

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ÁREA DE POSGRADO

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



“Polarizado fotocromático para ventana de vehículo en zonas de calor extremo.”

TESIS.

“que presenta para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS”

ING. FERNANDO JAVIER HARO NAVARRO.

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ÁLVARO GONZÁLEZ ÁNGELES

CODIRECTORA DE TESIS:

DRA. ROSA CITLALLI ANGUIANO COTA.

Mexicali, B. C.

Martes 26 de Octubre de 2021

Agradecimientos

Gracias al director de tesis DR. ÁLVARO GONZÁLEZ ÁNGELES, que me dio la oportunidad de aceptar el proyecto bajo su tutela.

Agradecimientos

Gracias al CONACYT por el apoyo económico de la beca CVU 843020 , Gracias al Maestro Pablo Rojo Calzada DIRECTOR.

Gracias al Dr. Marcos A. Coronado Ortega Coordinador General del Programa MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA de la facultad de Ingeniería de la U.A.B.C. Gracias por su apoyo.

Gracias al Dr. Rosa Citlalli Anguiano Cota, por su apoyo y dedicación a mi formación académica. Por su apoyo en la publicación y en la construcción de mi tesis. Los logros no son fáciles y son compartidos por todas las personas que participaron en el proceso cognitivo de mi formación como maestro en ciencias. Muchas gracias.

Gracias al Dr. Heriberto Márquez Becerra del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, En el laboratorio de ingeniería óptica, por proporcionar los equipos donde se midieron las muestras para la experimentación.

Dedicatoria

Dedicado a mi familia, mis compañeros, mis amigos, mis maestros, mi comunidad y mi país. El producto de este trabajo es un logro de equipo.

Dedico mi trabajo a la memoria de mi hermano Héctor Alfonso Haro Navarro 29 de marzo de 1972 † 27 de enero del 2021.

Resumen

En este trabajo se propone el análisis de las películas de control solar que bloquearon y redujeron la entrada de radiación ultravioleta (UV) e infrarroja (IR) al interior de un vehículo durante el día, pero por la noche permitió la visión del exterior al interior del vehículo, teniendo una aplicación principalmente en zonas de calor extremo. El resultado esperado es una película que tenga un bloqueo mayor al 95% de radiación UV y radiación IR. También se buscó que la película presentara una transmitancia de luz visible mayor a 85%.

Se seleccionaron del mercado 282 modelos de películas de control solar (PDCS) donde se recopilaron los datos proporcionados por el proveedor y se descartaron las que no cumplen con los parámetros esperados. Se corroboraron los datos con una muestra estadística de estas películas utilizando un radiómetro solar para medir la transmitancia del material. Se utilizó un espectrofotómetro para medir la ventana de transmisión del espectro, de la radiación ultravioleta UV a la luz visible. Se utilizó un espectrómetro para medir la ventana de transmisión de la radiación infrarroja (IR). Los resultados presentaron pequeñas diferencias en el rechazo de energía solar con las hojas de datos de los materiales, diferencias que no son significativas según los resultados del Análisis de Varianza realizado. Para terminar el estudio se redujo la lista de 282 a 10 PDCS que cumplieron con los parámetros las marca 3M, IQE, THERMOSHIELD, SOLAR GARD, SOLEx, SOLAR SCREEN, GLOBAL, VIPER, ASWF y LLUMAR

Abstract

This work proposes the analysis of solar control films that block and reduce the entry of ultraviolet (UV) and infrared (IR) radiation into the interior of a vehicle during the day, but at night allow vision from the outside to the inside of the vehicle, having an application mainly in areas of extreme heat. The expected result is a film that has a blockage greater than 95% of UV radiation and IR radiation. It is also intended that the film has a visible light transmittance greater than 85%.

282 models of solar control films (SCF) were selected from the market where the data provided by the supplier was collected, and those that did not meet the expected parameters were discarded. The data was corroborated with a statistical sample of these films using a solar radiometer to measure the transmittance of the material. A spectrophotometer was used to measure the transmission window of the spectrum, from ultraviolet UV radiation to visible light. A spectrometer was used to measure the transmission window of infrared radiation (IR). The results showed small differences in the rejection of solar energy with the datasheets of the materials, differences that are not significant according to the results of the Analysis of Variance carried out. To finish the study,, the list was reduced from 282 to 10 SCF that met the parameters, which are the following brands: 3M, IQue, THERMOSHIELD, SOLAR GARD, SOLex, SOLAR SCREEN, GLOBAL, VIPER, ASWF, and LLUMAR.

Hipótesis

La radiación UV e IR puede ser reducida al ser colocadas películas de control solar en las ventanas de los vehículos hasta en un 95% para zonas de calor extremo.

Objetivo

Determinar cuáles son las mejores películas de control solar comerciales que bloquean el UV en un 95% y que dejen pasar la luz visible en un máximo posible, para recomendar su uso en las ventanas de autos y edificios.

Metas

- Investigar las características de las películas de control solar que se venden en el mercado actual.
- Medir muestras de películas de control solar utilizando radiómetro solar, espectrofotómetro UV-VIS y espectrómetro IR.
- Analizar y discutir los resultados.
- Hacer una recomendación informada de cuáles son las películas que mejor protegen de la radiación UV e IR.

Justificación

La zona geográfica donde está ubicada la ciudad de Mexicali es parte de un desierto muy grande y vasto llamado Aridoamérica, la cual es una zona donde se presentan altas temperaturas durante el verano y bajas temperaturas durante el invierno. Para la sociedad de Mexicali es común entintar vidrios de los vehículos para tratar de reducir el calor que se introduce y se mantiene dentro de estos. Se ha demostrado que el entintar las ventanas puede reducir la entrada de radiación infrarroja al interior de esto, sin embargo, según estadísticas de las compañías de seguros de vehículos, un vehículo con los vidrios entintados es 40% más propenso a sufrir un accidente de tránsito que un vehículo que no tenga las ventanas entintadas.

Por otra parte, en los últimos años se ha observado un incremento en los problemas en la piel debido a la constante exposición a la radiación UV, siendo el uso del automóvil, uno de los principales lugares en donde se tiene esta incidencia directa.

Por lo que en este trabajo de tesis se propone analizar diferentes películas de protección solar para seleccionar aquellas que permitan reducir la entrada de radiación UV e IR al interior de vehículos hasta en un 95%, sin tener la problemática de reducción visual durante la noche.

ÍNDICE DEL CONTENIDO.	Página
Resumen.	1
Abstract.	2
Hipótesis.	3
Objetivo.	3
Justificación.	4
Índice de contenido.	5
Índice de figuras.	7
Índice de tablas.	8
Introducción	9
Capítulo 1 Estado del arte.	11
1.1 Antecedentes.	11
1.2 Ondas electromagnéticas.	12
1.3 Espectro electromagnético	13
1.3.1 Ecuaciones de Maxwell.	14
1.4 Fotometría y Radiometría	15
1.4.1 Unidades fotométricas	15
1.4.1.1 Iluminancia.	16
1.4.1.2 Luminancia.	16
1.4.2 Unidades radiométricas.	17
1.5 Luz en el espectro electromagnético	18
1.6 Índice de Refracción.	18
1.7 Ley de Refracción y Reflexión.	19
1.8 El principio de Fermat.	20
1.9 Polarizadores y retardadores	21
1.9.1 Polarización de la luz	23
1.9.1.1 Ley de Malus.	23
1.9.1.2 Polarización por reflexión.	25
1.9.1.3 Polarización por absorción.	26
1.9.1.4 Polarización por doble refracción.	26
1.9.2 Retardadores	27
1.10 Interferencias.	27
1.10.1 Interferencia Constructiva.	28
1.10.2 Interferencia Destructiva.	29
Capítulo 2 Marco teórico.	30
2.1 Fotocromismo.	30
2.1.1 Materiales fotocromáticos.	30
2.1.2 Tinta fotocromática.	33
2.1.3 Película fotocromática seca.	33
2.1.4 Determinación de foto protección.	34
2.1.5 Fabricación de artículos fotocromáticos.	34
2.1.6 Espectroscopia de polímeros fotocromáticos.	35
2.2 Filtros polarizadores.	35
2.2.1 Luz natural y Luz polarizada.	35

2.3 Películas delgadas.	37
2.3.1 Principio de operación de las películas delgadas.	37
2.3.2 Clasificación de películas delgadas.	37
2.3.3 Métodos para fabricar películas delgadas.	38
2.3.4 Caracterización de películas delgadas.	39
2.4 recubrimientos en el mercado.	40
2.4.1 Precedente histórico.	40
2.4.2 Marcas y modelos.	41
2.4.3 Características ópticas.	43
2.4.3.1 Materiales	43
2.4.3.2 Ventanas de transmisión.	47
Capítulo 3 Experimentación.	52
3.1 Materiales y equipos.	53
3.1.1 Radiómetro solar.	53
3.1.2 Espectrofotómetro.	53
3.1.3 Espectrómetro.	54
3.2 Experimentos.	54
3.2.1 Rechazo de energía solar.	54
3.2.2 Ventana de transmisión UV-VIS	59
3.2.3 Ventana de transmisión IR	64
Capítulo 4 Resultados y discusión.	66
4.1 Resultados.	67
4.1.1 Comparación entre ventanas de transmisión.	70
4.1.2 Selección de recubrimientos.	71
4.2 Conclusiones.	76
Trabajos futuros.	78
Anexo.	79
Referencias.	85

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página.
Figura 1. Espectro electromagnético, desde las ondas de radio a rayos gamma.	20
Figura 2. Espectro solar.	22
Figura 3. Ley de refracción y reflexión.	25
Figura 4. Luz linealmente polarizada y filtro polarizador.	26
Figura 5. Intensidad en un diagrama circular, ley de Malus.	26
Figura 6. Dos filtros polarizadores cruzados a 90° .	27
Figura 7. 45° entre dos polarizadores opuestos entre sí a 90° .	28
Figura 8. Dos filtros polarizadores cruzados no permiten pasar la luz.	29
Figura 9. Representación gráfica del prisma nicol.	30
Figura 10. Interferencia constructiva.	31
Figura 11. Interferencia destructiva.	33
Figura 12. Ventana de absorción del diarileno.	34
Figura 13. Molécula de diarileno desactivada y activada.	35
Figura 14. Ventana de absorción de un nuevo diarileno.	38
Figura 15. La luz natural está representada en el vector.	38
Figura 16. La suma de dos ondas linealmente polarizadas.	40
Figura 17. Ventana de transmisión del SnO_2F .	42
Figura 18. Espesor vs número de rociadas del SnO_2F .	45
Figura 19. Transmitancia de luz a través de una pieza.	50
Figura 20. ventana de transmisión del Fluoruro de calcio CaF_2 .	50
Figura 21. Ventana de transmisión del Zafiro Al_2O_3 .	51
Figura 22. Ventana de transmisión del Bromuro de potasio KBr.	51
Figura 23. Ventana de transmisión del Cloruro de potasio KCl.	52
Figura 24. Ventana de transmisión del Silicio fundido de grado UV SiO_2 .	52
Figura 25. Ventana de transmisión del Silicio fundido de grado UV SiO_2 .	53
Figura 26. Ventana de transmisión del Sulfato de zinc ZnS .	53
Figura 27. Ventana de transmisión del Policarbonato.	55
Figura 28. Vista frontal del radiómetro solar.	55
Figura 29. Vista frontal del Espectrofotómetro cari 50 Tablet UV-VIS.	56
Figura 30. Vista frontal del espectrómetro TENSOR 27.	57
Figura 31. Se toma la lectura.	62
Figura 32. Gráfica del espectrofotómetro.	62
Figura 33. Ventanas de transmisión UV-VIS de las muestras analizadas.	66
Figura 34. Ventanas de transmisión IR en porcentaje vs cm^{-1} .	67
Figura 35. Ventana de transmisión IR en porcentaje vs nanómetros.	68
Figura 36. Un día soleado de enero, temperatura 19°C a las 12:30 pm.	68
Figura 37. Con el radiómetro solar en posición se tomaron lecturas.	70
Figura 38. Rechazo de energía solar.	71
Figura 39. Ventana de transmisión UV-VIS.	71
Figura 40. Ventana de transmisión de IR.	72
Figura 41. Ventanas de transmisión para los materiales nanocerámicos.	73
Figura 42. Listado de las PDCS más eficientes en transmitancia de luz visible.	74
Figura 43. Listado de PDCS bloqueo de radiación UV	75
Figura 44. Transmitancia de dos filtros polarizadores	75
Figura 45. Ley de Malus medida con foto resistencias.	76
Figura 46. Variación de temperatura al interior de una caja	76
Figura 47. transmitancia de filtro polarizador	77

ÍNDICE DE TABLAS.

Página.

Tabla 1. Longitud de onda (λ) de radiación UV, luz visible, radiación IR.	14
Tabla 2. Espectro UV-VIS-IR.	15
Tabla 3. Unidades fotométricas y la relación entre ellas.	17
Tabla 4. Iluminancia recibida en diferentes situaciones medida en lux.	18
Tabla 5. luminancia de diferentes objetos medida en cd/cm^2 .	19
Tabla 6. Unidades fotométricas y la relación entre ellas.	19
Tabla 7. Índice de refracción de algunos materiales conocidos.	21
Tabla 8. Índices de refracción de materiales birrefringentes	24
Tabla 9. Películas de control solar 2018.	44
Tabla 10. Fluoruro de calcio CaF_2 .	46
Tabla 11. Zafiro	46
Tabla 12. Bromuro de potasio KBr.	47
Tabla 13. Cloruro de potasio.	47
Tabla 14. Silicio fundido de grado UV SiO_2 .	48
Tabla 15. Rutilo	48
Tabla 16. Sulfato de zinc grado claro	48
Tabla 17. Policarbonato (PC)	49
Tabla 18. Datos del fabricante y datos medidos por el radiómetro solar.	57
Tabla 19. A4 puntos críticos al 5% de la distribución $F(X>x)=0.05$	59
Tabla 20. A3 Puntos críticos para la distribución T de Student.	60
Tabla 21. ANOVA	61
Tabla 22. Datos del fabricante y datos medidos de transmitancia de luz visible.	63
Tabla 23. ANOVA transmitancia de luz visible.	64
Tabla 24. Datos del fabricante y datos medidos de bloqueo de radiación UV.	64
Tabla 25. ANOVA bloqueo de radiación UV.	65

Introducción

Nikola Tesla dijo alguna vez “nuestros sentidos nos permiten percibir sólo una pequeña porción del mundo exterior” con esto marcó la pauta, dándonos a entender que existen energías que no podemos ver y nos afecta estar expuesto a ellas. En el siglo XX se detectó un hoyo en la capa de ozono sobre la Antártida y desde entonces se han hecho esfuerzos para su monitoreo, se han prohibido el uso de gases que provocan que el ozono se destruya [1][2]. Se han buscado alternativas para protegernos, se descubrió que el cáncer de piel era promovido por la exposición prolongada a la radiación UV [3]. Esta radiación se ha incrementado gracias al desgaste del ozono, en comparación a los niveles que existían en el siglo XIX. Por esta razón se buscó una aportación a la seguridad de la salud de la piel a nivel mundial, protegiendo a las personas mientras conducen su vehículo [4]. Pero para poder aportar soluciones primero hay que conocer el problema y para esto es necesario conocimientos básicos que nos permitan entender qué problema estamos atacando y plantear una aportación en forma de polarizado fotocromático. Retomando el tema del conocimiento. Maxwell en su teoría electromagnética dijo que el campo eléctrico existe en presencia de un campo magnético y a su vez un campo magnético existe en presencia de un campo eléctrico producido por una corriente eléctrica [5]. Maxwell propuso ecuaciones que describen el comportamiento ondulatorio de las ondas electromagnéticas [5]. Una onda eléctrica siempre va acompañada de una onda magnética perpendicular y de igual magnitud. En ese tiempo solo se conocía la parte del espectro electromagnético que va desde infrarrojo (radiación invisible que se manifiesta en forma de calor) pasando por los colores de la luz visible (es la única parte del espectro electromagnético que es visible para el ojo humano) y hasta el ultravioleta (radiación invisible que provoca quemaduras solares tras una exposición prolongada) [3][5]. En la actualidad sabemos que el espectro electromagnético es infinito y se ha logrado medir desde las ondas de radio que utilizamos para comunicarnos hasta los rayos cósmicos que son producidos cuando una estrella muere explota en el universo. La luz tiene una naturaleza dual, es una partícula (fotón) que se mueve a través del medio en forma de onda electromagnética (onda electromagnética). Existe en los cuerpos traslúcidos algo que se llama índice de refracción, este valor es resultado de dividir la velocidad de la luz en el vacío (300,000 km/s) entre la velocidad de la luz en el medio que atraviesa. El índice de refracción aumenta con la densidad del material. Gracias a la existencia del índice de refracción fue como Isaac Newton pudo separar la luz en colores al pasar un pequeño haz de luz a través de un prisma triangular, Newton dedujo que los colores se mueven a diferentes velocidades es por eso por lo que el color rojo se dobla menos, porque su velocidad es mayor a la velocidad del color violeta. En la actualidad se sabe que la longitud de onda del color violeta es más pequeña que la del color rojo. Existen fenómenos en la óptica que se producen al pasar la luz de un medio menos denso a uno de mayor densidad, dicho de otro modo, el paso de la luz de un medio con índice de refracción menos a un medio de índice de refracción mayor, se dobla la luz dando lugar a un fenómeno llamado refracción de la luz, también la luz que es reflejada en la interfaz entre los dos medios da lugar a un fenómeno llamado reflexión de la luz. Es importante saber esto para poder entender la polarización de la luz que en la actualidad se conocen varios tipos como lo es polarización por reflexión, polarización por absorción, polarización por doble refracción. También debemos conocer el fenómeno de interferencia que existen dos tipos, la interferencia constructiva donde dos ondas con la misma amplitud se suman y el fenómeno de interferencia destructiva donde dos ondas con la misma amplitud, pero de signo contrario se destruyen, aquí podemos decir que la luz genera oscuridad al

destruirse las ondas. El fenómeno de interferencia tiene aplicaciones ópticas, en este trabajo se presenta en las películas delgadas como anti reflejante y los filtros polarizadores. Es importante conocer el fenómeno fotocromático que fue nombrado así por Yehuda Hirshberg en la década de 1950 en Israel. El fenómeno de cambio reversible de color fue estudiado por Markwald en la década de 1880 la primera sustancia que se estudio era un sólido llamado 2,3,4,4-tetracloronaftaleno-1(4H)-uno. En la actualidad existe una gama de tintes fotocromáticos con múltiples aplicaciones que van desde los lentes oftalmológicos, sensores ópticos, pinturas que cambian de color, etc. También es importante conocer los filtros polarizadores, estos materiales transmiten un solo plano de polarización y obstruyendo los demás. Una fuente de luz como el sol emite luz en todas las direcciones perpendiculares a la dirección de propagación, al pasar por un filtro polarizador solo pasa la luz en un solo plano, es entonces cuando la luz es polarizada. Existen tres tipos de polarización de la luz, polarización lineal, polarización circular y polarización elíptica [5]. La ley de Malus nos dice que si ponemos dos filtros polarizadores desfasados 90° uno con respecto del otro se bloquea casi totalmente la luz, porque se bloquea la luz en todas direcciones perpendiculares a la dirección de propagación y solo una parte muy pequeña logra pasar [5]. Las películas delgadas son utilizadas en óptica como recubrimientos ópticos que miden de décimas de nanómetros hasta películas delgadas de micrómetros de espesor [6]. Depende de la utilidad, el espesor que se le va a dar. Por ejemplo una película anti reflejante debe tener $\lambda/4$ en otras palabras debe tener como espesor la cuarta parte de la longitud de onda de se quiere producir el antirreflejo [5]. Las películas delgadas tienen más aplicaciones y pueden ser de una capa o de varias capas [6]. Las películas delgadas se han usado también como guías de onda en la fibra óptica. Para este trabajo se diseña un experimento para medir las ventanas de transmisión de los materiales ópticos. Se midieron películas de control solar y filtros polarizadores, utilizando un radiómetro solar, un espectrómetro y un espectrofotómetro. Las lecturas se analizaron y discriminaron los datos utilizando los criterios de evaluación fueron: tener transmitancia de luz visible mayor al 85%, bloqueo de radiación ultravioleta (UV) mayor al 95% y bloqueo de radiación infrarroja (IR) mayor al 95%. Los resultados mostraron que los filtros polarizadores tienen una ventana de transmisión más estable comparados con las películas de control solar.

Capítulo 1

Estado del arte

1.1 Antecedentes.

Desde 1985 que se firmó un tratado internacional para eliminar los gases que destruyen la capa de ozono de los productos de uso diario, mientras tanto se ha venido observando los efectos de la radiación ultravioleta (UV) en los seres humanos, la capa de ozono es el filtro natural que protege a la tierra de la radiación UV e infrarroja (IR), Al desgastarse la capa de ozono entra mayor cantidad de radiación UV. La exposición prolongada a la radiación UV se asocia como causa de cáncer de piel, cataratas en los ojos, entre otras patologías, estas razones es importante usar protección UV en la piel usando cremas que contengan bloqueador solar, en los ojos usando lentes con protección UV, en las ventanas de vehículos y edificios instalando películas de control solar [2].

Brian S. BoxerWachler y su hija Micaela BoxerWachler Evaluaron 29 automóviles de 15 fabricantes de automóviles. Ellos midieron la radiación UV-A detrás del parabrisas y detrás de la ventana lateral del lado del conductor. El porcentaje de bloqueo de la radiación UV-A en el parabrisas fue de 96% en promedio, variando las lecturas de un modelo a otro en un rango de 95% a 98%. El porcentaje de bloqueo de UV-A en la ventana lateral fue de 71% en promedio, variando las lecturas en un rango de 44% a 96%. La diferencia entre las lecturas del parabrisas y la ventana lateral fue de 25% en promedio [7]. Cabe señalar que las compañías productoras, han colocado protección UV en los parabrisas de los vehículos que produjeron durante los últimos 30 años, pero no se colocó protección UV en la ventana lateral de la mayoría de los vehículos de la muestra. Solo 4 de los 29 vehículos analizados presentan bloqueo a la radiación UV-A en la ventana lateral. Es importante señalar que el conducir un vehículo por largos periodos de tiempo sin protección UV en la ventana lateral, puede llegar producir envejecimiento prematuro en el lado izquierdo de la cara y cataratas en el ojo izquierdo [7].

En las zonas de calor extremo es común entintar las ventanas de los vehículos, para reducir la entrada de calor al interior, cabe señalar que los entintados tradicionales no incluyen protección UV, por lo tanto, es recomendable entintar las ventanas con películas que contengan protección UV. Los materiales que ofrecen una protección UV son los filtros nanocerámicos, como por ejemplo TiO_2 , que se encuentra presente en las cremas con bloqueador solar, gracias a estos compuestos las películas de control solar (PDCS) tiene un bloqueo significativo a la radiación UV. Las PDCS son una gama de productos que aseguran bloquear 95% ó más la radiación UV y rechazar una cantidad considerable de energía solar. La PDCS es un entintado combinado con un filtro nanocerámicos, por esta razón bloquea radiación UV e IR y reduce la transmitancia de luz visible al interior del vehículo, por lo tanto, hay que tomar en cuenta las leyes de tránsito. La legislación vigente permite películas en las ventanas laterales de los vehículos con transmitancia mayor al 85% y 15% en la ventana trasera [4]. La legislación vigente de cada estado de USA se encuentra disponible en la International Window Film Association (IWFA) [4]. En esta asociación están registradas las principales marcas productoras y vendedores de películas de control solar [4]. Las compañías productoras proporcionan las hojas de datos de cada película. En las hojas de datos se muestran cómo se presenta la reducción del flujo de calor a través de las ventanas, esta reducción se ve reflejada en el consumo energético por uso de aire acondicionado [8]–[10].

Para poder medir el desempeño de la PDCS es necesario separar la radiación solar, esta se divide en radiación UV, luz visible y radiación IR. De aquí tomamos radiación UVC y UVB, la exposición prolongada a estas dos radiaciones causa cáncer de piel [11]. En el pasado la radiación UVC y UVB eran eliminadas casi totalidad por la capa de ozono. La radiación IR mediano, IR lejano e IR extremo son radiación invisible que se manifiesta en forma de calor. Las radiaciones saludables del espectro solar son UVA, Luz visible e IR cercano, porque su exposición moderada provoca efectos positivos en la salud [4].

Tabla 1 Longitud de onda (λ) de radiación ultravioleta, luz visible, radiación infrarroja medidas en nm (nanómetros) [12][13][14].

Tipo de radiación	Longitud de onda (λ)
UVC (nociva)	220 nm a 280 nm
UVB (nociva)	280 nm a 320 nm
UVA	320 nm a 400 nm
Visible Violeta	400 nm a 455 nm
Visible Azul	455 nm a 492 nm
Visible Verde	492 nm a 577 nm
Visible Amarillo	577 nm a 597 nm
Visible Naranja	597 nm a 622 nm
Visible Rojo	622 nm a 780 nm
IR cercano	780 nm a 3000 nm
IR intermedio	3000 nm a 6000 nm
IR lejano	6000 nm a 15000 nm
IR extremo	15000 nm a 1 mm

1.2 Ondas electromagnéticas

La luz se considera como partícula (fotón) que se comporta como una onda (onda electromagnética), por lo que las ecuaciones de Maxwell están relacionadas a las ondas electromagnéticas. Las ondas electromagnéticas están representadas en su forma simple como una onda armónica plana y en su forma más compleja tomando en cuenta su frente de onda, longitud de onda y velocidad de fase, la caracterización transversal de la onda electromagnética, el fenómeno de polarización y la energía electromagnética que transporta representada por el vector de Poynting [5].

En el siglo XIII, Roger Bacon describió el proceso que produce el arcoíris como cuando la luz atraviesa un vaso con agua. En 1667 Isaac Newton presentó ante la real sociedad su experimento de descomposición de la luz por medio de un prisma. Newton observó que al hacer incidir un delgado haz de luz sobre un prisma triangular una parte se reflejaba y otra se refractaba a través del prisma dejando ver diferentes bandas de colores. Newton pensó que la luz se compone de corpúsculos (partículas) de diferentes colores que se mueven a diferentes velocidades que al pasar por el prisma la luz violeta es más lenta que la luz roja por eso su la refracción de la luz violeta es mayor que la roja dando como resultado el espectro de colores del arcoíris. En 1671 al describir su experimento de óptica usó la palabra espectro (del latín aparición o apariencia) por primera vez. Newton dividió la luz

en 7 colores tomando en cuenta una creencia de los filósofos griegos que decía que los 7 días colores estaban conectados a los 7 días de la semana, así como a los 7 planetas del sistema solar que se conocían entonces, así como las 7 notas musicales y nombro a sus 7 colores como: rojo, naranja, amarillo, verde, azul, añil (índigo) y violeta. Fue muy criticado por Isaac Asimov quien proponía eliminar el Añil por no considerarlo un color. Desencadenando una serie de alegatos como que el término blue en inglés es muy amplio a diferencia de otros idiomas.

1.3 Espectro electromagnético

En 1867 Maxwell publicó su teoría electromagnética, entonces solo se conocía el infrarrojo pasando por el visible hasta el ultravioleta como se muestra en la Tabla 1. Esta región del espectro electromagnético es una parte muy importante para la óptica. Pese a que representa una pequeña porción del espectro electromagnético que en la actualidad se ha logrado medir desde las ondas de radio hasta los rayos cósmicos. Teóricamente se considera que el espectro electromagnético es infinito, es solo que aún no inventan los sensores que logren medir más allá de estos límites [12].

Tabla 2 Espectro UV-VIS-IR [12].

