09E02.2.
- [117] I. H. Lai and K. Sen Chou, “Effect of titania addition on adhesion of silver colloids to glass substrate,” *Journal of Adhesion*, vol. 93, no. 6, pp. 468–480, 2017, doi: 10.1080/00218464.2015.1091734.
- [118] M. F. Ramli, S. N. Gan, W. H. Lim, and S. W. Phang, “Application of a palm oil-based alkyd for the improvement of polyaniline properties,” *Polymers and Polymer Composites*, vol. 25, no. 7, pp. 537–544, 2017, doi: 10.1177/096739111702500705.
- [119] N. Takeuchi and A. H. Romero, “Teoría Del Funcional De La Densidad,” *Simulaciones computacionales de materiales y nanoestructuras*, 2019.

- [120] W. C. K. Poon, "Colloidal suspensions," in *The Oxford Handbook of Soft Condensed Matter*, 2017. doi: 10.1093/oxfordhb/9780199667925.013.1.
- [121] T. H. Chiang and H. C. Yeh, "The Synthesis of α -MoO₃ by ethylene glycol," *Materials*, vol. 6, no. 10, pp. 4609–4625, 2013, doi: 10.3390/ma6104609.
- [122] J. S. Gebauer, V. Mackert, S. Ognjanović, and M. Winterer, "Tailoring metal oxide nanoparticle dispersions for inkjet printing," *J Colloid Interface Sci*, vol. 526, pp. 400–409, 2018, doi: 10.1016/j.jcis.2018.05.006.
- [123] S. P. Ramachandran, B. Saravanakumar, V. Ganesh, G. Ravi, A. Sakunthala, and R. Yuvakkumar, "Hexamine, PEG-400 effect on α -MoO₃ nanoparticle synthesis for pseudo capacitance applications," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 28, no. 18, 2017, doi: 10.1007/s10854-017-7223-9.
- [124] D. Hanlon, "Liquid Phase Exfoliation of Novel 2D Nanomaterials," Trinity CollegeDublin, 2016.
- [125] J. T. Du, Q. Sun, X. F. Zeng, D. Wang, J. X. Wang, and J. F. Chen, "ZnO nanodispersion as pseudohomogeneous catalyst for alcoholysis of polyethylene terephthalate," *Chem Eng Sci*, vol. 220, 2020, doi: 10.1016/j.ces.2020.115642.
- [126] G. A. Dilabio and A. Otero-de-la-Roza, "Noncovalent Interactions in Density Functional Theory," in *Reviews in Computational Chemistry*, vol. 29, 2016. doi: 10.1002/9781119148739.ch1.
- [127] Q. Xiang and D. Zhang, "Fabrication of molybdenum trioxide (MoO₃) coating by electrophoretic deposition," *Journal of Materials Science: Materials in*

- Electronics*, vol. 28, no. 10, pp. 7449–7453, 2017, doi: 10.1007/s10854-017-6434-4.
- [128] A. L. Al-Otaibi, “Yttrium Doped Single-Crystalline Orthorhombic Molybdenum Oxide Micro-Belts: Synthesis, Structural, Optical and Photocatalytic Properties,” *J Inorg Organomet Polym Mater*, vol. 31, no. 8, pp. 3416–3429, 2021, doi: 10.1007/s10904-021-01999-y.
- [129] S. Pandey, K. H. Sharma, A. K. Sharma, Y. Nerthigan, D. R. Hang, and H. F. Wu, “Comparative Photothermal Performance among Various Sub-Stoichiometric 2D Oxygen-Deficient Molybdenum Oxide Nanoflakes and In Vivo Toxicity,” *Chemistry - A European Journal*, vol. 24, no. 29, pp. 7417–7427, 2018, doi: 10.1002/chem.201705734.
- [130] M. Yan, Y. Shen, L. Zhao, and Z. Li, “Synthesis and photochromic properties of EDTA-induced MoO₃ powder,” *Mater Res Bull*, vol. 46, no. 10, pp. 1648–1653, 2011, doi: 10.1016/j.materresbull.2011.06.013.
- [131] Ç. Çetinkaya, E. Çokduygulular, Y. Özen, İ. Candan, B. Kınacı, and S. Özçelik, “Determination of surface morphology and electrical properties of MoO₃ layer deposited on GaAs substrate with RF magnetron sputtering,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 32, no. 9, 2021, doi: 10.1007/s10854-021-05863-0.
- [132] T. L. Valerio, G. A. R. Maia, L. F. Gonçalves, A. Viomar, E. do Prado Banczek, and P. R. P. Rodrigues, “Study of the Nb₂O₅ Insertion in ZnO to Dye-sensitized Solar Cells,” *Materials Research*, vol. 22, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1590/1980-5373-MR-2018-0864.

- [133] G. Nagaraju *et al.*, “Electrochemical heavy metal detection, photocatalytic, photoluminescence, biodiesel production and antibacterial activities of Ag–ZnO nanomaterial,” *Mater Res Bull*, vol. 94, no. September, pp. 54–63, 2017, doi: 10.1016/j.materresbull.2017.05.043.
- [134] T. Gutul, E. Rusu, N. Condur, V. Ursaki, E. Goncarenco, and P. Vlazan, “Preparation of poly(N-vinylpyrrolidone)-stabilized zno colloid nanoparticles,” *Beilstein Journal of Nanotechnology*, vol. 5, no. 1, pp. 402–406, 2014, doi: 10.3762/bjnano.5.47.
- [135] M. Khan, A. H. Naqvi, and M. Ahmad, “Comparative study of the cytotoxic and genotoxic potentials of zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles,” *Toxicol Rep*, vol. 2, no. May, pp. 765–774, 2015, doi: 10.1016/j.toxrep.2015.02.004.
- [136] S. Islam, K. M. A. Hussain, and M. J. Rashid, “Deposition and Optical Characterization of ZnO Thin films on Glass Substrate,” *J Phys Conf Ser*, vol. 1086, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1086/1/012009.
- [137] A. B. Lavand and Y. S. Malghe, “Synthesis, characterization and visible light photocatalytic activity of nitrogen-doped zinc oxide nanospheres,” *Journal of Asian Ceramic Societies*, vol. 3, no. 3, pp. 305–310, 2015, doi: 10.1016/j.jascer.2015.06.002.
- [138] N. Hadi and H. Dawood, “Antibacterial activity of modified zinc oxide nanoparticles against *Pseudomonas aeruginosa* isolates of burn infections,” vol. 33, no. January, pp. 1–14, 2016.
- [139] A. O. Mousa, N. F. Habubi, and N. A. Nema, “Substrate Effects on Structural and Optical Properties of ZnO Thin Films Deposited by Chemical Spray

Pyrolysis,” *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy*, vol. 51, 2015, doi: 10.18052/www.scipress.com/ilcpa.51.69.

- [140] Z. Yang *et al.*, “Multiple electron transporting layers and their excellent properties based on organic solar cell,” *Sci Rep*, vol. 7, no. 1, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-08613-7.