

TESINA DE LICENCIATURA

**ESTUDIO DE UNA UNIDAD DE MEDIDA DE MTF
POR MÉTODOS DIRECTOS.
PUESTA A PUNTO, AJUSTE, CALIBRACIÓN,
Y APLICACIONES.**

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
FACULTAD DE CIENCIAS

Autor: Carlos Dorronsoro Díaz
Director: Manuel Quintanilla Montón

Junio de 1997

Universidad de Zaragoza
Facultad de Ciencias
Departamento de Física Aplicada
Cátedra de Óptica

ESTUDIO DE UNA UNIDAD DE MEDIDA DE MTF POR MÉTODOS
DIRECTOS.

PUESTA A PUNTO, AJUSTE, CALIBRACIÓN, Y APLICACIONES.

Memoria presentada por
Carlos Dorronsoro Díaz
para la obtención del Grado de
Licenciatura en Ciencias Físicas
por la Universidad de Zaragoza.

Dedico este trabajo al Doctor J. J. Cruz, como agradecimiento a su ayuda personal y profesional, y como muestra de admiración por la labor que desarrolla.

Agradecimientos.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento al prof. D. Manuel Quintanilla Montón, director de este trabajo, por su inestimable ayuda y consejo en la realización de este trabajo.

Al personal de Leica Heerbrugg, por su hospitalidad, y en especial a John Rodgers, Roman Nachbauer y Enrique Bondi por los conocimientos transmitidos.

A Dolores Bello (IAC) por la realización de las simulaciones en CodeV, y por sus inyecciones de optimismo.

A mis padres, mis hermanos y a Uca, por todo.

ÍNDICE

Introducción y propósito.

Procedencia de la unidad de medida.

1.- Función de Transferencia Óptica.

1.1.-Breve introducción histórica a la Función de Transferencia Óptica.

1.2.-Definición.

1.2.1.-Función de Transferencia para luz coherente.

1.2.2.-Función de Transferencia para luz incoherente: FTO.

1.2.3.-Función de Transferencia policromática.

1.3.-Medida de la MTF. Teoría del barrido de la imagen.

1.3.1.-Métodos indirectos de medida.

1.3.2.-Métodos interferométricos.

1.3.3.-Métodos directos.

2.- Unidad de medida.

2.1.-Dispositivos precedentes.

Lindberg.

Baker.

Williams.

2.2.-Sistema de Jones.

Descripción del dispositivo experimental. Especificaciones.

2.3.-Ajustes-Calibración.

2.3.1.-El problema de anchura de rendija.

Comprobación experimental.

2.3.2.-Medida de la anchura de las rendijas.

2.3.3.-Calibración del retículo; normalización.

2.3.4.-Posicionamiento de la rendija imagen.

2.3.5.-Estudio del dispositivo electrónico.

3.-Medición.

3.1.-Protocolo de medida.

3.2.-Medidas realizadas.

3.2.1.- MTF correspondiente a distintos filtros. Comparación.

3.2.2.- Estudio de la profundidad de foco.

3.2.3.- Medida del rango 0-100 c/mm.

3.2.4.- Medidas fuera de eje.

3.3.-Simulación teórica de las medidas. Comparación.

4.- Adaptación al sistema de Williams. Un método de visualización, estudio y medida del efecto de las aberraciones sobre la MTF.

5.- Conclusiones.

6.- Referencias.

INTRODUCCIÓN Y PROPÓSITO

La Función de Transferencia Óptica es actualmente la herramienta más eficaz para abordar el complejo problema de evaluar la calidad de un sistema óptico.

En todos los campos que giran en torno al sistema óptico, industriales, científicos, etc., aparece la necesidad de la medida de su función de transferencia. Desde el diseño y la construcción, al uso: comparación y determinación de la utilidad de los instrumentos en diferentes condiciones, pasando por control de calidad o especificación de la misma.

La medida de la Función de Transferencia, si bien se basa en conceptos sencillos, presenta múltiples dificultades prácticas. La falta de repetitividad de los resultados, por el uso de una tecnología insuficientemente desarrollada, provocó desconfianza en un principio y retrasó la expansión de esta técnica.

Los aparatos actuales de medida de MTF (la parte más significativa de la Función de Transferencia) han alcanzado, tras una larga evolución, un nivel suficiente para que su utilidad y exactitud estén fuera de toda duda.

El propósito de este trabajo ha sido estudiar la problemática general de las medidas de MTF, tomando como base una unidad de medida particular.

Durante la calibración y puesta a punto se han realizado medidas de control, adaptaciones y simulaciones computacionales para comprobar el buen funcionamiento de la unidad de medida, así como cuantificar el efecto de las distintas causas de error.

Se detallan en este trabajo las ventajas de esta unidad de medida, así como sus limitaciones, un protocolo de medida, los usos que se le pueden dar al sistema... con especial atención a las áreas de apoyo a la investigación y docencia, donde consideramos que la introducción de este dispositivo sería especialmente útil.

PROCEDENCIA DE LA UNIDAD DE MEDIDA ESTUDIADA.

El aparato utilizado fue diseñado por G.E. Jones y comercializado por Ealing Beck Ltd, con el nombre comercial EROS 200. El método que utiliza es uno de los métodos directos de medida más avanzados.

Esta unidad de medida era utilizada en la fábrica de material óptico de precisión LEICA AG, en Heerbrugg, Suiza, para control de calidad de objetivos completos y subgrupos hasta Diciembre de 1996. Al ser sustituida por una nueva unidad de medida basada en métodos indirectos, computerizada, con tiempo de medida más rápido y de más difícil descalibración, la unidad de medida directa se retiró de la planta de producción y fue donada, con fines de docencia e investigación, a la Universidad de Zaragoza.

Expresamos aquí nuestro agradecimiento a John Rodgers, en el Departamento de Física, y a Roman Nachbauer, en Producción Óptica de LEICA, por haber posibilitado la donación de esta unidad de medida.

1.- FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ÓPTICA.

1.1.- BREVE INTRODUCCIÓN HISTÓRICA A LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ÓPTICA.

La función de transferencia óptica (OTF) es la respuesta en frecuencias, en términos de frecuencia espacial, de un sistema óptico a distribuciones de intensidad de luz en el plano objeto. La OTF es la amplitud y fase en la imagen relativa a la amplitud y fase en el objeto, como función de la frecuencia espacial, supuesto que el sistema responde linealmente y es invariante espacialmente. La OTF depende de los dos efectos que deterioran la imagen: difracción y aberraciones, y potencialmente los describe.

Pese a que los conceptos relativos a la OTF evolucionaron muy despacio, hoy en día se puede decir que en el mundo del diseño óptico y de evaluación de la calidad de imagen, conceptos antes tan familiares como 'círculo de mínima confusión', 'resolución', 'carta de barras'... han quedado obsoletos. La función de transferencia óptica ha sido aceptada como criterio general para evaluar la calidad de la imagen óptica.

En la mayor parte, el arte del diseño óptico ha dependido hasta hace poco de álgebra simple y trigonometría plana, conocidas generalmente como 'óptica geométrica'.

Los programas basados en trazado de rayos, incluso los más modernos, pese a su velocidad y precisión, su automodificación hacia el diseño óptimo... realizan fundamentalmente el mismo proceso de lápiz y papel, prueba y error, usados durante los dos últimos siglos.

EL uso de la óptica geométrica para la eliminación de aberraciones se ha mantenido porque ha producido excelentes resultados. Sin embargo, desde muy pronto, se llegaron a diseñar muy buenos sistemas cuya imagen se separaba de la configuración de un punto, y no podía ser explicada por la óptica geométrica.

En 1835, Airy¹, que estaba familiarizado con la teoría ondulatoria de la luz, desarrolló la fórmula del patrón de difracción de un punto, a través de una lente sin aberraciones, conocida desde entonces como el disco de Airy.

Pese a que desde 1818 Fresnel, usando el concepto de Huygens de ondas secundarias, y la explicación de Young de la interferencia, había desarrollado la teoría de difracción de ondas escalares a esencialmente en la forma en la que la conocemos hoy², los diseñadores ópticos fueron muy reacios a aplicar teoría ondulatoria.

Esta tradicional dicotomía entre óptica geométrica y óptica ondulatoria, retrasó la aparición de las técnicas de OTF.

Esto, actualmente ha desaparecido, y la OTF esta hoy en día reconocida como la herramienta para refinar resultados durante la ultima fase de optimizacion del

diseño. Su aplicación tiene el potencial de ir más allá del diseño óptico que se podría obtener utilizando solo óptica geométrica.

Por otro lado, la medida de la OTF ha demostrado ser una herramienta fundamental para la evaluación de la calidad de un sistema óptico, muy superior a los tradicionales (trazado de rayos, cartas de barras...) que completa a los métodos interferométricos y sensores de frente de onda.

Cronológicamente, **de 1850 a 1940** se establecieron los conceptos fundamentales que darían lugar a la OTF. Foucault³ sugirió que un objeto extenso periódico sería mejor que un solo punto para testear un sistema óptico. Abbe⁴ introdujo el concepto de frecuencia espacial. Se desarrolló la teoría de aberraciones geométricas, y también la teoría de la difracción. Por último, la función característica de Hamilton y la ecuación eikonal de Bruns unificaron rayos geométricos y ondas².

Rayleigh⁵ formuló su criterio de cuarto de longitud de onda para evaluar el límite difraccional. Strehl⁶, contemporáneo de Rayleigh, estudiando cómo modifican las aberraciones pequeñas el disco de Airy, enunció la famosa razón de Strehl (un sistema está limitado por difracción si el centro del disco de Airy mantiene una intensidad de al menos el 80 % de la correspondiente a un sistema perfecto). Maréchal, sobre el frente de onda, mostró que la pérdida de intensidad en el foco difraccional está relacionado con la varianza del frente de ondas respecto a una forma esférica.

Wright⁷ y Frieser⁸, estudiando sistemas de televisión y emulsiones fotográficas, respectivamente, fueron los primeros en sugerir, en los años 30, el uso de una función de transferencia óptica, inspirándose en el análisis de sistemas eléctricos.

Fue determinante **la aparición de algunas importantes teorías matemáticas**. De **1930 a 1940** se desarrolló lo que ahora se conoce como teorías de transformadas. La transformada de Fourier, utilizada por ingenieros en la amplificación del sonido, fue importada al campo de la óptica para aprovechar sus propiedades, especialmente el teorema de convolución (en el espacio transformado, la integral de convolución se transforma en producto simple de funciones, lo cual simplifica enormemente ciertos tratamientos matemáticos). La transformada de Fourier fue extendida a dos dimensiones, y aplicada sobre 'frecuencias espaciales'.

Definamos la función respuesta impulso de un sistema óptico a la distribución de flujo de luz en la imagen cuando la fuente de luz objeto es un punto. Resulta (se desarrollará más adelante) que la función imagen en términos de coordenadas espaciales es la convolución de la función objeto y la función impulso si consideramos el sistema óptico lineal y espacialmente invariante. Así, una definición sencilla de la OTF es la transformada de Fourier de la función impulso del sistema.

Las primeras aplicaciones de la OTF se dieron sobre los años 40. Durante la segunda guerra mundial, se estudió la OTF de lentes y de películas fotográficas. En 1950 se utilizó esta técnica para valorar la calidad de imagen de los primeros equipos de televisión.

Empezaron estudios de carácter teórico sobre efectos difraccionales en la aberración de onda (Nijboer⁹), textos rigurosos sobre aberraciones (Hopkins¹⁰), e incluso estudios específicos sobre Óptica de Fourier y OTF (Duffieux¹¹).

A partir de la segunda mitad de los **años 50**, hubo una explosión de publicaciones sobre conceptos e instrumentación de OTF. En lugar de aproximarse al sistema óptico como una caja negra con una entrada y una salida, se intentó hacer un desarrollo basado en óptica física para dar una idea comprensible del sistema, que facilitara su diseño y evaluación¹².

Pese a fabricarse un número importante de instrumentos de medida distintos, ni científicos ni ingenieros fueron muy estrictos al comparar los resultados de las medidas con las previsiones teóricas, ni con los distintos instrumentos entre sí.

Pese a esto, durante los cincuenta se llegó a importantes conclusiones:

- La aproximación mediante OTF implica objetos extensos.
- El testeo en tiempo real de los sistemas es posible.
- Se puede medir un amplio rango de sistemas, desde limitados por difracción a muy aberrantes. Incluso se pueden medir fibras ópticas.
- Durante el diseño se puede estimar la OTF del sistema.
- Dado un objeto, mediante análisis de Fourier, se puede estimar la OTF necesaria para producir una imagen de calidad aceptable.
- La naturaleza cuantitativa de la OTF, unida a la posibilidad de ser medida en tiempo real, proporciona una nueva herramienta para la especificación y el control en fabricación de óptica.

Se utilizaron técnicas directas de medida, usualmente una rendija imagen barrida por una red de transmisión o de área.

Aparecieron dificultades prácticas:

- La fabricación de redes de transmisión sinusoidal es extremadamente difícil.

- Ciertas limitaciones limitan el rango de frecuencias espaciales a medir. Además, la medida cerca de frecuencia espacial cero es complicada.
- La señal en el detector a veces era tan baja que se confundía con la luz ambiente.
- La iluminación debía ser completamente incoherente. Un mínimo grado de coherencia da lugar a resultados falseados.

El equipo necesario, por tanto, resultó ser mucho más elaborado de lo que parecía en un principio.

El verdadero ajuste a la práctica de la medida de la OTF no llegó hasta los **años 60**. El módulo de la OTF (MTF: Función de transferencia de modulación) daba cuenta de la medida del contraste en la imagen de un objeto periódico. Este concepto resultó familiar tanto a ingenieros eléctricos como a físicos ópticos. Unos y otros se lanzaron a aplicar sus conocimientos sobre la materia en sus propias instalaciones.

Desafortunadamente, los físicos ópticos, por lo general usaron como base bancos ópticos diseñados en principio para valoración visual de la calidad de la imagen, manifiestamente insuficientes para soportar equipos de MTF. Por este motivo, los resultados entre distintas las distintas máquinas no salían correlacionados. La comprobación se realizaba con lentes muy corregidas, o bien evaluando la habilidad del sistema de producir la transformada de Fourier de una determinada abertura. (Generalmente se estudiaba si, de una rendija grande, el sistema devolvía la función SINC adecuada). La experiencia posterior demostró que el uso de un banco no adecuado repercutía en errores de alineamiento que hacían imposible predecir el

grado de exactitud de la medida cuando se sustituía la lente bien corregida por otra de varias longitudes de onda de aberración.

Una experiencia en la cual una misma lente fue medida por varios laboratorios distintos, concluyó que la medida de la MTF todavía no había llegado a un grado de exactitud que permitiera su uso en especificaciones o normativas.

Por otro lado, durante esta época, se hizo urgente un método fiable, objetivo y reproducible de evaluar la calidad de sistemas ópticos asociados a televisión, microfilms, microcircuitos...

Un amplio grupo de laboratorios colaboraron con el objetivo de desarrollar la tecnología de medida de la MTF hasta un nivel suficiente. Cabe destacar la labor del instituto SIRA (Scientific Instrument Research Associated) de Inglaterra, que administró dicho trabajo.

Unas lentes standard de muchos tipos distintos ayudaron a desarrollar las máquinas de medida, y también a revisarlas rutinariamente¹³.

El desarrollo de los ordenadores personales y de algoritmos de cálculo de transformadas de Fourier y de integrales de correlación¹⁴ abrió un nuevo campo, el de los métodos indirectos de medida, basados en la interpretación de la función de línea o incluso de borde.

