

Diseño e Implementación de un Sistema de Software para Control y Automatización de un Escatómetro

Marcos Esteban Gerardo Soria¹

¹Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología,
Universidad Nacional de Tucumán. Av. Independencia 1800. San Miguel de Tucumán.
Tucumán, Argentina.
marcossoria@gmail.com

Resumen. En nuestros días, la utilización de herramientas y desarrollos de la Ingeniería de Software se lleva a cabo en áreas muy distintas en cuanto a temática y a complejidad. La demanda de optimización de los procesos es cada vez más exigente y la interdisciplina juega un papel crucial en esta tarea.

El presente trabajo de graduación, que consiste en el diseño y la implementación de un sistema de software para control y automatización de un escatómetro, surge a partir de la necesidad de automatizar el proceso de medición de un escatómetro, dispositivo experimental que permite caracterizar la distribución espacial de la luz redireccionada por un medio o material difusor.

La implementación del sistema de software permite manipular el posicionamiento de un sensor óptico y el accionamiento de un par de motores paso a paso para controlar los movimientos del sensor y de la muestra de material difusor a estudiar. Además, realiza el procesamiento de la información capturada por el sensor y presenta los resultados en formato adecuado para su posterior análisis.

Palabras clave: software de automatización; escatómetro automático; materiales difusores; distribución espacial de luz difundida.

1. Introducción.

En el marco de un proyecto de estudio de medios y materiales difusores y de la necesidad de determinar las funciones de distribución bidimensional de transmitancia y de reflectancia de distintos materiales de interés, surge la necesidad de contar con un dispositivo de medición automatizado, adecuado a las necesidades del proyecto.

Los sistemas de medición comerciales son muy sofisticados, no siempre se adaptan a las necesidades específicas y son inaccesibles por su costo. A partir de esta problemática, en el Laboratorio de Óptica del Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión (FaCET, UNT), dentro del marco del Proyecto “Configuraciones espaciales y temporales de luminancia que inducen stress visual” CIUNT E26/410-3, 2008-2012, dirigido por la Dra. Mirta Jaén, se desarrolló un sistema de menor costo que brinda prestaciones equivalentes.

El sistema en cuestión proporciona el control del movimiento de un sensor óptico y el posicionamiento de una muestra de material difusor en diferentes orientaciones respecto a la dirección del haz de luz incidente. Para ello se incorporan un par de motores paso a paso que permiten posicionar el sensor ajustando el ángulo de captura y orientar la muestra en diferentes ángulos respecto al eje óptico del sistema.

Por otra parte, el desarrollo del software permitió la configuración de los parámetros de trabajo del sensor, la adquisición de los datos capturados, su almacenamiento y posterior visualización y manipulación en un entorno accesible al usuario. El sistema completo puede verse esquemáticamente en el diagrama de bloques de la Fig. 1.

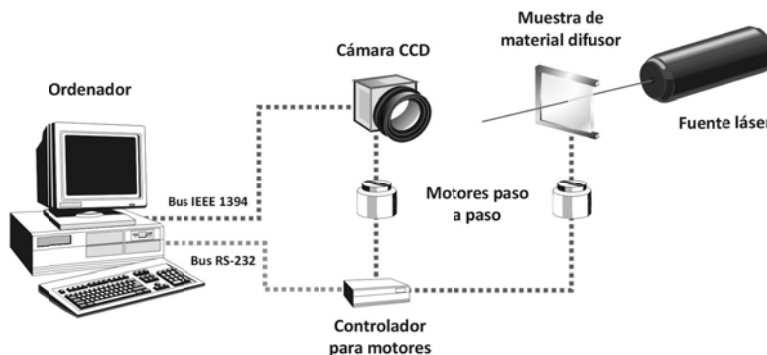


Fig. 1. Diagrama en bloques del sistema de medición.

Para el presente desarrollo se aplicaron metodologías específicas del área tecnológica de la computación y la electrónica, con el objetivo de aportar conocimientos y fundamentos científicos que sirvan de base para la caracterización e implementación de instrumentos en el área de investigación científico-tecnológica específica.

2. Marco teórico.

2.1. Difusión de la luz.

La difusión de la luz, también llamada esparcimiento (scattering, en inglés), es consecuencia de la interacción de la luz, una onda electromagnética que se propaga, con un medio material que presenta heterogeneidades ópticas. Como consecuencia de este proceso, una parte de la energía transportada abandona su dirección original para tomar una dirección diferente con una cierta probabilidad. Se altera así la dirección de propagación de los haces de luz pero, a diferencia de lo que sucede en los procesos de refracción y reflexión normales, la nueva dirección del haz puede ser, en principio, cualquiera. Es un proceso básicamente probabilístico y en esto se diferencia claramente de los procesos normales de reflexión y refracción [1].

En general, los estudios sobre los procesos de difusión se enfocan en hallar la distribución espacial final de la intensidad luminosa, tanto para elementos simples como para los casos más complejos. La difusión es un proceso volumétrico que se produce por la interacción de la onda electromagnética (luz) incidente con los centros dispersores del interior del medio difusor, pero el término se ha generalizado y se utiliza también para el efecto, de características similares, producido por imperfecciones en superficies, por ejemplo, de vidrios esmerilados [2]. Así, muchos autores distinguen entre procesos de “reflexión especular y refracción normal” por un lado y de “reflexión y refracción difusa” por otro [2].

2.2. ¿Qué es un escatómetro?

Un escatómetro (del inglés scatter-meter) es un dispositivo óptico que permite, básicamente, medir la distribución espacial de la luz difundida por un medio o material difusor. Una muestra del material se coloca en un soporte especialmente diseñado y se ilumina con una fuente de luz colimada¹ colocada a una cierta distancia. Un sensor, siempre orientado hacia la muestra, se desplaza sobre un arco de circunferencia alrededor de la misma y registra la radiación reflejada o transmitida en cada dirección, según se indica en la Fig. 2.

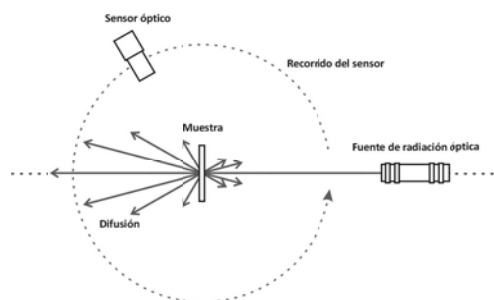


Fig. 2. Esquema elemental de un escatómetro.

