

# Prueba de estabilidad a la luz solar, al intemperismo y a la luz

La luz solar es una de las principales causas de daño a diversos materiales, incluyendo plásticos, textiles, recubrimientos y otros materiales orgánicos. El tipo de daño, como son la pérdida de propiedades físicas, desintegración en polvo, resquebrajamiento, descascarillado, decoloración y cambio de color, varía dependiendo de la sensibilidad del material y el espectro de la luz. La sensibilidad espectral varía de un material a otro. Para los materiales duraderos, como son la mayoría de los recubrimientos y plásticos, la luz ultravioleta de ondas cortas es la principal causa de degradación de los polímeros. No obstante, para materiales menos duraderos, como son los colorantes y pigmentos, la luz ultravioleta de ondas más largas, e incluso la luz visible de ondas cortas, puede causar un daño significativo.

Para muchos fabricantes, es muy importante formular productos que puedan resistir la exposición a la luz. Las cámaras de intemperismo acelerado fueron diseñadas para simular la luz solar natural y se utilizan extensamente en investigación y desarrollo, control de calidad y certificación de materiales. Estas cámaras proporcionan resultados rápidos, repetibles y reproducibles.

Para poder cuantificar las grandes variaciones de contenido de luz ultravioleta en la luz solar, se tomaron cuatro categorías de mediciones con el espectrógrafo. Ahí se incluyen la luz solar directa de verano, la luz solar de invierno, la luz solar filtrada a través del cristal de una ventana normal y la luz filtrada a través de un parabrisas.

Para poder cuantificar los espectros de las diversas pruebas de laboratorio, se tomaron medidas con el espectrógrafo en varios tipos de cámaras aceleradas, incluyendo una cámara de intemperismo acelerado QUV (es decir, cámaras de luz ultravioleta fluorescente y de condensación) y cámaras con luz de arco de xenón. Además, se calcularon los espectros para el aparato acelerado de exposición a la intemperie, conocido como el Concentrador de luz solar natural Q-Trac. Los diversos aparatos acelerados muestran una gran variedad de espectros. Las mediciones sugieren recomendaciones para el uso de diferentes cámaras o diferentes fuentes de luz para las diferentes aplicaciones.

## El espectro de la luz solar

La energía electromagnética de la luz solar normalmente se divide en luz ultravioleta, luz visible y energía infrarroja, como se muestra en la Figura 1. La luz ultravioleta consiste en radiación inferior a 400 nanómetros (nm). La luz visible se define como radiación entre 400 y 760 nm. La energía infrarroja consiste en longitudes de onda, las cuales son más largas que las longitudes de onda rojas visibles, y comienza por encima de 760 nm aproximadamente.

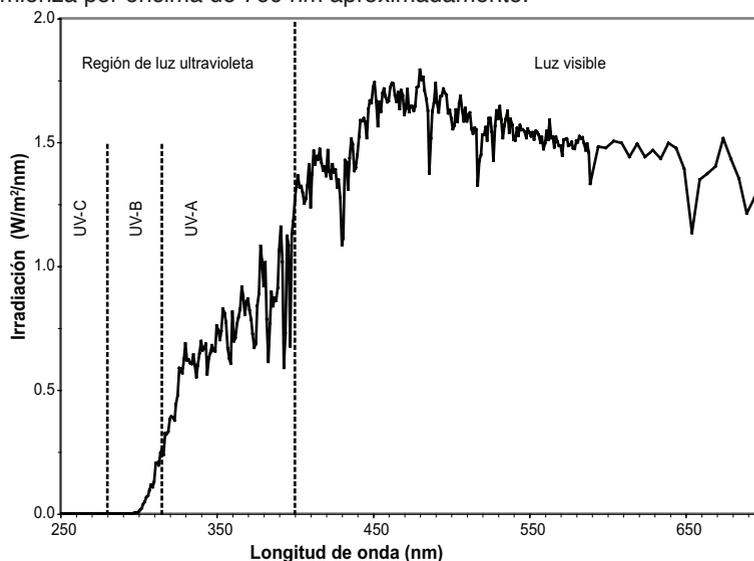


Figura 1- Luz solar.

**Variabilidad de la luz solar.** Dado que la luz ultravioleta se filtra fácilmente a través de la masa de aire, nubes, contaminación, etc., la cantidad y el espectro de la exposición a la luz ultravioleta natural es extremadamente variable. La luz solar varía de un momento a otro durante el transcurso del día. La Figura 2 muestra la distribución de la energía espectral (Spectral Power Distribution; SPD) de la luz solar de espectro completo medida varias veces durante el transcurso del día (dónde y cuándo).

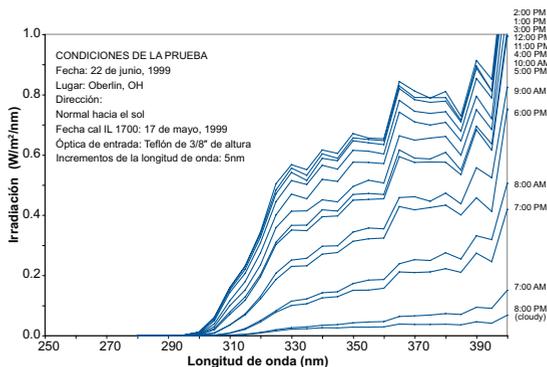


Figura 2- La luz solar durante el transcurso del día.

La SPD de la luz solar también varía durante el transcurso del año. La mayor variabilidad está en la región de la luz ultravioleta. La Figura 3 muestra una comparación de las regiones de luz ultravioleta de la luz solar, medidas en Cleveland, Ohio, EE.UU. a mediodía en:

- El solsticio de verano (el día más largo del año)
- El solsticio de invierno (el día más corto del año)
- El equinoccio de primavera.