Tipo de radiación	Longitud de onda (λ)
UVC (nociva)	220 nm a 280 nm
UVB (nociva)	280 nm a 320 nm
UVA	320 nm a 400 nm
Visible Violeta	400 nm a 455 nm
Visible Azul	455 nm a 492 nm
Visible Verde	492 nm a 577 nm
Visible Amarillo	577 nm a 597 nm
Visible Naranja	597 nm a 622 nm
Visible Rojo	622 nm a 780 nm
IR cercano	780 nm a 3 μ m
IR intermedio	3 μ m a 6 μ m
IR lejano	6 μ m a 15 μ m
IR extremo	15 μ m a 1 mm

El espectro electromagnético es la distribución energética del conjunto de ondas electromagnéticas. Al referirnos a un objeto emisor lo nombramos espectro electromagnético y si solo nos referimos a la radiación electromagnética la nombramos espectro. La radiación

electromagnética que se emite se llama espectro de emisión, la radiación electromagnética que se absorbe se denomina espectro de absorción de una sustancia. La radiación emitida después de ser absorbida sirve para identificar las sustancias como si fuera un código de barras o una huella digital del material. Se analiza el espectro electromagnético a través de una herramienta llamada espectroscopio. Podemos medir la longitud de onda, la frecuencia y la intensidad de la radiación electromagnética. El espectro electromagnético es infinito, pero gracias a los equipos que tenemos podemos decir que se extiende desde las ondas electromagnéticas con longitud de onda más pequeña, iniciando con los rayos gamma y los rayos X, después está la radiación ultravioleta, pasamos por los colores del espectro visible, después está la radiación infrarroja, hasta llegar a las ondas de radio que son las ondas electromagnéticas con mayor longitud de onda. Si pudiéramos medir todo el espectro veríamos que la longitud de onda máxima sería del tamaño del universo. El espectro electromagnético es infinito y continuo. Para los fines de este trabajo solo trabajaremos con las radiaciones ultravioleta, visible e infrarroja [5].

1.3.1 Ecuaciones de Maxwell.

Son 4 ecuaciones que describen el fenómeno electromagnético. James Clerk Maxwell reunió estas ecuaciones a lo largo de años de experimentos inspirándose en los trabajos previos de importantes personalidades como Coulomb, Gauss, Ampere, Faraday entre otros, uniendo el campo eléctrico y el campo magnéticos en un solo concepto al que se le denominó campo electromagnético [12][15].

Ecuaciones de Maxwell expresadas en forma de integral

$$\oint_C E \cdot dl = - \iint_A \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS \quad (1.1)$$

$$\oint_C \frac{B}{\mu} \cdot dl = \iint_A \left(J + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) \cdot dS \quad (1.2)$$

$$\oiint_A \epsilon E \cdot dS = \iiint_V \rho dV \quad (1.3)$$

$$\oiint_A B \cdot dS = 0 \quad (1.4)$$

Las ecuaciones de Maxwell escritas en forma de ecuación diferencial son útiles para describir el comportamiento de un campo electromagnético. Esto es posible gracias al teorema de divergencia de Gauss.

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (1.5)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1.6)$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.7)$$

$$\nabla \times B = \mu \sigma E + \mu \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1.8)$$

Estas expresiones nos ayudan a encontrar una ecuación de onda [12].

1.4 Fotometría y Radiometría.

Los conceptos de radiometría y fotometría son sencillos. La radiometría se ocupa de la energía radiante, radiación electromagnética para cualquier longitud de onda y le corresponde la unidad de vatio o watt. Es la unidad básica de potencia, tasa de transferencia de energía. La fotometría está restringida a la región visible del espectro electromagnético y le corresponden las unidades de lumen. Los vatios y los lúmenes tienen las mismas dimensiones de energía por tiempo [16].

1.4.1 Unidades Fotométricas.

Son las unidades que miden únicamente la luz visible. Se muestran en la tabla 2.

Tabla 3 Unidades fotométricas y la relación entre ellas.

Magnitud	Símbolo	Unidad	Definición de la unidad	Relaciones
Flujo luminoso	Φ	Lumen (lm)	Flujo luminoso de la radiación monocromática de frecuencia de 540×10^{12} Hertz y un flujo de energía radiante de $\frac{1}{683}$ Vatios	$\Phi = I \cdot \omega$
Rendimiento luminoso	η	Lumen por vatio $\left(\frac{lm}{W}\right)$	Flujo luminoso emitido por unidad de potencia	$\eta = \frac{\Phi}{W}$
Cantidad de luz	Q	Lumen por segundo (lms) Lumen por hora (lmh)	Flujo luminoso emitido por unidad de tiempo	$Q = \Phi \cdot t$
Intensidad luminosa	I	Candela(cd)	Intensidad luminosa de una fuente puntual que emite flujo luminoso de un lumen en un ángulo sólido de un estereorradián	$I = \frac{\Phi}{\omega}$
Iluminancia	E	Lux(lx)	Flujo luminoso de un lumen que recibe una superficie de $1m^2$	$E = \frac{\Phi}{S}$
Luminancia	L	Candela por m^2 $\left(\frac{cd}{m^2}\right)$	Intensidad luminosa de una candela por unidad de superficie.	$L = \frac{I}{S}$

1.4.1.1 Iluminancia.

Iluminancia es la relación entre el flujo luminoso que se mide en lumen dividido entre el área de la superficie sobre la cual incide se mide en metros cuadrados. La iluminancia (E) se mide en lux, el flujo luminoso (φ) se mide en lumen (lm) y la superficie (S) se mide en cm^2 o m^2 , la fórmula es:

$$E = \varphi / S \quad (1.9)$$

Cuanto mayor sea el flujo luminoso que incidente sobre la superficie, mayor será su iluminancia, para un mismo flujo luminoso incidente, la iluminancia será tanto mayor en la medida en que disminuya la superficie. El lux, se define como una superficie en un metro cuadrado que recibe un flujo luminoso de un lumen [16].

$$1 \text{ lux} = 1 \text{ lm}/1\text{m}^2$$

La iluminancia se mide usando un aparato especial llamado luxómetro, compuesto por una célula fotoeléctrica, al incidir la luz sobre su superficie, genera una débil corriente eléctrica que aumenta en función de la luz incidente. La corriente se mide con un miliamperímetro calibrado para entregar la lectura en lux. Gracias a este aparato se midió la cantidad de lux que recibimos en cada situación como lo muestra la tabla 3 [16].

Tabla 4 Iluminancia recibida en diferentes situaciones medida en lux.

Situación	Iluminancia en lux
Al sol	100,000
A la sombra de un árbol	10,000
A la sombra de un toldo	6,000
Dentro de una habitación al lado de la ventana	2,500
Dentro de una habitación al centro de la habitación	300

1.4.1.2 Luminancia.

La luminancia es lo que produce en el ojo humano la sensación de claridad, la luz no se hace visible hasta que es reflejada por los cuerpos. La mayor o menor claridad con que vemos los objetos igualmente iluminados depende de su luminancia. Una hoja de papel sobre un escritorio de madera tiene la misma iluminación, pero se ve con más claridad la hoja de papel porque su luminancia es mayor que la del escritorio[16].

La luminancia se representa con la letra L, su unidad de medida se compone por la candela entre metro cuadrado (cd / m^2) y se le llama nit (nt), la unidad compuesta por la candela entre centímetro cuadrado (cd / cm^2) se le denomina stilb. La intensidad se mide en candelas y se representa por la letra I, el área se mide en cm^2 o m^2 y es representada por la letra S La fórmula es:

$$L = \frac{I}{S} \quad (1.10)$$

donde L es luminancia (cd/cm^2), I es la intensidad (cd) y S es área (cm^2)

La perpendicular de la luz es realmente la percepción de diferencias de luminancia. Se puede decir, por lo tanto, que el ojo ve diferencias de luminancia y no de iluminación. La

luminancia tiene gran importancia en el fenómeno llamado deslumbramiento que se tratará más adelante [16].

Para medir la luminancia se utiliza un aparato llamado luminancímetro. Este aparato funciona similar al luxómetro. Gracias a esto se han medido la luminancia de diversos objetos en la naturaleza como se muestra en la siguiente en la tabla 4[16].

Tabla 5 luminancia de diferentes objetos.

Objeto	Luminancia en cd/cm^2
Sol	150,000
Cielo despejado	0.3 a 0.5
Cielo nublado	0.03 a 0.1
Luna	0.25
Llama de una vela de cera	0.7
Lámpara incandescente	100 a 200

1.4.2 Unidades Radiométricas.

Miden todos los tipos de radiación electromagnética. Se pueden ver en la tabla 5.

Tabla 6 Unidades radiométricas y la relación entre ellas.

Magnitud	Símbolo	Unidades	Definición	Relaciones
Energía radiométrica	Q	$J = W \cdot s$	Potencia de radiación por tiempo	$Q = \Phi \cdot t$
Flujo radiométrico	Φ	$W = \frac{J}{s}$	Potencia de radiación	$\Phi = I \cdot \omega$
Irradiancia	E	$\frac{W}{m^2}$ $\frac{W}{cm^2}$	Flujo por unidad de área recibido por una superficie.	$E = \frac{\delta\Phi}{\delta A}$
Exitancia radiométrica	M	$\frac{W}{m^2}$ $\frac{W}{cm^2}$	Flujo por unidad de área, emitido a todos los ángulos	$M = \frac{\delta\Phi}{\delta A}$
Radiancia	L	$\frac{W}{(st \cdot m^2)}$ $\frac{W}{(st \cdot cm^2)}$	Flujo emitido por unidad de área, por unidad de ángulo sólido	$L = \frac{\delta^2\Phi}{\delta A \delta \Omega}$
Intensidad radiométrica	I	$\frac{W}{st}$	Flujo por unidad de ángulo sólido recibido por una superficie	$I = \frac{\delta\Phi}{\delta \Omega}$

1.5 Luz en el espectro electromagnético

El espectro solar abarca longitudes de onda que van desde el UV hasta el IR. En la figura 1 se muestran los niveles energéticos del espectro solar en diferentes condiciones: con cielo limpio, en el exterior de la atmósfera y en el suelo, a un ángulo de 37° y con respecto a la normal, así como de un cuerpo ideal [17].

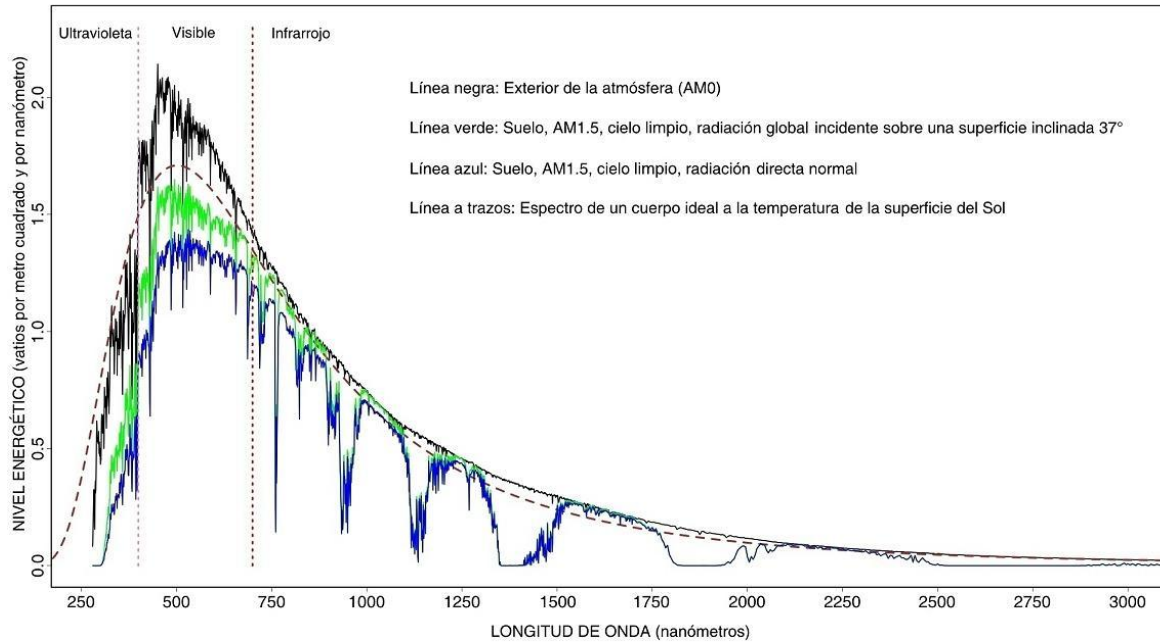


Figura 1 Espectro solar [17].

1.6 Índice de Refracción.

La velocidad de la luz en el vacío es de $c = 300,000 \text{ km / s}$, pero la luz disminuye su velocidad al pasar del vacío a un medio (aire, vidrio, diamante, etc.) y cuanto mayor densidad tenga el medio por el que pasa la velocidad de la luz es menor. Por lo tanto, se determinó que el índice de refracción del medio es la velocidad de la luz en el vacío ($c = 300,000 \text{ km / s}$) entre la velocidad de la luz en el medio que atraviesa (v). La fórmula para calcular el índice de refracción es:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.13)$$

Esta ecuación es válida si el medio que atraviesa es homogéneo e isótropo. En los materiales que no cumple con estas condiciones, el índice de refracción se calcula con la ecuación:

$$n = n(x, y, z, t, T). \quad (1.14)$$

Donde:

t	Tiempo
T	Temperatura
x	Coordenada eje x
y	Coordenada eje y
z	Coordenada eje z
n	Índice de refracción

La atmósfera terrestre es un buen ejemplo para el cual se aplica la Ecuación (1.14). Los materiales heterogéneos, que presentan un gradiente de índice de refracción se les considera en óptica como materiales dispersos o difusores de luz. En la tabla 6 se muestran algunos ejemplos conocidos de índice de reflexión de los materiales[18][19].

Nota: Es importante mencionar que para las diferentes longitudes de onda el índice de refracción es diferente.

Tabla 7 Índice de refracción de algunos materiales conocidos

Material	Índice de refracción
Vacío	1.0
Aire	1.00029
Hielo	1.309
Agua	1.333
Alcohol etílico	1.36
Cuarzo	1.46
Azúcar disuelta en agua al 80%	1.49
Vidrio común	1.52
Sal	1.54
Poliestireno	1.55
Vidrio de pedernal	1.65
Zafiro	1.77
Zircón	1.923
Diamante	2.417
Rutilo	2.907
Fosforo de galio	3.50
Átomos de sodio muy fríos	18000000

1.7 Ley de Refracción y Reflexión.

La unión entre dos medios ópticos de diferente densidad se llama interfaz, eso quiere decir que el índice de refracción de los dos medios es diferente $n_1 \neq n_2$ y en la unión existe una frontera. Al pasar un haz de luz a través de la frontera pasan dos cosas:

Una parte de la luz se refleja en la frontera con el mismo ángulo de inclinación, pero en sentido opuesto a la línea normal, esta es una línea perpendicular a la frontera en el punto donde incide el haz de luz, la luz reflejada se llama fenómeno de reflexión.

La otra parte del haz de luz que penetra la frontera dobla su trayectoria al entrar a un medio óptico con distinta densidad, para saber la trayectoria hacemos uso de una fórmula donde $i_1 = \text{ángulo de entrada}$, $i_2 = \text{ángulo refractado}$ si el haz de luz pasa de un medio de menor densidad a uno de mayor $i_1 > i_2$ pero por otro lado si pasa de un medio de mayor densidad a uno de menor densidad $i_1 < i_2$ esto ángulos se pueden calcular conociendo uno de ellos y en índice de refracción de los medios que inciden. La fórmula es:

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (1.15)$$

En la Figura 3 se muestra un ejemplo bien claro de reflexión y refracción de un haz de luz.

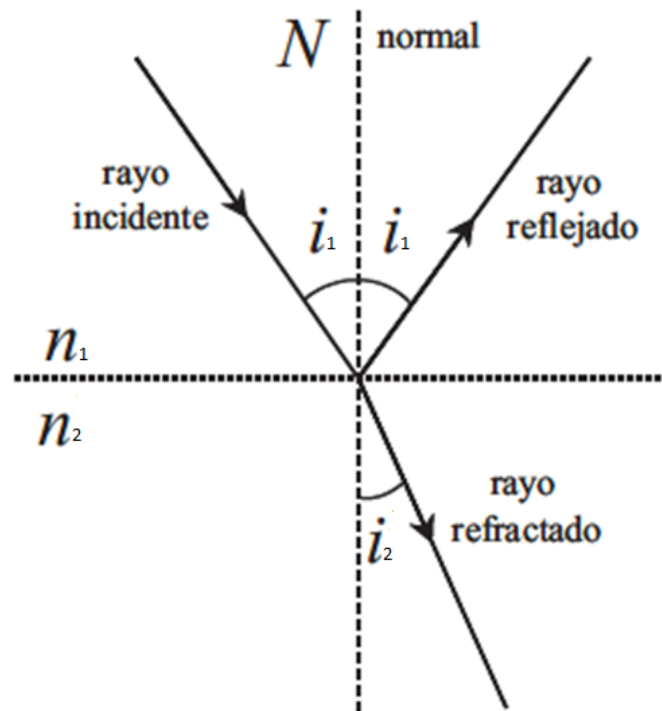


Figura 2 Ley de refracción y reflexión para un rayo de luz que pasa de un medio a otro medio con índice de refracción diferente.

1.8 El principio de Fermat.

El camino óptico que sigue la luz en una trayectoria de longitud S para ir de un punto A al punto B es el mínimo comparado con otras trayectorias geométricas próximas a S y que pasando por los puntos A y B , estas aproximaciones no son trayectorias reales de la luz. Esta definición afirma que el camino óptico a lo largo de una trayectoria de luz se mantiene aun cuando se introduce una variable infinitamente pequeña, la trayectoria S pasa a ser $S + dS$.

Donde dS es la variación del camino óptico y es nula al despreciar la variación infinitamente pequeña. Por lo tanto, la expresión matemática del principio de Fermat es:

$$\delta \times L = \delta \times \int_A^B n \times dS = 0 \quad (1.11)$$

En el caso de los espejos esféricos donde el camino óptico es el máximo que recorre la luz, el principio de Fermat puede decir que el tiempo que tarda en recorrer la trayectoria es mínimo. La ecuación que lo demuestra es la siguiente:

$$L = \int_S n \times dS = c \times \int_A^B \frac{dS}{v} = c \int_A^B dt = c \times t \quad (1.12)$$

Ya sea mínima o máxima la variación será anulada al pasar por la ecuación (1.12) la expresión matemática siempre será válida.

1.9 Polarizadores y retardadores.

En 1809 Étienne Malus, ingeniero militar y capitán del ejército de Napoleón al analizar una hoja de calcita se dio cuenta que al girarla frente al reflejo del atardecer sobre el cristal en una dirección el fenómeno de birrefringencia desaparecía, sacó en conclusión que la luz reflejada en el agua como en el vidrio es luz polarizada. Entonces dedujo la ley que lleva su nombre y se aplica a los polarizadores lineales[12].

En 1928 Edwin Herbert Land, estudiante de 19 años de edad en Harvard College inventó un polarizado de hoja dicroica conocido como hoja polaroide, usando una sustancia llamada herepatita. Después William Bird Herapath un médico inglés cuyo alumno descubrió que al verter yodo en orina de un perro al que se le había dado quinina, se producían cristales dicroicos[12].

En 1938 Land inventó la hoja H usando una hoja de alcohol de polivinilo transparente se calienta y se estira en una dirección, alineando las cadenas de polímero y se sumerge en una solución de yodo, impregnado las cadenas de polímero, los electrones de yodo se mueven a lo largo de las cadenas de polímero como si fueran alambres delgados[12].

En 1960 George R. Bird y Maxfield Parrish Jr construyeron una rejilla de alambre de por lo menos 2160 alambres por milímetro y lograron polarizar la luz linealmente. Antes de esta rejilla solo se podía obtener luz polarizada por medio de cristales minerales como la turmalina, que gracias a su configuración atómica se puede localizar el eje principal óptico, observando las esquinas del cristal cuando se rompen descubre la dirección de su eje principal. Si se corta la turmalina en un corte paralelo a su eje principal, el resultado es un polarizador lineal. La turmalina es un cristal dicroico que presenta dos colores. De un lado se ve transparente y si la giras 90° se ve oscura[12].

Existen sustancias ópticamente anisotrópicas, estos materiales son birrefringentes ya que tiene dos índices de refracción esto provoca el fenómeno de birrefringencia, presenta dos imágenes al mirar a través del cristal. La calcita es el mineral más común con el que se producen polarizadores lineales utilizados para láser de alta frecuencia [12].

Tabla 8 Índices de refracción de materiales birrefringentes.

cristal	n_o	n_e
Turmalina	1.669	1.638
Calcita	1.6584	1.4864
Cuarzo	1.5443	1.5534
Nitrato de sodio	1.5854	1.3369
Hielo	1.309	1.313
Rutilo TiO_2	2.616	2.903

La luz al pasar por la atmósfera se refracta, pero el color azul se separa y es lo que provoca que el cielo se mire de un color azul brillante esto sucede porque las moléculas de los gases de la atmósfera son muy pequeñas, de otro modo las nubes se ven de color blanco por que las gotas de agua son más grandes de desvían la luz en todo el espectro visible, esto provoca que la luz se polarice por esparcimiento, pero una de la formas más comunes de polarización natural de la luz es la polarización por reflexión, fue la forma de polarización que descubrió Malus al sostener una lámina de calcita al contemplar el atardecer vio que el reflejo desaparecía al girar la calcita, es así como se dio cuenta que el reflejo de la luz solar sobre el agua o sobre el vidrio es luz polarizada. También se descubrió que al hacer pasar luz polarizada por papel encerado esta luz pierde su polarización. La polarización por reflexión se da cuando la luz incide sobre una superficie en un ángulo de polarización es la ley de Brewster cuya fórmula es:

$$\theta_p = \frac{n_t}{n_i} \quad (1.16)$$

Donde:

- n_t Índice de reflexión del medio reflejante
- n_i Índice de reflexión del medio conductor
- Θ_p Ángulo de polarización

Un ejemplo muy común es la luz reflejada en el vidrio que tiene índice de reflexión de $n_t = 1.5$ el aire tiene un índice de reflexión de $n_i = 1$ usando la fórmula encontramos que el ángulo de polarización es de $\Theta_p = 56^\circ$ [12].

1.9.1 Polarización de la luz.

La luz se forma a partir de una carga eléctrica que produce un campo electromagnético y desprende ondas electromagnéticas en todas direcciones, como por ejemplo la llama de una bella alumbrada una habitación, la flama es el campo electromagnético y la luz es la onda electromagnética que se desprende del mismo. Esta luz se considera luz natural ya que oscila en los 360° del vector propagación. Al pasar esta luz por un filtro polarizador elimina las ondas electromagnéticas en todas las direcciones espesó en una, a la restricción de la luz en una sola dirección se le llama luz polarizada. En la Figura 4 se muestra como es la luz natural y cómo se comporta la luz polarizada [18][19].



(a)



(b)

Figura 3 (a) Imagen de luz que se refleja en el piso y (b) Imagen de luz eliminando el destello al ser utilizado un filtro polarizador.

1.9.1.1 Ley de Malus.

Dos filtros polarizadores superpuestos uno frente al otro, fijamos uno a un dispositivo y el otro lo dejamos girar libremente, se puede observar que la máxima intensidad luminosa está entre 0° y 180°, la intensidad nula se encuentra entre los ángulos 90° y 270°. La ecuación que describe el comportamiento de los filtros polarizadores es:

$$I = I_0 \cos^2 \delta \quad (1.16)$$

Donde:

I Intensidad resultante

I_0 Intensidad inicial

δ Ángulo de inclinación de un filtro polarizador con respecto a otro

Esta función nos da una gráfica que se muestra en la Figura 5.

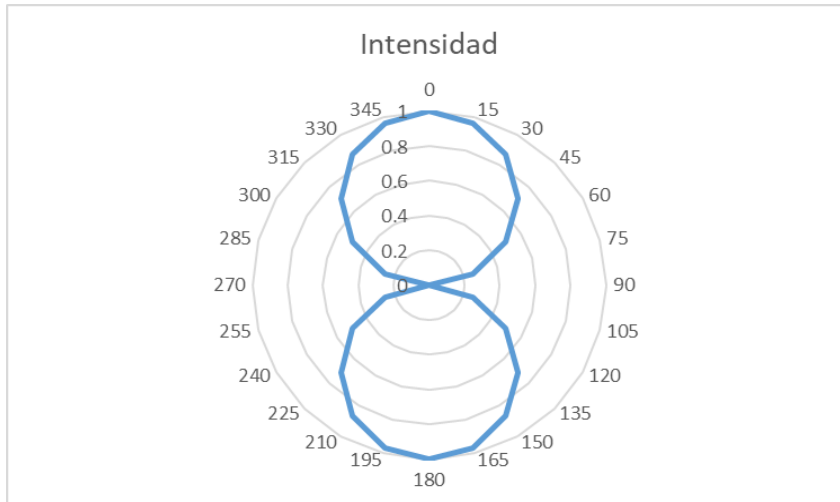


Figura 4 Intensidad en un diagrama circular, ley de Malus.

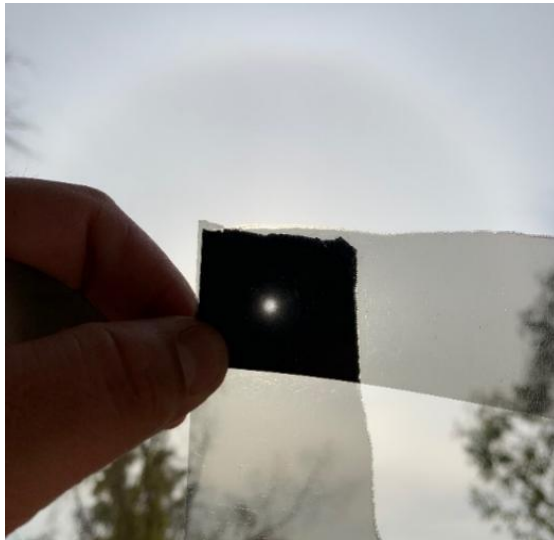


Figura 5 Dos filtros polarizadores no dejarán pasar la luz si sus planos de polarización están cruzados a 90°.

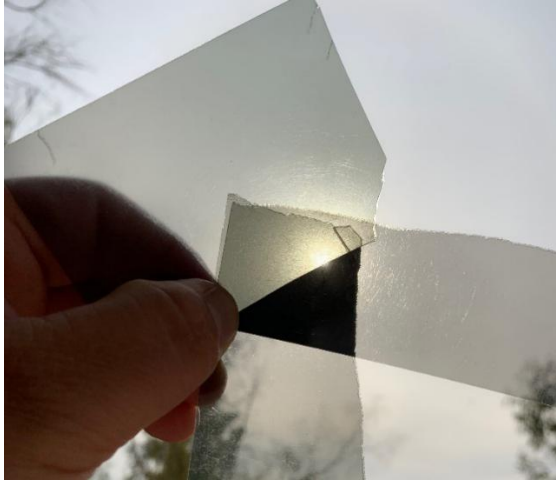


Figura 6 Se muestra como un retardador colocado a 45° entre dos polarizadores opuestos entre sí a 90° , elimina la interferencia total entre polarizadores.

Lámina de onda completa. Si la diferencia de fase es igual a 2π radianes, el retraso relativo es una longitud de onda; las ondas e y o están de nuevo en fase y no se detecta ningún efecto en la polarización de un haz monocromático incidente. Si el retardo es de 360° el sistema se denomina lámina de onda completa [12].

Lámina de media onda. Si la diferencia de fase es de π radianes Entonces el desfase es de media longitud de onda entre las ondas o y e existe un desfase de 180° , se denomina retardador de media onda, se pueden crear láminas de media onda pegando celofán en la superficie de un vidrio [12].