Para el diseño del sistema se utilizó, como fuente de radiación, un láser HeNe [3] (628nm, 5mW), y como sensor óptico, una cámara CCD modelo GuppyTM F080B [4] de la empresa alemana Allied Vision

¹Luz colimada es aquella cuyos haces son paralelos entre sí, esparciéndose muy lentamente al propagarse. Una fuente laser es muy colimada por el proceso mismo de producción de la luz, la emisión estimulada.

Technologies, cuya programación fue posible utilizando el kit de desarrollo de software AVT FirePackage™ del mismo fabricante [5]. Éste kit brinda soporte para integración con la tecnología .NET™ de Microsoft™ [6], pudiendo ser integrado en lenguajes de programación de la suite MS Visual Studio™ [7], por ejemplo. En particular ésta última presenta algunas ventajas significativas, como ser la migración sin costo alguno a plataformas móviles, a fin de facilitar la implementación del sistema para su uso en mediciones de campo.

En este proyecto en especial, es de interés caracterizar las propiedades espaciales de transmisión y reflexión de materiales difusores translúcidos planos y/o volumétricos, que contienen partículas pequeñas, aleatoriamente distribuidas, que actúan como centros dispersores del haz de luz incidente. Se trabaja sólo en el rango visible, pero extensiones al infrarrojo y al ultravioleta son de gran aplicación en agricultura de precisión, por ejemplo.

3. Dispositivo experimental.

El dispositivo consta de una plataforma en la que se fija, en un extremo la fuente de radiación óptica, y en el otro, el eje de rotación de la cámara y en forma concéntrica el eje de rotación de la muestra, tal como se puede apreciar en la Fig. 3. El motor que mueve la muestra se encuentra debajo de su eje, y está acoplado mecánicamente directo a él, mientras que el motor que mueve el brazo que sostiene la cámara se encuentra en medio de la parte inferior a la plataforma, utilizando una correa para acoplarse al eje de rotación. La fuente lumínica se encuentra en el extremo opuesto y no posee movilidad alguna.

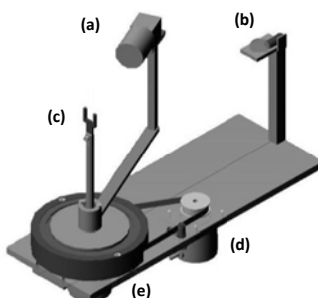


Fig. 3. Dispositivo escatómetro, sus componentes: (a) Cámara CCD; (b) Fuente lumínica; (c) Soporte para la muestra; (d) Motor para la cámara; (e) Motor para la muestra.

Tanto la cámara como la muestra y la fuente de radiación se encuentran en un mismo plano y tienen un mismo eje óptico, según se muestra en el esquema de la Fig. 4, para poder realizar correctamente la medición,



Fig. 4. Vista lateral del sistema, donde se representa el eje óptico de los componentes. (No corresponde a una posición de medición)

Todo este conjunto, a su vez, se monta sobre una mesa óptica para darle la estabilidad necesaria a todo el sistema mecánico, absorbiendo de esa manera las vibraciones producidas por el movimiento de las piezas, asegurando la máxima fidelidad en las mediciones.

4. Algoritmo de medición.

Desde una visión macroscópica del procedimiento, los pasos a seguir en la medición son los siguientes:

Posicionamiento de la cámara y captura de una imagen. Antes de realizar la toma de una imagen, la cámara debe ser posicionada correctamente. Se debe tener en cuenta que al momento de la captura, las oscilaciones producidas por el giro del motor que mueve la cámara ya deben estar amortiguadas, por lo que este detalle representa un punto crítico en el diseño del controlador de los motores.

Luego de establecida la posición de captura, se procede a obtener una imagen, para lo cual se utilizarán las funciones de programación provistas por el fabricante, y que deben ser integradas en el lenguaje en el que se implementará el software.

Determinación de la validez de la imagen. Para este paso se define un rango para la cantidad de píxeles saturados de la imagen capturada. Si esta cantidad está dentro del rango, la imagen se considera válida. Si está por debajo, se aumenta el tiempo de exposición y se toma una nueva captura. Por el contrario, si está por encima, se disminuye el tiempo de exposición para luego tomar otra captura.

Se debe tener especial cuidado en ésta última situación ya que si el valor del tiempo de exposición es el mínimo admisible, la cámara se encuentra expuesta a un exceso de radiación, generalmente al pasar frente al haz directo de la fuente. Para evitar posibles daños en el sensor pueden utilizarse filtros o pantallas que atenúen el haz incidente.

Selección del área central de la imagen. Para procesar la imagen capturada se utiliza sólo una muestra de la misma, correspondiente al área central, asumiendo que la luz difundida se distribuye en forma simétrica sobre el sensor. La razón fundamental por la que se utiliza sólo el área central de la imagen es para evitar la superposición en las mediciones contiguas, debido a que el ángulo de paso de la cámara es muy pequeño, de modo tal que no se obtenga información redundante. La Fig.5 muestra esta situación.

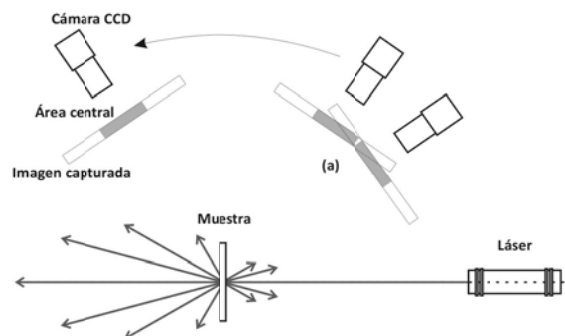


Fig. 5. Superposición de imágenes en posiciones contiguas. (a) Al tomar sólo el área central (sombreada), éstas no se superponen.

Cálculo del valor promedio del nivel de gris² por bandas verticales. Luego de definir las dimensiones del área central, ésta se divide en bandas verticales y se calcula el nivel de gris promedio para las mismas. Cada uno de estos promedios se asigna al punto central de la banda y representa un valor medido.