Estas mediciones concuerdan con los datos reportados por otros investigadores. Consulte la norma ASTM G173 para obtener un espectro de referencia útil.

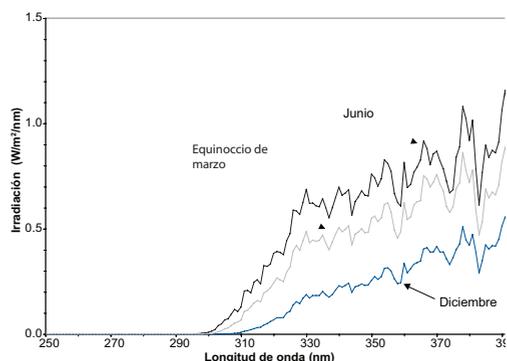


Figura 3- Variación estacional de la luz ultravioleta solar.

Debido a que el sol está más abajo en el cielo durante los meses de invierno, se filtra a través de una masa de aire más grande (Figura 4). Eso introduce dos diferencias importantes entre la luz solar de verano y la de invierno: cambios en la intensidad de la luz y cambios en el espectro. Lo más importante es que la luz ultravioleta de

onda más corta y más dañina se filtra durante el invierno. Por ejemplo, la intensidad de la luz ultravioleta a 320 nm es unas 8 veces superior en verano que en invierno. Además, el límite solar de onda más corta cambia de aproximadamente 295 nm en verano a alrededor de 310 nm en los meses de invierno. Por lo tanto, los materiales sensibles a la luz ultravioleta inferior a 310 nm solamente se degradarían ligeramente, como mucho, durante los meses de invierno. Estos tipos de cambio son especialmente importantes para los materiales poliméricos, como es el PVC.

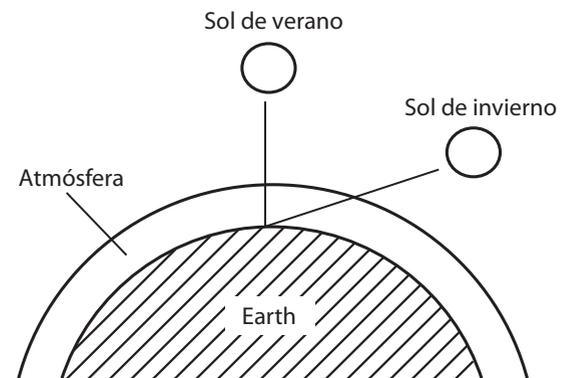


Figura 4- Efecto estacional sobre la filtración atmosférica.

**Sensibilidad espectral.** La cantidad y el tipo de daño al que es susceptible un material dependen de la sensibilidad espectral del material en particular. La sensibilidad espectral es una medida de cómo el daño, causado por una unidad de energía lumínica, varía de acuerdo a la longitud de onda de la luz. La sensibilidad espectral puede variar de un material a otro y materiales similares, formulados para la misma aplicación, pueden tener sensibilidades espectrales significativamente diferentes. La sensibilidad espectral determina si un material es sensible a las longitudes de onda cortas, a las longitudes de onda largas o a ambas.

**Importancia del límite de la longitud de onda corta.** Las reacciones fotoquímicas son causadas por fotones de luz que rompen los enlaces químicos. Para cada tipo de enlace químico hay una luz de longitud de onda de umbral crítica con energía suficiente para causar una reacción. La luz de cualquier longitud de onda más corta que el umbral puede romper el enlace, pero la luz de longitud más larga no puede, independientemente de la intensidad de la luz. Por consiguiente, la longitud de onda corta límite de una fuente de luz es de vital importancia. Por ejemplo, si un polímero en particular sólo es sensible a la luz ultravioleta inferior a 295 nm (el punto límite solar), éste nunca experimentará un deterioro fotoquímico a la intemperie. Si el mismo polímero se expone a una fuente de luz en el laboratorio, la cual tiene un límite espectral de 280 nm, entonces se deteriorará. Por lo tanto, las fuentes de luz, que producen longitudes de onda más corta, producen pruebas más rápidas, pero existe la

posibilidad de un resultado anormal si la cámara tiene un límite de longitud de onda muy por debajo al ambiente de uso final del material.

**Importancia de las longitudes de onda más largas.** En el caso de materiales para interiores, como son las tintas y los colorantes, la luz ultravioleta de onda más larga y la luz visible de onda corta frecuentemente tienen un efecto significativo. La radiación infrarroja (IR) también puede afectar la degradación debido al aumento térmico. Además, la luz infrarroja puede causar la degradación térmica en algunos materiales. Y si bien la luz infrarroja no causa fotodegradación, las temperaturas elevadas que crea conducirán a un aumento de la velocidad de degradación fotoinducida.

## Las fuentes de luz acelerada comparadas con la luz solar

La siguiente discusión sobre las fuentes de luz acelerada se reducirá a la cuestión del espectro. No hablaremos de la estabilidad espectral, los efectos de la humedad, los efectos de los ciclos de exposición ni de la reproducibilidad de los resultados.

Para analizar la utilidad de las fuentes de luz para simular la luz solar, compararemos las fuentes de luz de laboratorio más comunes con lo que llamamos la condición solar máxima: la luz de verano a mediodía, global, a una incidencia normal, el día del solsticio de verano. El máximo solar es la condición más severa que se encuentra en el exterior y, como tal, controla qué materiales fallarán. Es engañoso comparar las fuentes de luz con la llamada "luz solar óptima promedio", que simplemente es un promedio de las mediciones mucho menos dañinas del equinoccio de verano e invierno. Otra comparación engañosa es el "promedio de Miami", que simplemente es el promedio de un año de luz solar en Miami. Todas las gráficas con la leyenda "luz solar" en este artículo hacen referencia al máximo solar.

Pese a la variabilidad inherente de la luz ultravioleta solar, nuestras mediciones asombrosamente muestran poca variación en el máximo solar en diferentes lugares. La Figura 5 muestra el máximo solar medido en tres lugares muy variados.