Lámina de cuarto de onda. La lámina de un cuarto de onda introduce un desfase de onda de 90° o $\frac{\pi}{2}$ radianes Las hojas de un cuarto de onda se producen usando cuarzo, mica o plástico orgánico. Se puede producir usando el plástico filmico que utilizamos para envolver la comida sobre un vidrio, se le van agregando capas de plástico hasta obtener el desfase deseado a la salida [12].

1.9.1.2 Polarización por reflexión.

Cuando la luz es reflejada por una superficie plana y polarizada de forma parcial perpendicular al ángulo de incidencia, si variamos el ángulo de incidencia y medimos el nivel de polarización encontramos un ángulo de incidencia para el que la polarización es máxima, se le conoce como ángulo Brewster. Estos fenómenos se presentan en las puestas o salidas del sol sobre el mar o sobre un lago. La luz que se refleja sobre el agua está fuertemente polarizada, para poder reducir su intensidad es necesario usar un filtro polarizador en el ángulo de polarización adecuado para el efecto que se desea obtener [12].

1.9.1.3 Polarización por absorción.

Si tallamos la turmalina en dirección de su eje principal, la luz al pasar se separa en dos ondas linealmente polarizadas, una de las dos es absorbida al tratar de pasar la turmalina y la otra sale de la turmalina como una onda linealmente polarizada, esto era utilizado antes de las hojas polarizadoras, la primera compañía en utilizarlas fue Polaroid, las hojas polarizadoras se definen como películas delgadas que absorben una de las dos ondas linealmente polarizadas y son más eficientes que la turmalina, son utilizadas en óptica pero dejan de ser eficaces para el ultravioleta [12].

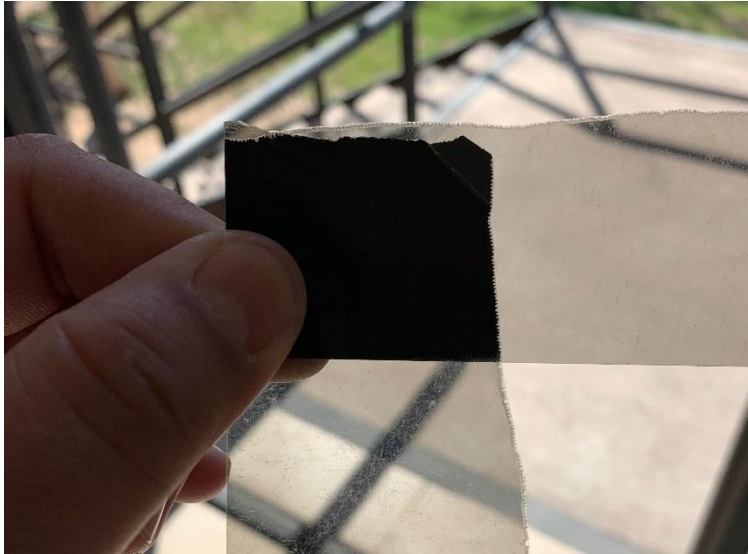


Figura 7 dos filtros polarizadores que tienen sus planos de polarización cruzados no permiten pasar la luz.

La primera lámina polarizada fue la hoja J de Edwin Herbert a sus 19 años en Harvard en 1928, se compone de una película delgada de polímero y con cristales diminutos de herapatita, polariza la luz gracias a los cristales dicroicos, pero presentaba el problema que presentaba luz polarizada difusa. En la actualidad los cristales dicroicos son de tamaño celular evitando así la difusión de la luz [12].

1.9.1.4 Polarización por doble refracción.

Un prisma nicol son dos prismas que unidos formando un romboide de calcita, en la unión se usaba bálsamo de caña, se usa calcita por su elevada birrefringencia, en la actualidad se usan resinas sintéticas en la unión de los prismas [12].

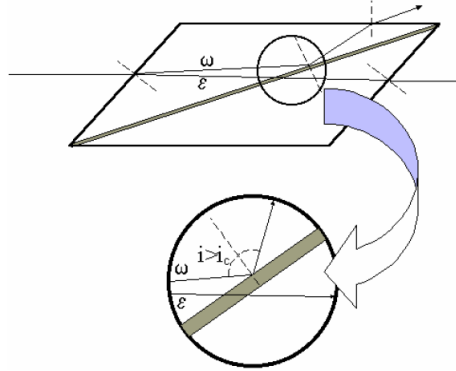


Figura 8 Representación gráfica del prisma nicol, donde la luz se divide en componentes polarizadas y una de las dos se pierde por reflexión total hacia el exterior y solo pasa una componente linealmente polarizada a través del prisma [12].

El haz de luz al pasar por el prisma se divide en dos componentes linealmente polarizadas que siguen rumbos diferentes y al llegar a la resina con índice de reflexión se refleja total gracias al índice de reflexión diferente y la otra onda linealmente polarizada presenta un índice de refracción parecido por lo tanto pasa sin problemas, obteniendo a la salida del prisma luz linealmente polarizada. Recordemos que la calcita es un elemento birrefringente y presenta dos índices de refracción en su composición [12].

1.9.2 Retardadores.

La función de un retardador es muy simple, al entrar la luz, se separa en dos ondas linealmente polarizadas y al salir la luz del retardador una de las dos ondas está desfasada con respecto a la otra entonces tenemos luz polarizada en la salida, teóricamente si desarrollamos los retardadores podremos desarrollar polarizadores elípticos y circulares [12].

1.10 Interferencias.

Para entender la interferencia tenemos que ver la luz en forma de onda, como cuando lanzamos una piedra en un estanque esta espere ondas en todas direcciones, cuanto más se aleja la onda de la fuente, la onda se puede ver como una onda plana, pero al chocar con un objeto en su camino esta onda se transforma y rebota como onda circular otra vez, cuando las ondas circulares interactúan se produce la interferencia. Podemos definir la interferencia como la suma de las ondas incidentes en un punto, son varios los tipos de interferencia que presentan, pero para este estudio solo veremos dos, interferencia constructiva y destructiva.

1.10.1 Interferencia Constructiva.

Cuando las ondas incidentes en un punto presentan la misma amplitud se suman formando una onda con amplitud más grande [20].

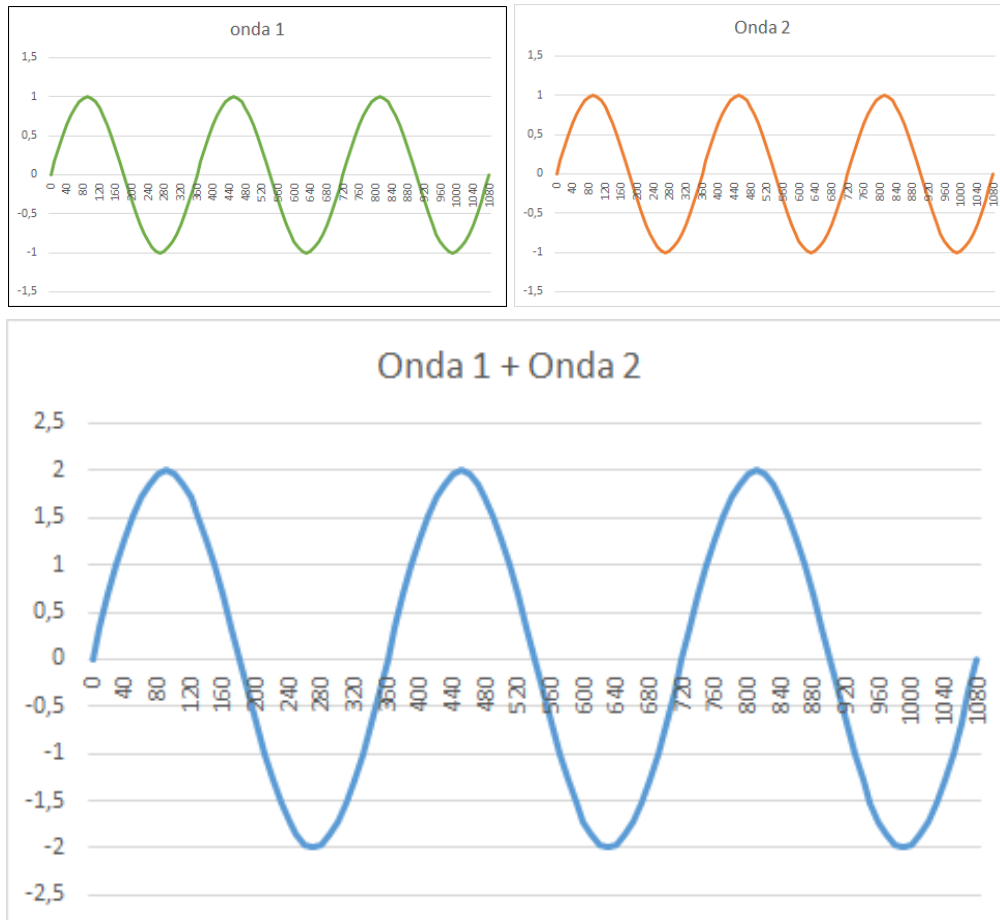


Figura 9 Interferencia constructiva [20].

1.10.2 Destructiva.

Cuando dos ondas inciden en un punto con amplitud de la misma magnitud pero de sentido contrario el resultado es la destrucción de las dos ondas [21].

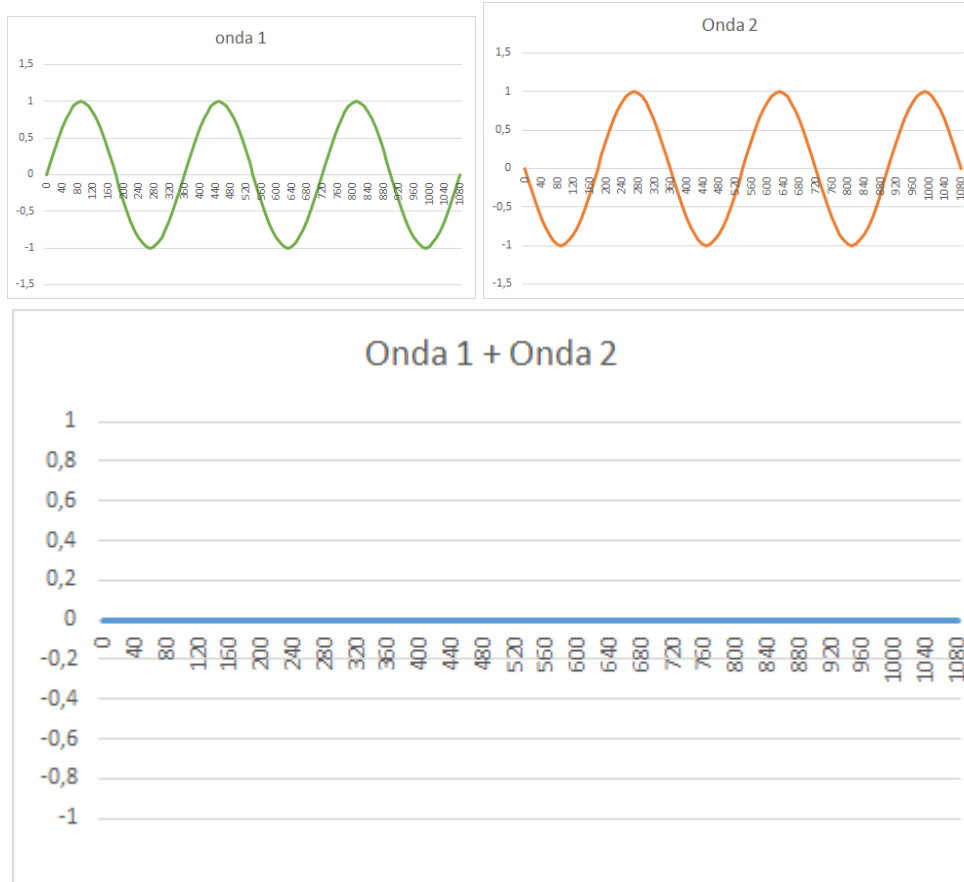


Figura 10 Interferencia destructiva [21].

Capítulo 2

Marco teórico.

Se contiene las tecnologías que se propusieron para la fabricación del polarizado fotocromático y algunos de los trabajos más recientes, relevantes, relacionados y que agregaron valor a la investigación, siempre se buscó demostrar que es posible construir un polarizado fotocromático con las tecnologías actuales, pero han sido aplicadas a otras áreas del conocimiento como por ejemplo la telecomunicaciones, los sensores ópticos, cremas con bloqueador solar, como medio en la industria farmacéutica, en el oftalmológico, entre otros.

2.1 Fotocromismo.

El cambio reversible de color en las sustancias fue estudiado por Markwald a finales de la década de 1880 y nombro fototropía al fenómeno del cambio reversible del color. Fototropía así se nombró hasta la década de 1950 cuando Yehuda Hirshberg propuso nombrar fotocromismo al fenómeno de cambio reversible de color. Una reacción fotoquímica reversible se considera fotocromismo cuando el ojo humano la percibe como un cambio de contraste. En esencia no existe una diferencia significativa entre la reacción fotocromática y la reacción fotoquímica. Existen compuestos que presenta una retro isomería con mayor velocidad si se les aplica calor, un ejemplo es el nitrospiropirina, es un compuesto químico que cambia de color con la luz del sol y regresa a su estado original en 10 minutos a temperatura ambiente, la reacción reversible puede ser más rápida si aumenta la temperatura ambiente, por lo tanto, los compuestos termo crómicos tienen estrecha relación con los compuestos fotocromáticos [22][23].

2.1.1 Materiales fotocromáticos.

En la actualidad es muy importante avanzar en el campo tecnológico en todas las áreas, aquí, fue importante encontrar nuevas moléculas fotocromáticas que se activaron con la radiación ultravioleta y que pertenecieran a una especie química en más de una forma, que esas formas fueran diferentes molecularmente y que presentaran diferentes propiedades. Estas moléculas fueron útiles en la creación de sensores que se activan con el cambio de intensidad de la luz, que fueron foto cristalinos, presentaron resistencia a la fatiga, se activaron con luz a diferentes longitudes de onda, tuvieron una buena estabilidad térmica y buena reversibilidad de los procesos químicos, estas características fueron de estos materiales una muy buena opción para producir productos duraderos. Es importante estar a la vanguardia en diseño y síntesis de nuevos materiales, por eso siempre se está investigando cómo bajar el tiempo de cambio, mejorar las características, reducir costos y mejorar la calidad [24].

Para medir la eficiencia del fotocromismo se usa una lámpara de luz UV de 100W haciendo pasar la luz a través de una película que contiene el material fotocromático en forma de película delgada, midiendo la luz que pasa con un espectrofotómetro con un filtro de 350 nm. [24].

Para medir la película delgada se usa un láser de longitud de onda 355 nm, con un tiempo de exposición de 5 ns, la intensidad de 35 a 8.5 mJ [24].

Los compuestos fotocromáticos presentan una facilidad a formar películas delgadas, son solubles en otros materiales disolventes, se aplica sobre superficies como el vidrio que tiene una buena absorción, la gran mayoría de las soluciones presentan una absorción máxima de luz UV en las longitudes de onda de 344 a 352 nm [24].

Para analizar las películas delgadas se utilizó un espectroscopio UV-VISIBLE. El comportamiento fotocromático muestra isomerización del azobenceno de 50 a 70%, mientras que la isomerización del polisiloxano es de un 95% [24].

La isomerización en solución líquida tarda 100 segundos en alcanzar el máximo de su isomerización, mientras que el mismo material en película delgada tarda 400 segundos en alcanzar el máximo de su isomerización al contacto con la luz del sol. El tiempo de isomerización y el tiempo de relajación es el mismo para el azobenceno, por eso se puede usar en aplicaciones ópticas, las moléculas de azobenceno muestran una buena isomerización en forma de película delgada aplicada a polímeros de cadena rígida, que en forma de película delgada aplicada a un polímero de cadena flexible [24].

Una película delgada de diariletieno, tiene una absorción máxima de 582 a 599 nm, al ser grabado con un láser de 650 nm se pueden producir imágenes polarizadas. El grabar imágenes holográficas capta la atención por su capacidad de almacenar datos, eso impulsó el estudio del diarileno, ya que sus átomos de hidrógeno pueden ser sustituidos para formar otros compuestos fotocromáticos, cambiando sus propiedades optoelectrónicas. El compuesto diariletieno muestra propiedades fotocromáticas, fluorescencia, facilidad para grabación holográfica y almacenamiento de datos. En película delgada expuesta a una radiación de 313 nm se torna de color azul y su absorción máxima esta en 591 nm, el color desaparece al exponerlo a una radiación de longitud de onda de 500 nm o mayor. El diarileno se activa con luz ultravioleta y se desactiva con luz visible, gracias a todo lo anterior se puede producir un polarizado fotocromático con el diarileno [24].

En la Figura 12 se muestra la ventana de absorción del diarileno, la absorción máxima se presenta en las longitudes de onda de luz UV y disminuye su absorción al pasar a las longitudes de onda de la luz visible [24].

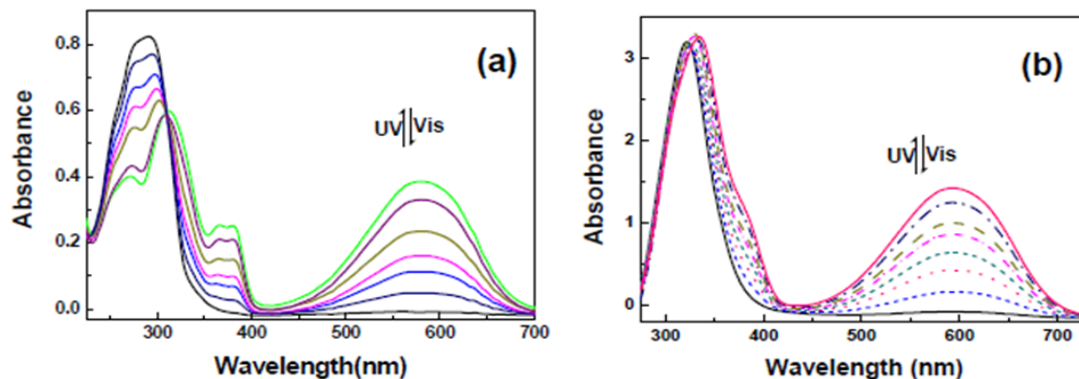


Figura 11 (a) ventana de absorción del diarileno disuelto en solución. (b) Ventana de absorción del diarileno en forma de película delgada. [24]

Un nuevo diarileno mostro de color azul con radiación UV de 313 nm, como se muestra en la figura. En solución presenta absorción máxima a 579 nm, en película delgada a 593 nm, como se muestra en la figura [24].

Usando película delgada y un láser de 633 nm polarizado de lectura y escritura, el diarileno puede ser usado para la grabación de imágenes holográficas polarizadas [24].

Los materiales fotocromáticos pueden ser utilizados gracias a su cambio de color de ser transparente pasa al color azul cuando se activa y se activa en presencia de radiación ultravioleta y se desactiva con luz visible, puede ser gravado como imagen holográfica polarizada. Gracias a esto el diarileno puede utilizarse para producir polarizado fotocromático que se activa de día y al desactivarse de noche permite la visión nocturna [24].

En la ilustración 13 se muestra la molécula de diarileno y su isomerización al ser activada por la radiación UV, regresa a su estado original en ausencia de radiación ultravioleta y en contacto con luz visible [24].

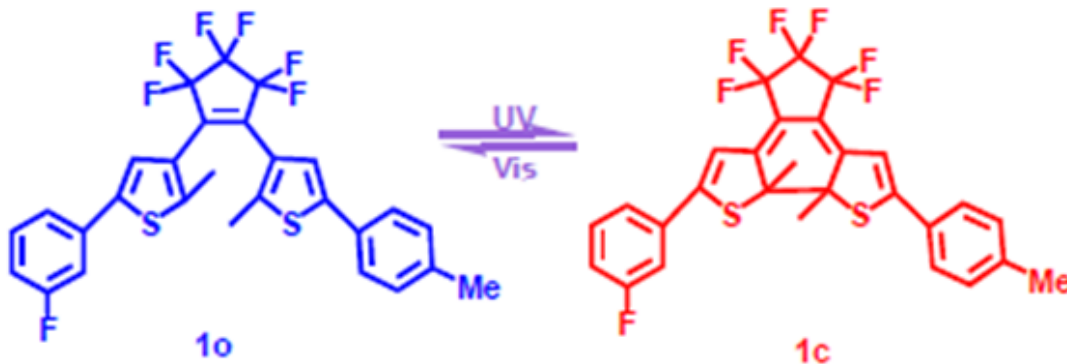


Figura 12 1o(open) Molécula de diarileno desactivada en ausencia de la radiación ultravioleta. 1c(closed) Molécula de diarileno activado en presencia de radiación ultravioleta [24].

Se sintetizó otro diarileno fotocromático, mostró un buen comportamiento tanto en solución como en película delgada, se activa a los 297 nm de la radiación ultravioleta, cambia de transparente a violeta, en película delgada tiene un máximo de absorción en 551 nm de luz visible como se muestra en la Figura 13. El comportamiento de un diarileno al aumentar la longitud de onda, muestra la absorción máxima dentro del espectro ultravioleta y luz visible [24].

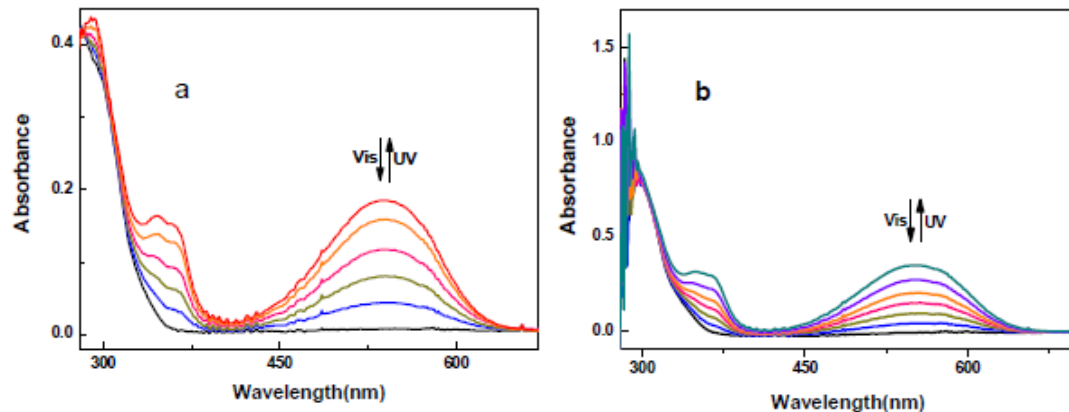


Figura 13 (a) Ventana de absorción de un nuevo diarileno disuelto en solución. (b) Ventana de absorción de un nuevo diarileno como película delgada [24].

2.1.2 Tinta fotocromática.

Pigmentos fotocromáticos son polvo que cambian de color y regresan a su estado original en presencia de la luz solar o de radiación ultravioleta, aparece un color y desaparece el color cuando regresa a la oscuridad. Por ser pigmentos necesitan un medio para adherirse de preferencia alguna pintura o resina transparente [19][24][25].

Pinturas fotocromáticas estos materiales no se ven en la oscuridad, solo aparecen en presencia de luz solar o radiación ultravioleta, existen en diferentes colores y desaparece el color al regresar a la oscuridad [19][24][25].

La tinta fotocromática se diferencia de las pinturas fotocromáticas porque la tinta es más viscosa que la pintura, en ausencia de luz solar o radiación ultravioleta es de un color blanquiczo y al ser expuesta al sol se torna en un color intenso y viene en varios colores [19][24][25].

Es apta para impresión, es de base polimérica soluble en agua, tiene propiedades para formar película delgada, cambia de color al ser expuesta a la radiación ultravioleta, se puede usar en impresoras de inyección de tinta, es resultado de combinar un alcohol vinílico, un colorante sensible a la acides y un bisulfito aldehído aromático. Esta mezcla cambia de color al ser expuesta a la radiación ultravioleta. Esto se debe a que la radiación causa aumento de acides en el aldehído, provocando el cambio de color [19][24][25].

2.1.3 Película fotocromática seca

Esta película contiene componentes encapsulados que se activan con la radiación ultravioleta en las longitudes de onda 290 a 365 nm, el cambio de color se activa con la absorción de la película delgada, el cambio de color se produce gracias a los radicales libres de cloro e hidrógeno que al combinarse forman ácido clorhídrico que ataca las células sensibles a la acides y absorbiendo la radiación UVA y UVB. El caucho clorado al unirlo con un cloruro de polivinilo encapsula al interior este mecanismo, al usar epóxido retardamos el cambio, esto permite medir el tiempo de exposición de la película a la radiación ultravioleta [19][24][25].

2.1.4 Determinación de fotoprotección.

Debido al incremento de la radiación ultravioleta que se ha dado en los últimos años gracias al desgaste sufrido por la capa de ozono y aunado al calentamiento global. Es importante contar con profesión solar, para prevenir los efectos nocivos que produce la exposición prolongada a la radiación ultravioleta, la calidad de la protección depende de los materiales utilizados en la foto protección y se mide con la cantidad de radiación ultravioleta y luz visible que bloquea la protección del filtro fotocromático. En Estados Unidos la FDA indica la protección adecuada para la exposición a la radiación solar, no es recomendable exponerse a la radiación solar por largos periodos de tiempo aun con protección solar, ya que el efecto de la radiación ultravioleta es acumulativo y puede llegar a lesionar la piel y los ojos [1][3] [26][28].

2.1.5 Fabricación de artículos fotocromáticos.

Existen diversos métodos de producción de productos fotocromáticos. En las patentes más recientes se exponen las novedades en la forma de fabricación de artículos fotocromáticos.[7] a continuación se describen patentes que describen el proceso de fabricación de artículos fotocromáticos.

Patentes EP0294056B1, JP59135152 y CA1339838C. Estas patentes hablan de los artículos compuestos de poliuretano que contiene un material fotocromático reversible, este compuesto se conoce como Asahi Glass, trata de la fabricación de cristales fotocromáticos para vehículos de motor, el material fotocromático necesita un material huésped polimérico que este laminado en el vidrio. La temperatura necesaria para adherir el polímero al vidrio destruye el material fotocromático orgánico, la solución fue agregar una capa extra de polímero para aislar el material fotocromático de calor. Al final se le agrega una capa de polímero para darle resistencia.

Patente US3508810A habla del material fotocromático encapsulado entre dos capas de vidrio y se sellan las orillas, ya que el poli-vinil-espiro-pirano con el que se adhiere el material fotocromático a los vidrios necesita ser protegido del medio ambiente. El material fotocromático no posee fátiga fotocromática.

Patente ES2692949T3 recubrimiento con propiedades fotocromáticas aplicable a superficies cristalinas, el recubriendo está formado por la síntesis de 3 elementos, una matriz polimérica depositada en la superficie del interior, micro cápsulas o nano cápsulas huecas en el interior de la matriz polimérica, disolución de compuesto fotocromático que comprende expiroxazina, azobencenos o cromenos en un disolvente líquido que no reaccione con el compuesto fotocromático y con la pared de la microcápsula o nanocápsula en la que se introduzca.

Patente EP84113167 no se había tomado en cuenta el material anfitrión del material fotocromático, se descubrió un error que dio un nuevo descubrimiento, que mezclar el material fotocromático en uno de los precursores del poliuretano previo a la polimerización, otorga resistencia a la fatiga fotocromática y un mejor acabado en el producto. Al prolongar su vida útil permite usar el fotocromismo en productos de uso frecuente. En resumen, se puede disolver el material fotocromático en uno de los precursores del poliuretano ya sea el poliólico o el di-isocianato. Estos al unirse se polimerizan en poliuretano que contiene en su interior células fotocromáticas protegidas por el cuerpo del poliuretano. El poliuretano puede curarse entre dos

ventanas transparentes, pueden usarse en los cristales de los autos, en ventanas de edificios, en lentes oftálmica, etc. Las láminas de poliuretano pueden ser construidas en 1 mm de espesor atrapado en medio de dos cristales de 2 mm de espesor.