Aceptación, **los 70**. La década de los 70 fue la década en la que la MTF fue generalmente aceptada. El vacío dejado cuando el poder resolutivo fue desacreditado como indicador de las propiedades ópticas de un sistema formador de imágenes aceleró este proceso de aceptación. Una mejor comprensión facilitó la mejora de las técnicas existentes, y la aparición de otras nuevas.

Se descubrió que los errores más corrientes eran: Falta de precisión y estabilidad en los bancos ópticos, pocos datos espectrales en los filtros de luz, rendijas de calidad insuficiente, deficiente control de la incoherencia de la iluminación.

Se estaban desarrollando las capacidades de la OTF, pero quedaban por definir claramente las limitaciones. Cómo decae la calidad de la imagen de un sistema óptico estaba descrito detalladamente, pero no el porqué.

El desarrollo de los ordenadores facilitó la incorporación de la OTF al proceso de diseño-fabricación-testeo-especificación de calidad.

La industria óptica comenzó a aplicar los nuevos conceptos.

Los **80**.

Durante los ochenta se intentó aplicar, con éxito desigual, la OTF a sistemas de gran ángulo de campo y alta apertura numérica, y también a otros sistemas poco usuales.

Apareció gran cantidad de software de diseño óptico, y todos los programas incluían opciones de cálculo de la OTF.

Los polinomios de Zernike aparecen en los artículos publicados como mucho más convenientes para tratar el tema de la OTF que los tradicionales polinomios de Seidel. Nuevos algoritmos para calcular la Transformada de Fourier se adaptan para el cálculo de la OTF.

Los ordenadores hicieron que se empezaran a preferir los métodos directos de medida sobre los indirectos. La eliminación de partes móviles, y de mecánica de precisión, abarató los equipos de medida de OTF al tiempo que los hacía más fiables.

Los **90**.

El conjunto de técnicas de medida, cálculo, interpretación..., de la MTF se han impuesto como la mejor forma de estudiar la calidad de un sistema óptico, tanto a priori como a posteriori.

Si bien es cierto que con la MTF el evaluador está siempre un paso alejado de la imagen directa del sistema, ningún otro sistema ofrece las ventajas de la MTF.

En general la MTF aporta una mayor exactitud y una mejor comprensión de la calidad de un sistema óptico, y hay problemas que sólo pueden ser resueltos satisfactoriamente por esta técnica. Esto ocurre, por ejemplo, cuando las aberraciones no sobrepasan unas pocas longitudes de onda (donde las técnicas basadas en óptica geométrica se muestran impotentes).

Podemos subrayar como ventajas de la MTF sobre otros métodos:

- La aplicación de la MTF no requiere conocimientos de ninguna teoría de la luz, ni ninguna composición espectral particular, ninguna asunción sobre la forma del diafragma, ni ninguna acotación a la magnitud de las aberraciones a medir.

- La MTF para cualquier región de la imagen da una descripción analítica completa de la relación objeto-imagen, sin ninguna restricción de la forma del objeto. Se puede predecir, mediante análisis espacial de Fourier, la forma de la imagen para un objeto dado.

- La MTF puede ser calculada directamente de los datos de fabricación, y medida en ese sistema tras la fabricación. Así, se puede evaluar tanto el proceso de fabricación como la precisión de la medida.

La MTF es ya algo perfectamente conocido y aceptado en los círculos entre los que nació: ambientes científicos, académicos e incluso industriales.

La MTF, además, se ha extendido a otras áreas muy alejadas de las del diseño y control de sistemas ópticos comunes (grupos de lentes y espejos). Por ejemplo, se ha aplicado la MTF al estudio de la calidad óptica del ojo¹⁵, de microscopios electrónicos, o de amplificadores de imagen (ya sea por fibras ópticas activas o por lentes electromagnéticas).

Queda sin embargo, expandir su uso a áreas más alejadas. De diseñadores de material óptico y fabricantes, a distribuidores, usuarios, institutos de certificación y evaluación... círculos donde aún no se aprecian sus ventajas.

1.2.- FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ÓPTICA. DEFINICIÓN.

La introducción en Óptica del análisis de Fourier^{2,16,17,18} hace posible conjuntar los efectos de difracción y aberraciones en la calidad de la imagen y constituye un importante avance en el estudio de los sistemas ópticos.

El concepto de Función de Transferencia Óptica (OTF) surge al estudiar cómo se transmiten a través de un sistema óptico las frecuencias espaciales del plano objeto al plano imagen. Para simplificar utilizaremos en el plano objeto las coordenadas reducidas $x = M x_0$; $y = M y_0$, siendo M el aumento lateral.

Si consideramos la función objeto $g(x,y)$ y la función imagen $g'(x',y')$ descompuestas en suma de funciones elementales:

$$g(x, y) = \iint c(f_x, f_y) \cdot e^{-j 2\pi (f_x \cdot x + f_y \cdot y)} \cdot dx \cdot dy$$

$$g'(x', y') = \iint c'(f_x, f_y) \cdot e^{+j 2\pi (f_x \cdot x' + f_y \cdot y')} \cdot dx \cdot dy$$

respectivamente, podemos decir que cada una de las componentes $c'(f_x, f_y)$ tiene un valor igual a su correspondiente en el objeto $c(f_x, f_y)$, multiplicado por un factor de transmisión. Este factor de transmisión se conoce con el nombre de Función de Transferencia Óptica.

Ahora bien, para poder caracterizar un sistema óptico por una única Función de Transferencia deben verificarse dos condiciones:

1.- Condición de linealidad; es decir, la imagen total es suma de las imágenes que de cada punto objeto forma el sistema óptico.

Matemáticamente, la linealidad viene expresada por la integral de superposición:

$$g'(x', y') = \iint_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) \cdot k(x, y; x', y') \cdot dx \cdot dy$$

Donde $g'(x', y')$ es la función que caracteriza a la imagen, $g(x, y)$ al objeto y $k(x, y; x', y')$ nos da cuenta de la contribución a la imagen en (x', y') de una fuente puntual unidad situada en (x, y) .

Para poder hablar de linealidad en los sistemas ópticos hay que especificar de antemano el tipo de iluminación, ya que hay diferencias en la definición.

En el caso de iluminación con luz coherente, la distribución de amplitud (nos referiremos en adelante a amplitud compleja), en la imagen $\mu'(x', y')$ se obtendrá sumando la amplitud producida en cada punto de la imagen por todos los puntos del objeto, es decir

$$\mu'(x', y') = \iint_{-\infty}^{+\infty} \mu(x, y) \cdot h(x, y; x', y') \cdot dx \cdot dy$$

Donde $\mu(x, y)$ representa la distribución de amplitud en el objeto y $h(x, y; x', y')$ es la amplitud, por unidad de área del objeto, en el punto (x', y') del plano imagen debida a una fuente puntual unidad situada en (x, y) .

A la función de respuesta puntual, tanto para luz coherente h o incoherente k , se le suele llamar PSF (Point Spread Function).

Cuando la iluminación es incoherente el valor promedio temporal $\langle \mu'(x',y',t) \mu'^*(x',y',t) \rangle$ vendrá dado por :

$$\iint_{-\infty}^{+\infty} dx dy \iint_{-\infty}^{+\infty} d\xi d\eta h(x, y; x', y') \cdot h^*(\xi, \eta, x', y') \langle \mu(x, y, t) \mu^*(\xi, \eta, t) \rangle$$

$$\text{donde } \langle \mu(x, y, t) \mu^*(\xi, \eta, t) \rangle = k I(x, y) \delta(x-\xi, y-\eta)$$

Siendo $I(x, y)$ la intensidad y k una constante de proporcionalidad. Por lo que en este caso resulta

$$I'(x', y') = \iint_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) |h(x, y; x', y')|^2 dx dy$$

Es decir, el sistema óptico cuando se ilumina con luz coherente se comporta como lineal en la transmisión de amplitudes, sin embargo cuando iluminamos con luz incoherente se comporta como lineal en la transmisión de intensidades.

Este trabajo tratará sobre la función de transferencia con iluminación incoherente. Hablaremos por tanto de linealidad en la transmisión de intensidades. Existe una gran diferencia entre las funciones de transferencia con iluminación coherente o incoherente. Cualquier grado de coherencia en la fuente de iluminación producirá un error considerable en la estimación de la función de transferencia. El uso de un orificio objeto excesivamente pequeño también puede dar problemas de coherencia. Esto es algo que hay que tener muy en cuenta al estudiar cualquier método de medida de MTF.

2.- Condición de isoplanatismo; Se verifica cuando, al desplazar en el plano objeto una fuente puntual su imagen queda desplazada en el plano imagen sin ningún otro cambio, es decir:

$$k(x, y; x', y') = k(x' - x, y' - y)$$

Esta condición se cumple en muy pocos sistemas ópticos cuando consideramos todo el campo objeto. Se procede entonces a dividir el campo objeto en regiones donde se satisface aproximadamente y se asigna a cada una de estas zonas una Función de Transferencia.

Supuestas estas condiciones, resulta que la función imagen es el producto de convolución de la función objeto y de la respuesta del sistema a una fuente puntual.

$$g'(x', y') = \iint_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) \cdot k(x' - x, y' - y) dx dy$$

Aplicando el teorema de convolución tenemos que

$$G'(f_x, f_y) = G(f_x, f_y) K(f_x, f_y)$$

donde $G'(f_x, f_y)$, $G(f_x, f_y)$ y $K(f_x, f_y)$ son las transformadas de Fourier de las funciones $g'(x, y)$, $g(x, y)$ y $k(x, y)$ respectivamente.

Esta ecuación nos indica que si las funciones objeto e imagen ($g(x, y)$ y $g'(x, y)$) se descomponen en una superposición de funciones sinusoidales de todas las frecuencias espaciales (f_x, f_y) , entonces cada componente de la imagen $G'(f_x, f_y)$ depende de la correspondiente en el objeto $G(f_x, f_y)$ y su cociente $K(f_x, f_y)$ es la función de transferencia.

Es decir, un sistema óptico como transmisor de frecuencias espaciales es totalmente equivalente a un filtro lineal pasivo.

Normalmente, se utiliza la función de transferencia normalizada a la unidad. Hablamos entonces de Función de Transferencia Óptica (OTF). Esta función es una magnitud compleja, que puede expresarse:

$$OTF(f_x, f_y) = MTF(f_x, f_y) \cdot e^{i\Phi(f_x, f_y)}$$

donde

$\Phi(f_x, f_y)$ es la fase de la función de transferencia Óptica o Función de Transferencia de Fase (PTF). Da cuenta de los posibles desplazamientos que se producen en las funciones elementales que forman la imagen, respecto a la posición en el objeto.

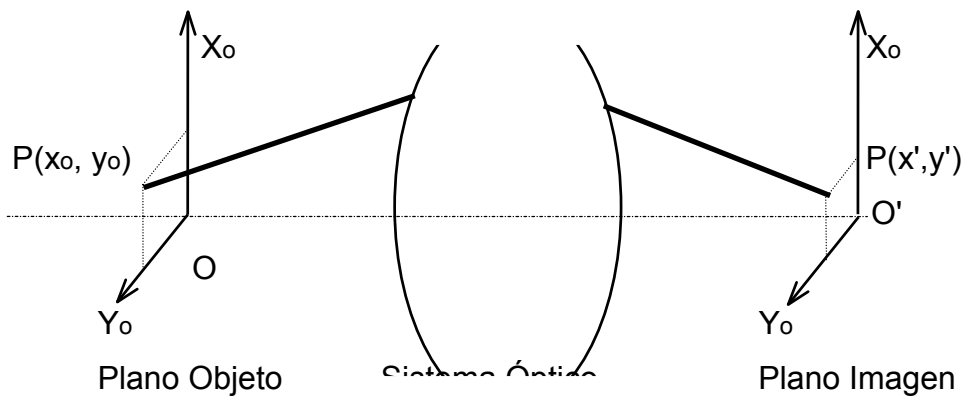
$MTF(f_x, f_y) = |OTF(f_x, f_y)|$ es el módulo de la Función de Transferencia Óptica o Función de Transferencia de Modulación: Expresa la caída de modulación (contraste) de las funciones elementales al pasar del objeto a la imagen.

Veamos ahora las diferencias existentes en el valor de la Función de Transferencia según sea el tipo de iluminación.

1.2.1.- Función de Transferencia para luz coherente.

Se trata ahora de expresar la Función de Transferencia para luz coherente en función de parámetros que caractericen al conjunto: Sistema óptico, plano objeto y plano imagen.

Consideremos un sistema óptico que forma en el plano O' , X' , Y' la imagen del plano objeto O , X_o , Y_o siendo O y O' puntos conjugados.



Sean (x_o, y_o) las coordenadas de un punto P cualesquiera y (x'_o, y'_o) las de su imagen ideal P' . Debido a la difracción y a las aberraciones la luz procedente de P se extiende alrededor de P' y podemos representar su distribución de amplitud por $h(x'-M x_o, y'-M y_o)$, siendo M el aumento. Se puede demostrar que esta distribución es simplemente la mancha de difracción de Fraunhofer debida a la pupila de salida, luego utilizando coordenadas reducidas,

$$\begin{cases} \hat{x}_o = M x_o \\ \hat{y}_o = M y_o \end{cases}$$

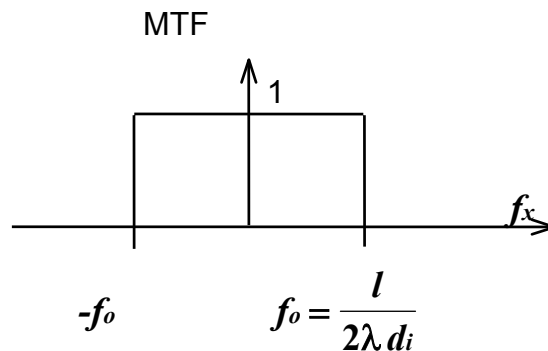
$$h(x' - \hat{x}_o, y' - \hat{y}_o) = cte \cdot \iint_{-\infty}^{+\infty} P(\lambda di x, \lambda di y) \cdot e^{-j2\pi((x' - \hat{x}_o)x + (y' - \hat{y}_o)y)} dx dy$$

donde $P(x, y) = P_d(x, y) \cdot e^{-jkW(x,y)}$ siendo $W(x,y)$ la aberración de onda y $P_d(x,y)$ una función que es la unidad dentro de la pupila de salida y cero fuera de ella. La distancia pupila de salida-plano imagen viene especificada por el valor di .

Si aplicamos ahora la transformada de Fourier a $h(x,y)$ obtenemos la Función de Transferencia.

$$H(f_x, f_y) = P(-\lambda di f_x, -\lambda di f_y)$$

De ello concluimos que en el caso de sistema perfecto : $W(x,y) = 0$ el sistema óptico se comporta como un filtro que transmite sin distorsionar las componentes de todas las frecuencias hasta una frecuencia límite, por encima de la cual no transmite.



En la figura se representa la Función de Transferencia $H(f_x, 0)$ para un sistema perfecto con pupila de anchura l . Sin embargo un sistema aberrante distorsiona las componentes que toman valores dentro del ancho de banda.

Es interesante volver a insistir aquí en que solamente si las aberraciones no varían con el campo se puede hablar de isoplanatismo y por tanto de Función de Transferencia. En caso contrario habría que definir una Función de Transferencia distinta en cada región.

1.2.2.- Función de Transferencia para luz incoherente: FTO.