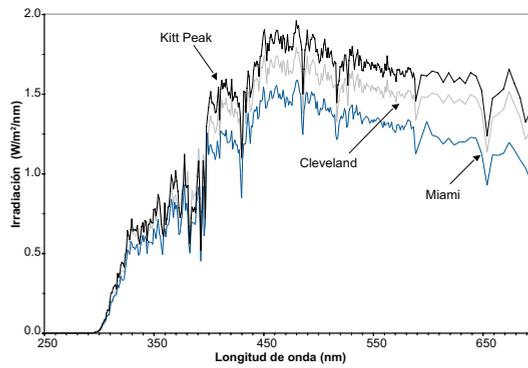


Figura 5- Máximo solar en 3 lugares.

## Dos métodos diferentes

La cámara de intemperismo acelerado QUV y la cámara con luz de arco de xenón son las cámaras comúnmente usadas para probar el intemperismo acelerado y la estabilidad a la luz. Dichas cámaras se basan en dos métodos completamente diferentes.

Las cámaras con luz de arco de xenón, como la cámara Q-Sun, reproducen el espectro completo de la luz solar, incluyendo la luz ultravioleta (UV), la luz visible y la luz infrarroja (IR). La luz de arco de xenón esencialmente es un intento por reproducir la luz solar misma.

Las cámaras QUV no intentan reproducir el espectro completo de la luz solar, sino más bien sólo los efectos dañinos de la misma. Eso se logra confinando la emisión primaria de las lámparas fluorescentes a la porción ultravioleta del espectro. Este método es eficaz debido a que la luz ultravioleta de onda corta causa casi todo el daño a los materiales duraderos expuestos a la intemperie. La Figura 6 muestra la comparación entre la luz solar, la luz de arco de xenón y la luz ultravioleta fluorescente.

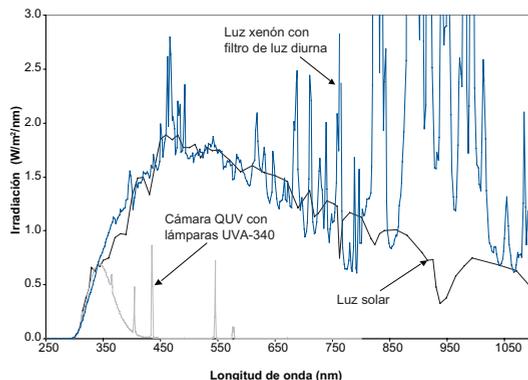


Figura 6- Luz solar, luz de arco de xenón y luz ultravioleta fluorescente.

Además de las consideraciones técnicas, existen ramificaciones prácticas para estos diferentes métodos. Las cámaras con luz de arco de xenón requieren mucha energía eléctrica para producir el espectro completo. Por lo tanto, también generan mucho calor a partir de las porciones de luz visible y luz infrarroja del espectro. Dicho calor debe ser eliminado mediante un sistema de enfriamiento por agua o por aire. Por consiguiente, las diferencias en los costos de operación de los dos tipos de cámaras son significativas. Para obtener información detallada, consulte el Boletín técnico LU-8009 de Q-Lab, *QUV y Q-Sun: una comparación de dos métodos eficaces para probar el intemperismo acelerado y la estabilidad a la luz*.

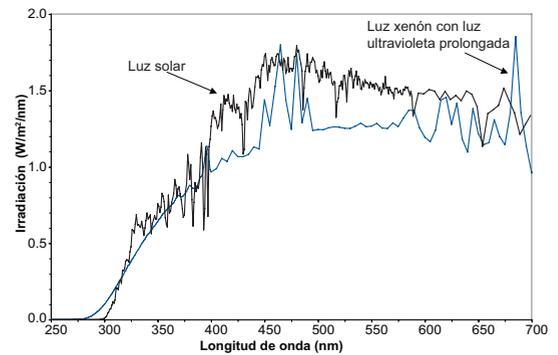
**Lámparas de arco de xenón.** La luz de arco de xenón de espectro completo (ISO4892-2, ISO11341, ASTM G155, SAE J2412) permite que el usuario pruebe los daños causados por la luz ultravioleta de onda corta, así como el daño de la longitud de onda más larga como son la decoloración y el cambio de color. Existen dos factores principales a considerar cuando se utiliza una cámara con luz de arco de xenón: el efecto de los filtros y el control de la irradiación.

*Filtros de luz de arco de xenón para las simulaciones a la intemperie.*

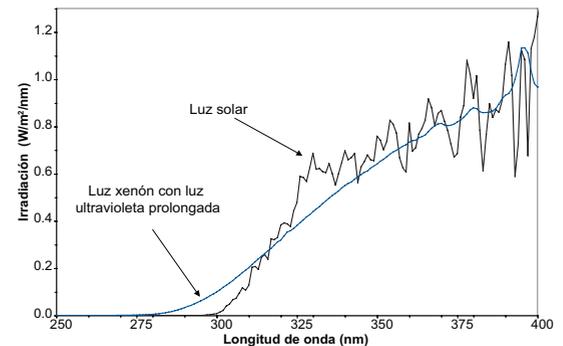
Dado que la radiación de un arco de xenón sin filtrar contiene demasiada luz ultravioleta de onda corta para permitir la correlación útil con las exposiciones naturales en la superficie terrestre, las cámaras con luz de arco de xenón emplean diversos tipos de filtros para reducir la radiación no deseada y lograr un espectro apropiado. La mayoría de los tipos de filtros utilizados afectan principalmente la porción de longitud de onda corta del espectro. Dado que los efectos nocivos de la luz ultravioleta son inversamente proporcionales a la longitud de onda, es importante que la longitud de onda límite se adapte al ambiente de servicio. El tipo de filtro utilizado depende del material que se va a probar y la aplicación de uso final.