2.1.6 Espectroscopia de polímeros fotocromáticos.

Los polímeros fotocromáticos depositados en película delgada presentan características más simples que los depositados en solución. El uso de un espectrofotómetro permite hacer mediciones en tiempo real de los materiales fotocromáticos durante su periodo de tiempo que le toma llegar de ser transparente a alcanzar su isomerización máxima. Los polímeros analizados presentaron tiempos de reversibilidad mayor a los de isomerización, más siempre se dio al 100%. El experimento sonda y bombeo mostró que al aumentar la intensidad de la luz disminuye el tiempo de isomerización, para disminuir los tiempos de decoloración es necesario aumentar la potencia de bombeo. Los tiempos de isomerización y reversibilidad son más cortos en solución debido a que los polímeros están libres para reaccionar con la luz. En solución los polímeros fotocromáticos alcanzan su punto máximo de isomerización casi al mismo tiempo comparado con los depositados en película delgada que tardan más en alcanzar el punto máximo de isomerización. Se utiliza un espectrofotómetro en espectroscopia el cual grafica la intensidad de radiación en las diferentes longitudes de onda que el material fotocromático deja pasar [25].

2.2 Filtros polarizadores.

Un polarizador o filtro polarizador es un material que transmite una sola dirección de oscilación de manera selectiva, bloqueando el resto de los planos polarizados. Por lo general se trata de una película polimérica a base de yodo estirada y emparedada entre dos vidrios [13] [15].

La luz es una onda electromagnética, la oscilación del campo magnético es perpendicular a su propagación. El sol emite luz en cualquier dirección de propagación, pero su oscilación magnética siempre será perpendicular a la propagación. Se puede filtrar la luz en una sola dirección de oscilación por medio de mecanismos físicos, esta luz se puede decir que es luz polarizada, porque la luz polarizada tiene una determinada dirección de oscilación. La luz polarizada se presenta en tres tipos, polarización lineal, circular y elíptica. Podemos pensar en el filtro polarizador lineal como una rejilla que permite el paso de luz que oscila paralelo al vector normal a la superficie de la reja. La luz que pasa el polarizador es luz polarizada. El filtro polarizador comercial se compone de una cadena de polímeros estirados al límite que actúan como rejilla, absorbiendo la luz fuertemente polarizada en las direcciones que coinciden con la dirección del polarizador [13] [15].

2.2.1 Luz natural y Luz polarizada.

La luz se produce a partir de un campo electromagnético que vibra a alta frecuencia, esto da paso a una onda electromagnética que se propaga por el vector Poynting. El vector propagación se propaga en todas direcciones ya que la vibración de la fuente no tiene restricciones, a esta luz se le llama luz natural, porque la luz polarizada sólo vibra en un solo plano. La luz que se propaga en un solo plano se le llama luz linealmente polarizada [12][13][15].

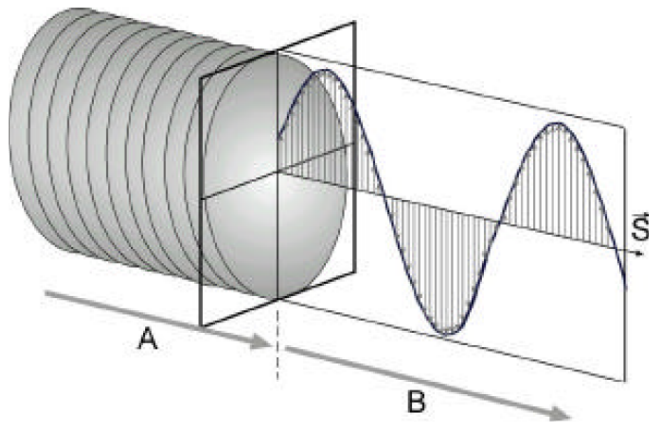


Figura 14 La luz natural está representada en el vector A porque el vector vibra en todas direcciones, S es el vector propagación o dirección, la luz polarizada está en el vector B luz que se propaga en un solo plano [12] [13] [15].

Dos ondas linealmente polarizadas separadas a 90° al combinarse pueden crear una tercera onda linealmente polarizada, siempre y cuando las dos ondas estén en la misma fase. Esto se puede calcular con la siguiente ecuación [12] [13] [15].

$$E_z(x, t) = \vec{i}E_{0z} \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) \right] \quad (2.1)$$

$$E_z(x, t) = \vec{j}E_{0y} \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) \right] + \delta \quad (2.2)$$

Si dos ondas se mueven por el eje x sobre los planos xz y zy estas ondas se representan con la expresión anterior. Para $\delta = 0$ la suma de los vectores en función del tiempo y el espacio, se introducen los vectores unitarios y la diferencia se calcula y resulta un vector intermedio resultado de la suma [12] [13] [15].

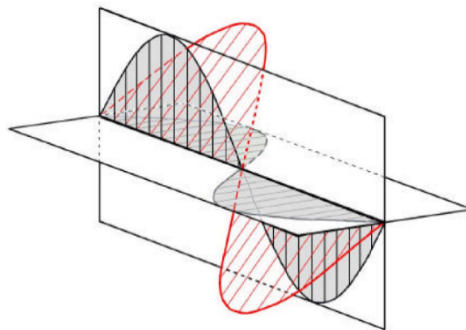


Figura 15 La suma de dos ondas linealmente polarizadas en fase dan como resultado otra onda linealmente polarizada (en rojo) [12] [13] [15].

La suma de dos ondas linealmente polarizadas y separadas a 90° . La onda resultante es linealmente polarizada [12] [13] [15].

$$E(x, t) = E_z(x, t) + E_y(x, t), \text{ si } \delta = 0 \quad (2.3)$$

$$E = \left(\vec{i}E_{0z} + \vec{j}E_{0y} \right) \cos \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) \right] \quad (2.4)$$

El vector E avanza en un ciclo en la dirección de x vibrando en un plano intermedio entre xz y xy. De este mismo modo como dos ondas linealmente polarizadas componen una onda. El proceso también puede ser inverso, que se una onda linealmente polarizada pueda descomponerse en dos componentes linealmente polarizados en planos perpendiculares. [12] [13] [15]

Luz polarizada

Se trata de llevar el vector a vibrar en uno de los planos que contiene la dirección de propagación del plano. Para el plano de polarización existen tres procedimientos para obtener luz polarizada. [12] [13][15]

2.3 Películas delgadas.

Se pueden considerar elementos bidimensionales ya que su espesor oscila entre algunos nanómetros a unas cuantas micras, son elementos sólidos que por ser de espesor tan pequeño necesita estar adherido a un sustrato que puede ser vidrio, polímero, metal, etc. Al principio se utilizaron como recubrimientos metálicos para embellecer objetos de ornato con fines decorativos. Los antiguos egipcios cubrían con películas delgadas de oro, monumentos, joyas, ataúdes, etc. En el siglo XVII se cubrían las vasijas de cerámica con una disolución de sal de plata, estas al ser horneadas descomponen la sal quedando cubiertas por una película delgada de plata. En nuestros días las películas delgadas se usan para una gama muy extensa de aplicaciones tecnológicas. [28]

2.3.1 Principio de operación de las películas delgadas.

Las siguientes características deben encontrarse en una película delgada para poder decir que esta película delgada es útil.

Las condiciones de operación como son temperatura, presión, humedad, entre otras. No deben afectar la composición química de la película delgada. Debe ser fácil de limpiar sin dañarla, esto implica que debe estar bien adherida al sustrato u objeto que la posea. El espesor debe ser uniforme en la película delgada. Debe tener una composición química controlada o ser químicamente pura. Debe tener baja densidad de imperfecciones. Las características adicionales son determinadas dependiendo de la aplicación tecnológica en la que se quiera utilizar la película delgada [29].

2.3.2 Clasificación de películas delgadas funcionando como recubrimiento óptico.

Cada técnica de deposición de película delgada da como resultado espesores diferentes, en otras palabras, según el espesor deseado se selecciona la técnica de deposición más adecuada. Partiendo de este criterio se desprende la clasificar las películas delgadas según su espesor, una película delgada con espesor $\leq 1\mu\text{m}$ se considera una película delgada de lámina delgada. Espesores mayores a $1\mu\text{m}$ se consideran película delgada de

lámina delgada. El límite de $1\mu\text{m}$ para diferenciar una película delgada o gruesa, va disminuyendo conforme avanza la tecnología. Las técnicas de deposición se clasifican en deposición química y deposición física. Sin embargo, los reactivos utilizados no se pueden considerar puramente físicos o químicos. Esto da lugar a los procesos físico-químicos de deposición de películas delgadas. [30]

2.3.3 Métodos para fabricar películas delgadas.

A continuación, se mencionan algunos de los métodos de deposición más comunes.

Depósito al vacío.

Se utiliza para depositar películas delgadas, creadas a partir de materiales que se pueden vaporizar sin afectar su composición química. El sustrato se deposita dentro de una cámara al alto vacío, frente al sustrato está el material que será vaporizado, puede ser calentado por una resistencia eléctrica o por un haz de electrones. El material sale en forma de vapor y se deposita en el sustrato [29][31].

Sputtering.

También se le llama pulverización catódica, deposita material en el sustrato en forma de vapor, este material es vaporizado por iones de argón calentados de 500°C a 1000°C , el material vaporizado se deposita en el material en forma de película delgada, este método no necesita el vacío la formación de película delgada es más rápida y el sustrato debe ser vidrio para que soporte las altas temperaturas [29][31].

Sol-gel.

Consiste en un sol que es una solución coloidal y un gel que es una membrana porosa. La solución coloidal puede ser ZnO , SnO_2 , SiO_2 , ZrO_2 y TiO_2 . Este proceso tiene 3 clasificaciones: las partículas de la solución son precipitadas al presentarse un cambio en el PH, los polvos resultantes se secan y se hornean para ser vitrificados. Otra forma es, dejar secar un poco la solución y se forma un gel el cual se deposita, al terminar de secar el gel forma una película que al ser horneada se vitrifica formando la película delgada. En otra forma el gel se forma por polimerización de partículas, se aplica y se hornea para vitrificar [29][31].

Depósito químico en fase de vapor (CVD).

Se hace reaccionar una mezcla de gases que deponen en su reacción sobre el sustrato una película delgada, los subproductos de la reacción química son evacuados de la cámara por una bomba de vacío mecánica. [29][31]

Depósito químico de vapor asistido por aerosol (AACVD).

Es un método económico, sencillo y fácil de aplicar, consiste en formar una nube de gotas muy finas de una solución del material disuelto en un solvente, este es transportado al sustrato en forma de spray, usando un gas que puede ser aire, argón o nitrógeno. Entra en una cara con temperatura controlada en la cual está el sustrato para que se forme la película sobre el sustrato. La temperatura es la clave para controlar la deposición del material, esta puede variar de 100 a 700°C según el material que se

desea deponer y también el transporte de material puede limitar el crecimiento de la película sobre el sustrato[29][31].

2.3.4 Caracterización de películas delgadas.

Un ejemplo es la caracterización óptica de un material que estudia un espectro de 200 a 1100 nm, obteniendo resultados de transmitancia de luz visible entre 74.1% y 87.7%, en una película delgada que varía su espesor de 40 a 100 rociados. El estudio UV-visible permite calcular el espesor con las siguientes fórmulas:

$$M = \frac{2s}{T_{min}} - \frac{S^2-1}{2} \quad (2.5)$$

$$n = \left[M + (M^2 - S^2)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

Donde M y n relacionan los mínimos de cada gráfica y S es el índice de refracción del vidrio que en este caso $S = 1.51$ y T_{min} es la transmitancia [31][32].

En la Figura 16 se puede apreciar las ventanas de transmisión del sustrato que es vidrio y las películas delgadas que varían de 40, 60, 80 y 100 rociados en la deposición de la película delgada [31][32].

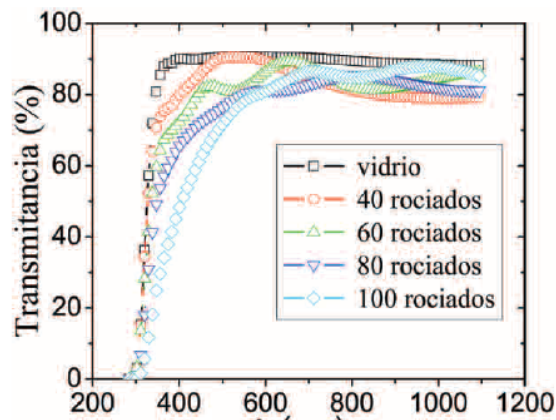


Figura 16 Ventana de transmisión de películas delgadas con espesor diferente.

Resolviendo las ecuaciones 2.5 y 2.6 podemos obtener el espesor de la película delgada con la ecuación:

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(2n_1 \lambda_2 - n_2 \lambda_1)} \quad (2.7)$$

Son n_1 y n_2 los índices de refracción obtenidos con la fórmula 2.6 para dos medidas consecutivas obtenidas directamente de la ventana de transmisión junto con λ_1 y λ_2 que son

las longitudes de onda correspondientes para cada valor. En la Figura 17 se muestran los resultados donde las dos técnicas de medición de espesor arrojan resultados similares. [32]

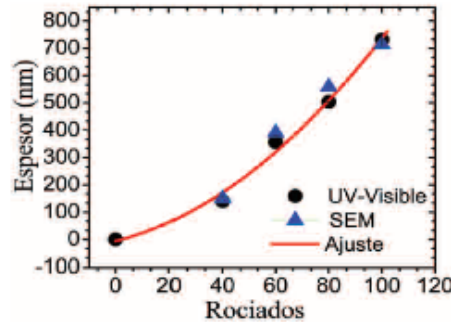


Figura 17 Espesor vs número de rociadas del material.

El ancho de banda prohibido está dado por la ecuación:

$$ahv = (hv - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

Donde h es la energía del fotón que incide, E_g es la energía del gap. α es el coeficiente de absorción y puede calcularse con la ecuación:

$$a = \frac{1}{d} \ln \ln \left(\frac{1}{T} \right) \quad (2.9)$$

Donde d es el espesor de la película delgada y T es la transmitancia de la muestra.[32]

2.4 Recubrimientos en el mercado.

En este tema veremos las aplicaciones tecnológicas de la película delgada más relevantes en la actualidad. [6]

Entre sus aplicaciones se mencionan algunas películas delgadas que se utilizan para el control de transmisión y reflexión de la luz en elementos ópticos, en la afinidad química de elementos ópticos, en la fabricación de dispositivos usando multicapas de películas delgadas [6].

2.4.1 Precedente histórico.

Se usan películas delgadas en muchas aplicaciones en diferentes ramas de la industria, a continuación, se mencionan algunos ejemplos de aplicación de películas delgadas:

Se emplean para aumentar la dureza y resistencia al desgaste de herramientas de corte, motores y máquinas. El recubrimiento evita la corrosión y deterioro de las piezas sujetas a desgaste, por ejemplo, las brocas, fresas, rodamientos, engranes, sierras, pistones, turbinas, por mencionar algunos[6].

Se pueden incluir películas delgadas en la fabricación de elementos ópticos, como son lentes, espejos, filtros, espejos, vidrio plano, entre otros. Se usan películas delgadas para

mejorar las propiedades de reflexión y transmisión de la luz a través del elemento óptico y evitar su deterioro por estar expuesto a la intemperie[6].

Se aprovechan al incluir películas delgadas en la fabricación de componentes electrónicos, como por ejemplo fotodiodos, diodos, superconductores, resistores, memorias de estado sólido, condensadores, etc. Dichos componentes son la base de la electrónica[6].

También se usan películas delgadas para almacenamiento de datos magnéticos y sensores de campo magnético. También son incluidas en el aprovechamiento de la energía solar en la construcción de colectores solares y fotoceldas. Se utilizan en el sector de telecomunicaciones para comunicarnos entre seres humanos y máquinas por medio de una pantalla táctil. Se valen de las películas para fabricación de sensores acústicos, luminosos, químicos, con la aplicándolas modificamos su velocidad de respuesta, selectividad y sensibilidad. Se incluyen películas delgadas en manufactura, para mejorar la apariencia de un artículo de ornato, aumentando su brillo, mejorando el color y haciéndolo más atractivo. Se usan películas delgadas para generar superficies autolimpiables, pueden ser tejidos, espejos, parabrisas, ventanas de vidrio y fachadas, valiéndose de la hidrofobicidad e hidrofiliidad de la superficie. Usar películas delgadas en la construcción de prótesis quirúrgicas, prótesis de rodilla, cardíacas, abdominales, dentales, etc., regula la adhesión celular y biocompatibilidad en la superficie de la prótesis[6].

2.4.2 Marcas y modelos.

Se buscó lo más cercano al polarizado fotocromático, entre la gama de diferentes marcas se encontró un tipo de película cuyas características permiten protegernos de la radiación UV e IR, la protección es transparente a la vista del ojo humano, Con una buena transmitancia de luz visible, ya que la protección es imperceptible para el ojo humano. Estas películas se denominan películas de control solar. La tabla 9 muestra las marcas y productos de películas de control solar, con las medidas expuestas por el fabricante, porcentaje de transmitancia de luz visible, porcentaje de radiación ultravioleta bloqueada y porcentaje de radiación infrarroja bloqueada. La Tabla 9 muestra en color verde las películas de control solar que tuvieron transmitancia de luz visible mayor a 85%, bloquearon más del 95% la radiación UV y bloquearon más del 95% la radiación IR.

Tabla 9 Películas de control solar 2018 [33]-[41].

Marca	Modelo	Transmitancia luz visible	Bloqueo UV	Bloqueo IR
3M	THINSULATE CC75	74.0%	99.9%	97%
	SCOTCHSHIELD ULTRA S600	87.0%	99.9%	97%
	SCOTCHSHIELD ULTRA S800	87.0%	99.9%	97%
	SAFETY S40	87.0%	99.0%	97%
	SAFETY S70	87.0%	99.0%	97%
	SAFETY S80	87.0%	99.0%	97%
	SAFETY S140	85.0%	99.0%	97%
	SAFETY S20 EXTERIOR	88.0%	99.9%	97%
	SAFETY S40 EXTERIOR	89.0%	99.9%	97%
	SAFETY S70 EXTERIOR	88.0%	99.9%	97%
	PR70X	71.0%	99.9%	97%
	PR90X	88.0%	99.9%	97%
IQue	73FG	70.0%	99.0%	94.0%
	78FG	77.0%	99.0%	75.0%
THERMOSHIELD	CR7595B	75.0%	99.0%	94.0%
SOLAR GARD	2 Mil Clear film	84.00%	99.00%	NO DICE
	Sentinel Plus 4 Mil Clear OSW	88.00%	99.00%	NO DICE
SOLex	SP70 + VERDE	73%	99%	85%
	SP70 + NEUTRO	78%	99%	70%
SOLAR SCREEN	PANTHERA 230 C	70%	99%	NO DICE
	SPECTRA 15 C	86%	99%	67%
	SPECTRA 615 C	85%	99%	68%
	CHARCOAL 30 C	70%	99%	NO DICE
GLOBAL	NR Charcoal QD 70	70%	99%	NO DICE
VIPER	PURE CHARCOAL SERIES 50	76%	99%	NO DICE
ASWF	EXCEL 88	88%	99%	NO DICE
	EXCEL IRP 70	76%	99%	89%
	RETRO IRP 70	76%	99%	89%
	DIMENSIÓN DX70	70%	99%	97%
	DIMENSIÓN DHR75	73%	99%	94%
LLUMAR	Air 80 Blue	78%	99%	NO DICE
	Clear – 7 Mil	88%	95%	NO DICE
	Clear – 15 Mil	83%	99%	NO DICE

2.4.3 Características ópticas.

Transmitancia. La luz que incide sobre una muestra tiene una intensidad radiante, la luz que se transmite a través de la muestra es la luz transmitida y tiene otra intensidad, la transmitancia se calcula al dividir la intensidad de luz transmitida entre la intensidad de la luz incidente. En la Figura 19 se aprecia la luz incidente y la luz transmitida [16].



Figura 18 Transmitancia de luz a través de una pieza.

La fórmula para calcular la Transmitancia es:

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.10)$$

Absorbancia. La transmitancia está relacionada a la absorbancia y se obtiene con la fórmula:

$$A = -\log T = -\log \left(\frac{I}{I_0} \right) = 2 - T\% \quad (2.11)$$

Reflectancia. Una parte de la luz se transmite, otra se absorbe y una parte es reflejada por la superficie, el grado en que la reflectancia se presenta depende de que tan reflectivo sea el material, se mide usando un espectrómetro de reflectancia y cada material refleja la luz en diferente intensidad [16].

2.4.3.1 Materiales

Los materiales que pueden bloquear la radiación ultravioleta e infrarroja y tienen una buena transmitancia de luz visible, Los materiales nanocerámicos se usan en las películas de control solar para bloquear la radiación ultravioleta e infrarroja, en la industria a estos materiales se les denomina filtros nanocerámicos, los más conocidos se muestran de la tabla 10 a la tabla 17 y son:

Tabla 10 Fluoruro de calcio [42].

Ecuación	CaF ₂
Índice de refracción en $n_{0.4678}$	2.44915
Índice de refracción en n_{10}	2.20084
Coefficiente térmico de índice de refracción A 0.6328 μm	5.43×10^{-5}
Rango de transmisión (μm)	0.37 a 14
Densidad $\left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}\right)$ a 20°C	4.09
Peso molecular	97.43
Solubilidad en agua $\left(\frac{\text{gr}}{100\text{cm}^3}\right)$	65×10^{-6}

Tabla 11 Zafiro [42].

Ecuación	Al ₂ O ₃
Índice de refracción en n_e , $\lambda = 564.07\text{nm}$	1.7771
Índice de refracción $n_F - n_C$ (Dispersión)	0.0107
Coefficiente térmico de índice de refracción A 3.39 μm para + / - 60°C	$\beta_o = (0.88 \text{ a } 1.28) \times 10^{-5}$ $\beta_e = (0.99 \text{ a } 1.39) \times 10^{-5}$
Rango de transmisión (μm)	0.17 a 5
Densidad $\left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}\right)$ a 20°C	3.98
Peso molecular	101.96
Solubilidad en agua $\left(\frac{\text{gr}}{100\text{cm}^3}\right)$	98×10^{-6}

Tabla 12 Bromuro de potasio [42].

Ecuación	KBr
Índice de refracción en n_e , $\lambda = 564.07nm$	1.5629
Índice de refracción $n_F - n_C$ (Dispersión)	0.0617
Índice de refracción en $n_{10.6}$	1.5251
Índice de refracción en $n_{8.0} - n_{12.5}$	0.0099
Coefficiente térmico de índice de refracción A $3.39\mu m$ para $+ / - 60^\circ c$	$(- 3.95 a 4.29) \times 10^{-5}$
Rango de transmisión (μm)	0.21 a 28
Densidad $\left(\frac{gr}{cm^3}\right)$ a $20^\circ c$	2.75
Peso molecular	119.01
Solubilidad en agua $\left(\frac{gr}{100cm^3}\right)$	53.48

Tabla 13 Cloruro de potasio [26]

Ecuación	KCl
Rango de transmisión	0.21 a $20\mu m$
Índice de refracción	1.45644 a $10\mu m$
Pérdida de reflexión	6.7% a $10\mu m$
Coefficiente de absorción	6.5×10^{-1} a $10.6\mu m @ 300K$
Restos de pico	$63.1\mu m$
$\frac{dn}{dT}$	$- 33.2 \times 10^{-6} / ^\circ c$
Densidad	$1.99 \frac{g}{cc}$
Solubilidad en agua	$\frac{34.7}{100g}$
Peso molecular	74.55

Tabla 14 Silicio fundido de grado UV [42]

Ecuación	SiO ₂
Índice de refracción en n_e , $\lambda = 564.07nm$	1.4601
Índice de refracción $n_{F'} - n_C$ (Dispersión)	0.0068
Índice de refracción en n_D	1.4584
Índice de refracción en $n_{F'} - n_C$	0.0068
Densidad $\left(\frac{gr}{cm^3}\right)$ a 20°C	2.21
Solubilidad en agua $\left(\frac{gr}{100cm^3}\right)$	insoluble

Tabla 15 Rutilo [42].

Ecuación	TiO ₂
Rango de transmisión	0.43 a 5.0 μm
Índice de refracción	2.555 a 0.69 μ
Pérdida de reflexión	30% a 2 μ (2 superficies)
$\frac{dn}{d\mu} = 0$	2.81m
Densidad	4.26 $\frac{g}{cc}$
Solubilidad en agua	insoluble en agua
Peso molecular	79.9

Tabla 16 Sulfato de zinc grado claro [42].

Ecuación	ZnS
Índice de refracción en $n_{0.4678}$	2.44915
Índice de refracción $n_{10.0}$	2.20084
Coefficiente térmico de índice de refracción A 0.6328 μm	5.43×10^{-5}
Rango de transmisión (μm)	0.37 a 14
Densidad $\left(\frac{gr}{cm^3}\right)$ a 20°C	4.09
Peso molecular	97.43
Solubilidad en agua $\left(\frac{gr}{100cm^3}\right)$	65×10^{-6}

Tabla 17 Policarbonato (PC) [44]

<i>Ecuación</i>	$(O - (C_6H_4) - C(CH_3)_2 - (C_6H_4) - CO)_n$
<i>Índice de refracción en n</i>	1. 584 a 1. 586
<i>absorbancia de radiación UV</i>	90%
<i>Densidad $\left(\frac{gr}{cm^3}\right)$ a 20°C</i>	1. 14 a 1. 21
<i>Solubilidad</i>	<i>Solventes orgánicos</i>

2.4.3.2 Ventanas de transmisión.

La ventana de transmisión de un material es la gráfica en la que se muestra el porcentaje de transmisión de radiación contra la longitud de onda, muestra gráficamente qué partes de la longitud de onda del espectro se bloquea la radiación y en qué longitud de onda del espectro se transmite la radiación. Para el trabajo se utilizan materiales que rechacen la radiación UV e IR en su mayoría, y que tengan un buen porcentaje de transmitancia del espectro en las longitudes de onda del espectro visible. A continuación, se muestran las ventanas de transmisión de los materiales considerados para el trabajo:

Fluoruro de calcio CaF_2 . La ventana de transmisión muestra gráficamente la transmitancia del espectro electromagnético que atravesó el material, se muestra en la Figura 19.

Zafiro Al_2O_3 . La ventana de transmisión muestra gráficamente la transmitancia del espectro electromagnético que atravesó el material, se muestra en la Figura 20.

Bromuro de potasio KBr. La ventana de transmisión muestra gráficamente la transmitancia del espectro electromagnético que atravesó el material, se muestra en la Figura 21.

Cloruro de potasio KCl. La ventana de transmisión muestra gráficamente la transmitancia del espectro electromagnético que atravesó el material, se muestra en la Figura 22.

Silicio fundido de grado UV SiO_2 . La ventana de transmisión muestra gráficamente la transmitancia del espectro electromagnético que atravesó el material, se muestra en la Figura 23.

Rutilo TiO_2 . La ventana de transmisión muestra gráficamente la transmitancia del espectro electromagnético que atravesó el material, se muestra en la Figura 24.

Sulfato de zinc ZnS . La ventana de transmisión muestra gráficamente la transmitancia del espectro electromagnético que atravesó el material, se muestra en la Figura 25.

Policarbonato $(O - (C_6H_4) - C(CH_3)_2 - (C_6H_4) - CO)_n$. La ventana de transmisión muestra gráficamente la transmitancia del espectro electromagnético que atravesó el material, se muestra en la Figura 26 [44].