La variación del tiempo de exposición en cada captura es necesaria para lograr que el sistema sea igualmente sensible en todo el rango de medición, de esta manera los valores promedios de nivel de gris son uniformes en las diferentes tomas y al dividirlos matemáticamente en el tiempo de exposición se recupera el valor real de la intensidad para cada ángulo. La expresión final de este valor se define en la ecuación (1).

$$v_k = \frac{\sum_{i=1}^{h,b} p_{i,j}}{h*b} \quad , k = 1, \dots, n \quad (1)$$

El valor $p_{i,j}$ corresponde al nivel de gris del píxel ij ; h y b la altura y el ancho, respectivamente, de la banda vertical. El tiempo de exposición $t_{shutter}$ es el tiempo de registro de la captura. Este mismo cálculo se realiza para las n bandas verticales del área central, obteniéndose n valores medidos en cada captura. Esto significa que se aprovecha cada píxel de la cámara como sensor, disminuyendo la distancia entre mediciones consecutivas e incrementando, por lo tanto, la sensibilidad del sistema.

Asignación del ángulo de captura de cada valor promedio. La segunda variable a determinar en la medición es el ángulo de captura respecto al comienzo de carrera de la cámara sobre el plano de medición. Suponiendo una relación lineal entre el ángulo y las distancias entre píxeles del sensor CCD, definida por el objetivo de la óptica utilizada, el ángulo de captura se define en la ecuación (2).

$$\alpha_i = \beta + \left(i + \frac{1}{2}\right) * b * \delta \quad , i = 1, \dots, n \quad (2)$$

En esta expresión β es el ángulo de paso del motor, i es el número de orden de la banda ($h*b$) que indica la posición de la banda vertical dentro del área central, δ es el ángulo equivalente a la distancia entre dos píxeles consecutivos y b el ancho en píxeles de la banda vertical. No debe confundirse este ángulo con el de incidencia del haz de luz sobre la muestra. El ángulo que determinamos en este algoritmo es el que forma la luz difundida, reflejada o transmitida, capturada por el sensor de la cámara, con el eje óptico del sistema.

5. Metodología de desarrollo.

Se emplea para el desarrollo del software la metodología Script o V-Script, la cual tiene un alto componente dinámico, orientado hacia la interfaz de usuario. Las principales características de esta metodología de desarrollo de detallan en el Apéndice I.

²El nivel de gris está dado por $2^n - 1$, donde n es la profundidad de color especificada por el fabricante, en nuestro caso 8 bits monocromáticos. Este valor indica cuán saturado está un píxel del sensor.

6. Resultados.

El software genera, como resultado del proceso de medición, una tabla almacenada en un archivo de texto (Apéndice II) con los valores de intensidad relativa y el ángulo de captura correspondiente, para cada imagen procesada. Con el objeto de verificar estos datos y para facilitar su futura utilización, es conveniente representar gráficamente los valores de la tabla generada, obteniendo la forma en que se distribuye bidireccionalmente la luz difundida, reflejada y/o transmitida.

Si el medio no presentara difusión (o esta fuera mínima), la función de distribución bidireccional de transmitancia sería prácticamente igual a la emisión de la fuente (menos la absorción del medio) con un máximo en 180° (dirección del haz transmitido) que se puede en general, ajustar a una curva gaussiana similar a la mostrada en la Fig.6. Esta es, entonces, la forma básica aproximada que se espera obtener al graficar los valores de la tabla generada por el software.

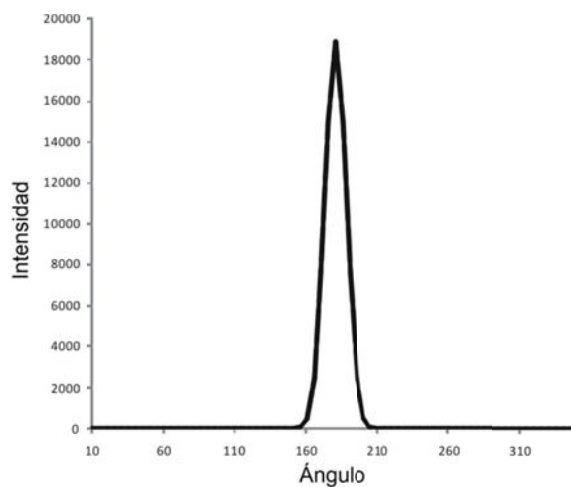


Fig. 6. Gráfica de la función de distribución de transmitancia (BTDF, Bidirectional Transmittance Distribution Function) para un material no difusor o muy poco difusor.

Sin embargo, las distribuciones generadas por efectos difusivos son muy variadas; no pueden ajustarse en general por curvas analíticas sencillas y es justamente esta dificultad la que amerita el uso de distribuciones empíricas para muchas aplicaciones. La Fig. 7 muestra la gráfica realizada a partir de la tabla de valores correspondiente a una medición, con ancho de la banda vertical de 20 píxeles y un ángulo de objetivo de 0.0076 grados, usando una muestra poco difusora (filtro Lee 258).

Si bien el problema del ajuste de una función analítica a los datos obtenidos por el programa está fuera del objetivo del presente trabajo³, podemos mencionar que este ajuste se realiza, en general, por tramos: entre los 170° y 180° , intervalo central izquierdo de la gráfica, se ajusta a una función exponencial, mientras que en las zonas más alejadas del máximo central conviene hacer un ajuste con una función coseno.

³ Forma parte del tema de Tesis Doctoral del Lic. Diego Corregidor Carrió, actual usuario final del sistema.