Existen tres categorías generales de filtros aptos para utilizar en la cámara con luz de arco de xenón. Dentro de cada categoría general puede encontrar varios tipos diferentes de filtros. Cada filtro consiste en un pedazo de vidrio especial diseñado para tener una transmisión particular.

Los filtros de luz diurna producen espectros casi equivalentes a la luz solar directa de verano a mediodía y cumplen con los requisitos espectrales de las normas ISO 4892, ISO 11341, ASTM G155, SAE J1960 y SAE J2527. Se recomiendan para probar materiales diseñados para uso exterior y permiten obtener la mejor correlación entre la luz de arco de xenón y las exposiciones naturales en el exterior. Vea la Figura 7 y la Figura 7A.

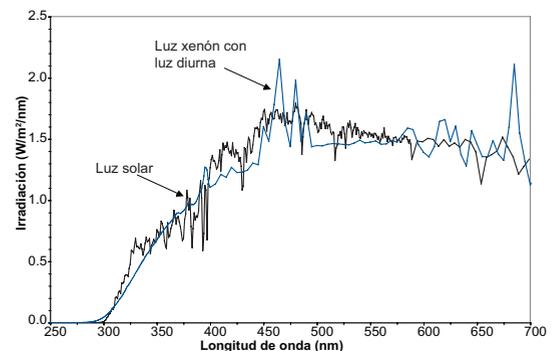


**Figura 7- Luz de arco de xenón con filtros de luz ultravioleta prolongada.**

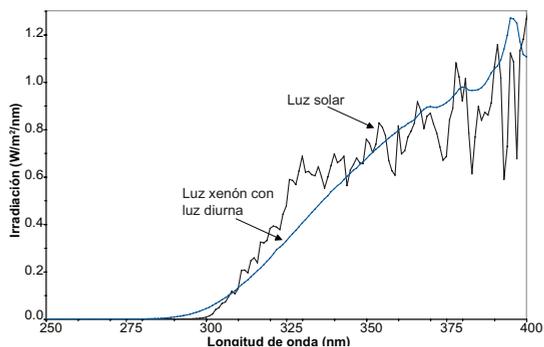


**Figura 7A- Luz de arco de xenón con filtros de luz ultravioleta prolongada en la luz ultravioleta.**

Los filtros de luz ultravioleta prolongada permiten un exceso significativo de luz ultravioleta por debajo del límite de luz solar natural en la superficie terrestre. Los filtros de luz ultravioleta prolongada frecuentemente se utilizan para producir una degradación más rápida que los filtros de luz diurna. Se requieren en muchos métodos de prueba automotriz. También se pueden utilizar para reproducir espectros extraterrestres para aplicaciones aeroespaciales. Vea la Figura 8 y la Figura 8A.



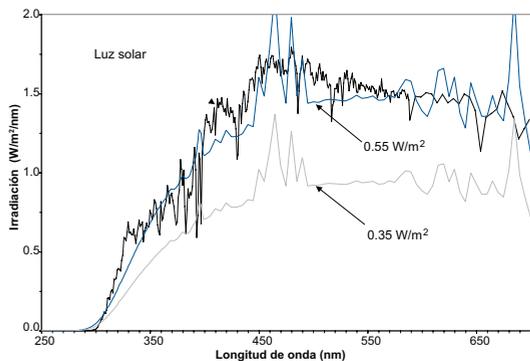
**Figura 8- Luz de arco de xenón con filtros de luz diurna.**



**Figura 8A- Luz de arco de xenón con filtros de luz diurna en la luz ultravioleta.**

**Control de irradiación.** Para controlar la intensidad de la luz, las cámaras con luz de arco de xenón modernas cuentan con un sistema de monitoreo de la luz para compensar el deterioro inevitable de la producción lumínica de una lámpara obsoleta. El ajuste más común de la irradiación es 0.35 ó 0.55 W/m<sup>2</sup> a 340 nm. La Figura 9 muestra cómo se comparan estos dos ajustes con el máximo solar. Por un lado, 0.55 es comparable a la luz solar de verano; por el otro, 0.35 es comparable a la luz solar de invierno. No obstante, debido a razones históricas, 0.35 es el ajuste de uso más común.

Otro ajuste de la irradiación que puede utilizar es 0.68 W/m<sup>2</sup> a 340 nm. Esa es la irradiación que se asemeja más al máximo solar.



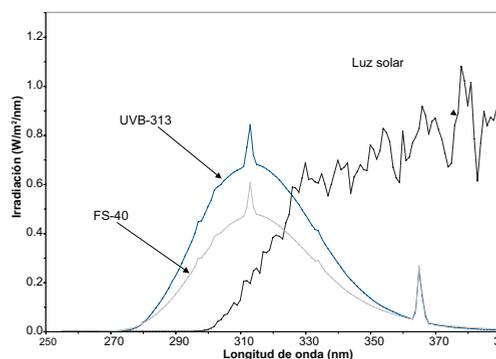
**Figura 9- Efecto del ajuste de la irradiación.**

**Luz ultravioleta fluorescente.** A diferencia de las luces de arco de xenón, las cámaras QUV (ISO4892-3, ISO 11507, ASTM G154, SAE J2020) utilizan diferentes tipos de lámparas de luz ultravioleta, con diferentes espectros para las diferentes aplicaciones de exposición.