Cuando iluminamos con luz incoherente hemos visto que la respuesta del sistema a una fuente puntual es el módulo al cuadrado de la respuesta a la misma fuente en el caso de luz coherente, es decir $|h(\mathbf{x}' - \hat{\mathbf{x}}_o, \mathbf{y}' - \hat{\mathbf{y}}_o)|^2$; luego la Función de Transferencia será la Transformada de Fourier (FFT) de $|h(\mathbf{x}, \mathbf{y})|^2$.

$$FFT\left\{|h(\mathbf{x}, \mathbf{y})|^2\right\} = \iint_{-\infty}^{+\infty} H(\xi, \eta) H^*(\xi - f_x, \eta - f_y) d\xi d\eta$$

donde $H(\xi, \eta) = FFT(h(\mathbf{x}, \mathbf{y}))$

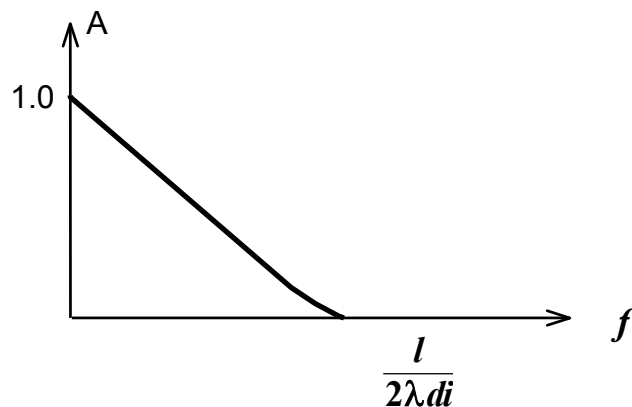
Por lo que en función de las características del sistema óptico nos queda:

$$OTF(f_x, f_y) = \frac{\iint_{-\infty}^{+\infty} P\left(\xi - \frac{\lambda di f_x}{2}, \eta - \frac{\lambda di f_y}{2}\right) \cdot P^*\left(\xi - \frac{\lambda di f_x}{2}, \eta - \frac{\lambda di f_y}{2}\right) d\xi d\eta}{\iint_{-\infty}^{+\infty} |P(\xi, \eta)|^2 d\xi d\eta}$$

Habiendo normalizado a la unidad.

A la Función de Transferencia para luz incoherente se le suele llamar Función de Transferencia Óptica (FTO).

En el caso del sistema perfecto la Función de Transferencia a una determinada frecuencia (f_x, f_y) coincide con el área común a dos pupilas de salida desplazadas una respecto a la otra $(\lambda d_i f_x, \lambda d_i f_y)$, esto significa que el sistema se comporta como un filtro que transmite bien las componentes de frecuencia espacial baja y tiene una frecuencia límite por encima de la cual no transmite. Este caso viene representado en la figura siguiente, donde la frecuencia de corte es el doble que en iluminación coherente.



1.2.3.- Función de Transferencia Policromática.

Hasta el momento hemos expuesto cómo se define la OTF para luz monocromática, pero muchas de las fuentes con que se iluminan los sistemas

ópticos son policromáticas, siendo, por consiguiente, necesaria la introducción de la Función de Transferencia Policromática²⁰.

Para ello se parte de la descomposición espectral de la intensidad de la imagen policromática:

$$I_i(x', y') = \int_0^{\infty} I_{i\lambda}(x', y') d\lambda = \int_0^{\infty} R_\lambda S_\lambda T_\lambda \iint_{-\infty}^{+\infty} |h_\lambda(x' - \bar{x}_o, y' - \bar{y}_o)|^2 I_o(\bar{x}_o, \bar{y}_o) d\bar{x}_o d\bar{y}_o d\lambda$$

donde R_λ = Distribución espectral de energía de la fuente.

T_λ = Transmisión espectral del sistema óptico.

S_λ = Respuesta espectral del detector.

La expresión anterior nos permite definir la Función de Transferencia Policromática, como la transformada de Fourier

$$|h(x, y)|^2 = \int_0^{\infty} |h_\lambda(x, y)|^2 R_\lambda S_\lambda T_\lambda d\lambda$$

Existen dos métodos para determinar la Función de Transferencia Óptica Policromática $OTF(f_x, f_y)$, el primero consiste en evaluar el cociente $\frac{G'(f_x, f_y)}{G(f_x, f_y)}$

donde G y G' son las transformadas de Fourier de la imagen y del objeto respectivamente. Este método es el que se llevará a cabo con nuestra unidad de medida. En el segundo método, $OTF(f_x, f_y)$ se obtiene como suma de las Funciones de Transferencia Óptica monocromáticas multiplicadas por unos ciertos factores de peso.

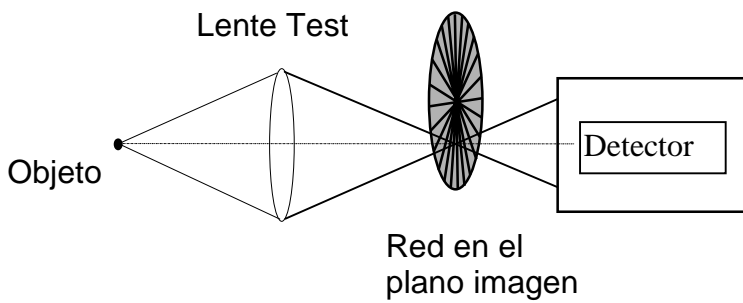
$$OTF(f_x, f_y) = \int_0^{\infty} R_\lambda S_\lambda T_\lambda A_\lambda(f_x, f_y) d\lambda$$

Este método se lleva a cabo en todos los métodos interferométricos que exigen como condición la monocromaticidad de la fuente de iluminación y por tanto

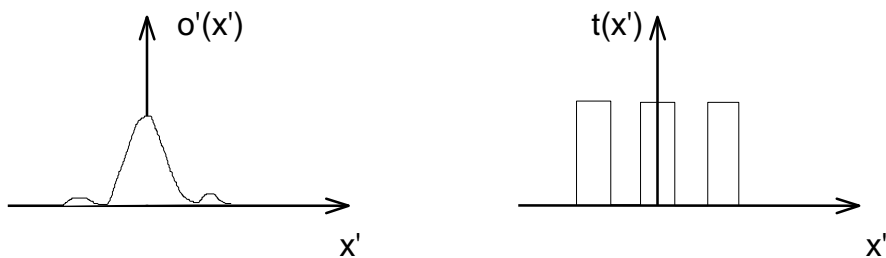
solamente son capaces de medir la OTF monocromática. También utilizan este método algunos programas de cálculo de la Función de Transferencia

1.3.- MEDIDA DE LA MTF. TEORÍA DEL BARRIDO DE LA IMAGEN.

Sea $o'(x', y')$ la distribución de intensidad en la imagen producida por la lente en estudio. Sea $t(x', y')$ la transmitancia de la pantalla que barre la imagen.



Se superponen la imagen y la pantalla en el mismo plano, con un desplazamiento relativo entre ellas de valor ξ en el eje x , η en el eje y .



El flujo de energía transmitida se expresa:

$$\phi(\xi, \eta) = \iint_{-\infty}^{+\infty} o'(x', y') \cdot t(x' - \xi, y' - \eta) dx' dy'$$

Siendo
$$\phi(\mathbf{0},\mathbf{0}) = \iint_{-\infty}^{+\infty} o'(x', y') \cdot t(x', y') dx' dy'$$

Si, como es habitual, la máscara es una función par, $t(x', y') = t(-x', -y')$

entonces

$$\phi(\xi, \eta) = \iint_{-\infty}^{+\infty} o'(x', y') \cdot t(\xi - x', \eta - y') dx' dy'$$

Esto es precisamente el producto de convolución de o' con t . Por el teorema de convoluciones, tomando la transformada de Fourier a ambos lados de la igualdad,

$$\Phi(f_x, f_y) = O'(f_x, f_y) \cdot T(f_x, f_y)$$

$$MTF(f_x, f_y) = |OTF(f_x, f_y)| = \left| \frac{O'(f_x, f_y)}{O(f_x, f_y)} \cdot \frac{O(\mathbf{0}, \mathbf{0})}{O'(\mathbf{0}, \mathbf{0})} \right| = \left| \frac{O'(f_x, f_y)}{O(f_x, f_y)} \cdot \frac{1}{N} \right|$$

(N es el factor de normalización)

En nuestro montaje, no tenemos forma de medir el desfase entre O y O', con lo cual solamente estaremos midiendo los módulos y podremos considerar:

$$MTF(f_x, f_y) = \frac{O'(f_x, f_y)}{O(f_x, f_y)} \cdot \frac{1}{N}$$

La fase de la OTF, la PTF (Phase Transfer Function) no es tan interesante como su módulo (la MTF) para la mayoría de las aplicaciones comunes. Además, la medición de la PTF resulta aún más complicada que la de la MTF, y aporta mucha menos información.

Queda
$$\Phi(f_x, f_y) = MTF(f_x, f_y) \cdot O(f_x, f_y) \cdot T(f_x, f_y) \cdot N$$

Expresa la cantidad de flujo de luz que atraviesa la red de barrido en el espacio de las frecuencias espaciales.

Hay que hacer notar que, al ser el producto de convolución conmutativo, sólo es importante el desplazamiento relativo entre el objeto y la pantalla. No introduce ningún cambio qué es lo que se mueve en realidad.

1.3.1.- Métodos indirectos de medida.

Puede parecer a la vista de lo anterior que el método más simple para obtener la MTF es hacer tanto $O(f_x, f_y)$ como $T(f_x, f_y)$ iguales a uno, es decir, $o'(x', y')$ y $t(x', y')$ iguales a una δ de Dirac. El sentido físico de esto es barrer un punto con otro punto, con lo cual tendríamos que $\Phi(f_x, f_y) = MTF(f_x, f_y)$.

Pero la única forma de conseguir el valor de $\Phi(f_x, f_y)$ es realizando la transformada de Fourier de la función $\phi(\xi, \eta)$. Esta función, ya medible, tendrá una función genérica, y la transformada habrá que realizarla por métodos numéricos y con ayuda de un ordenador.

Al conjunto de métodos en los que hay que realizar el cálculo de la transformada de Fourier para obtener la MTF, se les denomina métodos indirectos. No se reducen a esta técnica que de hecho es poco recomendable desde el punto de vista práctico por el hecho de trabajar con puntos en lugar de rendijas o funciones escalón.

Con la generalización del uso de los ordenadores y los avances en la investigación de algoritmos para realizar la transformada de Fourier, aparecieron multitud de métodos indirectos.

Vamos a detallar ahora la base física de algunos de los métodos más utilizados.

El método más intuitivo es medir la PSF y realizar numéricamente su transformada de Fourier. La medición de esta función, con calidad suficiente para poder realizar una transformada de Fourier con garantías, exige el uso de una cámara CCD de resolución suficiente.

El tamaño de la PSF varía dependiendo del sistema. Pero por lo general está entre unas pocas micras y décimas de milímetro. Además carece de simetría radial, y la iluminancia de las partes más externas de la imagen será muy baja, haciendo muy difícil su medida, aunque una parte importante del flujo de luz está contenida en esa parte de la imagen.

Como contraprestación a la dificultad de su medida, obtenemos la MTF en todas las direcciones sin necesidad de un barrido azimutal.

Un avance desde el punto de vista de la medida consiste en determinar la Función de Respuesta de Línea o LSF (Line Spread Function).

Considerando que una línea no es más que una serie de puntos, es fácil comprender que:

$$LSF(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} PSF(x, y) \cdot dy$$

Para pasar de la LSF a la OTF, (al igual que hicimos con la PSF) usamos la transformada de Fourier:

$$OTF(f_x) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i2\pi f_x x} dx = MTF(f_x) \cdot e^{iPTF(f_x)}$$

La PTF vale cero si la LSF correspondiente es simétrica. Salvo sistemas con tolerancias de distorsión muy estrictas (aplicaciones científicas o de fotogrametría), la PTF no aporta mucha información sobre la calidad del sistema, además de ser difícil de medir. Por ejemplo el máximo de la PTF, 2π radianes, a 25 líneas por milímetro equivale a un desplazamiento de la imagen de 0,04 milímetros. Por esta razón, la PTF no se suele considerar en sistemas de medida de MTF convencionales, y no la consideraremos en nuestro estudio.

La ventaja de utilizar rendijas en lugar de puntos reside en la cantidad de luz que se obtiene en el detector. Sin embargo, obtenemos una MTF que depende de la orientación.

En un principio, la imagen de la rendija objeto era barrida por una segunda rendija, y a la señal del detector se le hacía la transformada de Fourier electrónicamente.

Esto hoy en día está superado y sólo se plantean soluciones que pasen por el uso de cámaras CCD como detector y ordenadores para realizar la transformada de Fourier. El problema fundamental que se plantea, es que el muestreo de la detección se comporta como una función peine que multiplica a la LSF. Al realizar la transformada de Fourier, la MTF aparece convolucionada por una función peine de separación inversa a la anterior. Si el tamaño de los píxeles no es suficientemente pequeño, a frecuencias altas la MTF aparecerá falseada por aliasing, es decir,

queda multiplicada por ella misma, desplazada una cierta distancia. Resumiendo, el tamaño de los píxeles limita la frecuencia máxima que se puede medir con garantías.

Otro método indirecto consiste en la medida de la función de borde o traza de filo, es decir, la imagen que produce un objeto que consiste en un cambio brusco de luminosidad entre dos semiplanos. La función de borde es la convolución del objeto que la provoca por la LSF, es decir, la integral de la LSF.

Por tanto, este método consiste en el registro de la función de borde, la derivación de la señal para obtener la LSF y la transformada de Fourier de esta última. La derivación es una operación muy sensible a las imperfecciones de la señal original, y por tanto en este método hay que poner especial cuidado en la eliminación de errores y ruido en la etapa de registro.

Actualmente los métodos indirectos se prefieren a los directos, en particular en entornos industriales de control de calidad, donde la eliminación de partes móviles y la automatización del proceso son especialmente valorados.

1.3.2.- Métodos interferométricos

Cuando se mide óptica de alta calidad, como objetivos de microscopio, que exige rendijas u orificios objeto extremadamente pequeños, es difícil mantener una incoherencia luminosa estricta, necesaria en otros métodos de medida. Un método interferométrico requiere coherencia, con lo cual se elimina este problema.

Además, el uso de luz laser proporciona una alta concentración de energía que aumenta la relación señal-ruido en el detector.

Una desventaja es que la MTF policromática no se puede medir directamente.

La OTF, como se explicó anteriormente, puede ser obtenida de la autocorrelación de la función pupila.

Uno de los métodos interferométricos consiste en medir el frente de onda en la pupila de salida del sistema óptico, y calcular posteriormente la OTF por autocorrelación.

Otros métodos se basan en la medida del flujo total de luz en el área de intersección de dos frentes de onda desplazados.

Generalmente se utilizan modificaciones del interferómetro Michelson.

Una variación de los métodos interferométricos son los métodos holográficos de medida de MTF: Se registra por duplicado la función pupila en dos hologramas y posteriormente se reconstruyen a la vez, con un desplazamiento variable entre ambas. El flujo total debido a la interferencia de estas dos funciones pupila contiene información sobre el módulo y la fase de la MTF.

1.3.3.- Métodos directos

Se trata de encontrar mecanismos que eviten el paso intermedio de realizar numéricamente la transformada de Fourier. Dentro de estos métodos se suelen incluir los métodos semi-indirectos, aquellos en los que es necesario realizar alguna operación de cálculo para optimizar los resultados, tales como filtrado de frecuencias, normalización... Estas operaciones se suelen hacer de forma electrónica.

Aunque a primera vista puedan parecer métodos más complicados conceptualmente que los directos, dando lugar a instalaciones experimentales mucho más específicas, el proceso completo de una medida es de más fácil seguimiento.