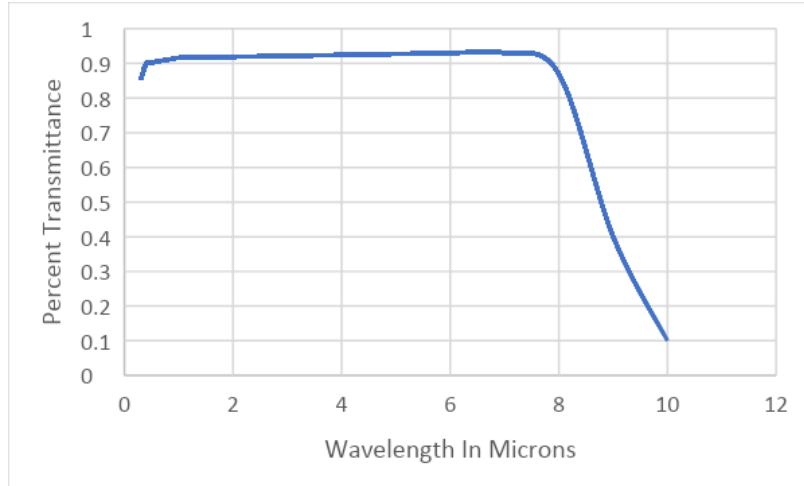


Figura 19 Ventana de transmisión del Fluoruro de calcio.

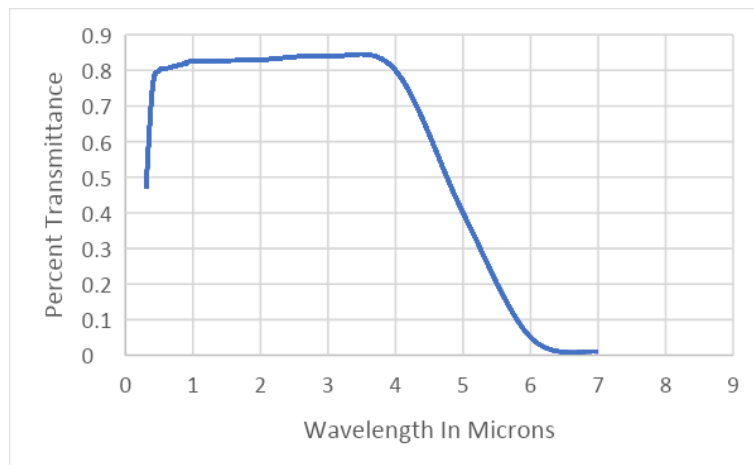


Figura 20 Ventana de transmisión del Zafiro.

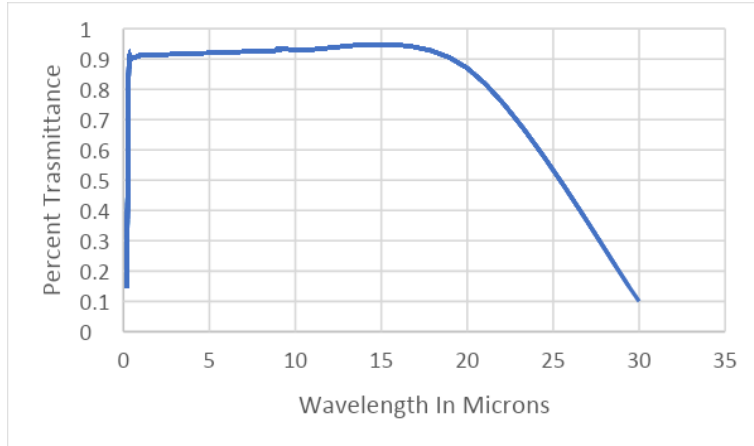


Figura 21 Ventana de transmisión del Bromuro de potasio.

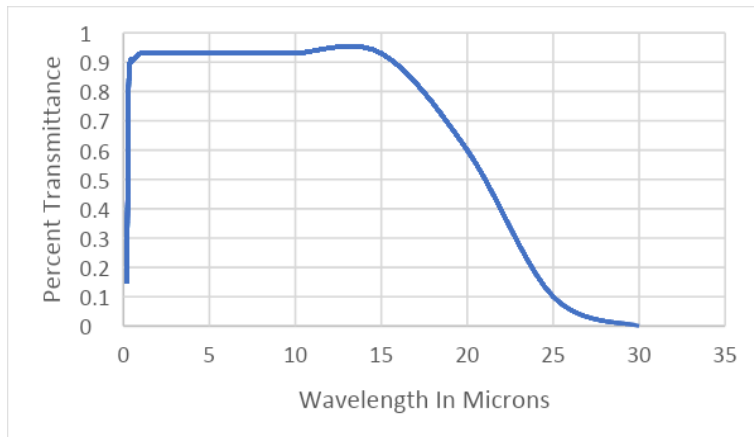


Figura 22 Ventana de transmisión del Cloruro de potasio.

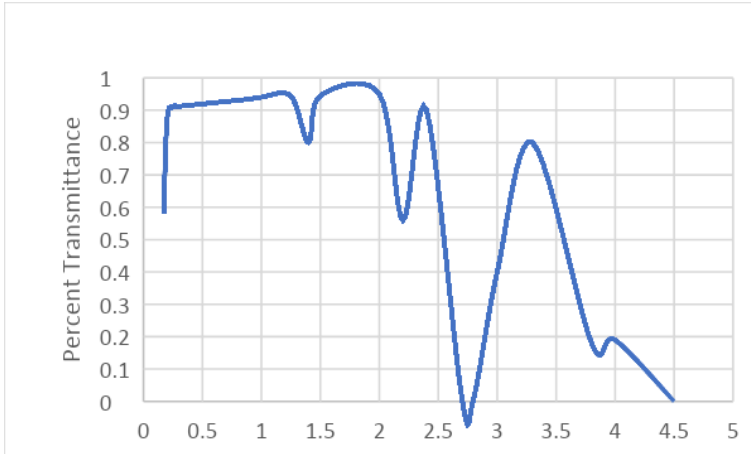


Figura 23 Ventana de transmisión del Silicio fundido de grado UV [42].

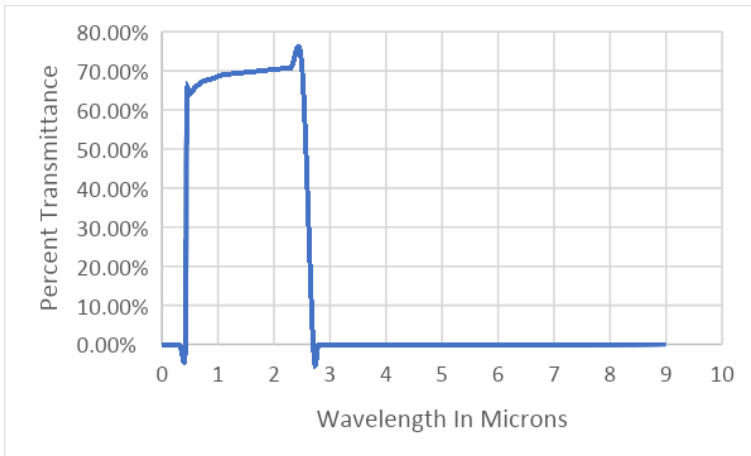


Figura 24 Ventana de transmisión del Silicio fundido de grado UV [43].

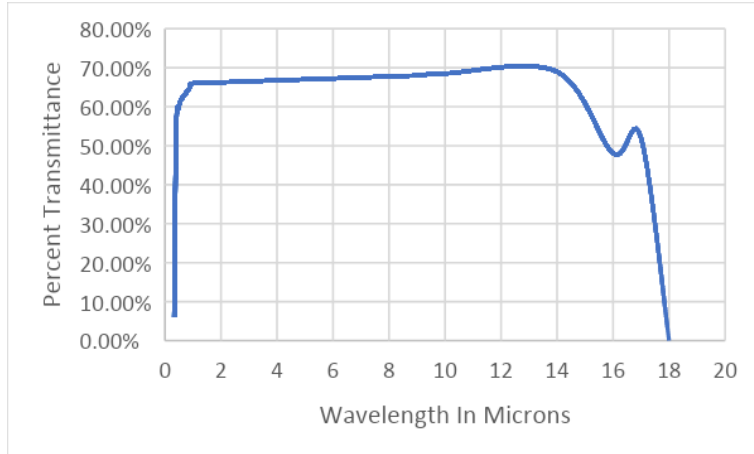


Figura 25 Ventana de transmisión del Sulfato de zinc.

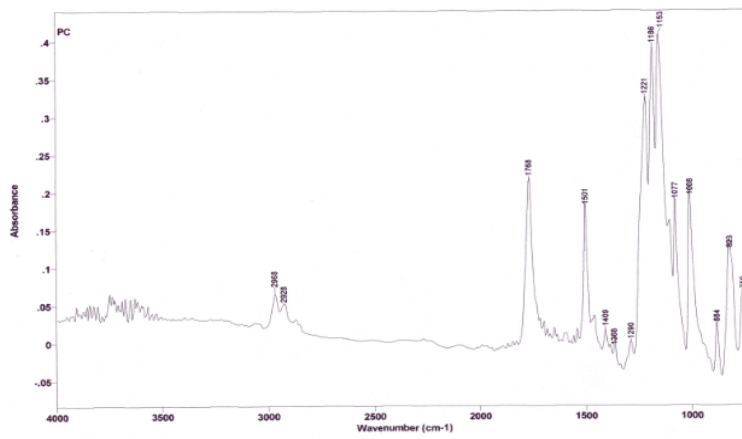


Figura 26 Ventana de transmisión del Policarbonato[44].

Capítulo 3

Experimentación.

Se realizaron experimentos para determinar estadísticamente si los datos de transmitancia solar, 95% de bloqueo de radiación UV y 95% de bloqueo de radiación infrarroja proporcionados por el fabricante, son iguales a los datos medidos experimentalmente con el radiómetro solar, espectroscopio y el espectrofotómetro.

El radiómetro solar nos permite medir la transmitancia de radiación solar en BTU/HR/FT² esta medida se utilizó para el análisis de varianza y así poder ver la desviación de las medidas contra los datos de la hoja de datos del fabricante, declarando las lecturas como el factor de interés y se bloquea el factor del tipo de la película, ya que es un factor de poco interés para el experimento.

Medir las muestras con el espectrómetro dio como resultado la transmitancia de radiación infrarroja. Se sacó el promedio de transmitancia de radiación infrarroja y se comparó contra la transmitancia de la hoja de datos del fabricante, usando un análisis de varianza para ver la desviación de los datos medidos contra los datos del fabricante.

Medir las muestras con el espectrofotómetro dió como resultado la ventana de transmisión de la radiación UV y la luz visible. Se separan y se sacan promedios para comparar los datos medidos contra los datos del fabricante, usamos nuevamente un análisis de varianza para verificar la desviación de los datos medidos contra los datos del fabricante.

Experimentos y materiales.

Se tomó una muestra estadística que se integró de 5 muestras de la marca SOLAR GARD con diferente nivel de transmitancia de luz visible (TLV):

NR CHARCOAL 54 = 54% TLV

NR CHARCOAL 35 = 35% TLV

NR CHARCOAL 23 = 23% TLV

NR CHARCOAL 17 = 17% TLV

NR CHARCOAL 7 = 7% TLV

Se midió la transmitancia de energía solar.

3.1 Materiales y equipos.

Para caracterizar las muestras recolectadas de materiales ya existentes en el mercado se usaron equipos de laboratorio para medir, las ventanas de transmisión del espectro ultravioleta-visible-infrarrojo de las muestras, la transmitancia de radiación solar en las muestras y todas sus combinaciones. Se verificó la temperatura al interior de un espacio cerrado, se midió el espesor de las películas delgadas en las muestras, las muestras son recolectadas de películas que se están utilizando actualmente en la ciudad de Mexicali.

3.1.1 Radiómetro solar.

Se midió la energía solar transmitida utilizando un Radiómetro solar. Modelo MARK VI SOL-A-METER, marca MATRIX INC. Hecho en MESA, ARIZONA USA, número de serie 3702. Mide porcentaje de radiación solar y BTU/HR/FT². Se calibra manualmente con el ajuste. El equipo se muestra en la Figura 28.

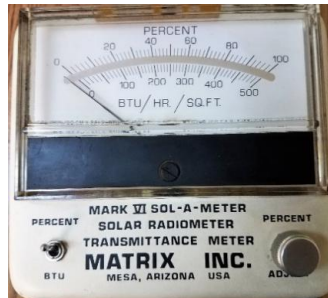


Figura 27 Vista frontal del radiómetro solar.

3.1.2 Espectrofotómetro.

Se midió el espectro de la longitud de onda de 200 nm a 800 nm utilizando un espectrofotómetro UV-VISIBLE. Modelo CARY 50 Tablet, marca VARIAN. Se obtuvo la ventana de transmisión de 200 nm a 800 nm para cada una de las 5 muestras. Con el promedio de las lecturas de las longitudes de onda de 200 nm a 400 nm se calculó la transmitancia de radiación UV. Con las lecturas de 400 nm a 800 nm se calculó el promedio de transmitancia de luz visible. El equipo se muestra en la Figura 29 [45][46].



Figura 28 Vista frontal del Espectrofotómetro cari 50 Tablet UV-VIS.

3.1.3 Espectrómetro.

Se midió la radiación IR utilizando un Espectrómetro. Modelo TENSOR 27, marca BRUKER. Se obtuvo la ventana de transmisión de 2500 nm a 27144 nm. Con el promedio de las lecturas se calculó el porcentaje de transmitancia de radiación IR. El equipo se muestra en la Figura 30 [47][48].



Figura 29 Vista frontal del espectrómetro TENSOR 27.

3.2 Experimentos.

El experimento que se llevó a cabo, midió la transmitancia en el espectro UV, Visible, IR y radiación solar, la lectura de control se realizó con el sensor solo, las siguientes lecturas de la transmitancia se tomó colocando la muestra entre la fuente radiación y el sensor, se repitió con cada una de las muestras, para poder calcular el rechazo de energía y poder dibujar las ventanas de transmisión de cada muestra. Se calcularon promedios de rechazo para las radiaciones UV e IR de cada muestra, también se calculó la transmitancia de luz visible en promedio, las mediciones se hicieron para cada una de las muestras.

3.2.1 Rechazo de energía solar.

Un día soleado de enero, temperatura 19° C a las 12:30 pm se colocó el radiómetro solar al aire libre con el sensor perpendicular al sol y se tomó la lectura con el sensor descubierto, dando una transmitancia de energía solar de 79 BTU/Hr/SQ. FT.

Con el radiómetro solar en posición, se cubrió el sensor con las muestras, dando como resultado la transmitancia de energía solar, es la energía calorífica que deja pasar la muestra medida en BTU por HORA por PIE CUADRADO:

$$NR \text{ CHARCOAL } 54 = 63 \text{ BTU/HR/SQ.FT}$$

$$NR \text{ CHARCOAL } 35 = 57 \text{ BTU/HR/SQ.FT}$$

$$NR \text{ CHARCOAL } 23 = 51 \text{ BTU/HR/SQ.FT}$$

$$NR \text{ CHARCOAL } 17 = 49 \text{ BTU/HR/SQ.FT}$$

$$NR \text{ CHARCOAL } 7 = 45 \text{ BTU/HR/SQ.FT}$$

Las lecturas se tomaron 15 segundos después de cubrir el sensor con las muestras. Conociendo la transmitancia de la energía solar se calculó la energía solar rechazada del material calculando la diferencia entre las lecturas de las muestras y la lectura del sensor desnudo, los resultados se registraron en BTU/HR/SQ.FT. Se muestra cómo se tomaron las lecturas en la Figura 31.



(a)

(b)

(c)

Figura 30 (a) se toma la lectura con el sensor descubierto directamente hacia el sol. (b) se toma la lectura con el sensor cubierto con la muestra. (c) se toma la lectura con el sensor totalmente tapado.

Se toman lecturas utilizando el radiómetro solar, se obtienen lecturas en BTU/HR/FT² estos datos se comparan contra los datos que proporciona el fabricante. Los porcentajes de rechazo de las muestras que se midieron y los del fabricante se colocaron en la tabla 18 para su mejor manejo.

Tabla 18. Datos del fabricante y datos medidos por el radiómetro solar.

Película	Tipo de datos	
	Fabricante	Medido
NR CHARCOAL 54	27	20.25
NR CHARCOAL 35	33	27.84
NR CHARCOAL 23	36	35.44
NR CHARCOAL 17	38	37.97
NR CHARCOAL 7	43	43.03

El diseño experimental seleccionado es el Diseño por Bloques al Azar.

- Factor de interés: Niveles del factor de interés: Datos del fabricante y datos medidos
- Factor de bloque: Niveles del factor de bloque es tipo de película.
- Nuestras:

Muestra 1. NR CHARCOAL 54

Muestra 2. NR CHARCOAL 35

Muestra 3. NR CHARCOAL 23

Muestra 4. NR CHARCOAL 17

Muestra 5. NR CHARCOAL 7

Se midieron tres variables de respuesta:

1. Energía solar transmitida (BTU/HR)/FT²
2. Radiación ultravioleta (% de transmisión)
3. Radiación infrarroja (% de transmisión)
4. Luz visible (% de transmisión)

Para cada una de ellas se elaboró un análisis de varianza (ANOVA) donde el factor de interés son los datos medidos comparados con los datos del fabricante y el factor de bloque es el tipo de película. Donde la letra μ es la media.

Hipótesis a probar:

Factor de interés

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j$$

Factor de bloque

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j$$

El estadístico de prueba es $F_0 = MC_{Tr}/MC_E$, el cual se compara con el valor crítico de F.

El factor crítico F_c Se toma de la Tabla 15 tomando en cuenta el grado de libertad del numerador MC_{Tr} y el grado de libertad del denominador MC_E [43]. Se usó para comparar con los resultados del ANOVA. Se utilizó un nivel de significancia de $\alpha=5\%$ de error.

Tabla 19 A4 puntos críticos al 5% de la distribución $F(X>x)=0.05$ [49]

		Grados de libertad en el numerador																						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	25	30	40	50	75	100	∞
Grados de libertad en el denominador	1	161	199	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244	245	245	246	248	249	250	251	252	253	253	254
	2	18.5	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5
	3	10.1	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.73	8.71	8.70	8.66	8.63	8.62	8.59	8.58	8.56	8.55	8.53
	4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.89	5.87	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.70	5.68	5.66	5.63
	5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.66	4.64	4.62	4.56	4.52	4.50	4.46	4.44	4.42	4.41	4.37
	6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.98	3.96	3.94	3.87	3.83	3.81	3.77	3.75	3.73	3.71	3.67
	7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.55	3.53	3.51	3.44	3.40	3.38	3.34	3.32	3.29	3.27	3.23
	8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.31	3.28	3.26	3.24	3.22	3.15	3.11	3.08	3.04	3.02	2.99	2.97	2.93
	9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.05	3.03	3.01	2.94	2.89	2.86	2.83	2.80	2.77	2.76	2.71
	10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.89	2.86	2.85	2.77	2.73	2.70	2.66	2.64	2.60	2.59	2.54
	11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82	2.79	2.76	2.74	2.72	2.65	2.60	2.57	2.53	2.51	2.47	2.46	2.41
	12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.72	2.69	2.66	2.64	2.62	2.54	2.50	2.47	2.43	2.40	2.37	2.35	2.30
	13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.63	2.60	2.58	2.55	2.53	2.46	2.41	2.38	2.34	2.31	2.28	2.26	2.21
	14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.57	2.53	2.51	2.48	2.46	2.39	2.34	2.31	2.27	2.24	2.21	2.19	2.13
	15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48	2.45	2.42	2.40	2.33	2.28	2.25	2.20	2.18	2.14	2.12	2.07
	16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.46	2.42	2.40	2.37	2.35	2.28	2.23	2.19	2.15	2.12	2.09	2.07	2.01
	17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.41	2.38	2.35	2.33	2.31	2.23	2.18	2.15	2.10	2.08	2.04	2.02	1.96
	18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.37	2.34	2.31	2.29	2.27	2.19	2.14	2.11	2.06	2.04	2.00	1.98	1.92
	19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.34	2.31	2.28	2.26	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	2.00	1.96	1.94	1.88
	20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.31	2.28	2.25	2.22	2.20	2.12	2.07	2.04	1.99	1.97	1.93	1.91	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.28	2.25	2.22	2.20	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.94	1.90	1.88	1.81	
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.26	2.23	2.20	2.17	2.15	2.07	2.02	1.98	1.94	1.91	1.87	1.85	1.78	
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.24	2.20	2.18	2.15	2.13	2.05	2.00	1.96	1.91	1.88	1.84	1.82	1.76	
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.22	2.18	2.15	2.13	2.11	2.03	1.97	1.94	1.89	1.86	1.82	1.80	1.73	
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.20	2.16	2.14	2.11	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.84	1.80	1.78	1.71	
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.18	2.15	2.12	2.09	2.07	1.99	1.94	1.90	1.85	1.82	1.78	1.76	1.69	
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.17	2.13	2.10	2.08	2.06	1.97	1.92	1.88	1.84	1.81	1.76	1.74	1.67	
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.15	2.12	2.09	2.06	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.79	1.75	1.73	1.65	
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.14	2.10	2.08	2.05	2.03	1.94	1.89	1.85	1.81	1.77	1.73	1.71	1.64	
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.13	2.09	2.06	2.04	2.01	1.93	1.88	1.84	1.79	1.76	1.72	1.70	1.62	
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.04	2.00	1.97	1.95	1.92	1.84	1.78	1.74	1.69	1.66	1.61	1.59	1.51	
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.95	1.92	1.89	1.86	1.84	1.75	1.69	1.65	1.59	1.56	1.51	1.48	1.39	
100	3.94	3.09	2.70	2.46	2.31	2.19	2.10	2.03	1.97	1.93	1.89	1.85	1.82	1.79	1.77	1.68	1.62	1.57	1.52	1.48	1.42	1.39	1.28	
∞	3.84	3.00	2.61	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.79	1.75	1.72	1.69	1.67	1.57	1.51	1.46	1.40	1.35	1.28	1.25	1.03	

Para determinar cuáles medias son diferentes, se utilizó el método de comparación múltiple de medias de Diferencia mínima significativa (LSD), la cual se calcula con la ecuación 3.1, el valor T de Student se obtiene de la tabla 20, $\alpha/2 = 0.025$ y N-k grados de libertad. La suma de cuadrados del error MC_E se obtiene del ANOVA.

$$LSD = t_{\alpha/2, N-k} \sqrt{\frac{2CM_E}{n}} \quad (3.1)$$

Tabla 20 A3 Puntos críticos para la distribución T de Student.[49]

Grados de libertad	Área a la derecha de los puntos, $P(X > x)$			
	0.10	0.05	0.025	0.015
1	3.0776835	6.3137515	12.706205	21.204949
2	1.8856181	2.9199856	4.3026527	5.6427784
3	1.6377444	2.3533634	3.1824463	3.8960459
4	1.5332063	2.1318468	2.7764451	3.2976297
5	1.475884	2.0150484	2.5705818	3.002875
6	1.4397557	1.9431803	2.4469119	2.8289279
7	1.4149239	1.8945786	2.3646243	2.714573
8	1.3968153	1.859548	2.3060041	2.6338144
9	1.3830287	1.8331129	2.2621572	2.573804
10	1.3721836	1.8124611	2.2281389	2.5274842
11	1.3634303	1.7958848	2.2009852	2.4906639
12	1.3562173	1.7822876	2.1788128	2.4607002
13	1.3501713	1.7709334	2.1603687	2.4358452
14	1.3450304	1.7613101	2.1447867	2.4148977
15	1.3406056	1.7530504	2.1314495	2.397005
16	1.3367572	1.7458837	2.1199053	2.3815454
17	1.3333794	1.7396067	2.1098156	2.3680548
18	1.3303909	1.7340636	2.100922	2.35618
19	1.3277282	1.7291328	2.0930241	2.3456475
20	1.3253407	1.7247182	2.0859634	2.3362422
21	1.3231879	1.7207429	2.0796138	2.3277923
22	1.3212367	1.7171444	2.0738731	2.3201596
23	1.3194602	1.7138715	2.0686576	2.313231
24	1.3178359	1.7108821	2.0638986	2.3069134
25	1.3163451	1.7081408	2.0595386	2.3011295
26	1.3149719	1.7056179	2.0555294	2.2958145
27	1.3137029	1.7032884	2.0518305	2.2909136
28	1.3125268	1.7011309	2.0484071	2.2863802
29	1.3114336	1.699127	2.0452296	2.2821746
30	1.310415	1.6972609	2.0422725	2.2782623

Tabla 21 ANOVA

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F_0	F_c	Valor P	Resolución
Tipo de dato	15.55	1	15.55	3	7.71	0.158	Se acepta
Película	440.90	4	110.224	21.30	6.39	0.006	Se rechaza H_0
Error	20.70	4	5.175				
total	477.15	9					

Hipótesis a probar: Los datos del fabricante y los medidos no presentan una diferencia significativa.

Hipótesis de interés: tipos de datos (fabricante y medidos) las medias son iguales

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ por lo tanto el tipo de dato no afecta el resultado.

Hipótesis de bloque: tipo de película las medias son iguales

$H_1: \mu_i \neq \mu_j$ para algún $i \neq j$ por lo tanto la película si afecta el resultado.

Tenemos diferencias entre ambos tipos de datos que no son significativas y están dentro de la tolerancia. Por lo que existe suficiente evidencia estadística para afirmar que los datos proporcionados por el fabricante son iguales a los datos medidos por el radiómetro solar.

3.2.2 Ventana de transmisión UV-VIS

Con el espectrofotómetro UV-VIS, se midieron las muestras y nos dio como resultado la ventana de transmisión para cada material. La ventana de transmisión de 6 muestras tomada del espectrofotómetro se muestra en la Figura 32.

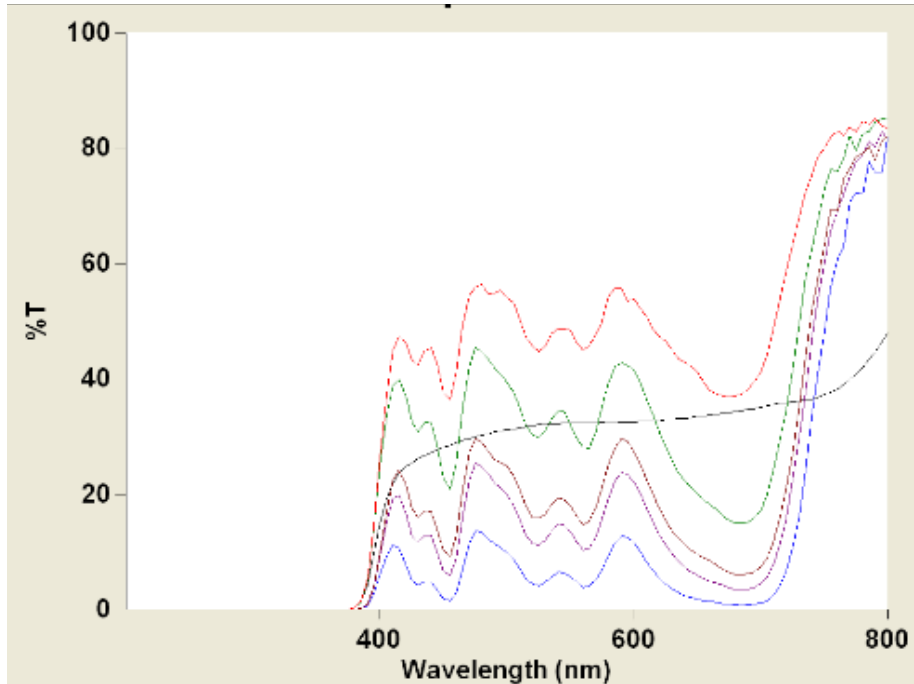


Figura 31 Gráfica del espectrofotómetro.