**Lámparas FS-40.** A principios de la década de 1970, la lámpara FS-40 fue la primera lámpara QUV que logró una amplia aplicación. Esta lámpara actualmente se especifica en algunas especificaciones automotrices, en particular para recubrimientos. Esta lámpara ha demostrado una buena correlación con la exposición a la intemperie para la retención de brillo en los recubrimientos y para la integridad del material de los plásticos. Sin embargo, la producción

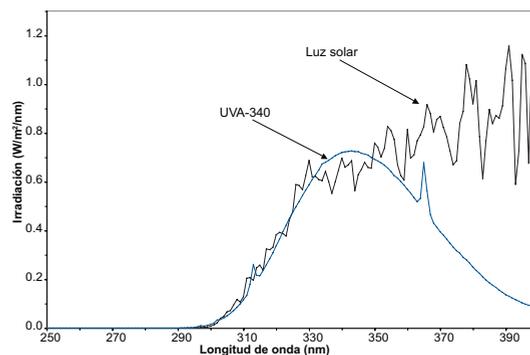
de una longitud de onda corta inferior al límite solar puede causar resultados anormales, especialmente para la retención de color de los materiales plásticos y textiles.

Las lámparas UVB-313 se introdujeron en 1984. La lámpara UVB-313 esencialmente es la segunda generación de las lámparas FS-40. Tiene la misma SPD que la lámpara FS-40, pero con una potencia más elevada y estable. La Figura 10 muestra la SPD de la luz solar comparada con la lámpara UVB-313 y la FS-40. Debido a la potencia superior, la lámpara UVB-313 produce una aceleración significativamente mayor que la lámpara FS-40 para la mayoría de los materiales. Es particularmente útil para el control de calidad y las aplicaciones de investigación.



**Figura 10- Lámparas UVB-313 y FS-40.**

Las lámparas UVA-340 fueron diseñadas para mejorar la correlación con las exposiciones naturales. La lámpara UVA-340 se usa extensamente tanto para plásticos como para recubrimientos, y mejora en gran medida la correlación que se logra con las lámparas QUV. La Figura 11 muestra la lámpara UVA-340 comparada con el máximo solar. Esta lámpara es una excelente simulación de la luz solar desde alrededor de 370 nm hasta el límite solar de 295 nm.



**Figura 11- Lámpara UVA-340 y luz solar.**

### Concentrador de luz solar natural Q-Trac.

Los aparatos de intemperismo acelerado en el exterior, que usan la luz solar natural como su fuente de luz, se han usado durante muchas décadas. Las versiones sencillas y tempranas fueron diseñadas para seguir el sol de la mañana a la noche y así poder maximizar la cantidad de luz solar que recibiría un espécimen expuesto a la intemperie. Posteriormente, se agregaron espejos para concentrar la luz solar en los especímenes de prueba para obtener una mayor aceleración. Esta técnica de aceleración a través de la concentración solar fue estandarizada en las normas ISO 877, ASTM G90 y SAE J1961, entre otras.

El concentrador Q-Trac y otros concentradores de luz solar utilizan una serie de 10 espejos para reflejar la luz solar de espectro completo. El espectro que reciben en realidad los especímenes de prueba se ve afectado por el hecho de que el aparato utiliza sólo el rayo directo de la luz solar y que la reflectividad de los espejos no es perfectamente eficiente. La Figura 12 muestra una comparación de la luz solar natural y el espectro de Q-Trac.

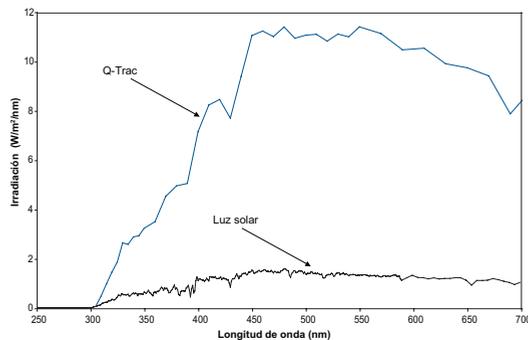


Figura 12- El concentrador Q-Trac y la luz solar.

### Efecto de filtrado del cristal sobre la luz solar

**Cristal de ventana normal.** Cualquier tipo de cristal hace las veces de filtro sobre el espectro de la luz solar. Las longitudes de onda más cortas y dañinas son las más afectadas. La Figura 13 muestra la luz solar directa comparada con la luz solar filtrada a través del cristal de una ventana ordinaria, sencilla, sin tinte, con un grosor de 0.125 pulgadas. El cristal ordinario esencialmente es transparente a la luz mayor a 370 nm. No obstante, el efecto de filtrado se vuelve más pronunciado a medida que disminuyen las longitudes de onda. De hecho, las longitudes de onda inferior a 310 nm, que son más dañinas, se filtran por completo.

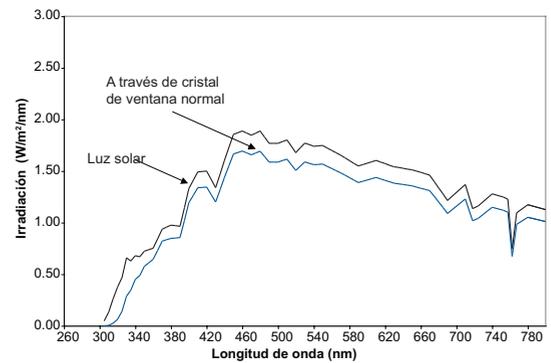


Figura 13- La luz solar a través del cristal de una ventana.

**Parabrisas.** Los parabrisas son más gruesos que el cristal de las ventanas. Con frecuencia tienen algún polarizado y el cristal de los parabrisas normalmente contiene una capa de plástico laminado. La Figura 14 muestra una comparación de la luz solar directa con la luz solar a través del cristal de una ventana y la luz solar a través de un parabrisas. Todos los anteriores actúan para mejorar la eficiencia de filtrado de un parabrisas y se filtra casi toda la luz ultravioleta más dañina. La Figura 15 muestra la SPD de cuatro tipos diferentes de parabrisas, con diferentes combinaciones de grosor y polarizado.