Partimos del resultado conocido:

$$\Phi(f_x, f_y) = MTF(f_x, f_y) \cdot O(f_x, f_y) \cdot T(f_x, f_y) \cdot N$$

El método más sencillo teóricamente para hacer una medida directa es el siguiente:

$$O(f_x) = 1 \Rightarrow o(x') = \delta(x')$$

El objeto es una rendija infinitamente estrecha

$$t(x') = a + b \cos(2\pi f_c x') = a + \frac{b}{2} \left(e^{2\pi f_c x'} + e^{-2\pi f_c x'} \right)$$

La red de barrido es sinusoidal en transmisión en la dirección x.

$$\frac{b}{a} \text{ es el contraste y } f_c = \frac{1}{\text{periodo de la red}} \text{ es la frecuencia}$$

característica.

Realizamos la transformada de Fourier:

$$T(f_x) = a\delta(f_x) + \frac{b}{2} \{ \delta(f_x + f_c) + \delta(f_x - f_c) \}$$

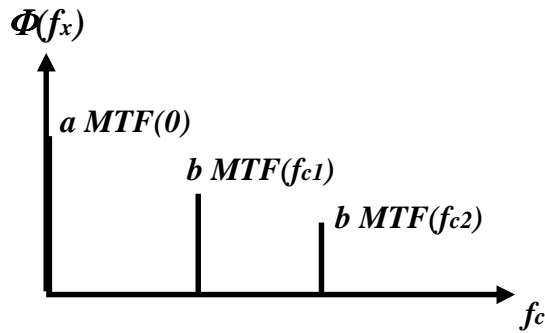
Con lo cual,

$$\Phi(f_x) = MTF \cdot T(f_x) \cdot N = MTF(f_x) \cdot N \cdot \left\{ (a\delta(f_x) + \frac{b}{2} \{ \delta(f_x + f_c) + \delta(f_x - f_c) \}) \right\}$$

$$\text{-Si } f_x = 0 \text{ entonces } \Phi(f_x = 0) = N \cdot (a \cdot MTF(0)) = N \cdot a$$

$$\text{-Si } f_x = f_c \text{ entonces } \Phi(f_c) = N \cdot \left(\frac{b}{2} \cdot MTF(-f_c) + \frac{b}{2} \cdot MTF(f_c) \right)$$

Las frecuencias positivas y negativas tienen el mismo significado físico, por tanto, el flujo de luz será suma de dos contribuciones, una correspondiente a frecuencia espacial cero, y otra correspondiente a frecuencia espacial f_c . Pero todavía no podemos obtener la información de la MTF ; En el detector no tendremos más que una señal constante.



Para obtener información sobre la MTF, ponemos en movimiento a velocidad constante uno de los dos elementos, o bien la rendija, o bien la red. Con esto, la información que portan las frecuencias espaciales pasa a ser portada por frecuencias temporales, con la transformación dada por:

$$\nu = V \cdot f_x \quad \begin{array}{l} \nu \text{ es frecuencia temporal} \\ V \text{ es velocidad constante} \end{array}$$

La intensidad recogida en el detector, proporcional al flujo de luz, será la composición de dos señales, una de frecuencia temporal cero, y otra de frecuencia temporal ν .

En el espacio de frecuencias:

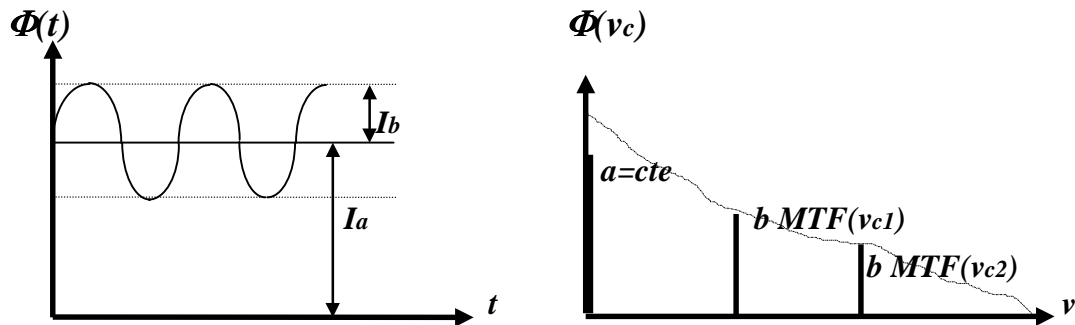
$$I(\nu) \propto \rho \Phi(\nu) \propto MTF(\nu) \{ a \delta(\nu) + b (\delta(\nu - \nu_c)) \}$$

$$I(\nu = 0) \propto a$$

$$I(\nu_c) \propto b MTF(\nu_c)$$

En el espacio de tiempos:

$$I(t) = I_a + I_b \cos(2\pi \nu_c t + \psi) \quad \text{Con} \quad I_b \propto b MTF(f_c)$$



Si se elimina la componente de continua (olvidamos el fondo de luz constante y nos quedamos con las variaciones en el tiempo de la intensidad de luz), entonces:

$$I(\nu_c) \propto \rho \Phi(\nu_c) \propto b \text{ MTF}(\nu_c) \quad \rho: \text{sensibilidad del detector.}$$

La amplitud y la fase de la señal eléctrica de frecuencia ν_c que produce el detector corresponden a la amplitud y fase de la MTF a frecuencia f_c . Para evitar el factor de proporcionalidad (b , N , ρ) hemos de normalizar de tal forma que la amplitud de la señal medida a $\nu_c = 0$ sea uno.

Tal como se realizan las medidas, no se puede medir la MTF a frecuencia espacial cero. Para realizar la normalización habría que interpolar los resultados obtenidos a frecuencias bajas. Este problema puede resolverse con otro tipo de instalaciones, pero tradicionalmente ha sido una importante fuente de error en aparatos de medida de MTF.

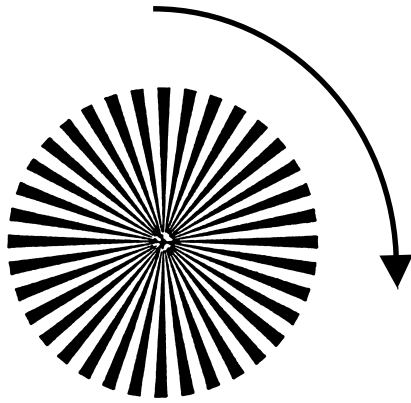
2.- UNIDAD DE MEDIDA.

2.1.- DISPOSITIVOS PRECEDENTES.

Dentro de los diferentes métodos directos de medida de la función de transferencia, el sistema experimental que nos ocupa, EROS 200 (Ealing), representa el último paso en la evolución de una serie de dispositivos experimentales que vamos a detallar a continuación. Las mejoras de un sistema a otro son tanto de carácter puramente tecnológico como de fundamento físico.

Sistema de Lindberg.

Lindberg²⁰ usa una red de onda cuadrada de frecuencia temporal variable. La forma de llevar a la práctica esta idea era a través de un disco de sectores alternativamente opacos y transparentes, rotando a velocidad angular constante en el plano imagen de la lente en estudio. El objeto utilizado era puntual. Al realizar barridos de la imagen con el disco, a distintos radios, obtenemos distintas frecuencias espaciales sin variar la frecuencia temporal de la señal en el detector. (El radio cambia la velocidad de barrido y la frecuencia característica de tal forma que la frecuencia temporal no cambia. Esto facilita el análisis posterior de la señal).



Al ser la onda cuadrada en lugar de sinusoidal, $T(x')$ tiene muchos armónicos además del fundamental. Sólo la amplitud del armónico fundamental lleva información de la MTF. Por tanto, la señal temporal resultante ha de ser filtrada electrónicamente por un filtro pasa banda para seleccionar el armónico fundamental. Veamos esto matemáticamente:

Red periódica en almendra de contraste unidad:

$$t(x') = 1 + \frac{4}{\pi} \left\{ \cos(2\pi f_c x') - \frac{1}{3} \cos(2\pi 3 f_c x') + \dots \right\}$$

Para una rendija objeto, el flujo de luz en el espacio de frecuencias espaciales es de la forma:

$$\Phi(f_x) = MTF(f_x) N \left\{ \delta(f_x) + \frac{2}{x} \left\{ \delta(f_x + f_c) + \delta(f_x - f_c) \right\} - \frac{1}{3} \left\{ \delta(f_x + 3f_c) + \delta(f_x - 3f_c) \right\} + \dots \right\}$$

Al poner en movimiento la rendija o la red a velocidad constante V , la intensidad en el detector tendrá un espectro de frecuencias temporales del tipo:

$$I(\nu) \propto \rho \Phi(\nu) \quad \text{Con } \nu = V f_x$$

Si pasamos esta señal electrónica de variación temporal a través de un filtro pasabanda estrecho en ν_c , la amplitud y fase de la salida será proporcional a la amplitud y fase de la OTF a la frecuencia espacial f_c .

$$I(\nu_c) \propto \rho \Phi(\nu_c)$$

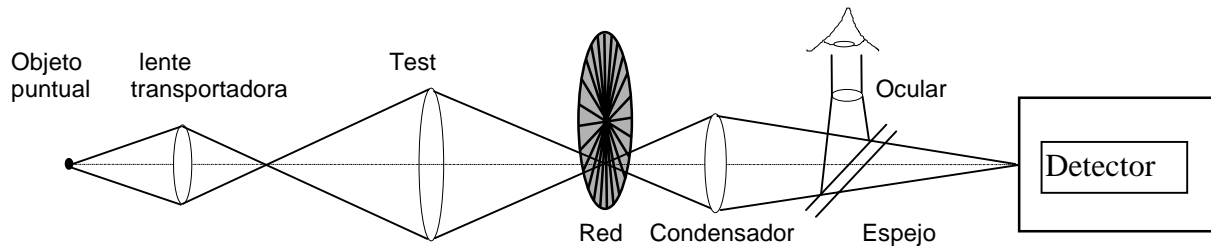
Una vez obtenida la curva para todas las frecuencias (para todas las ν_c es decir, para todas las f_c), ha de ser normalizada al valor unidad en el origen, como en el caso anterior. Esto introduce una serie de errores importantes en el resultado final pues en este dispositivo la MTF a frecuencia espacial cero no puede ser medida, (exigiría una red de radio infinito) y es necesario extrapolar los resultados obtenidos a baja frecuencia. Una red de radio infinito, aun siendo inviable, sólo permitiría aproximarnos a $\nu_c = 0$ de forma asintótica, y el verdadero límite lo impondrían las anchuras de los filtros pasabanda y pasabaja.

Una modificación al sistema anterior sería utilizar la red como objeto y el orificio objeto como elemento de barrido de la señal resultante. Esto, como vimos anteriormente es conceptualmente equivalente a lo anterior, y puede interpretarse como una consecuencia física de la propiedad matemática de que el producto de convolución es conmutativo.

Se suele introducir una lente transportadora con objeto de reducir los inconvenientes de usar un objeto puntual: efecto de extensión finita, que veremos más adelante, y pérdida de flujo de energía en el detector. La lente, que se supone sin aberraciones, crea una imagen reducida perfecta del objeto. Con esto conseguimos objeto más pequeño con la misma intensidad de luz: conseguimos limitar el efecto de anchura de rendija sin perder relación señal-ruido en el detector.

Otra mejora habitual consiste en introducir un sistema condensador-espejo-ocular que facilite la alineación del sistema, y garantice un uso óptimo del detector.

El banco óptico final podría ser el esquematizado en la figura:

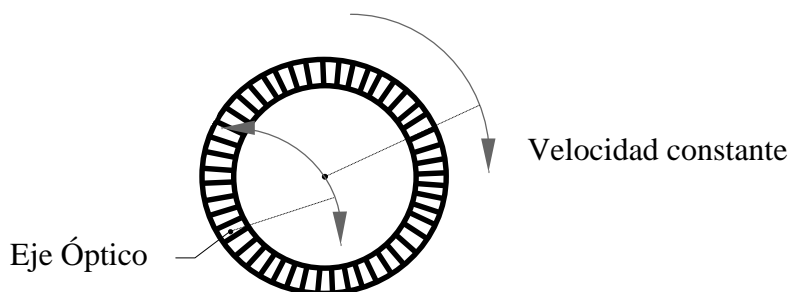


Sistema de Baker.

Baker²¹ diseñó un dispositivo experimental más refinado y dio completa solución a los problemas de medida de la frecuencia espacial cero, y por tanto normalización, y variación continua de las frecuencias espaciales.

Como objeto utiliza una rendija (que llamaremos rendija objeto) sobre la que se proyecta parte de la imagen de una red radial de alto contraste (a través de una lente transportadora que se supone libre de aberraciones).

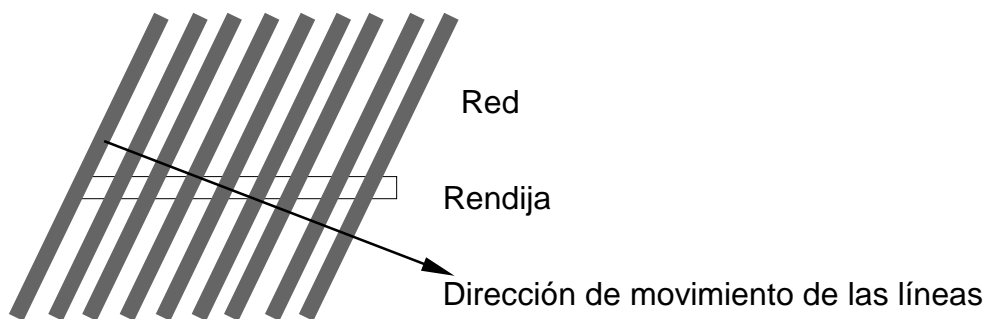
La red, en su totalidad, puede verse en la figura siguiente:



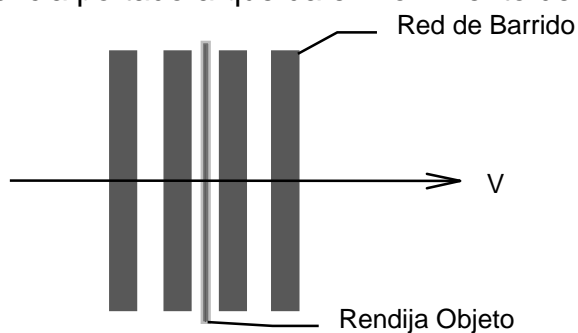
La red rota alrededor de su centro a velocidad constante.

En el plano de la rendija objeto, se obtiene una onda espacial cuadrada que barre la rendija. La red completa y el motor se pueden girar en torno a un punto que está en el centro del patrón de líneas, y sobre el eje óptico. Esto hace que el ángulo entre la rendija objeto y las líneas de la red se pueda variar, dando lugar a distintas frecuencias espaciales. Veamos esto último:

Las líneas se mueven en todo momento en dirección perpendicular a ellas mismas, y a velocidad constante.



Cuando las líneas de la red son paralelas a la rendija, se produce una distribución de luz uniforme de luz a lo largo de toda la longitud de esta, lo que corresponde a una frecuencia espacial cero, y es modulada en el tiempo por la frecuencia portadora que da el movimiento de las líneas.