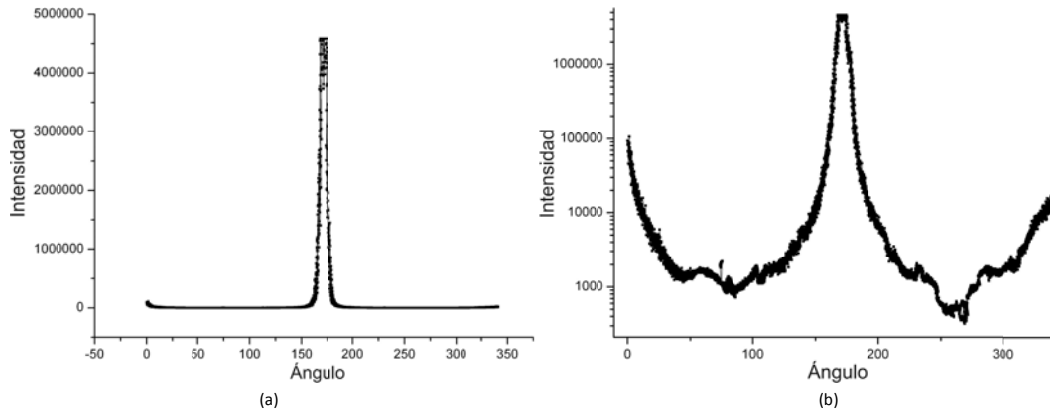


Fig. 7. Gráfico obtenido de una medición del filtro Lee 258, con ancho $b = 20$ píxeles y ángulo de objetivo de 0.0076 grados, (a) usando escala lineal en el eje vertical; (b) usando escala logarítmica en el eje vertical. Ésta última resulta muy útil para la tarea de ajuste.

7. Discusión.

Para hacer una estimación de los errores involucrados en el proceso de medición, tomamos un tramo de esta gráfica, por ejemplo las 100 primeras imágenes adquiridas por la cámara, correspondientes al tramo entre 0° y 50° de giro de la cámara y realizamos un ajuste con una función que se designa como “decaimiento exponencial de 2° orden” (suma de dos exponenciales negativas) representada por la ecuación (3).

$$y = A_1 \cdot e^{(-x/t_1)} + A_2 \cdot e^{(-x/t_2)} + y_0 \quad (3)$$

La Fig. 8 representa gráficamente el tramo de la medición con su correspondiente ajuste. Puede apreciarse que éste es, en general, bueno, obteniéndose un coeficiente de regresión $R^2 = 0,935$. Sin embargo los intervalos de incerteza de los valores de los parámetros dados por el ajuste son en algunos casos, todavía considerables:

$$\begin{aligned} y_0 &= 405 \pm 728 \\ A_1 &= (76,8 \pm 3,6) \cdot 10^3 \\ t_1 &= 3,2 \pm 0,2 \\ A_2 &= (15,6 \pm 3,5) \cdot 10^3 \\ t_2 &= 15,6 \pm 4,6 \end{aligned}$$

Esto se explica por la imposibilidad de ajustar exactamente la distribución de una muestra real que presenta texturas superficiales o inhomogeneidades volumétricas.

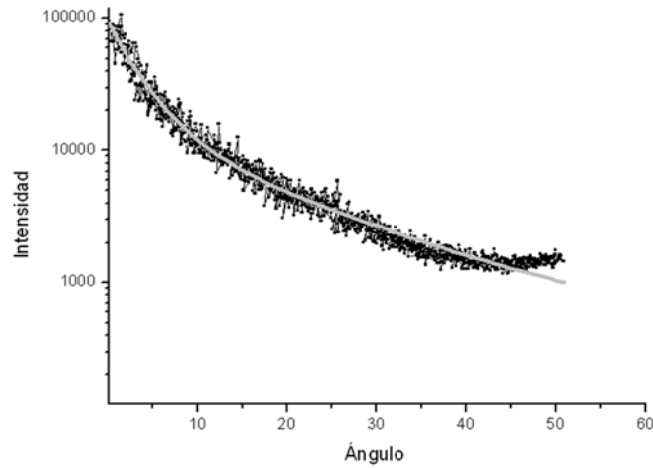


Fig. 8. Ajuste por la función de decaimiento exponencial de 2º orden de las 100 primeras imágenes adquiridas por la cámara, equivalentes a un arco de 50º.

Ante la imposibilidad de realizar una calibración directa del sistema, se llevó a cabo una contrastación comparando nuestros resultados con los obtenidos anteriormente con un escatómetro manual [8], utilizando para ello el filtro ROSCO 3008. La Fig.9 (a) muestra los valores obtenidos para varias muestras de materiales con el escatómetro manual, mientras que la Fig. 9 (b), los obtenidos con el nuevo dispositivo.

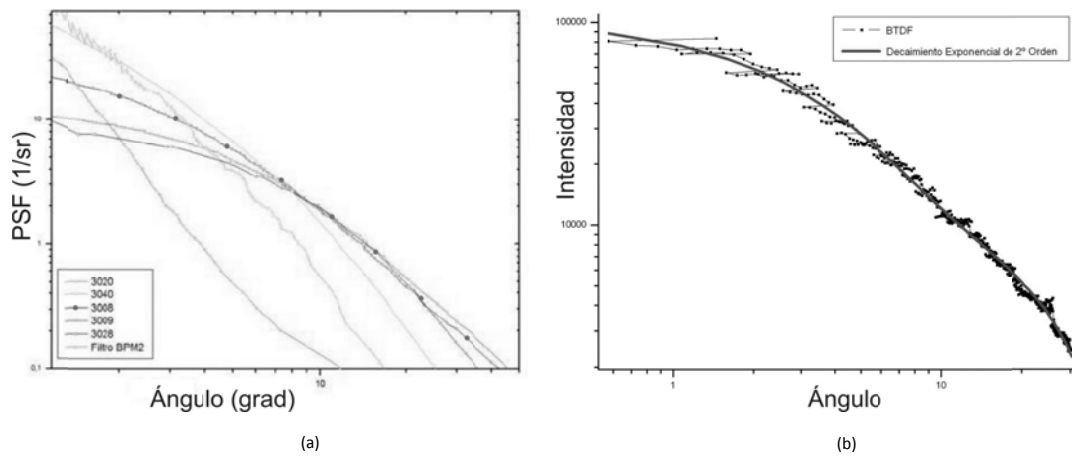


Fig. 9. (a) Gráficas obtenidas con el escatómetro manual, para seis muestras de materiales difusores. Se resalta la curva del filtro ROSCO 3008. (b) Gráfica suavizada y ajustada obtenida con el nuevo dispositivo. Esta medición corresponde al filtro ROSCO 3008, utilizado en la contrastación del método manual y automático.

Podemos apreciar que luego de suavizar y ajustar la gráfica, ésta presenta un comportamiento muy similar al obtenido por el método manual. Esta comparación se repitió para otros filtros disponibles. A

partir de estos resultados, podemos ver, entonces, que el software responde a las especificaciones planteadas para su diseño.