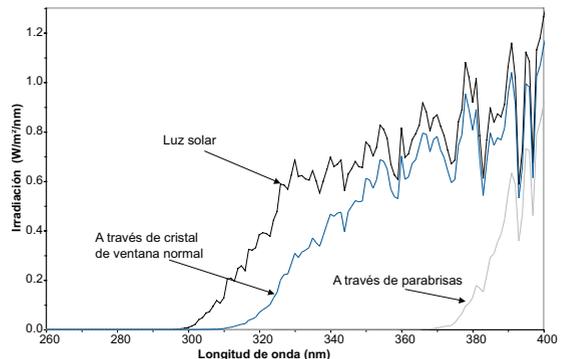


Figura 14- La luz solar a través del parabrisas.

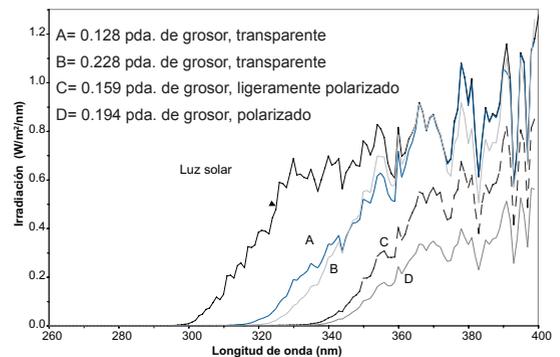
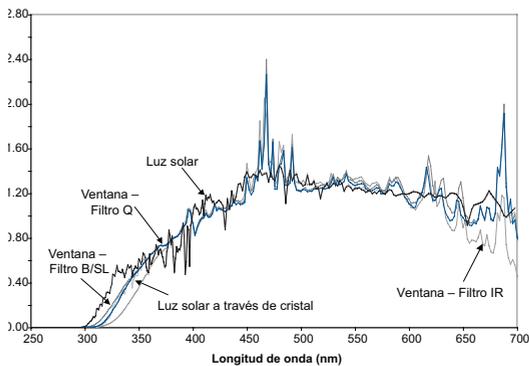


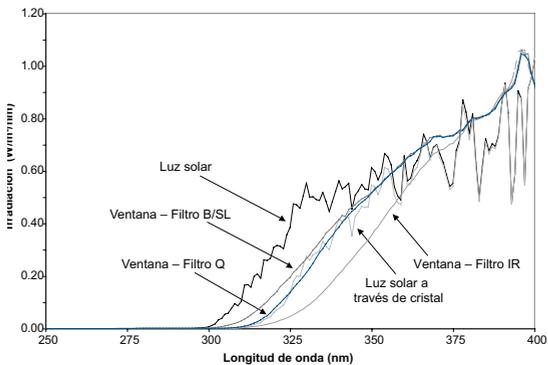
Figura 15- La luz solar a través del parabrisas.

## Las fuentes de luz acelerada y la luz solar a través del cristal

**Luz de arco de xenón.** La luz de arco de xenón (ISO 4892-2, ISO 105 B02, ASTM G-155, SAE J2527, AATCC TM16-3) adecuadamente filtrada brinda la mejor simulación para la luz solar a través del cristal de una ventana. Sin embargo, no existe ningún "cristal de ventana estándar" único. Dado que la transmisión varía debido al grosor, la composición química, etc., se han desarrollado varios filtros de cristal de ventana para la cámara con luz de arco de xenón Q-Sun.

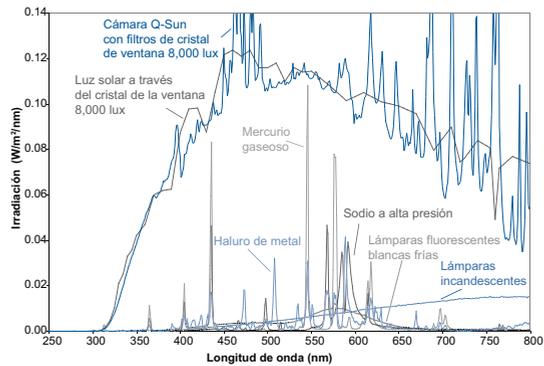


**Figura 16- Luz de arco de xenón con filtros de cristal de ventana.**



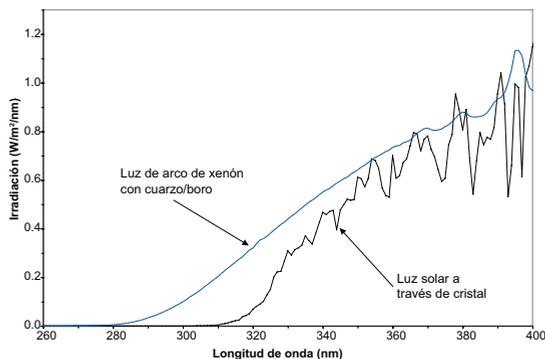
**Figura 16A- Luz de arco de xenón con filtros de cristal de ventana en la luz ultravioleta.**

Los espectros, producidos por las cámaras con luz de arco de xenón usando filtros de cristal de ventana, también cubren la mayoría de las longitudes de onda que podrían provenir de las diversas fuentes de luz artificial utilizadas en ambientes interiores (luz fluorescente blanca fría, etc.), por eso es adecuada para la mayoría de las aplicaciones interiores. Vea la Figura 17.



**Figura 17- Las SPD para luces interiores normales, comparado con Q-Sun.**

Nota: Algunos métodos de prueba automotriz para materiales interiores, como son textiles y molduras flexibles, todavía especifican el filtro de luz ultravioleta prolongada. Las normas SAE J1885 y SAE J2412 son ejemplos de ello. La Figura 18 muestra este método con luz de arco de xenón comparado con la luz solar a través de un cristal ordinario. Obviamente, el filtro de luz ultravioleta prolongada permite el paso de una cantidad excesiva de luz ultravioleta de onda corta y la correlación con los resultados del mundo real deben ser examinados cuidadosamente.