Con la ayuda de EXCEL usando los datos que nos dio el espectrofotómetro se dibuja una gráfica más clara, señalando bien sus datos e indicando a qué curva pertenece cada muestra, estas líneas se muestran en la Figura 32.

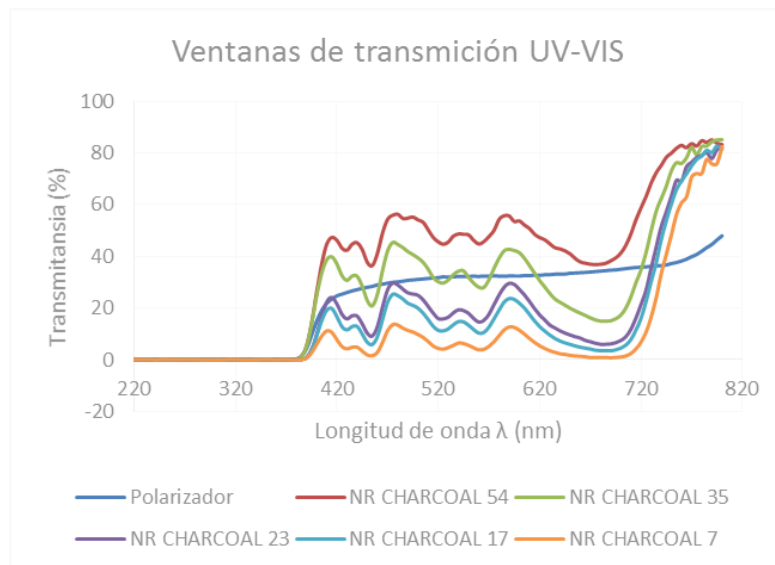


Figura 32 Ventanas de transmisión UV-VIS de las muestras analizadas.

Se calculan los promedios de transmitancia de luz visible (TLV) y bloqueo de radiación UV, para poderlos comparar con los datos del fabricante. Se tomaron las lecturas de 5 muestras de película y se comparan los datos obtenidos con los datos que proporciona el fabricante, se quiere saber si los datos son iguales. Se utiliza un diseño de bloque para este experimento, bloqueando el tipo de película.

Tabla 22 Datos del fabricante y datos medidos de transmitancia de luz visible

Película	Tipo de datos	
	Fabricante	Medido
NR CHARCOAL 54	54	53.33
NR CHARCOAL 35	35	38.97
NR CHARCOAL 23	23	26.98
NR CHARCOAL 17	17	23.18
NR CHARCOAL 7	7	15.6

Diseño de experimentos.

Diseño por bloques

Factor de interés: tipos de datos (fabricante y medidos)

Factor de bloque: tipo de película

ANOVA: transmitancia luz visible.

Hipótesis a probar:

Factor de interés: se desea saber si las lecturas del fabricante y las lecturas obtenidas con el espectrofotómetro UV-VIS son iguales para la transmitancia de luz visible.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j$$

Factor de bloque:

El factor de bloque es las 5 muestras que son diferentes.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j$$

Tabla 23 ANOVA transmitancia luz visible.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F_0	F_c	Valor P	Resolución
Tipo de dato	49.06	1	49.06	8.24	7.71	0.045	Se acepta
Película	2156.86	4	539.21	90.56	6.39	0.000	Se acepta H_0
Error	23.82	4	5.95				
total	2229.74	9					

Factor de interés: tipos de datos (fabricante y medidos) las medias son iguales

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ por lo tanto el tipo de dato no afecta el resultado.

Factor de bloque: tipo de película las medias son iguales $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$.

Tenemos diferencias que no son significativas y están dentro de la tolerancia. Entre los datos del fabricante contra los datos medidos por el espectrofotómetro UV-VIS.

Tabla 24. Datos del fabricante y datos medidos de bloqueo de radiación UV

Película	Tipo de datos	
	Fabricante	Medido
NR CHARCOAL 54	98	97.98
NR CHARCOAL 35	98	98.12
NR CHARCOAL 23	98	99.26
NR CHARCOAL 17	98	99.32
NR CHARCOAL 7	98	99.57

Diseño de experimentos.

Diseño por bloques

Factor de interés: tipos de datos (fabricante y medidos)

Factor de bloque: tipo de película

ANOVA: bloqueo de radiación UV.

Hipótesis a probar:

Factor de interés: se desea saber si las lecturas del fabricante y las lecturas obtenidas con el espectrofotómetro UV-VIS son iguales para el bloqueo de radiación UV.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j$$

Factor de bloque:

El factor de bloque es las 5 muestras que son diferentes.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j$$

Tabla 25. ANOVA bloqueo de radiación UV.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F_0	F_c	Valor P	Resolución
Tipo de dato	1.806	1	1.8062	6.58	7.71	0.062	Se acepta
Película	1.099	4	0.2746	1	6.39	0.500	Se acepta H_0
Error	1.099	4	0.2746				
total	4.003	9					

Factor de interés: tipos de datos (fabricante y medidos) las medias son iguales

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \text{ por lo tanto el tipo de dato no afecta el resultado.}$$

Factor de bloque: tipo de película las medias son iguales $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$.

Tenemos diferencias que no son significativas y están dentro de la tolerancia. Entre los datos del fabricante contra los datos medidos por el espectrofotómetro UV-VIS.

3.2.3 Ventana de transmisión IR

Con la ayuda del espectrómetro se pudieron obtener las ventanas de transmisión en el espectro infrarrojo de las muestras. Las gráficas de las ventanas de transmisión IR expresadas en porcentaje vs cm^{-1} se muestran en la Figura 34.

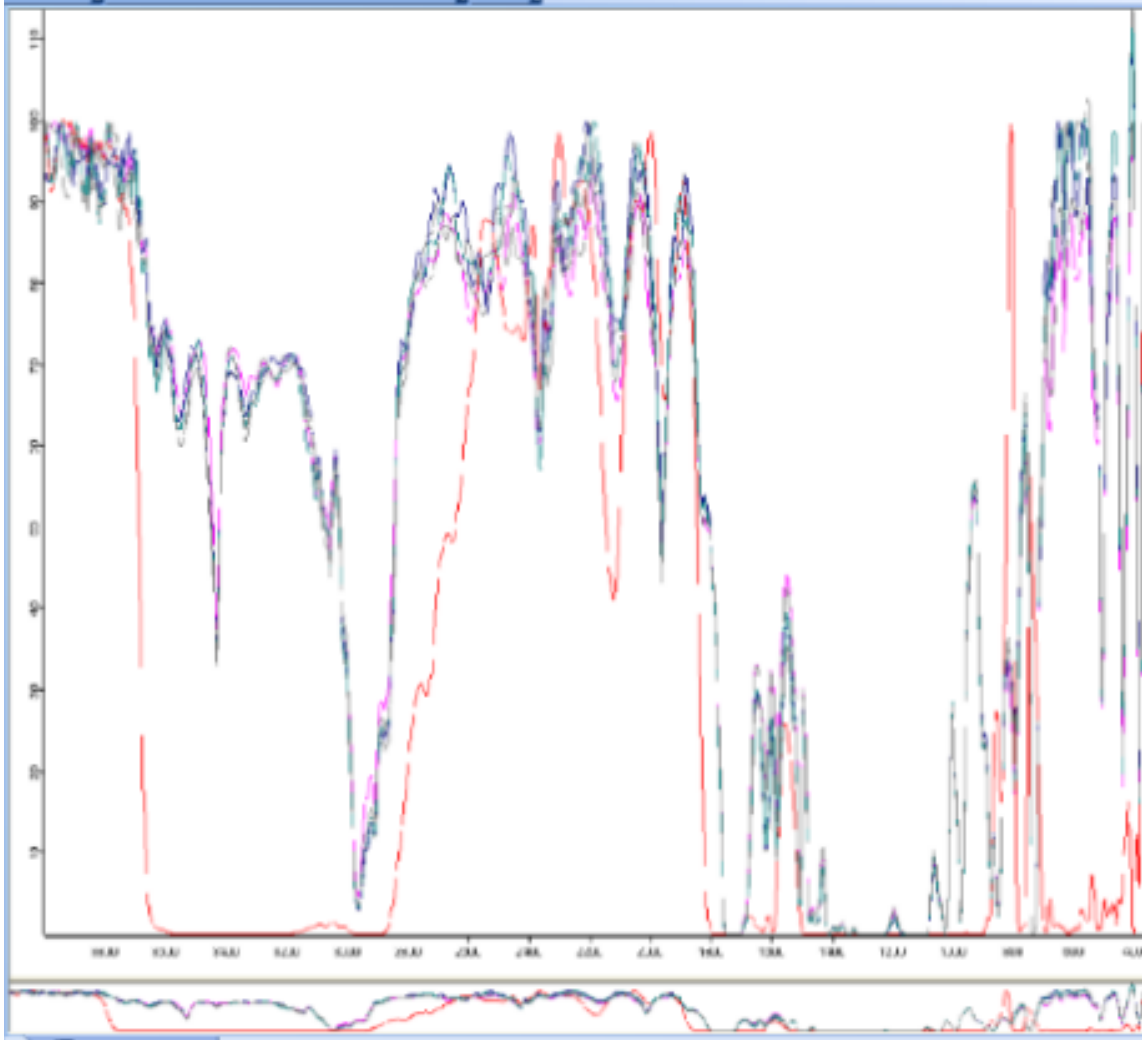


Figura 33 Ventanas de transmisión IR en porcentaje vs IR.

Con los datos del espectrómetro se calculó la ventana de transmisión expresada en porcentaje de transmitancia vs nanómetros, las muestras mostraron comportamientos similares por lo tanto se expresan en una sola gráfica como lo muestra la Figura 34.

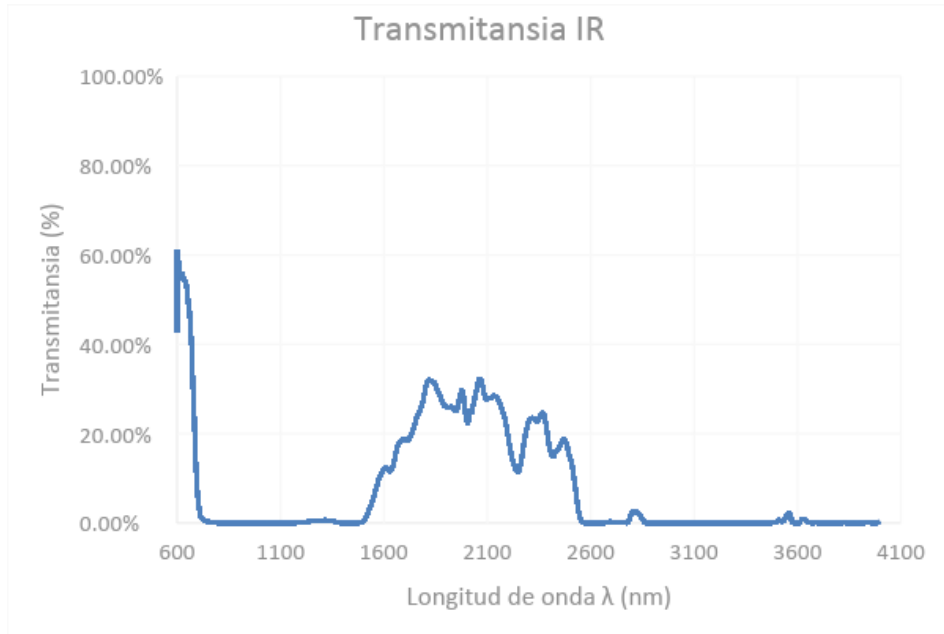


Figura 34 Ventana de transmisión IR en porcentaje vs nanómetros.

Capítulo 4

Resultados y discusión.

En este trabajo se compararon las películas de control solar (PDCS) de las marcas en el mercado, Los criterios de evaluación fueron: la PCDS deberá tener transmitancia de luz visible mayor al 85%, también tener bloqueo de radiación ultravioleta (UV) mayor al 95% y tener bloqueo de radiación infrarroja (IR) mayor al 40%. Se recopilaron las hojas de datos de 282 PDCS pertenecientes a 12 marcas diferentes. Se realizó un análisis a una muestra estadística de PDCS en el laboratorio de óptica, utilizando el radiómetro solar que se muestra en la figura 35, espectrómetro y espectrofotómetro. Los resultados mostraron que 15 PDCS.

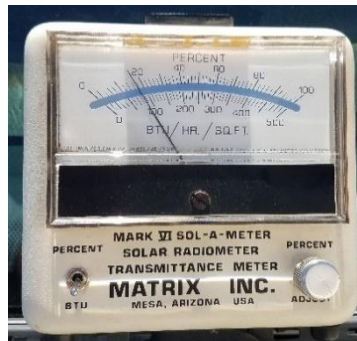


Figura 35 Un día soleado de enero, temperatura 19° C a las 12:30 pm se colocó el radiómetro solar al aire libre con el sensor perpendicular al sol y se tomó la lectura con el sensor desnudo, dando una lectura de 79 BTU/HR/SQ.FT.

Las lecturas se tomaron 15 segundos después de cubrir el sensor con las muestras de PDCS. Conociendo la transmitancia de la energía solar se calculó la energía solar rechazada del material calculando la diferencia entre las lecturas de las muestras y la lectura del sensor desnudo, los resultados se registraron en BTU/HR/SQ.FT. En la Figura 38.



Figura 36 con el radiómetro solar en posición se tomaron lecturas cubriendo el sensor con las muestras.

La transmitancia de radiación solar de cada muestra es:

NR CHARCOAL 54 = 63 BTU/HR/SQ.FT.

NR CHARCOAL 35 = 57 BTU/HR/SQ.FT.

NR CHARCOAL 23 = 51 BTU/HR/SQ.FT.

NR CHARCOAL 17 = 49 BTU/HR/SQ.FT.

NR CHARCOAL 7 = 45 BTU/HR/SQ.FT.

Se midió la parte de espectro UV-visible utilizando un espectrofotómetro UV-VISIBLE. Modelo CARY 50 Tablet, marca VARIAN. Con el promedio de las lecturas de 200 nm a 400 nm se calculó el promedio de la transmitancia de radiación UV y con este se calculó el porcentaje de bloqueo de radiación UV del material. Con las lecturas de 400 nm a 800 nm se calculó el promedio de transmitancia de luz visible. También se obtuvo la ventana de transmisión de 200 nm a 800 nm para cada una de las 5 muestras, la gráfica de resultados se muestra en la Figura 39.

Se midió la radiación IR utilizando un Espectrómetro. Modelo TENSOR 27, marca BRUKER. Se calculó el porcentaje de transmitancia de radiación IR, al calcular el promedio de las lecturas de 2500 nm a 27144 nm. Con el porcentaje de transmitancia de radiación IR se calculó el porcentaje de rechazo de radiación IR. Se obtuvo la ventana de transmisión IR de 2500 nm a 27144 nm Figura 40.

4.1 Resultados.

Las lecturas obtenidas de los equipos se compararon con los valores de la hoja de datos utilizando ANOVA, determinamos si las medias son iguales. Con estos resultados se validaron los valores proporcionados por la hoja datos del material con los valores medidos. El estudio determinó cuáles marcas y modelos de película de control solar fueron más eficientes protegiendo contra la radiación UV después de ser aplicados en las ventanas.

Se tomaron en cuenta los criterios:

Que el material tenga una transmitancia de luz visible mayor a 85%.

Que el material tenga bloqueo de radiación UV mayor a 95%.

Que el material tenga bloqueo de radiación IR.

En la Figura 37 se comparan los valores del rechazo de energía solar en BTU/HR/SQ.FT. De la hoja de datos del proveedor con las lecturas que se obtuvieron con el radiómetro solar. la barra de la izquierda son los valores de la hoja de datos del fabricante, la barra de la derecha son los porcentajes de rechazo de energía solar obtenidos de las lecturas del radiómetro solar al mediodía cuando el sol está en el punto más alto y un cielo despejado. Se puede apreciar que 3 muestras bloquean la energía que indica el proveedor y las otras dos más claras bloquean entre 4 y 5% menos de lo indicado por el proveedor. Figura 38.

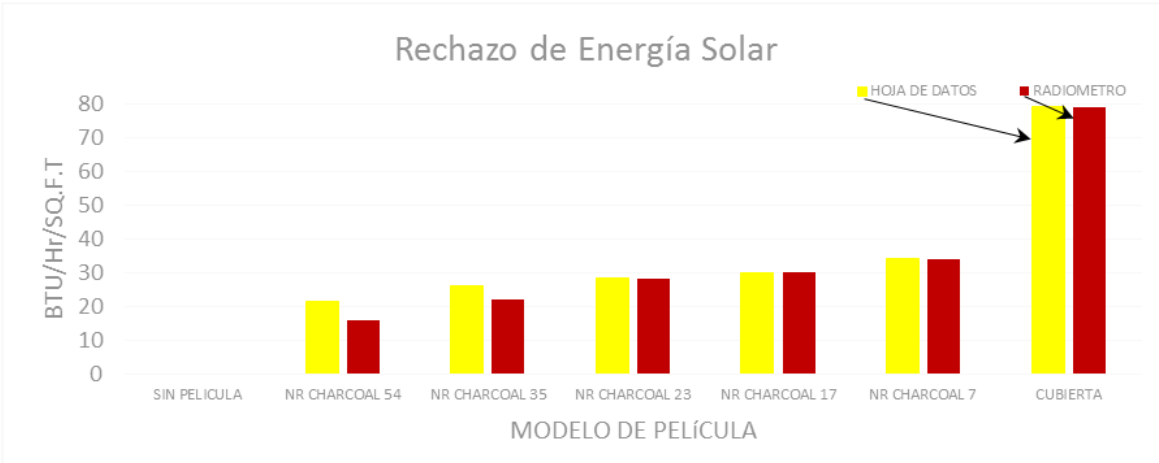


Figura 37 Rechazo de energía solar; comparando la hoja de datos contra las lecturas obtenidas por el radiómetro solar.

En la figura 38 se observa la ventana de transmisión UV-VIS. Se observó que la región de 200 a 400 nm presentó un bloqueo casi total de la radiación UV, en exceso es la radiación solar más dañina para el cuerpo humano. El bloqueo de los rayos UV se debió al filtro nanocerámico de la película. Se calculó el promedio y se observaron diferencias entre las lecturas obtenidas y los valores de las hojas de datos del fabricante respecto al bloqueo de radiación UV.

En la región de 400 a 800 nm (luz visible) se observaron gráficas de transmitancia de luz visible. También se observa que entre más oscura es la película menor es el porcentaje de transmitancia de luz visible por lo que de acuerdo a los criterios se recomiendan las películas que tengan mayor porcentaje de luz visible como NR CHARCOAL 54 Y 35. Comparamos los datos de las hojas de datos con las lecturas del radiómetro solar. Encontramos que la lectura de transmitancia de luz visible para NR CHARCOAL 54 presenta una diferencia de -5.67% comparada con la transmitancia de luz visible de la hoja de datos del fabricante, de igual manera NR CHARCOAL 35 con una diferencia +3.97%, NR CHARCOAL 23 con una diferencia +3.98%, NR CHARCOAL 17 con una diferencia +6.18%, NR CHARCOAL 7 con una diferencia +8.69%. La intensidad de la transmitancia de luz visible varió en función de la intensidad de la negrura del entintado en la película como se observó en la Figura 38.

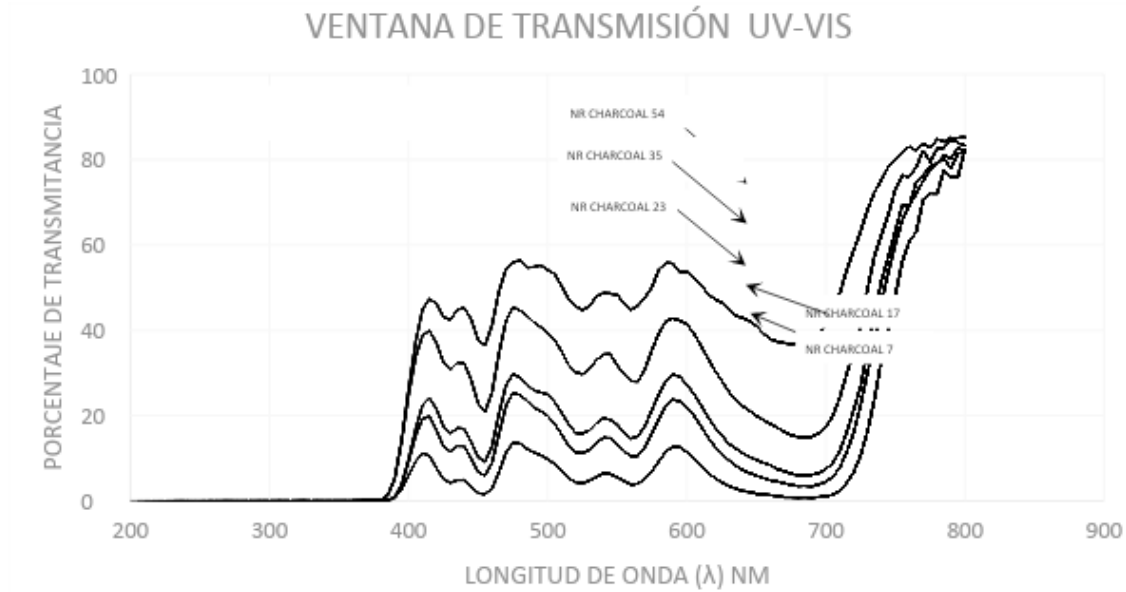


Figura 38 Ventana de transmisión UV-VIS.

En la Figura 39 se muestra un bloqueo significativo de la radiación IR (infrarroja) idéntico en las 5 muestras. Se calculó el promedio con las lecturas que nos dio el espectrómetro IR en una tabla de Excel, el resultado fue 10.98% de transmitancia IR. Con la transmitancia IR se calculó el porcentaje de bloqueo de IR cuyo resultado fue 89.02% para las 5 muestras. No se calcularon diferencias, debido a que este fabricante no incluyó este valor en sus hojas de datos.

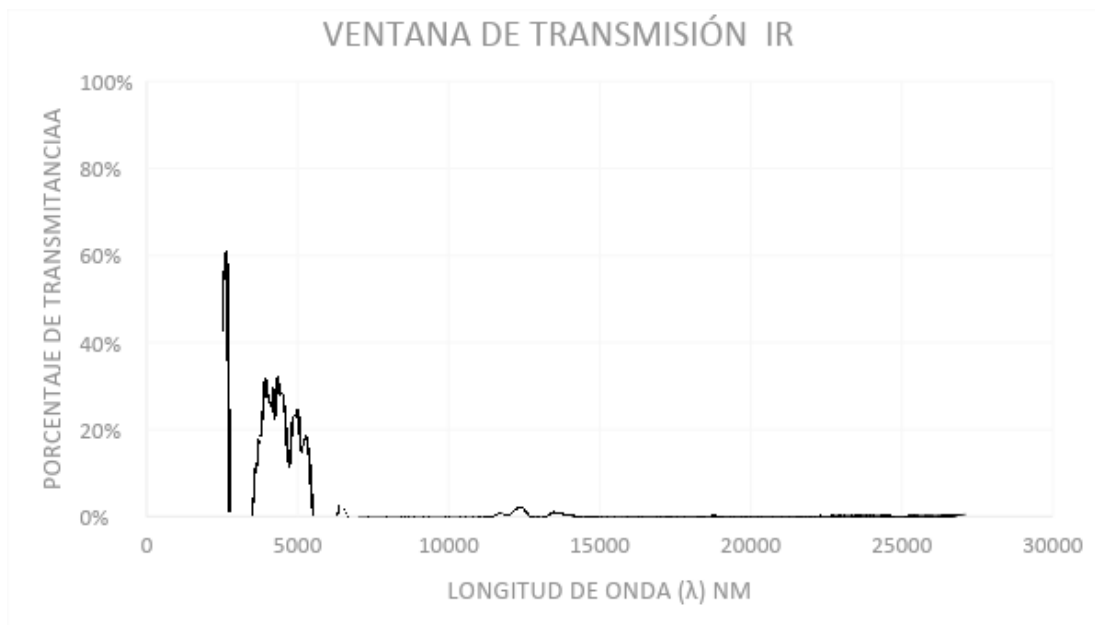


Figura 39 Ventana de transmisión de IR. Se observa que a una λ de 2502 – 2753 nm deja pasar un 60% de IR. También se observa que en el rango de 2493-5521 nm hay una ventana de transmisión del 25% de IR correspondiente al IR intermedio.

Se investigó y se encontraron 2 fabricantes y proveedores de materiales nanocerámicos de grado óptico, capaces de proveer los materiales de calidad, estos son:

-Crystran UV.Visible . IR Speciakist Optics

-ISP Optics a Light Path`Company

De estos dos se obtuvieron las ventanas de transmisión de los filtros nanocerámicos que ofrecen. Con los datos obtenidos se seleccionaron 7 materiales nanocerámicos, el criterio de selección fue que contaran con una buena transmitancia de luz visible. Con los datos de los 7 se dibujaron las ventanas de transmisión de 200 nm a 2500 nm en una sola hoja como se muestra en la Figura 40. Se compararon las ventanas de transmisión eliminando los materiales que no bloquearon la radiación UV e IR. De los 7 materiales preseleccionados solo 2 cumplieron con los criterios. Los materiales nanocerámicos presentaron propiedades ópticas, bloquean una parte del espectro electromagnético y dejan pasar otra. Los 2 que presentaron una buena transmitancia de luz visible, bloquearon casi totalmente la radiación UV e IR son: TiO_2 y ZnS

4.1.1 Comparación entre ventanas de transmisión.

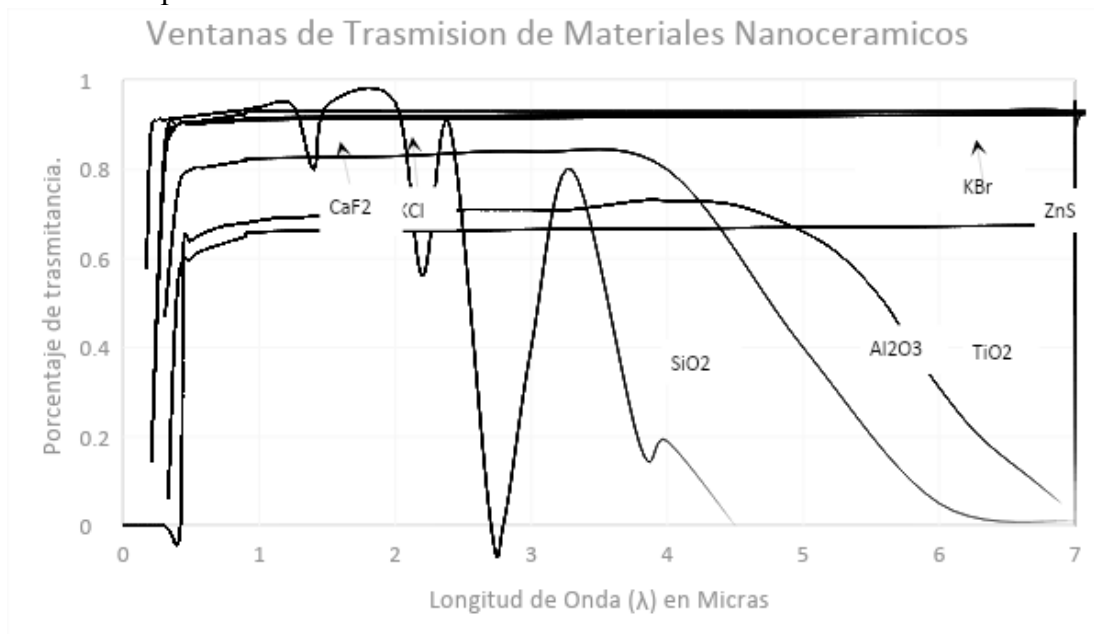


Figura 40 Ventanas de transmisión para los materiales nanocerámicos que presentaron un bloqueo en la mayor parte de la radiación UV y tuvieron una alta transmitancia de luz visible[26][46][47].