Para verificar la repetibilidad del sistema se realizaron cinco sesiones en días sucesivos, en las cuales se hizo correr el programa de medición completo; para la misma muestra en una sola posición, perpendicular al haz incidente, se realizaron 680 capturas entre 0° y 340° , respecto a la posición inicial de la cámara. De la Fig.10 puede verse que, en términos generales, las mediciones son coincidentes.

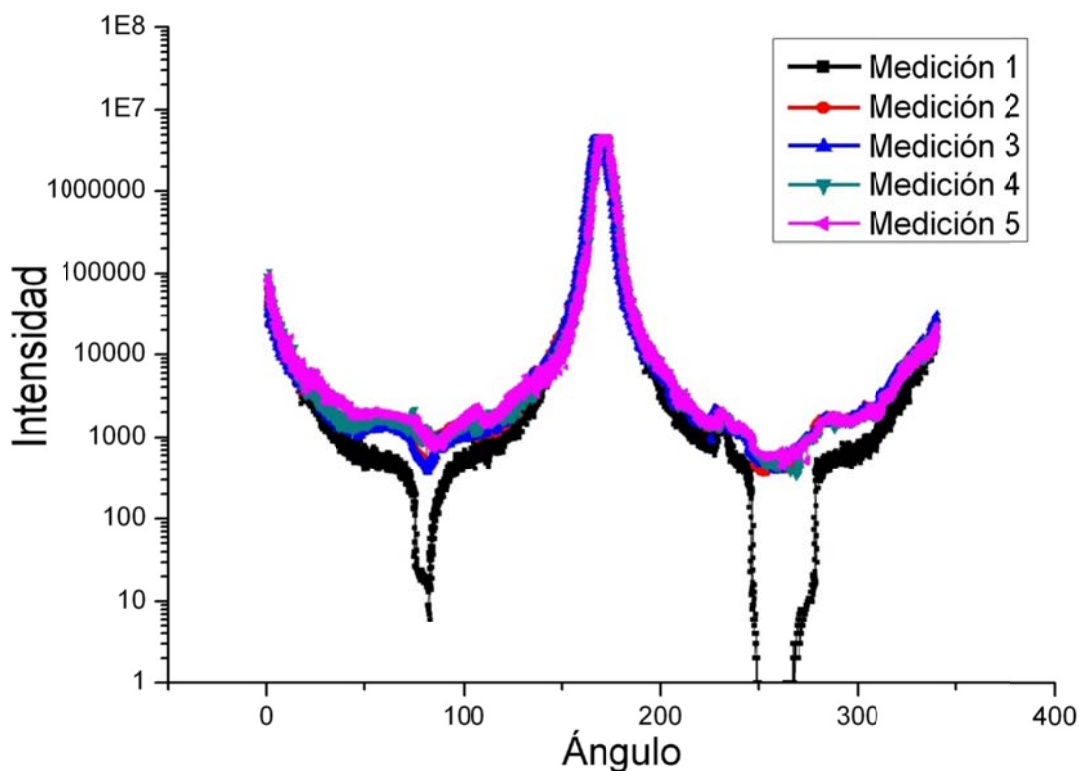
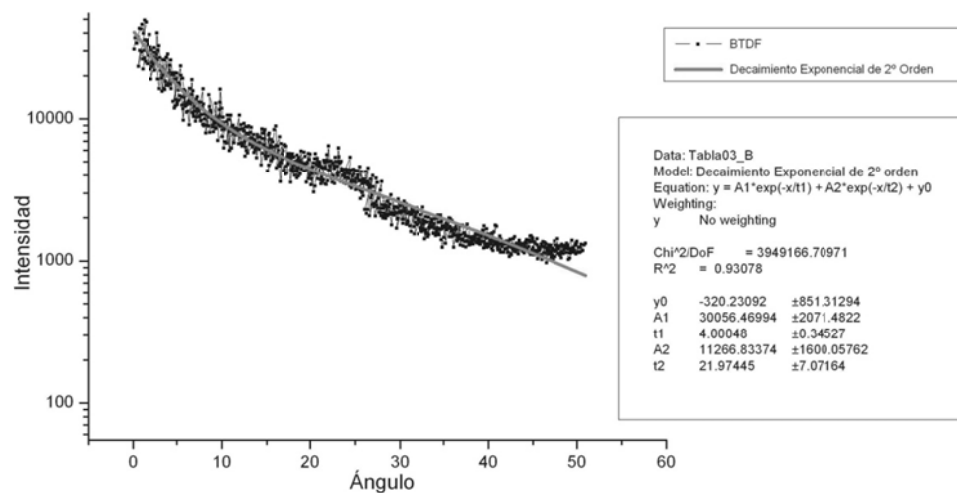
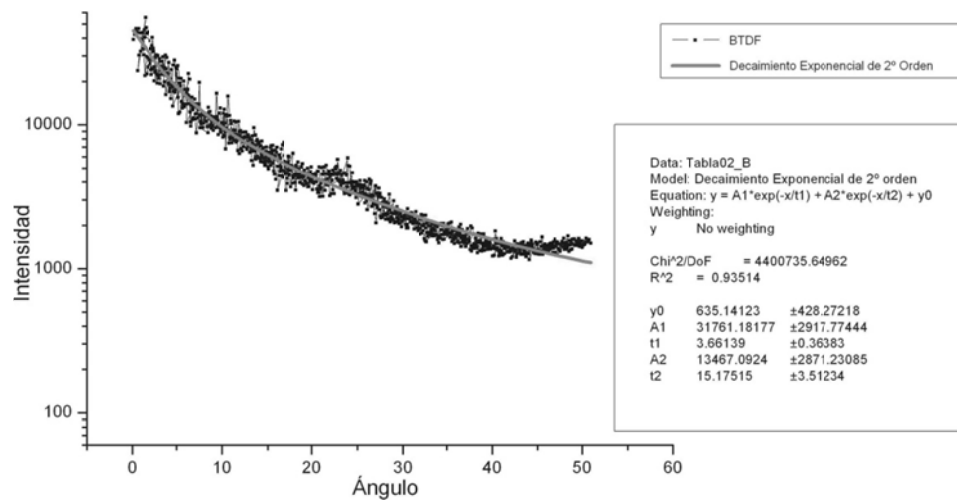
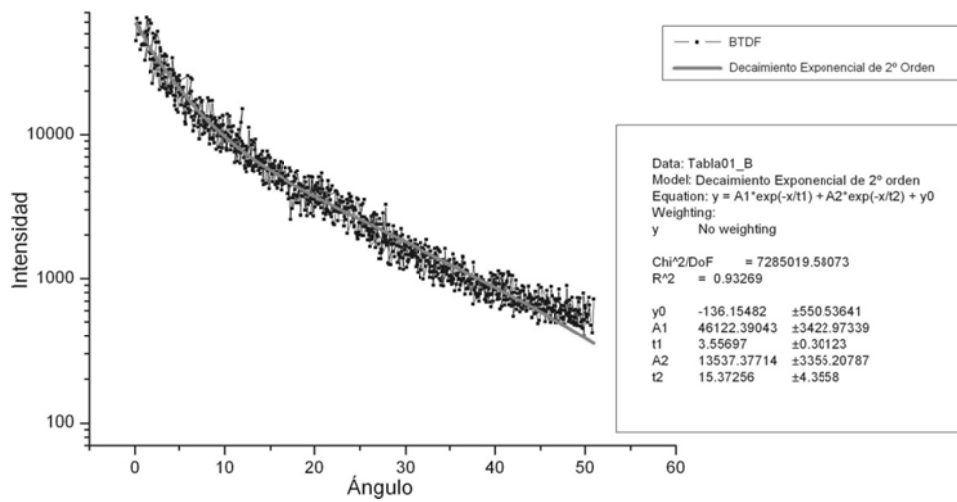