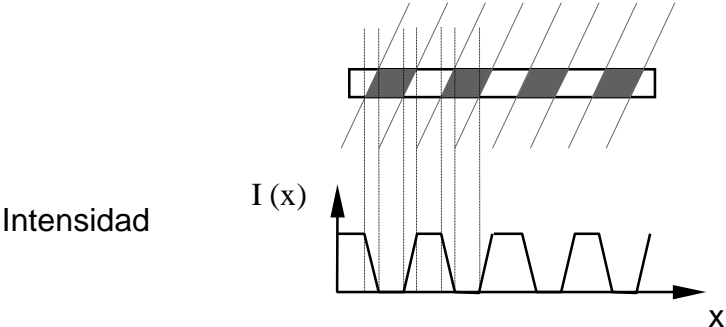


Al rotar el centro de la red un cierto ángulo alrededor del eje óptico, se genera un patrón de línea a lo largo de la rendija de una frecuencia espacial distinta de cero.

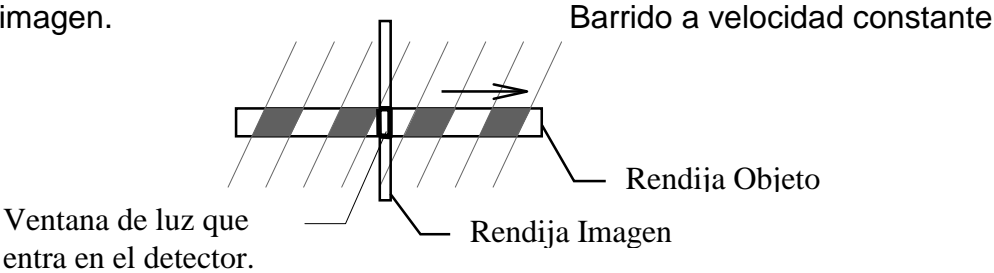
Para transformar esta frecuencia espacial en una frecuencia temporal, Baker colocó en el plano imagen de la lente test una rendija imagen perpendicular a la rendija objeto. Haciendo rotar la red a velocidad constante, como en el caso anterior, el detector nos dará información del contraste de esa frecuencia espacial, pese a que la señal eléctrica tendrá siempre la misma frecuencia temporal: la correspondiente a la red girando a esa velocidad.

Cuando las líneas de la red son perpendiculares a la rendija objeto, la onda espacial resultante tendrá la frecuencia espacial máxima que se puede medir.

Plano Objeto: Onda espacial generada:

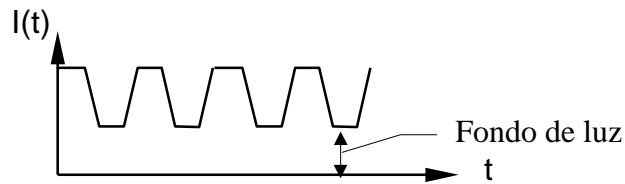


Plano imagen.

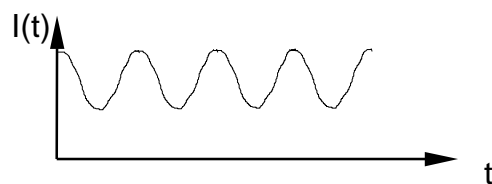


Señal en el detector:

- Si no hubiera aberraciones:



- Con aberraciones:



La señal eléctrica del detector se filtra, de tal forma que obtengamos el armónico fundamental. Esta señal se demodula, para obtener su amplitud. La relación entre esta amplitud y la correspondiente a frecuencia espacial unidad, expresa la pérdida de contraste al aumentar la frecuencia espacial, y es por tanto la MTF a esa frecuencia.

La onda espacial, en el caso de una rendija objeto infinitamente estrecha será cuadrada, y para una cierta anchura será romboidal o incluso triangular (ya que el detector va a integrar la luz en dirección perpendicular a la rendija objeto). Que la forma de la onda espacial no sea estrictamente cuadrada, no va a dar lugar a ningún problema, ya que siempre nos quedaremos tan sólo con la frecuencia fundamental. Para cada frecuencia, la forma de la onda espacial va a ser ligeramente distinta. Baker demostró que la amplitud de la componente fundamental no varía en todo el rango (de

0 a 90 grados) más de un uno por ciento, siempre que la anchura de las rendijas objeto e imagen sea menor que un cuarto de la anchura de las líneas.

Una forma más teórica de explicar el avance de Baker es considerar que el diafragma objeto fue sustituido por dos rendijas perpendiculares. Por la disposición en la que se colocan dentro del dispositivo, sólo la primera lleva información de las aberraciones del sistema (LSF) y la otra se mantiene inalterada. La segunda rendija hace que, de toda la imagen de la primera, que en primera aproximación podemos tratar como la LSP, nos quedemos con sólo un elemento infinitesimal transversal. El resultado es un punto, ideal en dirección Y pero con las aberraciones propias de la lente en dirección X. Este 'punto' es barrido en diferentes direcciones. Como sólo nos interesa la proyección de la dirección de barrido sobre la dirección en la que se presentan las aberraciones, podemos hablar de frecuencias espaciales efectivas, en función del ángulo.

Matemáticamente, la señal en el detector siempre es:

$$\Phi (f_x, f_y) = MTF(f_x, f_y) O (f_x, f_y) T (f_x, f_y) N$$

Las funciones $O (f_x, f_y)$ y $T (f_x, f_y)$ son las transformadas de Fourier de $o(x,y)$ y $t(x,y)$, que en este caso, Si consideramos anchura finita son :

$t(x,y)$: la convolución de la red de transmitancia en almena en dirección genérica (x,y) , dada por el ángulo de giro, y la rendija objeto, que es una función rectángulo en dirección Y.

$o(x,y)$: función rectángulo en dirección X.

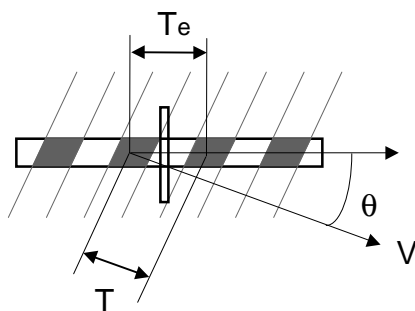
Apoyándonos en el razonamiento anterior, podemos hacer algunas simplificaciones: la segunda rendija hace que al final sólo recibimos información de la componente f_x de la red: elimina la dependencia en f_y . Para distintos ángulos de la red se proyecta una distinta frecuencia espacial en dirección X, que llamaremos frecuencia efectiva de barrido. La teoría, por tanto, continua igual que en el dispositivo de Lindberg.

En la práctica, se alcanzan dos grandes avances:

Posibilidad de variar fácilmente la frecuencia espacial, sin cambiar la frecuencia temporal, lo que facilita el tratamiento electrónico de la señal.

Posibilidad de medir la frecuencia espacial cero. Este avance elimina errores de normalización, muy importantes, pues falsean toda la medida considerablemente.

Veamos la dependencia que tiene la frecuencia espacial de barrido con el ángulo:



T es el periodo de la red

T_e es el periodo efectivo de barrido

$$\cos \theta = \frac{T}{T_e} \quad T_e = \frac{T}{\cos \theta}$$

s es la frecuencia de la red $s = \frac{1}{T}$

s_e es la frecuencia efectiva de barrido

Por tanto

$$s_e = s \cos \theta$$

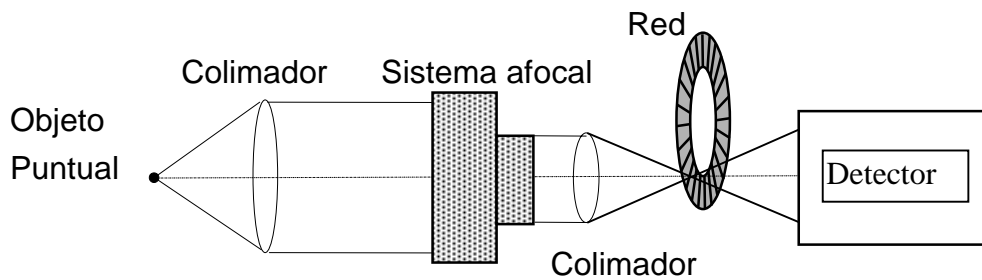
Cuando θ es cero, $s_e = s$. Y cuando θ es $\frac{\pi}{2}$, $s_e = 0$. Entre 0 y $\frac{\pi}{2}$ tenemos todos los valores posibles de s_e . Hay que subrayar que la escala no es lineal, pero que las variaciones pueden ser continuas si se desea.

Sistema de Williams.

Williams y colaboradores²² diseñaron en 1972 un equipo compacto con la filosofía de testear sistemas ópticos en plantas de producción de forma simple, rápida, barata y objetiva.

Mantuvieron la red de frecuencia espacial constante con posibilidad de variar el ángulo, pero retornaron a la idea de objeto puntual.

En el caso de testear un sistema afocal, la instalación es la siguiente:



Para un sistema que no funcione como afocal, se prescindiría de los colimadores.

Con esa configuración se perdía la ventaja de poder variar la frecuencia de forma continua, pero a cambio se podía, de forma simple, hacer un barrido de la MTF para diferentes azimuts. Una sola frecuencia resultaba representativa para evaluar la calidad del sistema, y el hecho de medir varios azimuts resultaba fundamental para sus propósitos.

Donde se hicieron avances significativos fue en el diseño de la electrónica.

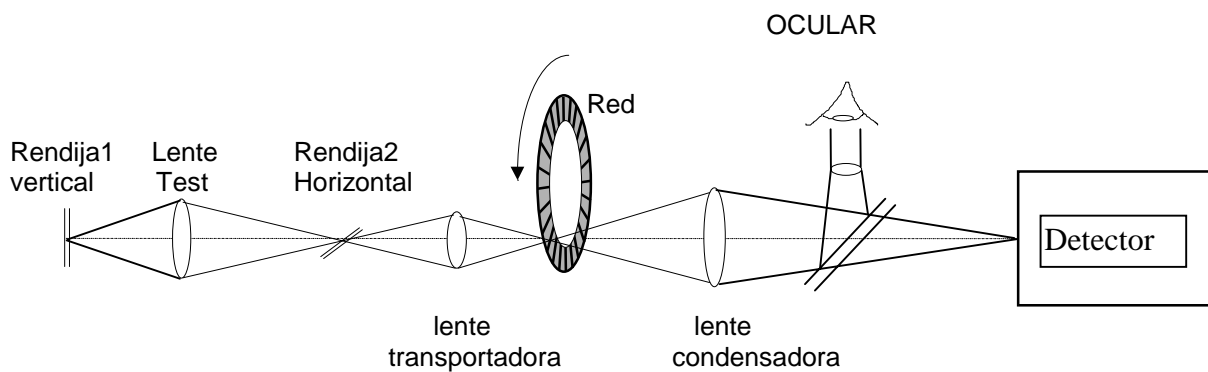
La MTF, como hemos visto anteriormente, es la razón entre la amplitud de la componente fundamental de la señal AC recogida en el detector, y la señal DC media.

Tras el filtrado de frecuencias, este sistema realizaba una normalización automática, por medio de un comparador y un bucle que mantenía la señal DC en uno, por medio del control del EHT del fotomultiplicador. La ventaja de este sistema es la lectura directa de la medida, sin necesidad de interpretaciones posteriores, y la independencia de las variaciones de luz ambiental.

2.2.- SISTEMA DE JONES

Jones²³ basándose en los sistemas anteriores, diseñó la unidad de medida de MTF de la que se encarga este trabajo.

En el diseño del montaje óptico se partió de la idea de Baker, con la salvedad de usar sólo una rendija como objeto y utilizar la red como barrido en el espacio imagen.



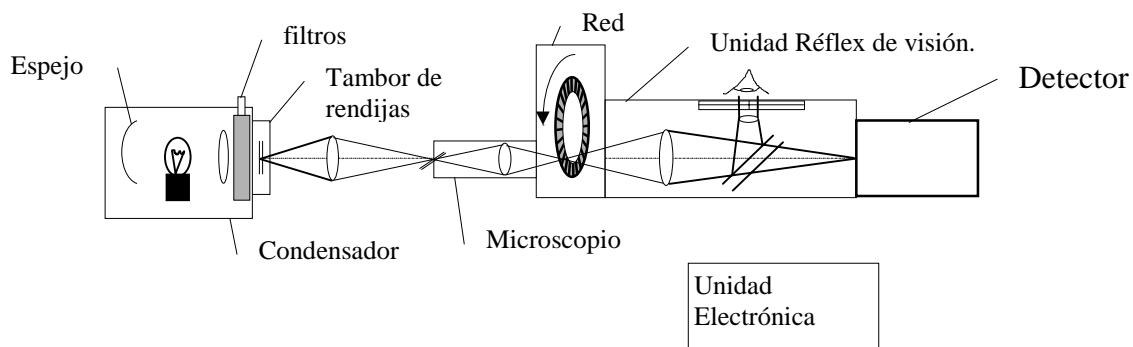
Lentes transportadoras de distintos aumentos se utilizan para cambiar el rango de la frecuencia efectiva de barrido. Además, permiten la utilización de rendijas de mayores anchuras. La anchura de las rendijas puede ser seleccionada, según la aplicación. El sistema permite, mediante el intercambio de filtros, seleccionar la composición espectral de la luz con la que se va a hacer el análisis (que debería ser siempre la que exijan las especificaciones de uso de la lente).

El ensamblaje mecánico, en forma de módulos intercambiables férreamente sujetos unos a otros, tiene por objeto evitar en lo posible los desajustes y problemas de alineamiento tan perjudiciales en las medidas y por otro lado tan comunes en los laboratorios de MTF hasta aquel momento.

La electrónica es análoga a la utilizada por Williams, y un convertidor analógico-digital permite lecturas numéricas.

Con esto, se obtiene una gran versatilidad. Posibilidad de medir gran cantidad de sistemas ópticos diferentes, focales o afocales, en eje y fuera de eje, en un amplísimo rango de frecuencias espaciales, y para todo tipo de composición espectral de la luz, para diferentes azimuts, en condiciones variables de luz ambiente...

Descripción del dispositivo experimental - Especificaciones



Fuente:

La iluminación de la rendija proviene de una fuente halógena de tungsteno de 20 vatios.

Un espejo esférico en cuyo centro de curvatura se coloca el filamento, y un sistema óptico condensador hacen que el rendimiento de la fuente sea mayor, concentrando mayor cantidad de luz, y uniformemente distribuida sobre la rendija.

Un soporte mecánico permite la introducción de filtros entre el condensador y la rendija. En principio, para testear instrumentos de visión, contamos con un filtro que reduce la distribución espectral de la luz procedente de la lámpara a la distribución de máxima eficiencia del ojo. Con esto, el comportamiento del sistema ante el test de MTF dará una cuantificación realista de las prestaciones del sistema en su uso normal.

Contamos con dos tambores de rendijas de anchura variable. En total disponemos de 60 rendijas con anchuras que van desde pocas micras hasta más de un milímetro. Elegir la anchura adecuada de la rendija, como veremos más adelante, tiene gran importancia para eliminar fuentes de error.

En el foco objeto de un objetivo de microscopio que sirve de lente transportadora, colocamos una rendija cuya imagen debe recaer sobre la red de frecuencia espacial.

Lente transportadora: Disponemos de dos conjuntos lente-rendija distintos. Uno de 5 aumentos y otro de 20. Para cada lente transportadora, las posiciones objeto e imagen y los aumentos están perfectamente definidos, por lo cual no es necesario tener rendijas intercambiables, dado que siempre se va a usar la misma.

Red de frecuencia espacial. La red físicamente tiene una única frecuencia espacial, 5 pares de líneas por milímetro. El dispositivo de rotación permite ir variando la frecuencia efectiva de 0 a 5 c/mm (en el plano donde está colocada). Lo que sucede, es que estamos calculando la MTF en el plano imagen de la lente test, con lo cual proyectamos dicha frecuencia espacial al plano de interés multiplicando por los aumentos de la lente transportadora: Obtenemos los siguientes rangos: de 0 a 25 c/mm y de 0 a 100 c/mm.