La transmitancia de luz visible se consideró importante, porque la luz visible es la que nos permitió ver a través de las ventanas donde se aplicó el filtro nanocerámico. Bloquear la radiación UV fue considerado importante para proteger la salud de los ojos y la piel de las personas, porque la exposición prolongada a la radiación UV es causa de cáncer de piel y cataratas en los ojos. Bloquear la radiación IR fue considerada importante porque la radiación IR se manifestó en forma de calor al interior de la ventana. Las películas de control solar que tuvieron una transmitancia de luz visible mayor a 85%, bloquearon la radiación UV más del 95% y bloquearon la radiación IR. Se registraron en orden de mayor a menor eficiencia de transmitancia de luz visible en la figura 42 Con el mismo orden de la figura 41 se presentan la transmitancia de luz visible y en la figura 42 se nombraron las películas de control solar, iniciando con el nombre de la marca seguida del nombre del modelo de la película.

4.1.2 Selección de recubrimientos.

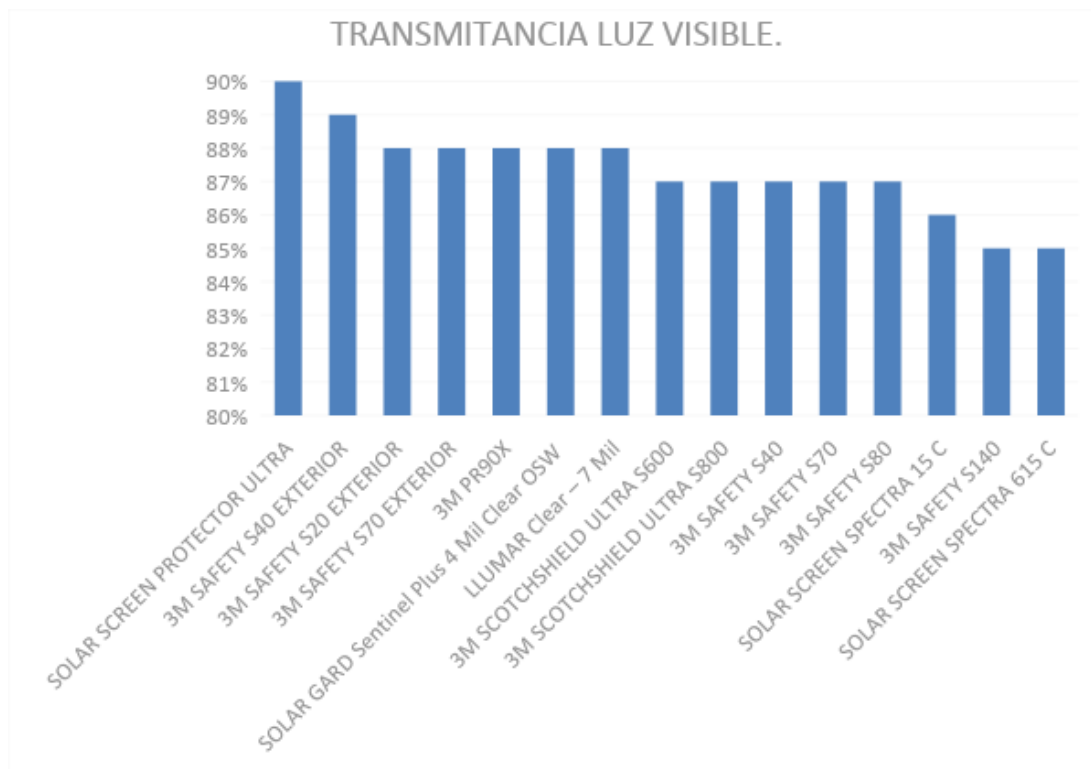


Figura 41 Listado de las PDCS más eficientes en transmitancia de luz visible en orden de mayor a menor.

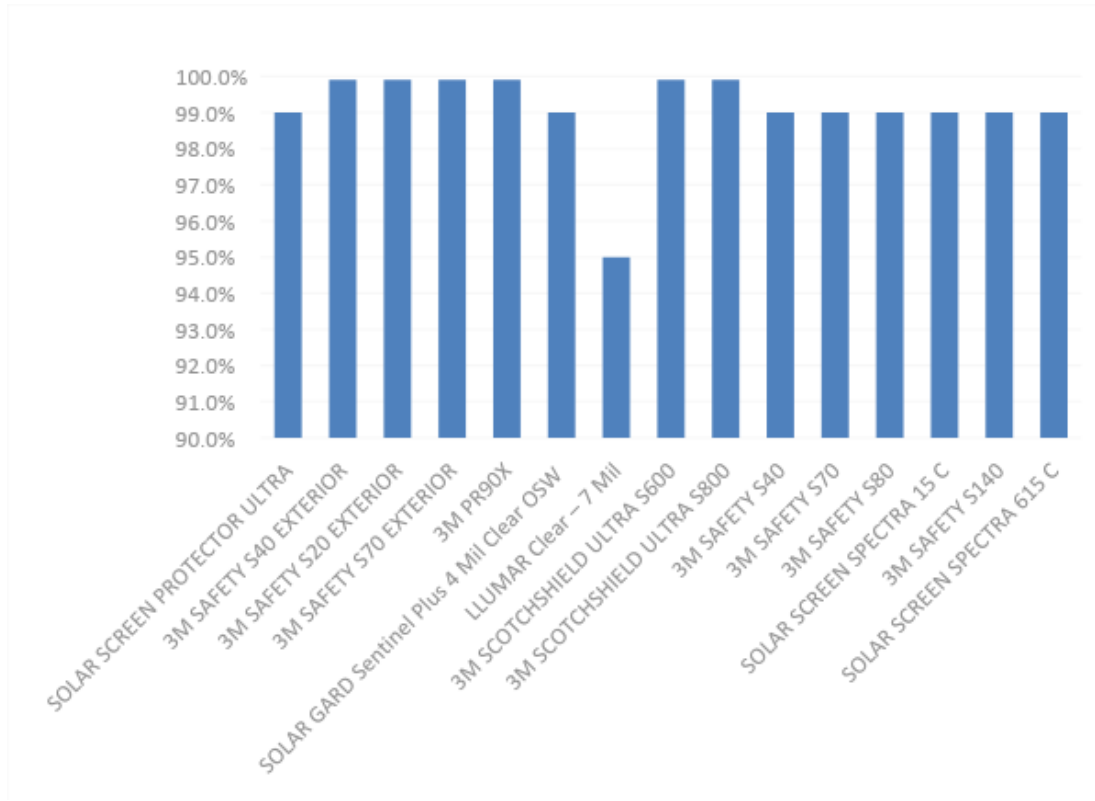


Figura 42 Listado de PDCS mostrando las eficiencias de bloqueo de radiación UV en el mismo orden de la Figura 42.

Se midió con el radiómetro solar la transmitancia de un polarizador, también se midió la transmitancia de radiación solar a través de dos, tres y cuatro polarizadores desfasados a 90° uno contra el otro, una lectura se tomó sin ningún polarizador como medida de control. Los resultados se muestran en la figura 43.

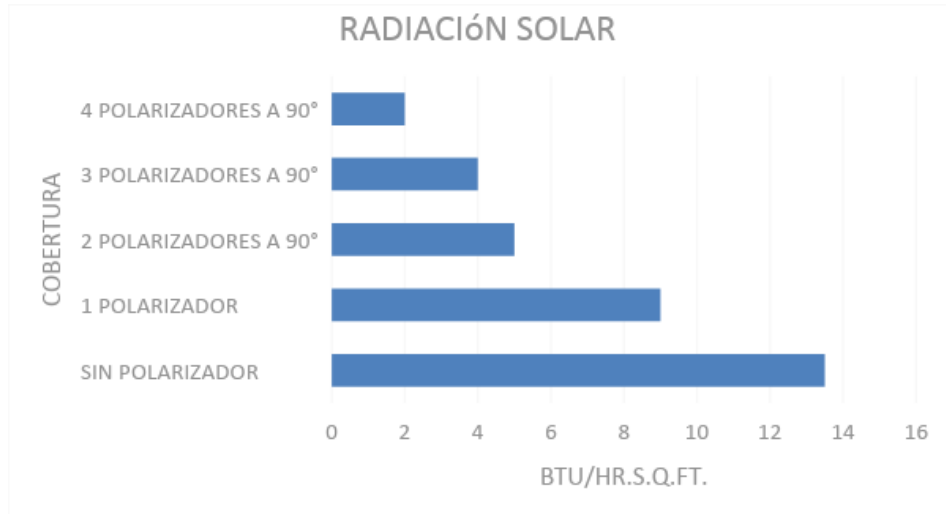


Figura 43 transmitancia de radiación solar de filtro polarizador hasta en 4 capas desfasados a 90°.

Usando el radiómetro solar, se midió la transmitancia de radiación solar de dos polarizadores, desfasando su orientación uno con respecto al otro de cero a noventa grados en intervalos de diez grados entre lecturas, el comportamiento de la transmitancia se muestra en la figura 44.

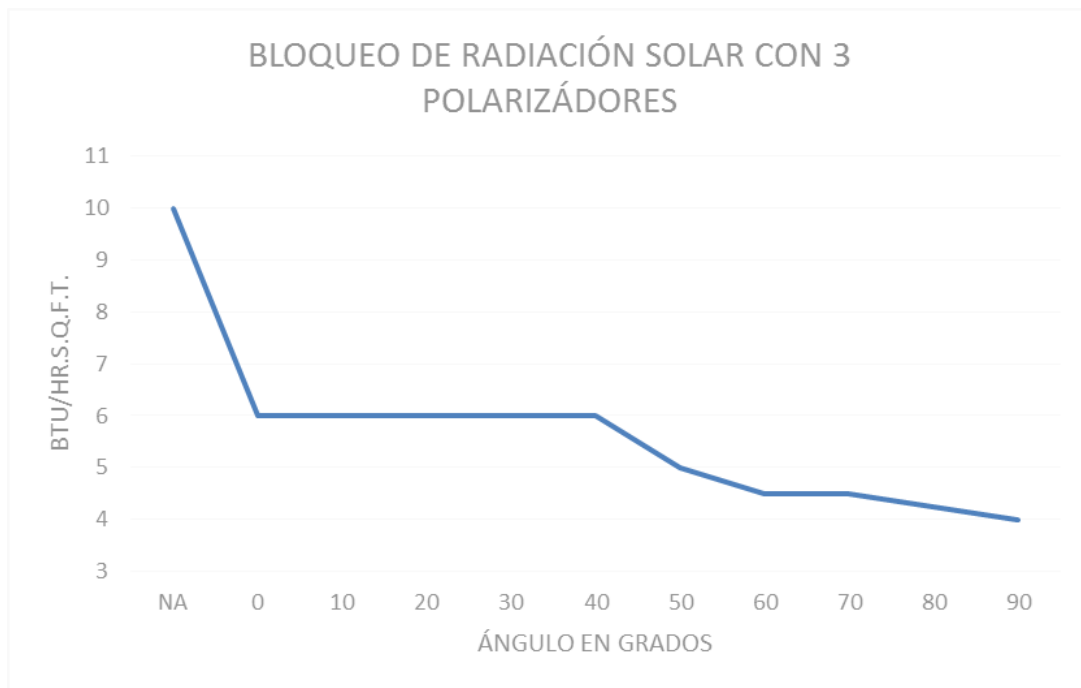


Figura 44 Transmitancia de dos filtros polarizadores, transitando de un desfase de 0° a 90°, en intervalos de 10°.

Usando dos tipos diferentes de foto resistencia como instrumento de medición, se midieron la variación de la resistencia al bloquear la radiación solar con dos polarizadores, desfasando uno con respecto a otro de cero a noventa grados en intervalos de diez grados y los resultados se muestran en la figura 45.

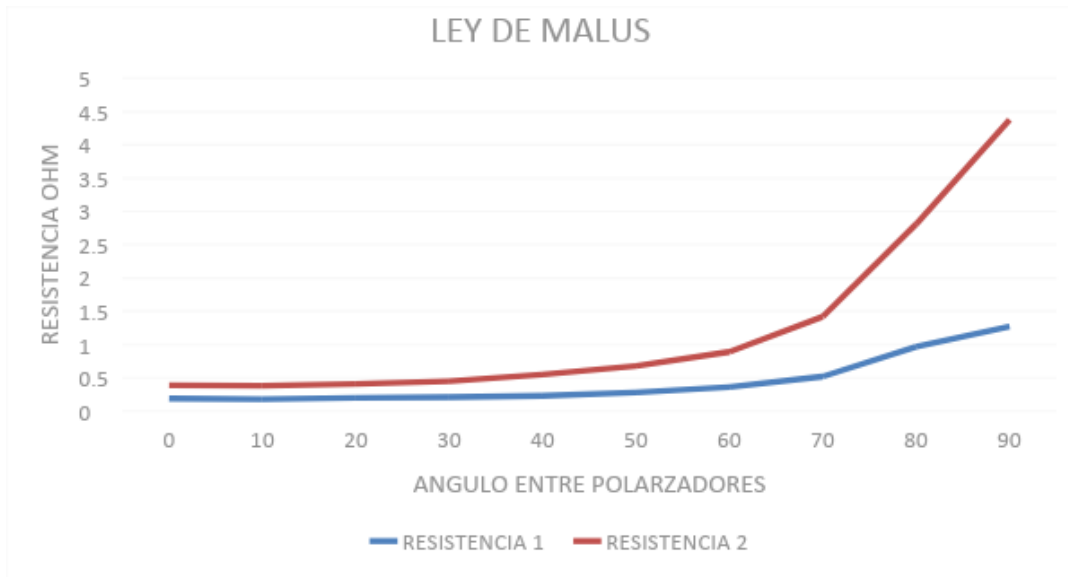


Figura 45 Ley de Malus medida con fotorresistencias.

Usando un termopar de 4 canales, se tomó la temperatura al interior de una caja cerrada con un lado de cristal por donde entra la radiación solar y con un termómetro electrónico se tomó la temperatura ambiente a la sombra. Los resultados se muestran en la figura 46.

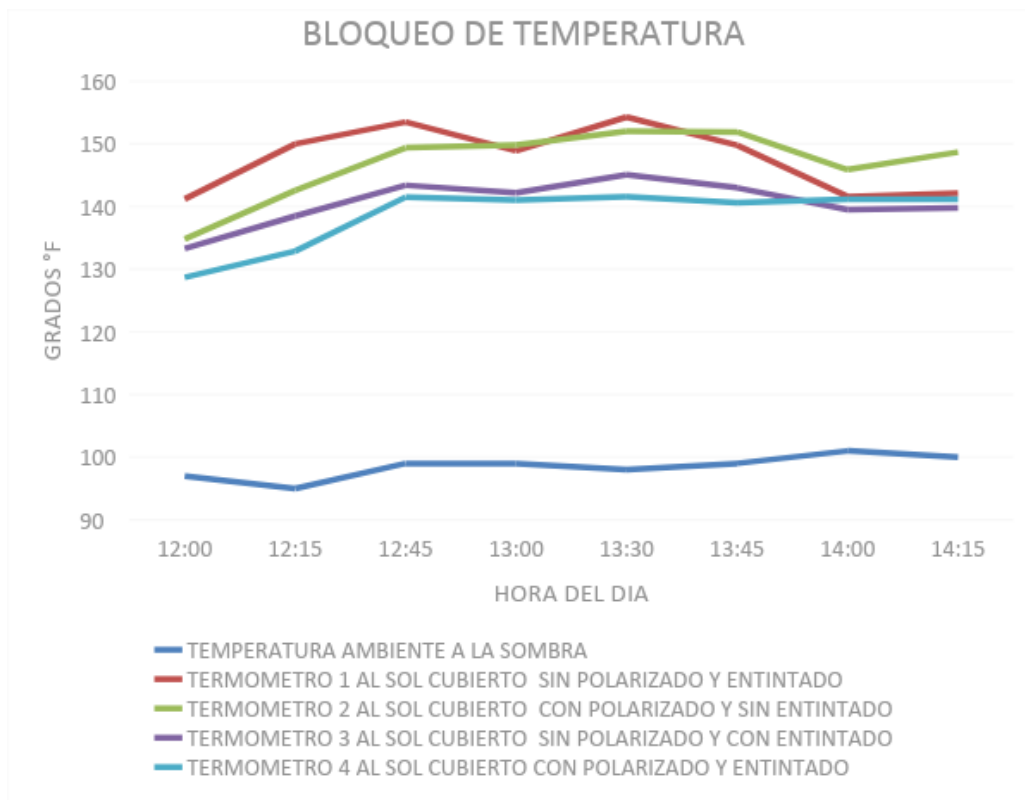


Figura 46 Variación de temperatura al interior de una caja dependiendo de la ventana con la que se cubre la entrada de radiación solar.

Con el radiómetro solar se midió un filtro polarizador lineal, un sustrato de policarbonato grado óptico, una película delgada fotocromática, una película delgada de anti reflejante y todas las combinaciones posibles, en la gráfica se muestran los resultados del experimento en la figura 47.

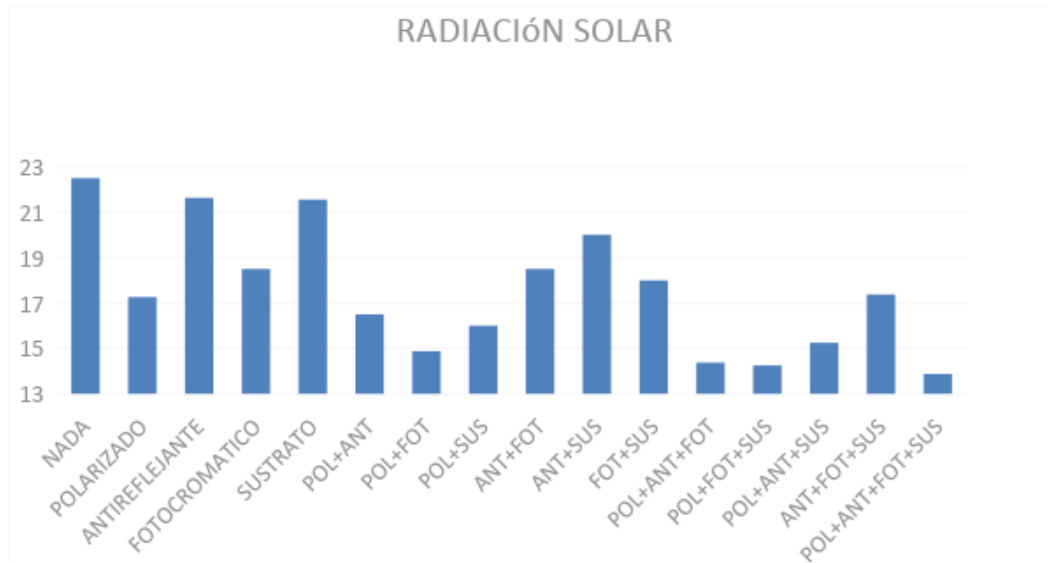


Figura 47 transmitancia de filtro polarizador, sustrato, fotocromático, anti reflejante y sus combinaciones.

4.2 Conclusiones

El objetivo de esta tesis fue determinar cuales eran las películas de control solar en el mercado que pudieran bloquear la radiación ultravioleta al 95% o más, bloquear la radiación infrarroja al menos en 95% y permitieran el paso de la luz visible en su mayoría, de tal manera que nos protegerá de las quemaduras solares causadas por el exceso de exposición a la radiación solar al conducir un vehículo o como pasajero del mismo, que la película de control solar redujera la transferencia de calor por radiación al interior del vehículo en zonas de calor extremo.

Al inicio de la investigación, se colectaron los datos de todas las películas de control solar de diferentes marcas comerciales disponibles en el mercado para la población en general, las películas de control solar fueran incluidas en una lista, se tomó en cuenta el criterio antes mencionados, en esta recolección de datos se separaron las más eficientes al bloquear la radiación infrarroja en un 99%, bloquear la radiación ultravioleta en un 99% y permitir la transmitancia de luz visible en un 85% o más.

Se recolectaron muestras físicas en los diferentes establecimientos de polarizado comercial de la ciudad de Mexicali, estas muestras fueron analizadas en Ensenada Baja California por un espectrofotómetro uv-vis y un espectrómetro infrarrojo, también fueron analizadas por un radiómetro solar en el laboratorio ingeniería mecánica de la facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, los resultados obtenidos fueron comparados por medio de una herramienta estadística ANOVA, esta herramienta fue utilizada para encontrar diferencias significativas entre los datos obtenidos en el laboratorio y los datos proporcionados en las hojas de datos de las películas de control solar, proporcionadas por el fabricante, los resultados del ANOVA encontraron diferencias no significativas entre los datos obtenidos y los proporcionados por el fabricante, por lo tanto los datos propuestos por el fabricante fueron considerados como confiables y se utilizaron en la investigación.

Se hizo una recomendación informada donde se expuso las mejores películas de control solar que mejor protección presentaron contra la radiación infrarroja y ultravioleta, se logró publicar en International journal of latest in engineering and Technology, se anexa copia en este documento de tesis.

Se analizaron las hojas de datos de 282 películas de control solar de 12 marcas diferentes. Como resultado se obtuvo que 15 películas de control solar de 4 marcas diferentes fueron las que presentaron una transmitancia de luz visible mayor al 85%, un bloqueo de radiación UV mayor al 95% y un bloqueo importante de la radiación infrarroja.

La película de control solar que presentó mayor transmitancia de luz visible, fue la marca SOLAR SCREEN con un 90% en su modelo PROTECTOR ULTRA.

Las películas de control solar que presentaron el mayor bloqueo de radiación UV, es la marca 3M con un 99.9% en 6 de sus modelos, a continuación se mencionan dichos modelos:

SAFETY S40 EXTERIOR

SAFETY S20 EXTERIOR

SAFETY S70 EXTERIOR

PR90X

SCOTCHSHIELD ULTRA S600

3M SCOTCHSHIELD ULTRA S800

Las películas de control solar que presentaron el mayor bloqueo de radiación infrarroja, pertenecen a la marca 3M con un bloqueo de 97% en 10 de sus modelos, a continuación se enlistan dichos modelos:

SAFETY S40 EXTERIOR

SAFETY S20 EXTERIOR

SAFETY S70 EXTERIOR

PR90X

SCOTCHSHIELD ULTRA S600

3M SCOTCHSHIELD ULTRA S800

SAFETY S40

SAFETY S70

SAFETY S80

SAFETY S140.

Trabajo a futuro

- Hacer con diferentes materiales con características de polarización y fotocromismo por separado y la unión de estos materiales.
- Analizar las características de los materiales sintetizados.
- Hacer pruebas de campo de los materiales sintetizados al ser operados en condiciones de calor extremo.

Anexo

Gracias a esta investigación se pudo lograr una publicación en una revista, en ella se plasmó el trabajo que se llevó a cabo, la investigación bibliográfica, la investigación de campo, los experimentos, los resultados expuestos y público una opinión informada sobre las películas de control solar[50].



International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology
Vol.(15)Issue(2), pp.018-023
DOI: <http://dx.doi.org/10.21172/1.152.04>
e-ISSN:2278-621X

SOLAR FILMS COMPARISON FOR PROTECTION AGAINST UV AND IR RADIATION

F. J. Haro-Navarro¹, Á. González-Ángeles², R. C. Anguiano-Cota³

Abstract- Due to damage that solar radiation causes on humans, in this work, solar control films (SCF) were compared in order to assess radiation protection. The evaluation criteria were that the SCF must have visible light transmittance greater than 85%, ultraviolet (UV) and infrared (IR) blocking greater than 95% and 40% respectively. 282 SCF data sheets belonging to 12 different brands (films: most used in polarizing vehicles and buildings) were compiled. An analysis was made to one statistical sample of SCF in the optical laboratory, using the solar radiometer, spectrometer and spectrophotometer. The results showed that 15 SCF belonging to 4 brands satisfy the evaluation criteria.

1. INTRODUCTION

Since 1985, when Montreal protocol was signed to eliminate gases that destroy the ozone layer of everyday products, due to the ozone layer is the natural filter that protects the earth from UV and infrared (IR) radiation 1. As the ozone layer ages, more UV radiation enters. Prolonged exposure to UV radiation is associated as a cause of skin cancer, cataracts in the eyes, among other pathologies, this is why it is important to use UV protection on the skin using creams containing sunscreen, in the eyes using UV-protected lenses, in the windows of vehicles and buildings installing solar control films 1-2.

Brian S. BowerWachler and daughter Micaela BowerWachler evaluated 29 automobiles of 15 automobile manufacturers. They measured the UV-A radiation behind the windshield and behind the side window driver's side. The percentage of blocking of UV-A radiation in the windshield was 96% on average, varying the readings from one model to another in a range of 95% to 98%. The percentage of blocking of UV-A in the side window was 71% on average, varying the readings in a range of 44% to 96%. The difference between the windshield readings and the side window was 25% on average 3. It should be noted that vehicle manufacturers have placed UV protection on the windshields of the vehicles they produced during the past 30 years, but no UV protection was placed on the side window of most of the vehicles in the sample. Only 4 of the 29 vehicles analyzed have UV-A blockage in the side window. It is important to note that driving a vehicle for long periods of time without UV protection in the side window can lead to premature aging on the left side of the face and cataracts in the left eye 3.

In areas of extreme heat it is common to polarize windows of the vehicles, to reduce the entry of heat, it should be noted that traditional inking does not include UV protection, therefore, it is advisable to ink the windows with films that contain UV protection. The materials that offer UV protection are nanoceramic filters, such as, which is present in creams with sunscreen, thanks to these compounds the solar control films (SCF) have a significant block to radiation UV [4]. The SCF are a range of products that claim to block 95% or more of UV radiation and reject a considerable amount of solar energy 3-4. The SCF is an inking combined with a nanoceramic filter, for this reason it blocks UV and IR radiation and reduces the transmittance of visible light to the interior of the vehicle, therefore, it is necessary to take into account the traffic laws.

Current legislation allows films in the side windows of vehicles with transmittance greater than 85% and 15% in the rear window 5. The current legislation of each USA state is available at the International Window Film Association (IWFA) 5. In this association are registered the main producing and selling brands of solar control films 5. The production companies provide the data sheets of each film. The data sheets show how the reduction of heat flow occurs through the windows, this reduction is reflected in the energy consumption due to the use of air conditioning 6,7,8.

In order to measure the performance of the SCF it is necessary to separate the solar radiation, this is divided into UV radiation, visible light and IR radiation (Table 1). From here we take UVC and UVB radiation, prolonged exposure to these two radiations causes skin cancer 2. In the past, UVC and UVB radiation were almost completely eliminated by the ozone layer. The medium IR, far IR, and extreme IR radiation are invisible radiation that manifests as heat. The healthy radiations of the solar spectrum are UVA, visible light and near IR, because its moderate exposure causes positive effects on health 5.

Table 1. Wavelength (λ) of ultraviolet radiation, visible light, infrared radiation measured in nm (nanometer) 9,10,11

Type of radiation.	Wave length (λ)
UVC (noxious)	220 nm a 280 nm
UVB (noxious)	280 nm a 320nm

^{1,2,3} Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería, Blvd. Benito Juárez S/N, Mexicali B.C., 21280, México

UVA	320 nm a 400 nm
Visible Violet	400 nm a 455 nm
Visible Blue	455 nm a 492 nm
Visible Green	492 nm a 577 nm
Visible Yellow	577 nm a 597 nm
Visible Orange	597 nm a 622 nm
Visible Red	622 nm a 780 nm
IR near	780 nm a 3000 nm
IR intermediate	3000 nm a 6000 nm
IR far	6000 nm a 15000 nm
IR extreme	15000 nm a 1 mm

In an attempt to contribute in the field of sun protection, a comparison of the data sheets of the most common films on the market was made to determine the most efficient film protection under criteria visible light transmittance greater than 85%, a blockage of UV radiation greater than 95% and a significant blockage of the IR radiation.