**Figura 18- La luz de arco de xenón y la luz solar a través del cristal.**

## Conclusiones y advertencias

La correlación entre los resultados de las pruebas de laboratorio y de la exposición natural probablemente siempre será controversial. El usuario debe aprender a decidir entre varias opciones.

Dado que existen varios tipos de cámaras de laboratorio con múltiples lámparas y filtros, ningún aparato por sí solo es perfecto para cada aplicación. La luz ultravioleta de onda corta normalmente es mejor para probar la degradación de los polímeros, mientras que el método de espectro completo con frecuencia es más indicado para el cambio de color de los pigmentos y colorantes.

Las fuentes de luz que producen luz ultravioleta de onda muy corta rinden resultados rápidos, pero no necesariamente son precisos. Normalmente cuando están equivocados, lo están por el lado seguro, es decir, que los resultados son demasiado severos. Las fuentes de luz que eliminan las longitudes de onda por debajo del límite solar de 295 nm brindarán resultados más precisos, pero el precio del incremento en la correlación normalmente es una menor aceleración. Como Fischer ha demostrado, la velocidad y la precisión de la prueba están inversamente relacionadas.

Asimismo, es necesario indicar que pese al interés actual en la energía lumínica, el espectro de un aparato de prueba solamente es una pieza del rompecabezas. Con una cámara acelerada, es posible programar diversos parámetros: el espectro, la humedad, la temperatura y el ciclo de la prueba. Asimismo, los parámetros que elegimos son, hasta cierta medida, arbitrarios. Ningún ciclo o aparato de prueba puede reproducir todas las variables encontradas a la intemperie en diferentes climas, altitudes y latitudes. Por lo tanto, incluso la cámara más sofisticada realmente es un aparato de análisis. La utilidad real de las cámaras aceleradas es que pueden proporcionar indicaciones confiables y relativas en cuanto a qué materiales se desempeñan mejor bajo un conjunto específico de condiciones.

## Reconocimientos

Los autores son responsables de la veracidad de este artículo. No obstante, queremos reconocer la ayuda de:

Kit Peak National Observatory  
Ohio Spectrographic Service  
3M Company  
BASF Corporation  
Americhem Corporation

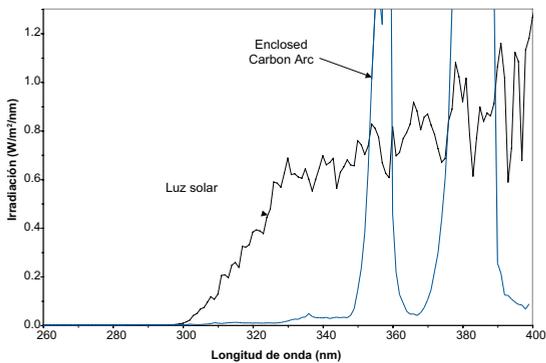
## Nota de referencia

Este artículo se presentó originalmente en la Society of Plastics Engineers Automotive RETEC en 1987, y se publicó como el boletín técnico Q-Panel: *la luz solar, la luz ultravioleta y el intemperismo acelerado* en 1994.

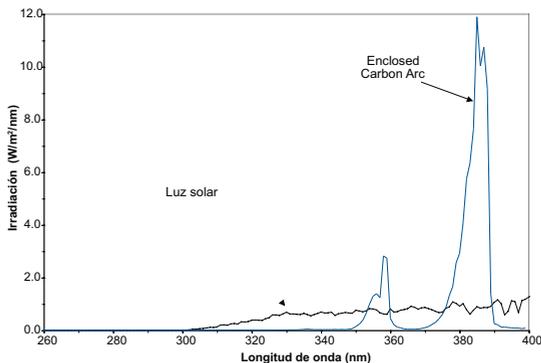
El artículo fue modificado en el 2007 y publicado nuevamente como *Prueba de la estabilidad a la luz solar, el intemperismo y la luz*.

## Apéndice 1

*Luz de arco cerrado con electrodo de carbón* (ASTM G153). El uso de la luz de arco cerrado con electrodo de carbono como simulador solar para la prueba de intemperismo y solidez a la luz se remonta a 1918. Cuando se compara la potencia de la luz de este aparato con la luz solar, es evidente que existen limitantes. La Figura 19 muestra la SPD de la luz ultravioleta de la luz solar de verano (máximo solar) comparado con la luz de arco cerrado con electrodo de carbono. La potencia de la luz ultravioleta de la luz de arco cerrado con electrodo de carbono consiste primordialmente de dos picos de energía extremadamente grandes, con una potencia muy pequeña menor a 350 nm. La Figura 20 muestra la misma comparación de SPD graficada en una escala vertical diferente para incluir toda la potencia de los picos. Dado que es deficiente en la porción de onda corta del espectro, la luz de arco cerrado con electrodo de carbono produce ensayos muy lentos en la mayoría de los materiales, y una mala correlación en los materiales sensibles a la luz ultravioleta de longitud de onda corta.