La red gira con un motor a una velocidad de 100 Hz. Esto da lugar a una señal eléctrica en el tiempo de 4250 Hz. (pues el radio son 8,5 mm)

$$v = V f_c$$

$$v = \omega r f_c$$

v :frecuencia de la señal en el detector

ω : velocidad de rotación del motor

V : Velocidad de barrido de la red

r : radio

f_c : frecuencia espacial de la red

Unidad réflex de visión.

Una lente recoge la luz emergente del módulo anterior para focalizarla en el detector. En este espacio intermedio se coloca un espejo abatible que desvía la luz hacia un ocular que permite alineado, enfoque aproximado, comprobación de paralelismos y perpendicularidades...

Fotomultiplicador.

Con preamplificador en montura de triple ventana. La respuesta del cátodo es del tipo S20.

Unidad electrónica.

Fuentes de tensión: de lámpara, motor de rotación, fotomultiplicador.

Analizador de la señal: La señal procedente del fotomultiplicador es amplificada.

La ganancia puede multiplicada por 10 o ser atenuada de forma continua. A la salida del atenuador sigue tres caminos:

1.- Directamente a una salida en el panel trasero. Esta salida (buffered O/P) puede ser llevada a un osciloscopio por medio de un conector B.N.C., para analizar su forma, frecuencia, ruido, contraste, atenuación al aumentar la frecuencia...

2.- A través de un filtro pasa baja y a través de otro atenuador (Balance) da lugar a la lectura de flujo de luz (light flux). Es decir, este camino se queda con la componente de continua de la señal de entrada. El atenuador tiene la misión de posibilitar la normalización automática de la MTF.

3.- Un filtro pasa banda se queda con la frecuencia portadora. Más tarde se suaviza la señal para dar un nivel DC, que tras ser comparado con el valor del flujo de luz obtenido del camino anterior, expresa el valor de la MTF.

Proceso de normalización.

En este dispositivo, la frecuencia espacial cero se da con un ángulo θ igual a $\frac{\pi}{2}$.

Para obtener directamente la MTF normalizada, hemos de hacer todas las medidas en una posición de los controles de atenuación y ganancia de forma que la **MTF (0) = 1**.

Podemos trabajar en dos modos:

- Modo manual: Todos los ajustes se realizan por parte del operario.
- Modo automático: El dispositivo electrónico controla la EHT del fotomultiplicador de forma que el flujo de luz se mantiene siempre igual a la unidad.

2.3.- AJUSTES REALIZADOS. CALIBRACIÓN.

2.3.1.- El problema de anchura de rendija.

Desde el momento en el que la rendija¹ (el objeto) no es una delta de Dirac, sino una función rectángulo de una anchura determinada, se nos plantea un cambio en todo el tratamiento matemático. Supongamos que la anchura de la rendija² es suficientemente pequeña como para no considerar sus efectos. (Más adelante veremos exactamente el tamaño adecuado).

Habíamos visto que el flujo de luz que llega al detector, en el espacio de frecuencias, tiene la forma:

$$\Phi(fx) = MTF(fx) O(fx) T(fx) N$$

Ahora

$$\begin{aligned} o(x') = \text{rect}(ax') &= 1 && \text{si } |ax'| < \frac{1}{2} \text{ mm} \\ &= 0 && \text{en otro caso} \end{aligned}$$

Con lo cual

$$\begin{aligned} o(x') = \text{rect}(ax') &= 1 && \text{si } |x'| < \frac{1}{2a} \text{ mm} \\ &= 0 && \text{en otro caso} \end{aligned}$$

La anchura del rectángulo será $\frac{1}{2a} + \frac{1}{2a} = \frac{1}{a}$

Hacemos la transformada de Fourier:

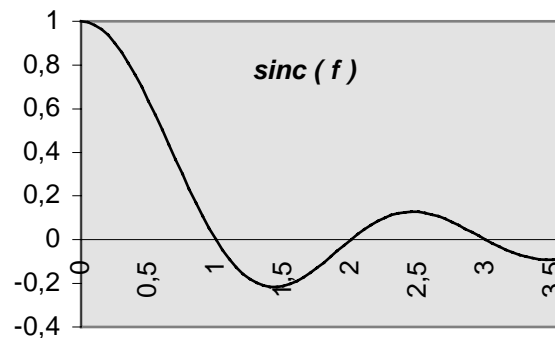
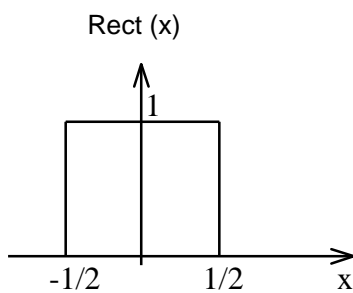
$$O(f_x) = \frac{1}{a} \operatorname{sinc}\left(\frac{f_x}{a}\right)$$

El factor $\frac{1}{a}$ no es importante, ya que se producirá una normalización posterior.

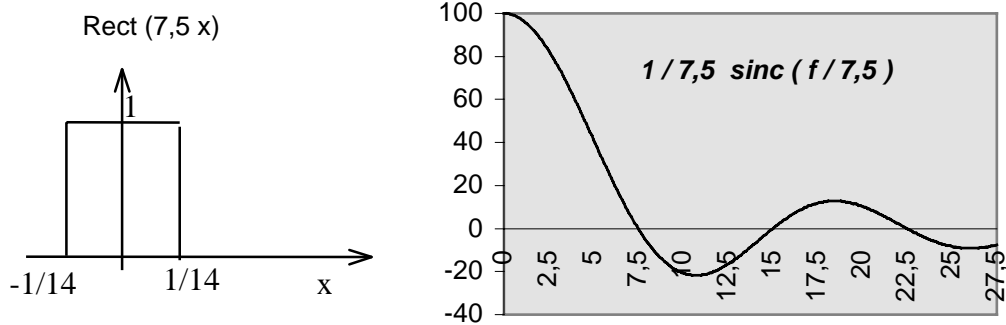
Entonces,

$$O(f_x) = \operatorname{sinc}\left(\frac{f_x}{a}\right) = \frac{\operatorname{sen}\left(\pi \frac{f_x}{a}\right)}{\pi \frac{f_x}{a}}$$

Ceros en $\frac{f_x}{a} = n$ es decir, en $f_x = a, 2a, 3a \dots$



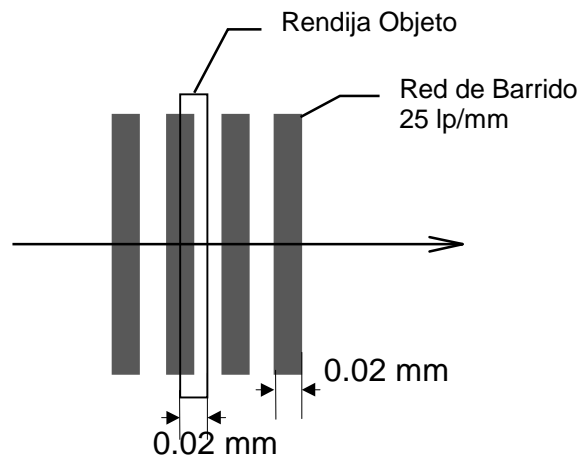
Para el caso particular de $a=7,5$ se representan las funciones de la rendija en el los dominios espacial y de frecuencias:



La diferencia entre considerar el objeto sin anchura y considerar su anchura, estriba en esta función que multiplica a la MTF. $\Phi(f_x)$ nos va a dar información del producto de la MTF (que es realmente lo que nos interesa) por $O(f_x)$, que es un efecto parásito, una causa de error debida a la anchura de la rendija.

Para ver la cantidad de error que se introduce, vamos a referirnos al plano imagen de la lente test. En este plano, y con la lente transportadora de cinco aumentos, $f_c=25$ lp/mm (pares de líneas por milímetro). Esto corresponde a un grosor de cada línea de 0.02 mm.

Si la imagen ideal sin difracción de la rendija a través de los elementos que haya (en general lente test, aunque puede haber un colimador) mide lo mismo que una línea de la red, entonces $a=50$ lp/mm.



La función $O(f_x)$ puede considerarse una función de error debido a la anchura de rendija que multiplica a la MTF real.

Si $f_x = f_c = 25 \text{ lp/mm}$ (máxima frecuencia espacial que se puede medir en este rango) entonces estamos cometiendo un error de:

$$\text{Error} (25 \text{ lp/mm}) = \text{sinc}\left(\frac{f_x}{a}\right) = \text{sinc}\left(\frac{25}{50}\right) = \text{sinc}(0.5) = 0.637$$

Esto indica que para esta frecuencia el error es del **36.6 %** . Un error, sin duda alguna apreciable.

Si hubiéramos tomado un grosor de rendija en el plano imagen de la lente test (que, hay que insistir, no equivale al mismo valor de anchura de la rendija real) de 0.04 mm entonces $a=25 \text{ lp/mm}$. Esto indica que la medida se hace cero en 25 lp/mm

independientemente del valor de la MTF en ese punto. Con lo cual la situación cambia cualitativamente:

- Antes teníamos un error de valor conocido en la medida. De ser apreciable, la medida del detector podía ser dividida para cada frecuencia por el valor del error a esa frecuencia, con lo cual se podía recuperar la información sobre la MTF. A esto se le llama proceso de corrección de anchura de rendija, y es algo que se hace de forma automáticamente en unidades de medida de MTF más modernas.

- En el segundo caso tenemos una destrucción de la información. Cuando el primer cero del sinc está en una frecuencia de nuestro interés, la medida no se puede realizar, pues además de tener un error considerable, no se puede hacer corrección de anchura de rendija . (No se puede hacer división por cero).

Por tanto el modo de proceder es el siguiente: si no se va a hacer corrección de anchura de rendija, lo cual es mucho más cómodo, hay que fijar un error máximo tolerable. Calcular la rendija de anchura más grande admisible. Probar si el detector recibe luz suficiente, no sólo para medir, sino para que el coeficiente señal-ruido permita una buena medida. (Esto puede comprobarse exactamente conectando un osciloscopio por la salida BUFFERED O/P, pero habitualmente es suficiente con percatarse de que la señal digital de la pantalla no sufre grandes variaciones a lo largo del tiempo). Si hay demasiado ruido, hay que plantearse aumentar el error, o bien hacer corrección de anchura de rendija.

Como orientación, si el grosor de rendija en el plano de interés es un cuarto del grosor de la línea de la red, entonces el error máximo (en f_c) es de un 2.5 %, error admisible cuando se habla de medidas MTF, según bibliografía^{24,25,26}.

Comprobación experimental.

Para ilustrar esta influencia de la anchura de la rendija, se realizó una experiencia práctica: Se realizaron dos medidas de la MTF de una lente, una con rendija grande y otra con rendija pequeña. Las demás condiciones, composición espectral de la luz, posiciones objeto e imagen... se dejaron inalteradas.

Como rendija pequeña se tomó la más pequeña disponible. La imagen producida, incluso estando expandida por las aberraciones de la lente, se observaba con un tamaño suficientemente pequeño como para descartar efectos de anchura de rendija. Por rendija grande se tomó una rendija que daba lugar a una imagen manifiestamente mayor que el tamaño de la línea de red. Al haber comprobado anteriormente que el orden de magnitud del ensanchamiento producido por las aberraciones era mucho menor, se concluye que dicha rendija grande producirá un error de anchura de rendija muy importante.

Se realizó la medida en el rango 0-25 lp/mm, para eliminar aún más el posible error de anchura de la rendija pequeña.

En la rendija grande, se obtuvieron varios ceros, como cabía esperar de la influencia de la función sinc. En los alrededores de dichos ceros se hicieron medidas

adicionales, ya que la posición exacta del cero es la que nos facilitará en un paso posterior ajustar los resultados experimentales a la gráfica teórica.

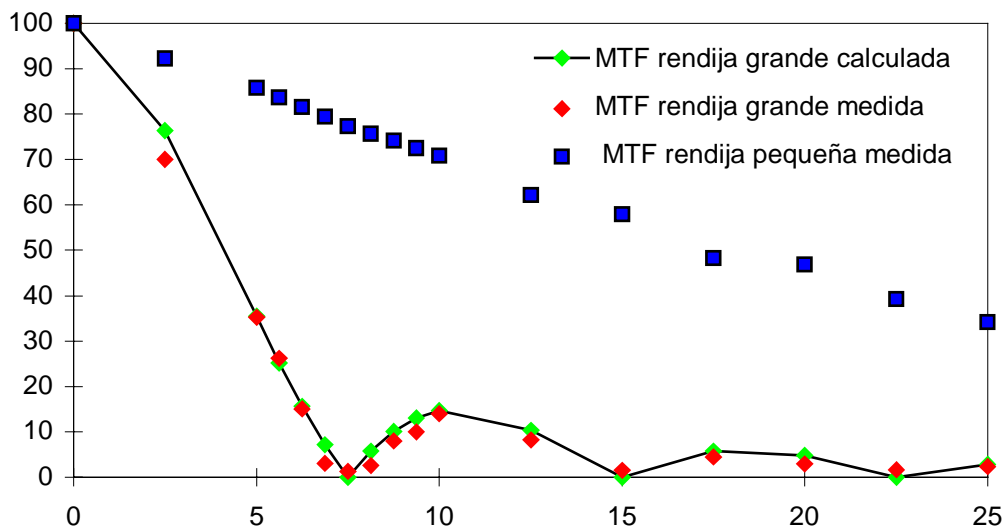
Ajuste teórico: El producto de la MTF correspondiente a la rendija pequeña (sin error de rendija) por una función sinc (error de rendija) de parámetro "a" dado por los ceros de estudiados anteriormente, debería dar la curva de MTF medida con la rendija grande.

Como se ve en la gráfica de la siguiente página, la concordancia es enorme.

Los puntos experimentales de la zona superior corresponden a la MTF de la rendija pequeña.

La curva continua, corresponde a la medida esperada para rendija grande. Coincide plenamente con la medida obtenida (puntos huecos).

frecuencias	MTF rendija grande calculada	MTF rendija grande medida	diferencia: error	MTF rendija pequeña medida
0,000001	100,0000002	100	2,5E-07	100
2,5	76,33141518	70	6,33141518	92,3
5	35,47783123	35,2	0,27783123	85,8
5,625	25,11112557	26,2	-1,08887443	83,675
6,25	15,5747012	15	0,5747012	81,55
6,875	7,138060306	3	4,13806031	79,425
7,5	0,000180761	1,3	-1,29981924	77,3
8,125	5,756944144	2,6	3,15694414	75,7
8,75	10,10873898	8	2,10873898	74,1
9,375	13,05467597	10	3,05467597	72,5
10	14,65850566	14	0,65850566	70,9
12,5	10,28770043	8,2	2,08770043	62,2
15	0,000135395	1,5	-1,4998646	57,9
17,5	5,70629721	4,5	1,20629721	48,3
20	4,848182312	2,9	1,94818231	46,9
22,5	9,16664E-05	1,6	-1,59990833	39,2
25	2,828350613	2,4	0,42835061	34,2



Como última comprobación, se midió si la anchura física de la rendija grande se correspondía con el parámetro "a" obtenido del ajuste de la curva (del estudio de los ceros).

Con el método que se detalla en la sección 2.3.2, de medida de la figura de difracción producido por la rendija, se midió para la rendija grande (rendija número 15 del tambor de rendijas negro) una anchura de 0,142 mm . El parámetro "a" obtenido de la curva es 7,5 pl/mm. Esto hace que el valor de la anchura sea 0,15 mm. En principio trabajábamos entre puntos de aumento unidad. Pero este posicionamiento es sólo aproximado, a lo cual se puede deber la discrepancia entre ambos resultados.