2. EXPERIMENT AND MATERIALS

5 samples of the SOLAR GARD brand with different level of visible light transmittance (VLT): nr charcoal 54 = 54%(VLT), Nr charcoal 35 = 35%(VLT), Nr charcoal 23 = 23%(VLT), Nr charcoal 17 = 17%(VLT), Nr charcoal 7 = 7%(VLT) were analyzed in order to prove the data sheet furnished by provider on its website.

The rejected solar energy was measured using a solar radiometer. MARK VI SOL-A-METER model, brand MATRIX INC. Made in MESA, ARIZONA USA, serial number 3702.

The part of the UV-visible spectrum was measured using a UV-VISIBLE spectrophotometer VARIAN. Model CARY 50 Tablet.

The IR radiation was measured using a Spectrometer BRUKER. Model TENSOR 27.

3. RESULTS AND DISCUSSION



Figure 1. Radiometer a) without solar film, b) with solar film.

The transmittance of solar energy was measured on a sunny January day, temperature 19 ° C at 12:30 pm, the solar radiometer was placed outdoors with the sensor perpendicular to the sun and the reading was taken with the nude sensor, giving a result of 79 Btu/h/Sq. Ft. (Figure 1 (A)). With the solar radiometer in position, readings were taken covering the sensor with the film samples, Figure 1 (B).

The readings were taken 15 seconds after covering the sensor with the SCF samples. Knowing the transmittance of the solar energy, the rejected solar energy of the material was calculated by calculating the difference between the readings of the samples and the naked sensor reading, the results are shown in Btu / h / Sq. Ft. at figure 2.

Figure 2 compares the solar rejection between values of the supplier's data sheet and the readings obtained in solar radiometer when the sun is at the highest point and a clear sky. It can see that 3 samples block the energy indicated by the supplier and the other two cleaners block between 4 and 5% less than that indicated by the supplier. Figure 2.

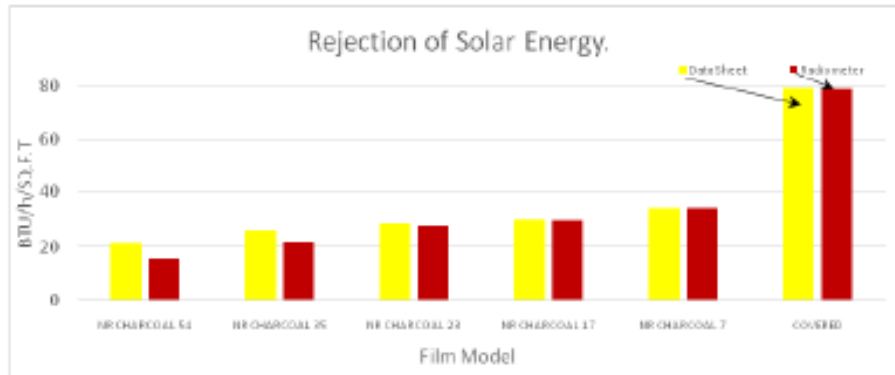


Figure 2. Rejection of solar energy. Comparing the data sheet against the readings obtained by the solar radiometer.

It can be seen in figure 2 that the darkest film (charcoal 7) just blocks 34% of total sun energy, so it can be mentioned that darkness grade is not synonymous of solar energy rejection because it just blocks visible light. Also, it can be observed that films NR charcoal 23, 17 and 7 block a similar quantity of solar energy. Looking for an equilibrium between visible light transmittance and rejection of total energy, it is recommended a film between NR Charcoal 35 and 23.

Figure 3 shows the UV-VIS transmission window for 5 studied samples. It can be observed that there is an almost total blockage of UV radiation in the region of 200 to 400 nm, which according to Table 1 is the most harmful radiation for the human body. The blocking of UV radiation was due to the nanoceramic filter on the film. The average was calculated and differences were observed between the readings obtained and the values of the manufacturer's data sheets.

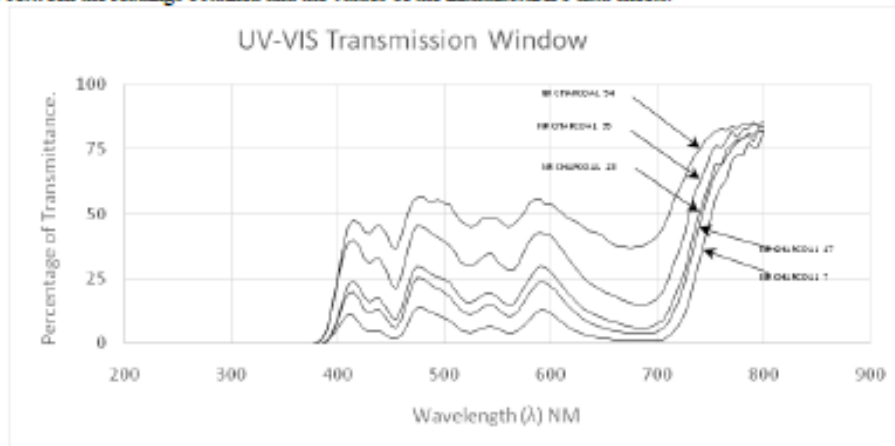


Figure 3. UV-VIS transmission window for 5 studied samples.

In the region of 400 to 800 nm visible light transmittance behavior is observed. It can be seen that the darker the film is, the lower the percentage of visible light transmittance. According to the criteria, the films with the highest percentage of visible light, such as NR charcoal 54 and 35, are recommended.

Figure 4 shows an IR blockage identical in the 5 samples. It is observed that at a λ of 2502 - 2753 nm it passes 60% IR (IR near). It is also observed that in the range of 2493-5521 nm there is a transmission window of 25% IR corresponding to the intermediate IR. After that all IR transmittance is totally blocked.

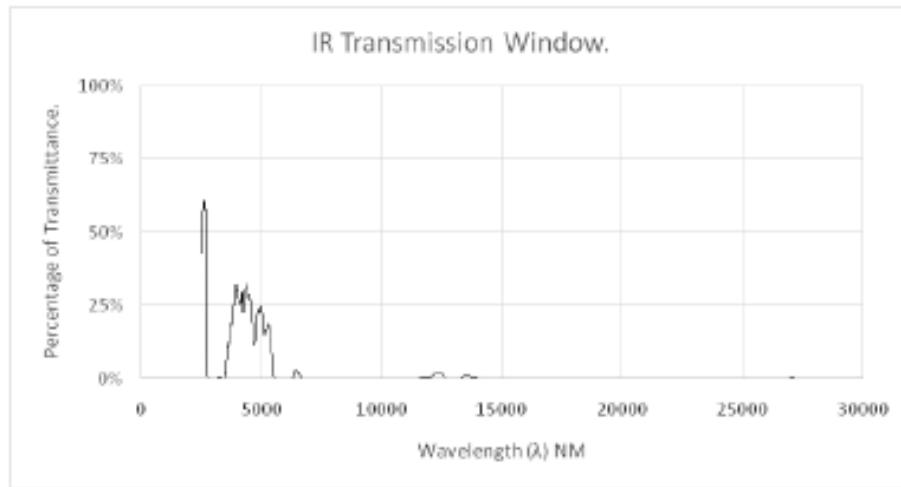


Figure 4. IR transmission window for 5 studied samples.

On the other hand, data sheets of 282 solar control films corresponding to 12 different brands (most popular in USA) were analyzed.

From the transmission windows information provided by manufacturer, 2 nanoceramic materials were selected due to great visible light transmittance, almost totally blocked UV radiation and largely blocked IR radiation. These materials are Al_2O_3 and TiO_2 as shown in Figure 5.

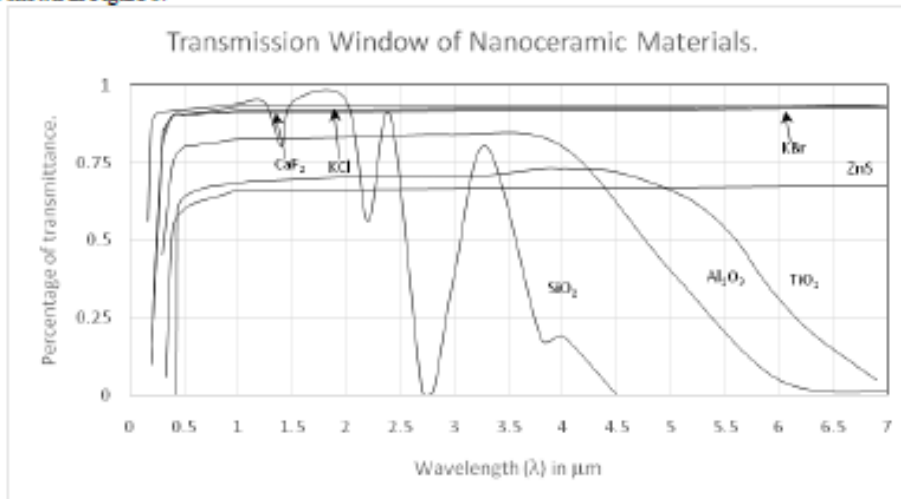


Figure 5. Transmission windows for nanoceramic materials that showed a blockage in most of the UV radiation and had a high transmittance of visible light 12–18.

From 282 sun protection films, 15 (corresponding to 4 brands) had visible light transmittance greater than 85%, blocked UV radiation more than 95% and blocked IR radiation were recorded in order of higher to less visible light transmittance efficiency (Figures 6 and 7).

The importance of the transmittance of visible light is because the visible light allowed us to see behind the windows where the nanoceramic filter was applied. The blocking of UV radiation was considered important to protect the health of people's eyes and skin, because prolonged exposure to UV radiation causes skin cancer and cataracts in the eyes. The blocking of IR radiation was considered important because the IR radiation is manifested in the form of heat inside the window.

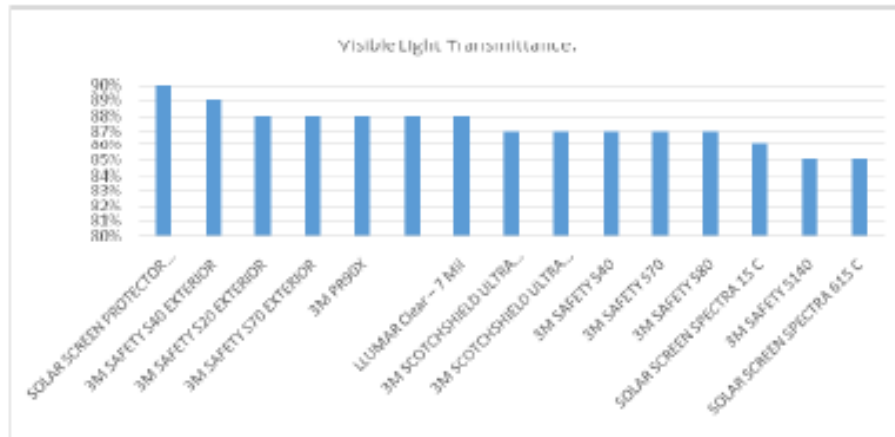


Figure 6. List of the most efficient SCF in transmittance of visible light in order of greater to less.

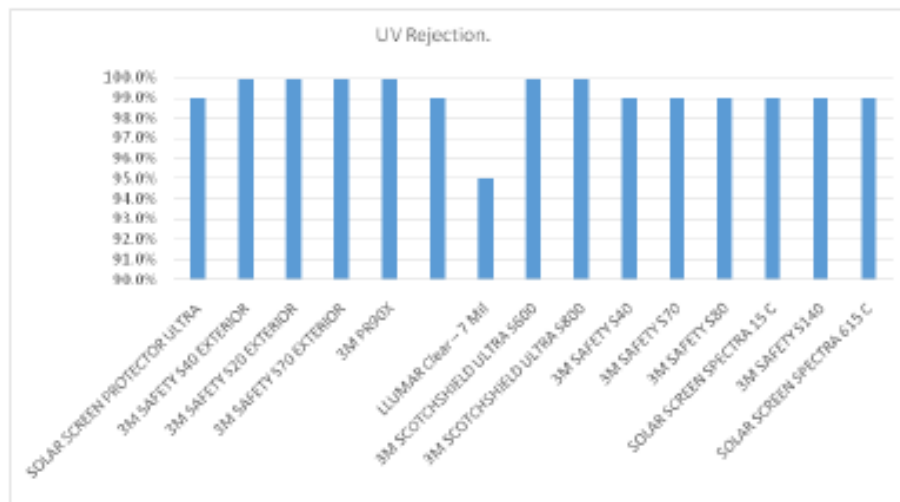


Figure 7. List of SCF showing the blocking efficiencies of UV radiation.

4. CONCLUSION

The aim was achieved. Our experiment results are similar to the data provide by manufacturer.

The nanoceramic materials that best block UV and IR radiation and have good visible light transmittance are TiO₂, Al₂O₃ and ZnS.

From 282 studied films only 15 showed a visible light transmittance greater than 85%, a blockage of UV radiation greater than 95% and a significant blockage of the IR radiation.

Darkness grade on windows films it is not synonymous of solar energy rejection because just block visible light. Looking for an equilibrium between visible light transmittance and rejection of total energy, it recommendable a film between NR Charcoal 35 and 23.

Acknowledgment: the authors want to say thanks to The National Humanities Science and Technology Council of Mexico (CONAHCYT), for support given under grant number: (CVU/scholarship):843020/634464.

5. REFERENCES

- [1] S. T and K. K. S. K. Reddy, "Ozone Layer Depletion and Its Effects: A Review," *Int. J. Environ. Sci. Dev.*, no. January 2011, pp. 30-37, 2011.
- [2] W. R. Stanton, M. Janda, P. D. Baude, and P. Anderson, "Primary prevention of skin cancer: A review of sun protection in Australia and internationally," *Health Promot. Int.*, vol. 19, no. 3, pp. 369-378, 2004.
- [3] B. S. Boxer Wachler, "Assessment of levels of ultraviolet light protection in automobile windshields and side windows," *JAMA Ophthalmol.*, vol. 134, no. 7, pp. 772-775, 2016.

- [4] H. S. Song, Y. J. Yoo, G. J. Lee, K. S. Chang, and Y. M. Song, "Optical Design of Porous ZnO/TiO₂ Films for Highly Transparent Glasses with Broadband Ultraviolet Protection," *J. Nanomater.*, vol. 2017, 2017.
- [5] "Official website of IWFA | IWFA.comx."
- [6] J. Xamán, Y. Olazo-Gómez, I. Zavala-Guillén, I. Hernández-Pérez, J. O. Aguilar, and J. F. Hinojosa, "Thermal evaluation of a Room coupled with a Double Glazing Window with/without a solar control film for Mexico," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 110, pp. 805–820, Jan. 2017.
- [7] E. Moretti and E. Belloni, "Evaluation of energy, thermal, and daylighting performance of solar control films for a case study in moderate climate," *Build. Environ.*, vol. 94, no. P1, pp. 183–195, 2015.
- [8] T. Nagahama, T. Sato, T. Harima, and J. Shimizu, "Optical properties and field test results of spectrally-selective solar control window film that enables not increasing downward reflection," *Energy Build.*, vol. 157, pp. 176–183, 2017.
- [9] T. Dalgleish et al., *[óptica]*, vol. 136, no. 1, 2007.
- [10] E. HECHT, *óptica*, 1999th ed. MADRID: ISABEL CAPELLA, 2000.
- [11] Y. Wang et al., "A Novel UV-Shielding and Transparent Polymer Film: When Bioinspired Dopamine-Melanin Hollow Nanoparticles Join Polymers," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 9, no. 41, pp. 36281–36289, 2017.
- [12] I. OPTICS, "Al₂O₃, CaF₂, KBr, SiO₂, ZnS," 2019.
- [13] D. F. Bezuidenhout, "Calcium Fluoride (CaF₂)," *Handb. Opt. Constants Solids*, pp. 815–835, 1997.
- [14] E. D. Palik, "Potassium Bromide (KBr)," *Handb. Opt. Constants Solids*, pp. 989–1004, 1997.
- [15] E. D. Palik, "Potassium chloride (KCl)," *Handb. Opt. Constants Solids*, vol. 1, pp. 703–718, 2012.
- [16] "Fused Silica IR Grade (SiO₂)," Ratio, pp. 4207–4207.
- [17] T. Range et al., "Rutile (TiO₂) MATERIALS DATA," vol. 139, no. 2, pp. 88–89, 1992.
- [18] ISP OPTICS, "Zinc Sulfide Cleartran®(ZnS)," *Zinc Sulfide Cleartran®(ZnS)*, 2019.

Referencias.

- [1] S. Chakraborty *et al.*, “Dermatological effect of UV rays owing to ozone layer depletion,” *2017 4th Int. Conf. Opto-Electronics Appl. Opt. Optronix 2017*, vol. 2018–Janua, pp. 1–6, 2018.
- [2] S. T and K. K. S. K. Reddy, “Ozone Layer Depletion and Its Effects: A Review,” *Int. J. Environ. Sci. Dev.*, no. January 2011, pp. 30–37, 2011.
- [3] G. Hubbard, R. G. Kyle, R. D. Neal, V. Marmara, Z. Wang, and S. U. Dombrowski, “Promoting sunscreen use and skin self-examination to improve early detection and prevent skin cancer: Quasi-experimental trial of an adolescent psycho-educational intervention,” *BMC Public Health*, vol. 18, no. 1, pp. 1–16, 2018.
- [4] “Official website of IWFA | IWFA.comx.” [Online]. Available: <https://iwfa.com/>. [Accessed: 12-Nov-2018].
- [5] T. Cantero, “Óptica electromagnética,” pp. 1–205, 2002.
- [6] P. J. Espinós Manzorro, “Aplicaciones tecnológicas de películas delgadas,” *Cent. Investig. Científicas Isla la Cart.*, pp. 25–28, 2010.
- [7] B. S. Boxer Wachler, “Assessment of levels of ultraviolet a light protection in automobile windshields and side windows,” *JAMA Ophthalmol.*, vol. 134, no. 7, pp. 772–775, 2016.
- [8] J. Xamán, Y. Olazo-Gómez, I. Zavala-Guillén, I. Hernández-Pérez, J. O. Aguilar, and J. F. Hinojosa, “Thermal evaluation of a Room coupled with a Double Glazing Window with/without a solar control film for Mexico,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 110, pp. 805–820, Jan. 2017.
- [9] E. Moretti and E. Belloni, “Evaluation of energy, thermal, and daylighting performance of solar control films for a case study in moderate climate,” *Build. Environ.*, vol. 94, no. P1, pp. 183–195, 2015.
- [10] T. Nagahama, T. Sato, T. Harima, and J. Shimizu, “Optical properties and field test results of spectrally-selective solar control window film that enables not increasing downward reflection,” *Energy Build.*, vol. 157, pp. 176–183, 2017.
- [11] W. R. Stanton, M. Janda, P. D. Baade, and P. Anderson, “Primary prevention of skin cancer: A review of sun protection in Australia and internationally,” *Health Promot. Int.*, vol. 19, no. 3, pp. 369–378, 2004.
- [12] E. HECHT, *óptica*, 1999th ed. MADRID: ISABEL CAPELLA, 2000.
- [13] T. Dalglish *et al.*, *[óptica]*, vol. 136, no. 1. 2007.
- [14] Y. Wang *et al.*, “A Novel UV-Shielding and Transparent Polymer Film: When Bioinspired Dopamine-Melanin Hollow Nanoparticles Join Polymers,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 9, no. 41, pp. 36281–36289, 2017.
- [15] V. Rusanov, S. Stankov, and A. X. Trautwein, “Photoswitching of nitroprussides,” in *Hyperfine Interactions*, 2002.
- [16] J. a. Taboada, “Magnitudes luminosas fundamentales.” *Manual de Luminotecnia*. 1943, Barcelona, p. 77, 1943.
- [17] Centro de Estudios de la Energía Solar, “Espectro solar.” [Online]. Available: <http://www.censolar.org/especsol.htm>. [Accessed: 18-Mar-2019].
- [18] R. Ulrich and R. J. Martin, “Geometrical Optics in Thin Film Light Guides,” *Appl. Opt.*, vol. 10, no. 9, p. 2077, 1971.
- [19] R. De Conceptos, F. Parte, I. Reporte, T. Presentado Por, A. Cornejo Rodríguez, and G. U. Serrano, “Óptica Geométrica,” 2005.

- [20] “Ondas representativas de la interferencia constructiva. | Download Scientific Diagram.” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Ondas-representativas-de-la-interferencia-constructiva_fig5_297706235. [Accessed: 19-Mar-2019].
- [21] “Astronomía para niños-INAOE.” [Online]. Available: <https://www.inaoep.mx/~astrokids/DreamHC/calculos/arcoiris.html>. [Accessed: 19-Mar-2019].
- [22] E. B. Manaia, R. C. K. Kaminski, M. A. Corrêa, and L. A. Chiavacci, “Inorganic UV filters,” *Brazilian J. Pharm. Sci.*, vol. 49, no. 2, pp. 201–209, 2013.
- [23] I. Sava and A. M. Resmerita, “Photoactive polyimides containing azobenzene pendent groups,” *Proc. Int. Semicond. Conf. CAS*, vol. 2, pp. 283–286, 2008.
- [24] A. Chen, S. Pua, Z. Le, and G. Liu, “Synthesis, photochromism and photoinduced anisotropy of a new photochromic diarylethene,” *Proc. 2009 Pacific-Asia Conf. Circuits, Commun. Syst. PACCS 2009*, pp. 477–480, 2009.
- [25] Y. Wang *et al.*, “Polarization patterns hide and display using photoinduced anisotropy of photochromic fulgide,” *Opt. Express*, vol. 13, no. 1, p. 20, 2005.
- [26] E. D. Palik, “Potassium chloride (KCl),” *Handbook of Optical Constants of Solids*, 2019. [Online]. Available: https://isoptics.com/wp-content/uploads/2018/05/isoptics_ecatalog_2015.pdf. [Accessed: 03-Jun-2019].
- [27] J. Langen, “Envisat’s contribution to atmospheric chemistry studies,” pp. 1497–1499, 2003.
- [28] A. Hernán Bedoya Calle, “Fabricación y caracterización de películas delgadas de óxidos transparentes con aplicaciones ópticas,” *Uanl-Fime*, p. 106, 2015.
- [29] A. R. Verduzco, “Síntesis y caracterización de películas delgadas transparentes y conductoras (base ZnO) para el aprovechamiento de la energía solar,” pp. 1–131, 2015.
- [30] E. Nieto and F. Fernandez, “Películas delgadas: fabricación y aplicaciones,” *Cerámica y Vidr.*, vol. 258, pp. 245–258, 1994.
- [31] L. Melo-Maximo, A. Murillo-Sanchez, O. Salas-Martinez, B. Garcia-Farrera, D. Melo-Maximo, and J. Oseguera-Pena, “Producción y caracterización de películas delgadas de Aluminio como electrodos para biosensores,” *Rev. Análisis Cuantitativo y Estadístico*, vol. 3, no. 9, pp. 8–12, 2016.
- [32] H. Miranda, A. Watson, I. Abrego, and E. Ching-Prado, “Preparation and characterization of SnO₂: F thin films deposited by spray pyrolysis technique for TCO’s applications ; Preparación y caracterización de películas delgadas de SnO₂:F depositadas mediante la técnica de rocío pirolítico y sus aplicaciones com,” 2016.
- [33] ASWF, “ASWF | Page not found,” 2019. [Online]. Available: <http://aswf.com/html/products/products.html>. [Accessed: 02-May-2019].
- [34] GLOBAL, “Weblet Importer,” 2019. [Online]. Available: <http://www.globalwindowfilms.com/automotive-specification.php>. [Accessed: 02-May-2019].
- [35] Solar Screen, “FILMS - Solar control - Thermal insulation - Solar 80 C,” 2019. [Online]. Available: <https://www.solarscreen.eu/film/en/147/solar-control/thermal-insulation/solar-80-c>. [Accessed: 02-May-2019].

- [36] SOlex, “Polarizado Auto - Solex - Linea polarizado automotriz,” 2019. [Online]. Available: <https://solex.mx/polarizado-auto/>. [Accessed: 02-May-2019].
- [37] Solar Gard, “Resources - Specification Sheets | Solar Gard,” 2019. [Online]. Available: <https://www.solargard.com/resources/#1455206102323-c718c925-3110>. [Accessed: 02-May-2019].
- [38] IQue, “Marcas de IQue Films: Líder Mundial en Películas para el Rechazo de Calor en Cristales,” 2019. [Online]. Available: <http://www.iquefilms.com.mx/marcas.html>. [Accessed: 02-May-2019].
- [39] thermoshield, “Productos - Thermoshield,” 2019. [Online]. Available: <https://www.thermoshield.mx/tienda/>. [Accessed: 02-May-2019].
- [40] 3M, “Exterior Durability Visible Light Transmission Low Reflection Infrared Rejection Energy Savings,” 2019. [Online]. Available: <https://multimedia.3m.com/mws/media/1173227O/3m-sun-control-window-film-prestige-ext-family-card.pdf>. [Accessed: 02-May-2019].
- [41] LLUMAR, “Solar Control Window Film For Home | LLumar,” 2019. [Online]. Available: <https://northamerica.llumar.com/window-film-for-homes/types-of-window-film-for-home/solar-control-window-film-for-home>. [Accessed: 02-May-2019].
- [42] I. OPTICS, “Al₂O₃, CaF₂, KBr, SiO₂, ZnS,” 2019. [Online]. Available: https://isptoptics.com/wp-content/uploads/2018/05/isptoptics_ecatalog_2015.pdf. [Accessed: 03-Jun-2019].
- [43] T. Range *et al.*, “Rutile (TiO₂) MATERIALS DATA,” 1992. [Online]. Available: <https://www.crystran.co.uk/optical-materials/rutile-tio2>.
- [44] Universitat de Barcelona / Materials, “Policarbonato | CMEmaterials,” 2019. [Online]. Available: <http://www.ub.edu/cmematerials/es>. [Accessed: 29-Apr-2019].
- [45] Varian, “Cary 50 Operation Manual,” vol. 3, no. 85, 1999.
- [46] A. Technologies, “Varian Cary 50 UV-Vis Spectrophotometer-Typical Specifications,” pp. 30–31, 2008.
- [47] B. Zinn, “Bruker Tensor 27 FT-IR & OPUS Data Collection Program,” *Stanley Gr. Catal. Stud.*, pp. 1–47, 2004.
- [48] “Bruker Tensor 27 IR - Systems Chemistry,” 2019. [Online]. Available: <https://www.ru.nl/systemschemistry/equipment/optical-spectroscopy/machinery/bruker-tensor-27-ir/>. [Accessed: 13-May-2019].
- [49] H. Gutierrez and R. De la Vara, *Análisis y diseño de experimentos*. 2008.
- [50] Á. G.-Á. R. C. A.-c. F. J. Haro-navarro, «SOLAR FILMS COMPARISON FOR PROTECTION AGAINST UV AND IR RADIATION,» INTERNATIONAL JOURNAL OF LATEST TRENDS IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY, vol. 15, n° 2, pp. 18-23, 2019.
- [51] NASA, “Cosmic Colors | NASA Space Place – NASA Science for Kids.” [Online]. Available: <https://spaceplace.nasa.gov/cosmic-colors/sp/>. [Accessed: 18-Mar-2019].