Fig. 10. Gráficas de las cinco mediciones superpuestas, con escala logarítmica en el eje vertical.

Se puede observar que la primera medición (trazo más oscuro) presenta dos mínimos simétricos muy marcados en los 90° y 270° ; éstos se deben, por un lado a la utilización de un soporte para la muestra diferente al de las mediciones siguientes, el cual tiene un borde más ancho en un costado, que coincide con éstos ángulos. Por otro lado, esta medición se realizó sin luz ambiente, lo cual contribuyó a marcar un poco más este efecto. Sin embargo, debido a que estos intervalos no son útiles en la caracterización de los materiales y por lo tanto no son considerados en este estudio de la repetibilidad, se decide incluir esta medición en el análisis.

Ahora bien, debido a que la curva general de difusión no es fácil ajustar para realizar comparaciones entre muestras, por ejemplo, se utiliza comúnmente el ajuste por tramos de la curva general y se compara la decadencia de los flancos de las curvas. En nuestro caso, se comparan las curvas obtenidas en las cinco mediciones sucesivas en el tramo entre 1° y 50° y se ajusta una curva de decaimiento exponencial de 2° orden en cada caso. Estas mediciones se muestran en la Fig. 11.



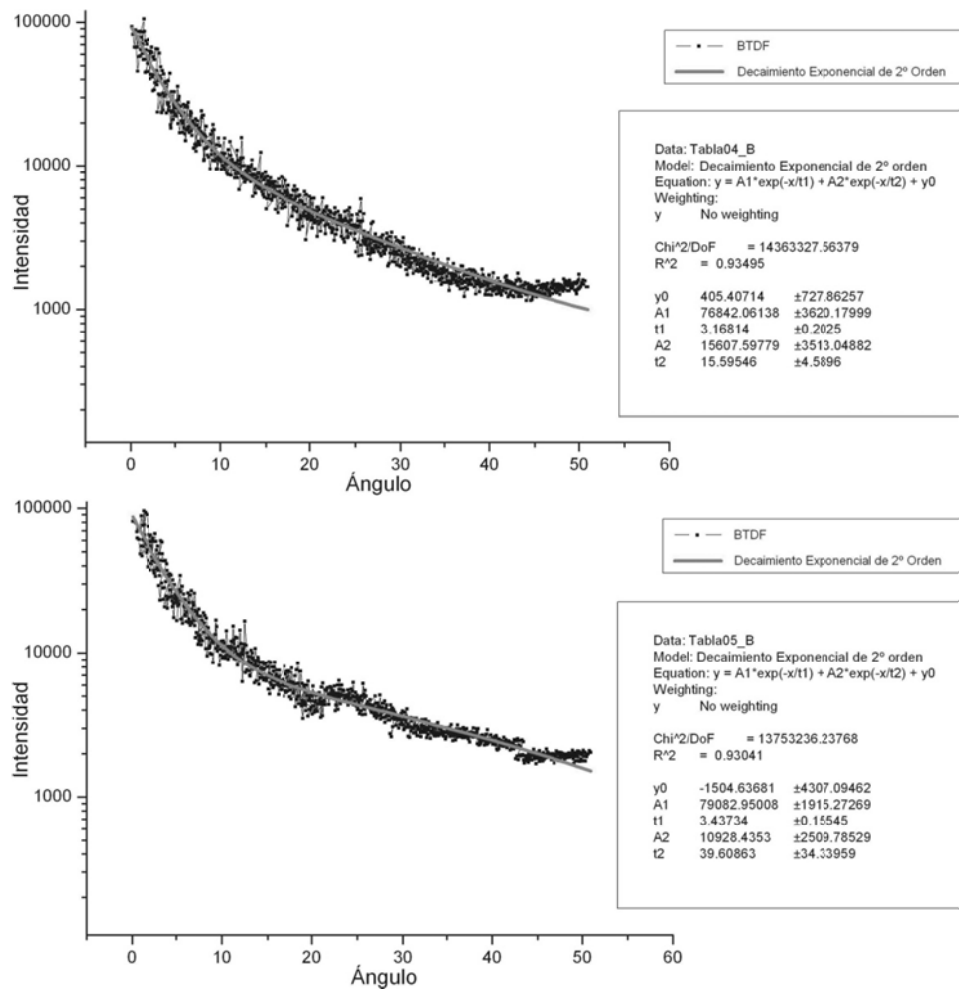


Fig. 11. Gráficas de las cinco mediciones con sus respectivos ajustes. En cada una se muestra los valores de los parámetros de ajuste.

En la Tabla 1 se recoge la información de los parámetros de ajuste con sus errores correspondientes, a partir del análisis de la tabla de salida del software. Estos valores pueden ser calculados con cualquier software de análisis y representación gráfica de datos tales como OriginPro™, por ejemplo, importando el archivo de texto generado por nuestra aplicación.