Este método, se usó tradicionalmente para control y calibración de las máquinas de medida de la MTF. En realidad, se buscaba obtener la transformada de Fourier de funciones conocidas. Aunque la comprobación más utilizada era usar una rendija grande -función rectángulo-, como en este caso, el método se puede utilizar con cualquier función de transmitancia del objeto

2.3.2.- Medida de la anchura de las rendijas

Si bien la observación a través del ocular de la imagen aberrante de la línea nos permite obtener una idea aproximada de la anchura de la rendija en el plano de análisis, se ha visto la importancia de conocer la anchura física de la rendija en el plano objeto. Disponíamos de dos tambores de rendijas numeradas, con anchura en orden decreciente con la numeración. Pero no conocíamos la anchura de cada rendija. Se planteó la necesidad de medir la anchura de dichas rendijas, y por su facilidad se optó por el método de la interpretación de su figura de difracción.

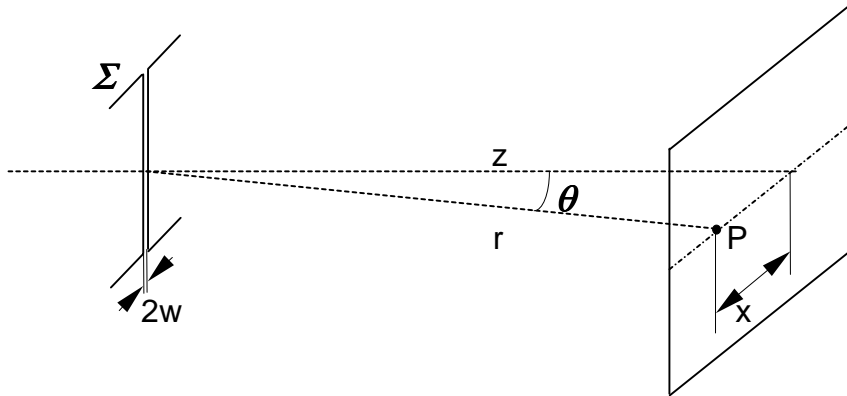
Fundamento teórico².

Sea una rendija de anchura $2w$. Sea ξ el eje perpendicular a la rendija, en el plano de la rendija. La integral de difracción de Fraunhofer para este caso particular es, para el campo eléctrico:

$$E_{cp} = C \cdot \int_{\Sigma} \frac{\cos \theta}{r} \cdot e^{-ikr} \cdot e^{-ik\alpha'\xi} d\xi$$

Σ es todo el plano de la rendija

$$\alpha' = \frac{x}{r} = \text{sen } \theta$$



Entonces

$$E_{cp} = C \cdot \frac{\cos \theta}{r} \cdot e^{-ikr} \int_{\Sigma} e^{-ik\alpha' \xi} d\xi$$

$$I_p = c \cdot \left(\frac{\cos \theta}{r} \right)^2 \cdot e^{k^2 r^2} \cdot \frac{\text{sen}^2(k w \text{sen} \theta)}{(k w \text{sen} \theta)^2}$$

$$I_p = c \cdot \frac{z^2}{r^4} \cdot e^{k^2 r^2} \cdot \frac{\text{sen}^2\left(\frac{k w x}{r}\right)}{\left(\frac{k w x}{r}\right)^2}$$

Lo que nos interesa, lo que vamos a utilizar para interpretar la figura de difracción, son sus ceros. Sólo la segunda fracción nos va a dar esta información.

Con lo cual:

$$I_p \propto \frac{\text{sen}^2\left(\frac{k w x}{r}\right)}{\left(\frac{k w x}{r}\right)^2} = \frac{\text{sen}^2 u}{u^2}$$

$$\text{Con } u = \frac{k w x}{(x^2 + z^2)^{1/2}} = \frac{2\pi w x}{\lambda(x^2 + z^2)^{1/2}}$$

Sabemos que los mínimos de la función sinc están en $u=n\pi$ con $n=1,2,3\dots$

Con lo cual, midiendo x , z y conocida λ podemos hallar $2w$ que es la anchura de la rendija.

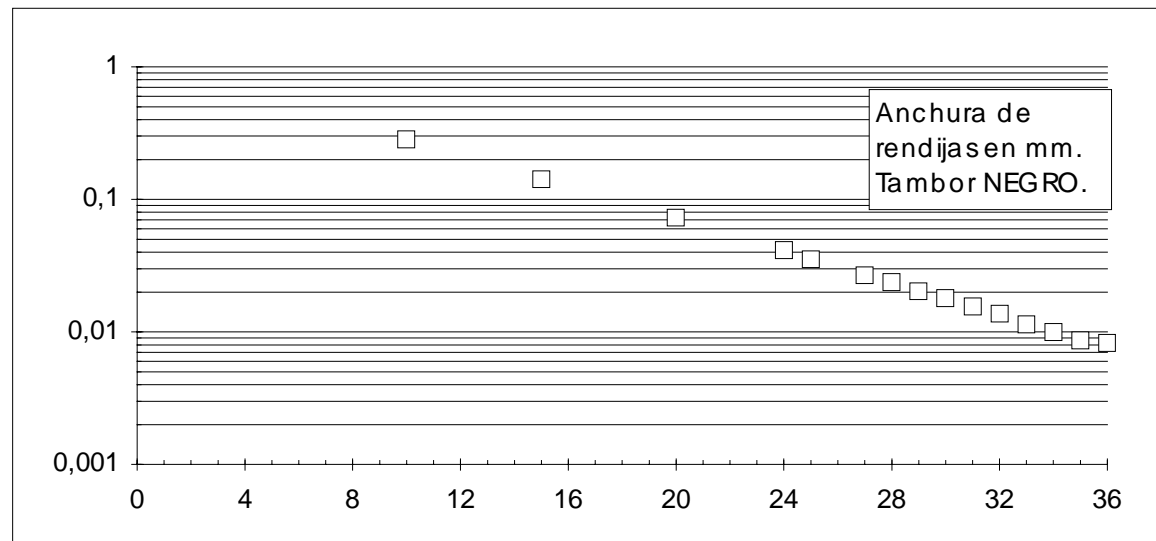
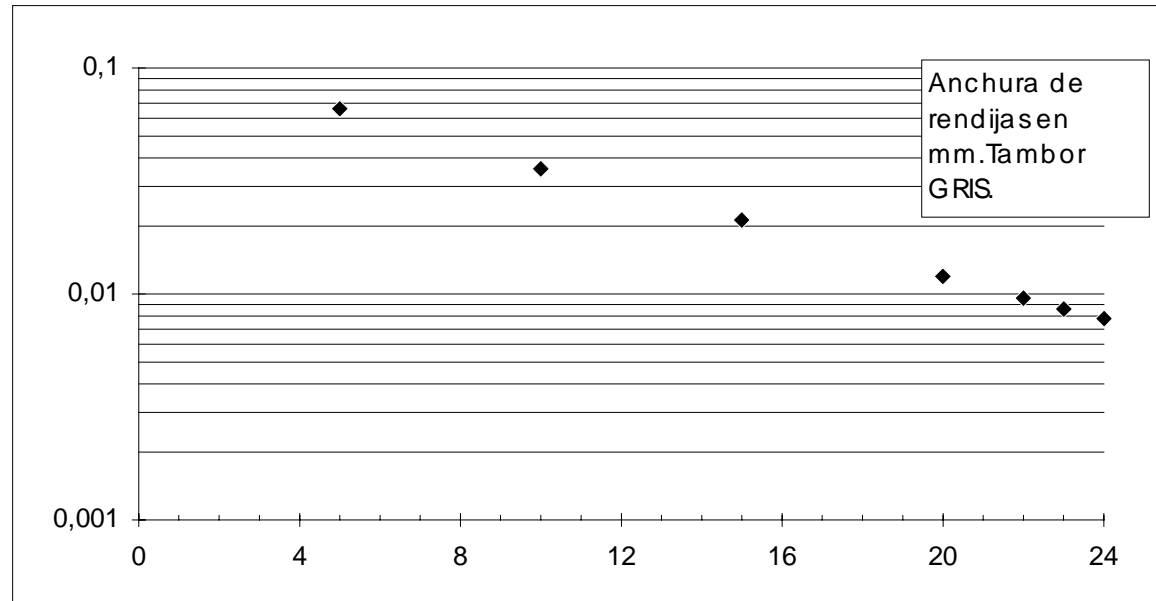
Para realizar la medida, se incide con el láser perpendicularmente en la rendija a medir. La figura de difracción se recoge en una pantalla a distancia suficientemente cercana para que la figura sea suficientemente visible y suficientemente lejana para que las distancias se midan con poco error relativo. Se miden tantos mínimos de difracción como sea posible, con objeto de hacer la media. Esto se puede hacer, teniendo en cuenta que los mínimos de difracción, salvo los correspondientes a $n=+1$ y $n=-1$ (los que hay a ambos lados del máximo central, que es de anchura doble) están igualmente espaciados. Esto dará una medida de x con menos error. Se introduce en la fórmula y se despeja $2w$.

Resultados obtenidos:

A continuación se expresan los resultados obtenidos. Como se ve, tenemos una gran cantidad de rendijas, con una variación continua de anchuras.

Estas tablas y curvas deberían ser consultadas en cada medida, con objeto de elegir cada vez la anchura de rendija más adecuada.

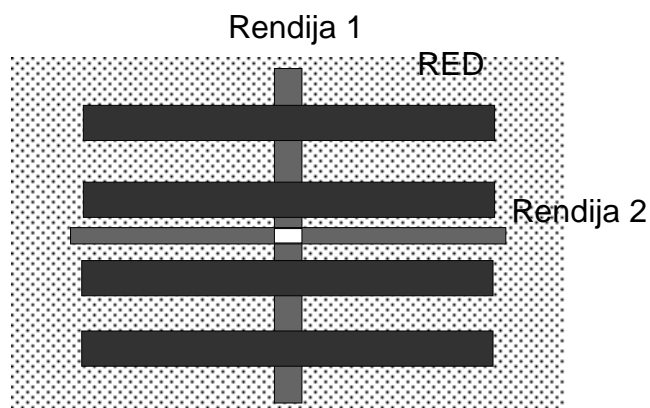
tambor	# rendija	D(anchura de rendija en mm)
gris	24	0,0077917
	23	0,0086168
	22	0,0096155
	20	0,0119728
	15	0,0212409
	10	0,0357684
	5	0,0659879
negro	36	0,0082452
	35	0,0086123
	34	0,0099858
	33	0,0113714
	32	0,0137787
	31	0,0155744
	30	0,0179244
	29	0,0203544
	28	0,0236104
	27	0,0268061
	25	0,0352985
	24	0,0413635
	20	0,0725558
	15	0,1420874
	10	0,2815672



2.3.3.-Calibración del retículo; normalización.

Es muy importante orientar de forma conveniente el retículo, pues será la referencia para orientar las rendijas respecto a la red. El correcto ajuste de los paralelismos y perpendicularidades es de gran importancia para evitar errores de normalización, ajuste de la escala de frecuencias espaciales... Veamos por qué:

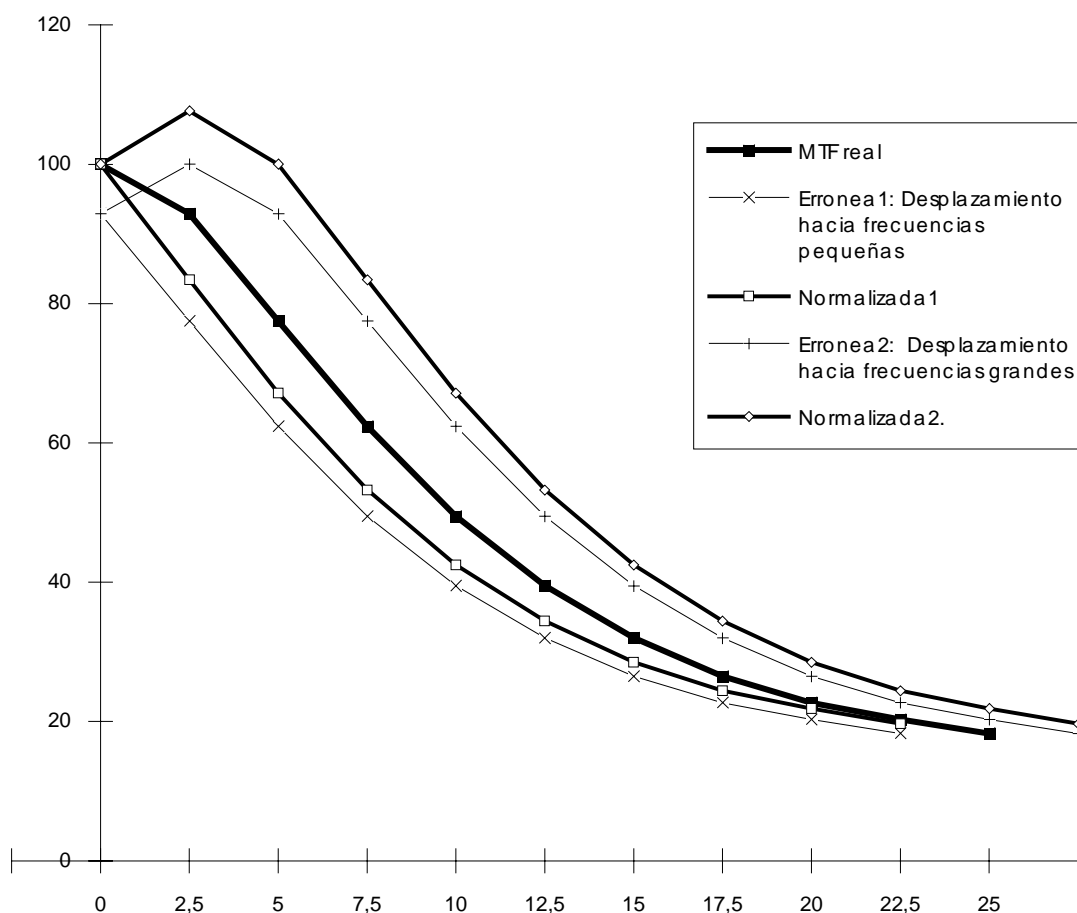
La posición de la red en la que la rendija2 es paralela a las líneas de la red y perpendicular a la rendija1 corresponde a frecuencia espacial igual a cero y es la de máximo contraste. Esta posición servirá para normalizar la MTF.



La escala de frecuencias está referida a la red. Con objeto de no modificar esta escala, que está dibujada en la carcasa del analizador de Fourier, tomamos la red como referencia para posicionar todo lo demás.

Si la rendija2 no es paralela a la red en la posición de la escala igual a cero, normalizaremos a una frecuencia distinta de cero, y por tanto este error se arrastrará a la medida de todas las frecuencias: a toda la medida.

La desviación del paralelismo se puede producir a ambos lados. El efecto que tendremos en la curva de la MTF es el siguiente:



En el caso de la curva 1, la forma de la curva obtenida no es real. a frecuencias bajas mediremos valores menores de los reales.

En el caso de la curva 2. El error es más espectacular aún, ya que para algunos valores tendremos que la MTF es mayor que uno. Algo inconcebible por definición de la MTF.