**Figura 19-** La luz de arco cerrado con electrodo de carbono y la luz solar.

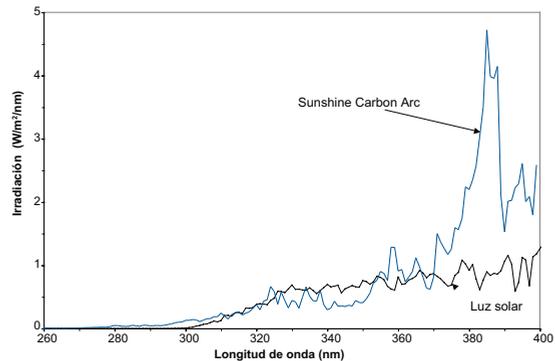


**Figura 20-** La luz de arco cerrado con electrodo de carbono y la luz solar.

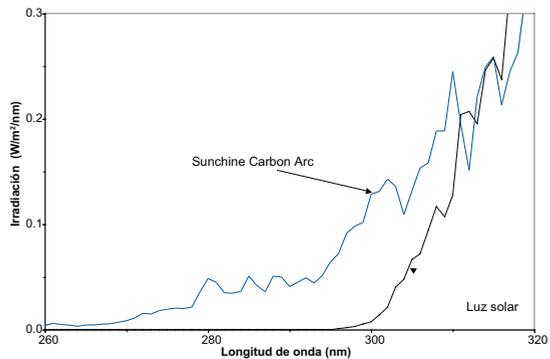
*Luz de arco abierto con electrodo de carbono* (ISO 4892-4, ASTM G152). La introducción de la luz de arco abierto con electrodo de carbono en 1933 fue un avance sobre la luz de arco cerrado con electrodo de carbono. La Figura 21 muestra la SPD de la luz ultravioleta de la luz de arco abierto con electrodo de carbono (con filtros Corex D). Si bien ya es más similar a la

luz solar que la luz de arco cerrado con electrodo de carbono, todavía existe un pico de energía extremadamente grande, mucho mayor a la luz solar, de unos 390 nm.

Sin embargo, existe un problema más grave con el espectro de la luz de arco abierto con electrodo de carbono en las longitudes de onda corta. Para ilustrar eso, es necesario cambiar la escala para expandir el extremo inferior de la gráfica. La Figura 22 muestra el máximo solar comparado con la luz de arco abierto con electrodo de carbono entre 260 nm y 320 nm. La luz de arco con electrodo de carbono emite una gran cantidad de energía en la porción C de la luz ultravioleta del espectro, muy por debajo del límite solar normal de 295 nm. La radiación de este tipo es realista para el espacio exterior, pero nunca se encuentra en la superficie terrestre. Estas longitudes de onda corta pueden causar una degradación poco realista cuando se compara con las exposiciones naturales.



**Figura 21-** La luz de arco abierto con electrodo de carbono y la luz solar.



**Figura 22-** La luz de arco abierto con electrodo de carbono y la luz solar.

## Apéndice 2

**Experimental.** Se utilizó un espectrógrafo para medir la irradiación espectral que las muestras de prueba recibieron al estar expuestas a la luz solar o en las cámaras aceleradas. La irradiación es la velocidad con la cual la energía lumínica cae sobre el área de unidad de una superficie. La irradiación espectral es la distribución de la irradiación con respecto a la longitud de onda. En este caso, la irradiación se mide en cada banda de longitud de onda de 1 nm, en toda la región de interés de la longitud de onda. Las curvas resultantes de la distribución de la energía espectral (SPD) se trazaron como gráficas de irradiación opuesta a la longitud de onda. Las mediciones de la luz solar se tomaron a mediodía con el sensor en incidencia normal con respecto al sol y un sistema propulsión ecuatorial para rastrear la luz solar. El sensor veía el cielo de entrada, de modo que se midió la luz solar global completa. Las mediciones de las fuentes de luz acelerada se tomaron con el sensor en la misma posición como en las muestras de prueba ordinarias, de modo que la irradiación medida sería la misma que recibe la muestra.

Todas las mediciones se tomaron con el mismo instrumento para asegurar que las diversas curvas de SPD fueran estrictamente comparables. Una fuente de error común en este campo es intentar comparar las curvas de SPD generadas por diferentes espectrógrafos, dados los diferentes tipos de óptica de entrada, los diferentes pasos de banda de la longitud de onda o, bien, las simples limitantes en las calibraciones ultramodernas de irradiación espectral de fuentes de luz difusa, como son el cielo o las luces fluorescentes.

El instrumento, que se muestra en la figura adjunta, fue un espectrógrafo International Light IL 700 No. 504, que consiste en los componentes que se muestran a continuación:

- **Óptica de entrada:** IL-2WE Double Wide Eye, difusor de coseno con lente de cuarzo doble para un ángulo de visualización ancho.
- **Monocromador:** Kratos GM-200, monocromador con rejilla de difracción doble y paso de banda calibrado a 1.0 nm, luz difusa menor a 1 parte por millón.
- **Detector:** Fotomultiplicador PM 270C, con una respuesta S-5, operada con un suministro de energía IL 760.

• **Picoamperímetro:** Radiómetro IL 700A.

• **Calibración:** Microvatio por centímetro cuadrado por nanómetro, retrazable a la Oficina Nacional de Normas. Certificado de calibración: 404045901.

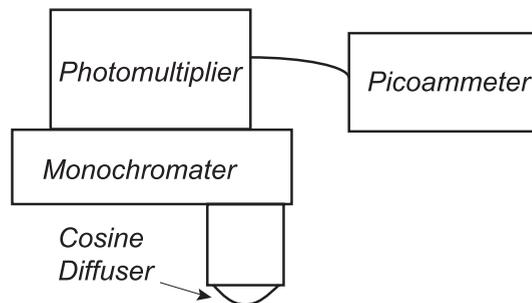


Figura 23- Diagrama del espectrógrafo





## Q-Lab Corporation

**Q-Lab Headquarters  
& Instruments Division**  
800 Canterbury Road  
Westlake, OH EE.UU.  
Tel. +1-440-835-8700  
Fax +1-440-835-8738

**Q-Lab Europe, Ltd.**  
Express Trading Estate  
Stone Hill Road, Farnworth  
Bolton BL4 9TP Inglaterra  
Tel. +44 (0) 1204-861616  
Fax +44 (0) 1204-861617

美国**Q-Lab**公司中国代表处 传  
中国上海市共和新路3388号永鼎大厦1001室  
邮编: 200436  
电话: +86-21-58797970, +86-21-56030380  
传真: +86-21-58797960

[www.q-lab.com](http://www.q-lab.com)  
[info@q-lab.com](mailto:info@q-lab.com)

LU-0822.2  
© 2008 Q-Lab Corporation.  
Todos los derechos reservados.