Tabla 1. Parámetros de ajuste (e incertezas) de los datos experimentales de intensidad de luz difundida por la muestra entre 1° y 50°.

	$A_1(*10^3)$	$\Delta A_1(*10^3)$	t_1	Δt_1	$A_2(*10^3)$	$\Delta A_2(*10^3)$	t_2	Δt_2	y_0	Δy_0
Med.1	46,1	3,4	3,6	0,3	13,5	3,4	15,4	4,4	-13,6	550,5
Med.2	31,8	2,9	3,7	0,4	12,5	2,9	15,2	3,5	635	428,3
Med.3	30,1	2,1	4,0	0,3	11,3	1,6	21,9	7,1	-320	851,3
Med.4	76,8	3,6	3,2	0,2	15,6	3,5	15,6	4,6	405	727,9
Med.5	79,1	1,9	3,4	0,2	11,0	2,5	39,6	34,3	-1504	$4,3*10^3$

Finalmente se determinan los valores medios y el error estándar de los parámetros calculados, que se muestran en la Tabla 2. Puede verse en esta tabla que, en casi todos los casos, el error estándar por dispersión entre mediciones resulta ser muy inferior a la dispersión o incerteza propia del ajuste de cada medición.

Tabla 2. Valores medios de los parámetros. Incertezas del ajuste de los datos experimentales y error estándar por dispersión entre mediciones.

	Valor medio	Error experimental medio	Error estándar
$A_1 (*10^3)$	52,8	2,8	11,9
t_1	3,58	0,28	0,15
$A_2 (*10^3)$	12,78	2,78	0,95
y_0	-159,5	1371,6	349,5

A partir de estos resultados, podemos concluir que el sistema ha mostrado un nivel adecuado de repetibilidad, dentro de los errores experimentales con que estamos trabajando. Es posible generalizar este control comparando otras zonas de las gráficas obtenidas y también para distintas posiciones de la muestra. Esta tarea será encarada en futuros trabajos con el escatómetro, ya que depende fundamentalmente del tipo de muestras que se caractericen y de la zona de interés para el estudio. Otro análisis encarado a futuro será el de la determinación de la sensibilidad del sistema para discriminar muestras diferentes a partir del análisis de las funciones de distribución bidireccional de difusión.

8. Conclusiones.

Con el software implementado se logró el objetivo planteado, el sistema se implantó en su lugar de trabajo y responde según los requisitos. Además, el producto obtenido presenta muy buenas características de performance, pues se comprobó que tiene la sensibilidad requerida y es repetible dentro de los límites verificados.

El uso de las técnicas y métodos empleados durante las distintas etapas del desarrollo permitió afianzar y profundizar los conocimientos relacionados con el proceso de desarrollo de software.

Un análisis a fondo del sistema, a partir de su utilización, reveló aquellos detalles factibles de mejora, por lo que el producto software es susceptible de evolucionar en sucesivas versiones hasta lograr el máximo aprovechamiento de las características del dispositivo experimental.

Referencias.

1. van de Hulst, H. D.: Light scattering by small particles. Dover Publications, New York (1981)
2. Stover, J.: Optical scattering: measurement and analysis. SPIE (1994)
3. CVI Melles Griot, <https://www.cvimellesgriot.com/Products/HeNe-Lasers.aspx>
4. Allied Vision Technologies, <http://www.alliedvisiontec.com/us/products/cameras/firewire/guppy.html>
5. Allied Vision Technologies: AVT FirePackage SDK Documentation. (2009)
6. Microsoft™ .NET™ Framework, <http://www.microsoft.com/NET/>
7. Microsoft™ Visual Studio™, <http://www.microsoft.com/latam/visualstudio/default.aspx>
8. Corregidor, D., Jaén, M., Sandoval, J.: Medición de la Función de Distribución Bidireccional de Transmitancia y la Función de Transferencia de Modulación para materiales difusores. Anales de la AFA, Vol. 19, pp. 83-88 (2008)
9. Pressman, R.: Software Engineering: A Practitioner's Approach. Mc Graw-Hill (1993)
10. Odstřil, M.: Conceptos de Sistemas y Análisis Orientado a Objetos. Asociación Cooperadora FaCET – UNT, S.M. de Tucumán (2001)
11. Booch, G.: Object-Oriented Analysis and Design with Applications. Addison-Wesley (1993)
12. Sparx Systems™, Enterprise Architect™, <http://www.sparxsystems.com/>

Apéndice I: Metodología de desarrollo.

La metodología Script o V-Script es una metodología de desarrollo de software que tiene un alto componente dinámico, orientado hacia la interfaz de usuario. Puede seguir un ciclo de vida clásico en V o en prototipado evolutivo. Se adapta perfectamente al paradigma de orientación a objetos, aunque se han usado técnicas Script en metodologías estructuradas, para el diseño de interfaz de usuario. Tiene la particularidad de dividir las etapas en dos grupos: etapas orientadas al cliente y etapas orientadas a la computadora.

Mediante el proceso Script, se capturan las necesidades del usuario mediante la construcción de maquetas o prototipos desechables, tratando de capturar la expectativa del usuario. A su vez, define las interfaces de usuario y permite integrar los aspectos del modelo estático y funcional.

Cada etapa Script de desarrollo tiene asociada una etapa de prueba al mismo nivel de abstracción. Estas etapas permiten verificar y validar el producto en los diferentes puntos del camino desde el mundo real (necesidad) hacia la máquina. Dentro de cada etapa Script suelen encontrarse procesos con refinamiento sucesivo, que son limitados por las líneas base. [9]

El diagrama de la metodología, con sus respectivas fases, se muestra en la Fig. 12.

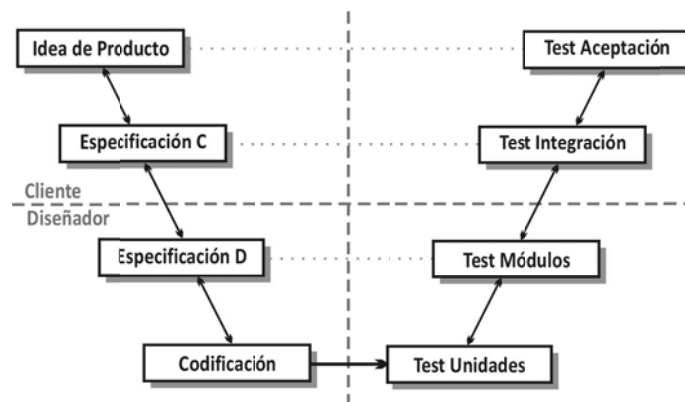


Fig. 12. Diagrama de la metodología Script.

En el diagrama puede observarse dos ejes fundamentales:

- *Eje horizontal*: divide al ciclo de vida en dos partes, una orientada hacia el cliente y otra orientada hacia el desarrollador (computadora).
- *Eje vertical*: divide al ciclo de vida en etapas de desarrollo y etapas de prueba del software.

Después de finalizada cada etapa, se determina una línea de base. Una línea de base es un punto del ciclo de vida que permite tomar decisiones condicionantes. Se evalúa todo lo realizado hasta ese momento mediante revisiones formales y se decide seguir adelante (hacia la próxima línea base) o bien continuar en cada etapa. Las líneas base de esta metodología se encuentran al final de cada etapa Script.

Como en el modelo V tradicional, puede volverse a la etapa anterior en caso de que se necesite realizar refinamiento. Dentro de un prototipado evolutivo, se recorre tantas veces el modelo como veces se necesita acercarse el prototipo al producto final. [10]

Cabe destacar que para modelar el sistema se utilizó el paradigma de orientación a objetos [11], fundamentalmente por el gran contenido semántico de sus modelos conceptuales y por la facilidad de implementación que brindan los lenguajes que soportan este paradigma. Es posible además, con esta modelización, aprovechar que el software está desarrollado en UML2 para migrar a herramientas CASE⁴ como Enterprise Architect™ [12] que mejorará notablemente el proceso software. Esto será considerado para el desarrollo de futuras versiones de nuestra aplicación, ya que las ventajas que presenta son realmente significativas.

⁴ CASE: Computer Aided Software Engineering, Ingeniería de Software Asistida por Computadora. Aplicaciones informáticas destinadas a aumentar la productividad en el desarrollo de software reduciendo el coste de las mismas en términos de tiempo y de dinero.

Apéndice II: Capturas de pantalla del software desarrollado.

Para complementar la descripción del desarrollo se adjuntan capturas de pantallas de distintos escenarios de la aplicación.

La Fig. 13 muestra la ventana de configuración de una nueva medición. En ella es posible ajustar los parámetros del procesamiento, los distintos elementos a utilizar (tipo de material difusor, fuente de radiación, sensor óptico), el directorio destino del archivo de salida, etc.

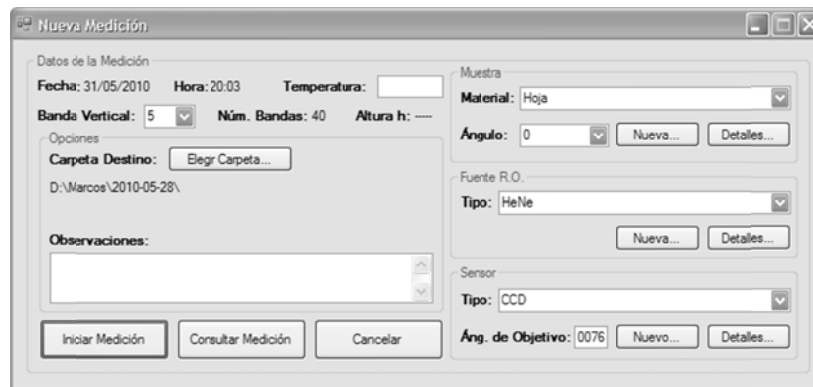


Fig. 13. Ventana de configuración de una nueva medición.

Como se mencionó anteriormente, la salida del proceso de medición es una tabla almacenada en un archivo de texto. La Fig. 14 muestra una captura de un ejemplo de este archivo.

Value	Intensity/Count
0,076	93291
0,228	82468
0,38	67076
0,532	88487
0,684	67449
0,836	85942
0,988	86557
1,14	85685
1,292	71054
1,444	105571
0,576	66860
0,728	45789
0,88	57916
1,032	58269
1,184	78584
1,336	85528
1,488	86729
1,64	74368
1,792	70588
1,944	75656
1,076	64743
1,228	60470
1,38	55109
1,532	55407
1,684	64258
1,836	51849
1,988	51720
2,14	52474
2,292	61095
2,444	67076
1,576	45033
1,728	45483

Fig. 14. Archivo de texto conteniendo la tabla de salida de una medición.

Una vez iniciado el proceso de medición es posible seguir su progreso a través de un escenario diseñado para tal fin, el cual puede apreciarse en las Fig. 15 (a) y (b).

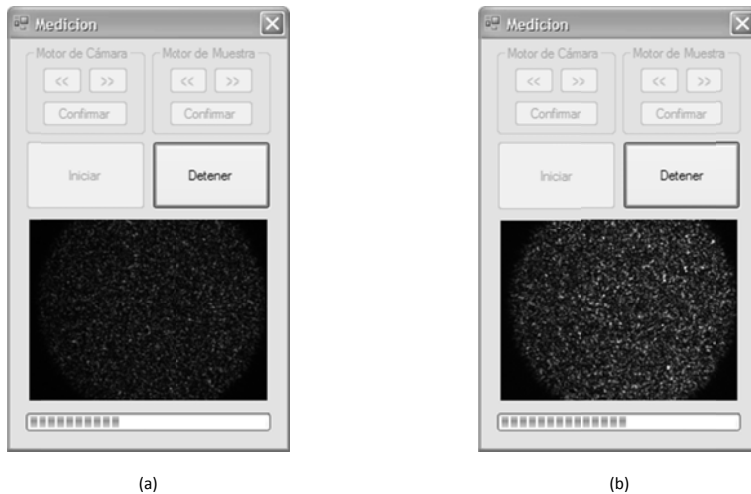


Fig. 15. Ventana de progreso del proceso de medición: (a) *captura medianamente cercana al eje óptico del sistema;* (b) *captura muy cercana al eje óptico.*

Éste escenario presenta una pequeña ventana que permite visualizar las sucesivas imágenes capturadas por la cámara, a modo de control visual del progreso de la medición. A medida que la cámara se aproxima al eje óptico del sistema, aumenta la cantidad de píxeles saturados en el sensor.