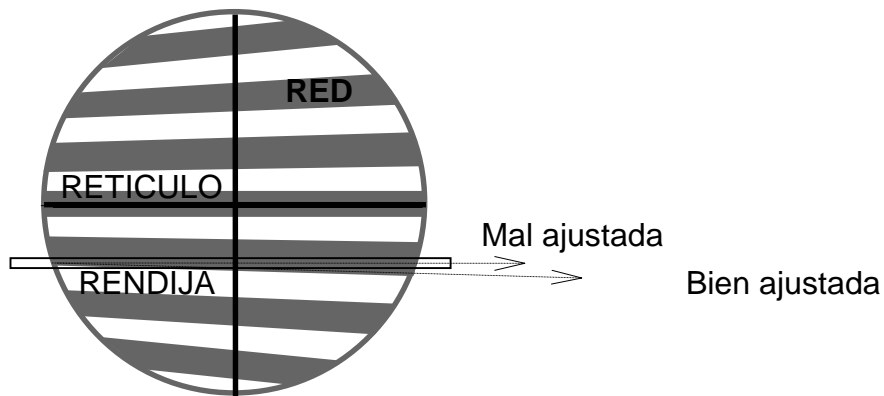
Otra cosa que puede suceder es que, al realizar la medida, ya que hacemos saltos discretos de frecuencias, no midamos ninguno de los puntos con MTF mayor que uno y no nos percatemos del error que estamos cometiendo. Esto es muy destructivo, ya que al hacer la representación de la curva, interpolaremos dichos valores, obteniendo una curva mucho más alta de la que corresponde a la realidad.

Como ya vimos, la relación en la que cambian las frecuencias con el ángulo, no es lineal, $s_e = s \cos \theta$, siendo la zona más sensible la de frecuencia igual a cero (la zona donde la primera derivada del coseno es mayor). Además, generalmente la MTF también tiene la mayor pendiente en $s=0$, con lo cual el error será importante.

Otra causa de error es la no perpendicularidad entre las dos rendijas. Esto trae como consecuencia la medición de una LSF mayor de la real: una peor MTF del sistema de la que le corresponde en realidad.

De todo esto se deduce la importancia de realizar una buena calibración. Veremos en este apartado cómo se realizó la calibración de la posición del retículo y más adelante el protocolo a seguir en cada medida.

La red es una corona circular, por lo tanto al observarla en el ocular las líneas no serán exactamente paralelas:



Existe un pequeño descentramiento entre la posición en la que se observa la rendija2 y el centro del retículo por frecuencia espacial cero

En la posición de frecuencia espacial cero (recordar que hemos tomado la red como referencia para posicionar todo lo demás), colocamos la rendija2 paralela a las líneas que hay en su entorno. Giramos el retículo previamente desbloqueado de forma que uno de los brazos de la cruz quede paralelo, y el otro perpendicular, y se vuelve a fijar con un tornillo. Tras este ajuste, en lo sucesivo podremos tomar como referencia el retículo para calibrar la verticalidad de la rendija1 y la horizontalidad de la rendija2.

La máquina estaba mal ajustada en un principio, dando lugar a errores importantes en las primeras medidas que se hicieron.

2.3.4.- Posicionamiento de la rendija imagen.

El uso de un microscopio como lente transportadora, hace que sea muy importante un ajuste de la posición de la rendija imagen.

La imagen a través del microscopio de esta rendija, para que el sistema funcione correctamente, ha de estar sobre la red de barrido. Esto se controla a través del ocular: El ojo ha de apreciar enfocadas simultáneamente ambas imágenes.

El objetivo de microscopio tiene una profundidad de foco pequeña. Esto hace que cualquier desviación de la posición de la rendija se traduzca rápidamente en pérdida de nitidez, para el observador, y pérdida de contraste, para la MTF.

Con objeto de evitar la descalibración del posicionamiento de la rendija respecto al microscopio, esta va unida al anillo de fijación de la última lente. Con esto se pretende que una vez calibrada, no se produzcan errores por esta causa. Pero la calibración es más difícil, pues al ir la rendija enroscada al microscopio, se acoplan los dos ajustes de la rendija exigidos por la medida: posicionamiento en el plano objeto del microscopio y verticalidad respecto a las líneas de la red. Además, la rendija debe estar enroscada a tope, para dar rigidez a las lentes del microscopio.

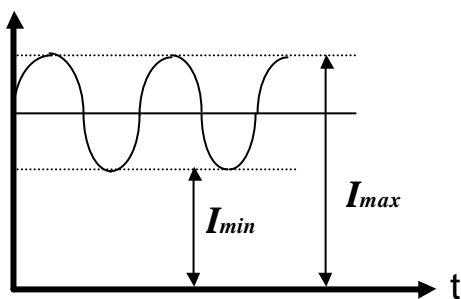
Mediante arandelas de espesor variable (varias micras) se consigue ajustar la posición a la vez que se fija el microscopio. El ajuste de la verticalidad de la rendija hay que realizarlo girando solidariamente la rendija y el objetivo de microscopio respecto a la red, en el dispositivo mecánico de adaptación.

2.3.5.- Estudio del dispositivo electrónico.

Funcionamiento básico.

Se trata de calcular la pérdida de modulación que sufre la señal procedente del fotomultiplicador para cada frecuencia espacial efectiva respecto a la modulación a frecuencia espacial cero. Este cálculo, previo ajuste-normalización se realiza de forma electrónica.

Se pretende obtener $MTF = (I_{máx} - I_{mín}) / (I_{máx} + I_{mín})$. Para que esta medida esté normalizada, se ajusta $(I_{máx} + I_{mín})$ a cien, con lo cual las medidas de MTF estarán dadas en tanto por ciento de pérdida de modulación.



Este ajuste de $(I_{máx} + I_{mín})$ a cien se realiza actuando sobre dos controles que tienen el mismo efecto, variar la amplitud de la señal, pero muy distinta causa:

GAIN controla la ganancia del amplificador.

EHT controla la diferencia de potencial entre las placas del fotomultiplicador, es decir, el número de electrones por fotón incidente.

Se selecciona visualizar LIGHT FLUX (que es la señal $(I_{máx} - I_{mín})$ demodulada para obtener un valor de continua correspondiente a esa amplitud) y se actúa sobre GAIN y EHT, hasta obtener 100.

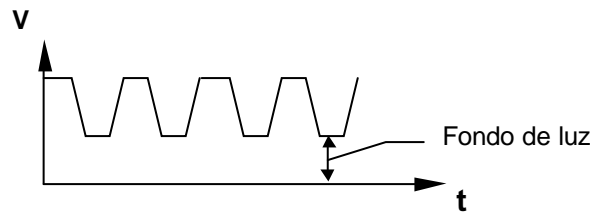
Tras esto, se selecciona la frecuencia espacial cero. En esta posición, hay que ajustar que $MTF(0)=1$, es decir, como no hay demodulación, $I_{mín} = 0$. Esto se consigue actuando sobre el control BALANCE, que varía el nivel DC que se toma como referencia. En la práctica, se selecciona la visualización de la MTF, y a frecuencia espacial cero se fija a 100.

Estudio de un paso intermedio.

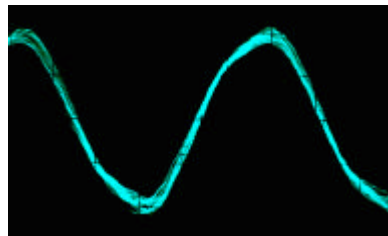
Buscando una mayor comprensión de la unidad de medida en general, y la comprobación del buen funcionamiento de la parte electrónica, se estudió la señal en un punto intermedio: la que sirve de entrada del dispositivo electrónico, y de salida del preamplificador del fotomultiplicador, por medio de la conexión de un osciloscopio a la salida BUFFERED o/p.

Forma de la señal.

Como se explicó anteriormente, la forma de la señal, para una lente sin aberraciones, debería ser la convolución de una función almendra y una función rectángulo (correspondiente a la rendija). A frecuencia espacial cero (las líneas de la red barren paralelamente a la rendija imagen), si $x < X < 2x$ para una anchura de rendija x y de línea de la red X , se obtendría una señal del tipo:



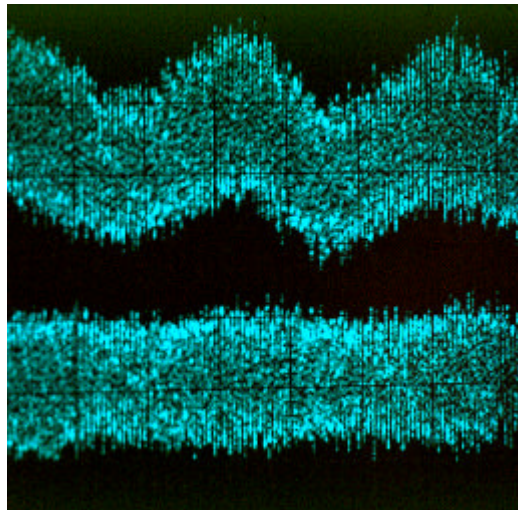
En nuestro aparato, se midió este caso, y la señal obtenida en el osciloscopio fue la siguiente:



La discrepancia (suavizamiento de bordes) se debe a que no estamos en un caso ideal: Tenemos aberraciones y efectos capacitivos que se comportan como un filtro pasa baja. Estos efectos proceden de las capacidades interelectrodos del fotomultiplicador.

Además, tenemos otro efecto. La intensidad de la señal está modulada a bajas frecuencias por una señal portadora de 100 Hz, como se ve en la imagen siguiente (señal sin filtrar) :

Señal sin filtrar:



Señal filtrada:

Este 'ruido' de frecuencia 100 Hz viene introducido por el motor, que gira a dicha frecuencia. Comprobación: Para nuestra red, se cumple:

$$frecuencia\ temporal = velocidad\ angular \cdot radio\ de\ giro \cdot frecuencia\ espacial$$

Todos estos valores además de estar especificados por el fabricante, son medibles de forma sencilla.

$$frecuencia\ temporal = 4250\ Hz$$

$$radio = 8,5\ mm$$

$$frecuencia\ espacial = 5\ c/mm$$

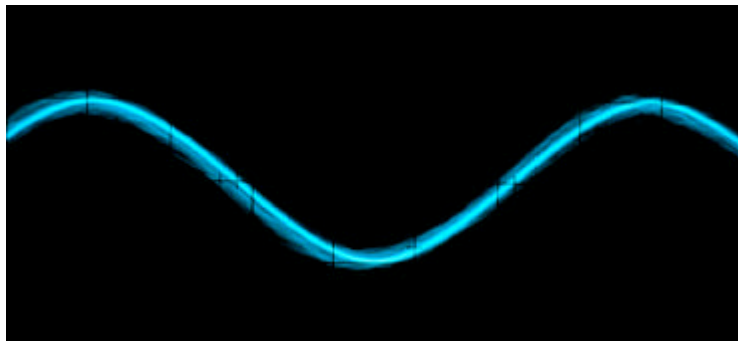
Por tanto la velocidad angular del motor es de 100 Hz.

El eje del motor parece que no está perfectamente alineado con la red, y en cada vuelta se produce un ligero desajuste que provoca un ruido de la misma frecuencia que la velocidad de giro del motor.

De cualquier forma, este efecto no debe considerarse ruido de la medida, ya que no influye en esta. El proceso de filtrado posterior elimina estos efectos de tipo mecánico.

Para ilustrar esto, se hizo pasar la señal a través de un filtro activo pasa alta de primer orden, de frecuencia de corte 3000 Hz. La comparación de las dos señales se ve en la figura anterior (señal filtrada y señal sin filtrar).

Además, con este filtrado se consigue que la señal presente un perfil senoidal:



La apariencia de la señal es manifiestamente menos ruidosa. No hay que olvidar que es éste propiamente el ruido que hay que considerar como ruido de la medida.

3.-MEDICIÓN

3.1.- PROTOCOLO DE MEDIDA.

Lo primero que hay que hacer cuando se quiere medir la MTF de un sistema óptico con este sistema es hacer un estudio del uso que se le va a dar al sistema, con objeto de realizar una medida que reproduzca realmente las prestaciones del sistema. Es decir, hay que estudiar las posiciones objeto e imagen más comunes del sistema. Hay que tener en cuenta que si alguna de estas posiciones coincide con el infinito, el sistema requiere el uso de un colimador (o dos si el sistema es afocal). Al usar un colimador hay que estudiar los errores que este introduce:

El colimador degrada la imagen. Pero, al no ser la MTF aditiva, su MTF, con la escala de frecuencias multiplicada por los aumentos del sistema (es decir, expresada en el plano imagen de la lente test), solamente nos dará una cota del error que se va a producir. Es decir, las aberraciones del colimador pueden sumarse a las del sistema, o compensarlas (el caso más general es que se sumen, pero no totalmente). Como el error introducido por el colimador no es conocido exactamente, aunque conozcamos su MTF, no se puede hacer corrección a posteriori del error. Se suelen tomar colimadores de muy larga longitud focal, para que al testear sistemas de focal más corta el cambio en la escala de frecuencias (la relación de aumentos) sea muy favorable al colimador.

Además, hay que estudiar qué filtros hay que utilizar, ya que la luz utilizada en la medida ha de tener la misma composición espectral que la luz con la que trabajará el instrumento en su uso normal. Esto es de gran importancia a la hora de evaluar las aberraciones cromáticas. Si se quiere hacer un estudio del instrumento sin aberraciones cromáticas, con luz monocromática, es importante resaltar que se exige el uso de un filtro interferencial, nunca un láser, ya que la luz debe seguir siendo incoherente para que los resultados sean extrapolables.

De los aumentos del sistema, la configuración, etc... obtendremos el tamaño de rendija más adecuado. Podrá ser aumentado si no llega luz suficiente al detector, y entonces se realizará corrección de anchura de rendija, siempre que sea posible.

Una vez hecho este estudio, y ya en el laboratorio, hay que seguir los pasos siguientes.

1.- Ajuste del espejo condensador. Para aprovechar al máximo la luz procedente del filamento, el espejo debe formar una imagen del filamento sobre el mismo filamento, con objeto de recuperar la luz que la lámpara emite "hacia atrás". Esto se realiza por medio del ajuste de tres tornillos que en la parte posterior de la fuente sujetan el espejo: Si el espejo está desajustado, emergen dos haces de luz en distintas direcciones. El ajuste se realiza moviendo la posición del espejo hasta que ambos haces coinciden, con lo que tendremos mayor cantidad de luz.

2.- Introducción del filtro con el que deseemos medir en el soporte de filtros.

3.- Ajuste de la verticalidad rendija1-retículo. Se quita la lente de microscopio, con objeto de visualizar completa la imagen de la rendija en el retículo. Se gira o bien la fuente o bien todo el dispositivo analizador de la imagen con objeto de que la rendija aparezca paralela a la línea vertical del retículo. (Esto se podría hacer de otro modo: Manteniendo la lente de microscopio y quitando solamente la rendija2, con lo cual se mantendría la misma posición de enfoque. Pero dado lo problemático del enfoque microscopio-rendija2, que hemos visto anteriormente, se prefiere no manipular la posición de la rendija2).

4.- Comprobación de la rendija 2. Se vuelve a colocar el sistema rendija-microscopio. Encendemos una fuente de luz exterior y extensa, colocada a distancia suficiente. Con el motor de barrido funcionando, (su velocidad es suficientemente alta para que se produzca un fundido en la retina y la red no afecte a la imagen) comprobamos que la rendija esté bien enfocada. Con el motor de barrido apagado, inmóvil, y la fuente de luz extensa más cercana, para que la red sea visible, comprobamos que las líneas de la red y la rendija sean paralelas en la posición de frecuencia espacial igual a cero.

Aclaración: Es importante, a la hora de establecer el paralelismo, tomar como referencia las líneas de la red que se encuentran cerca de la rendija.

La posición del retículo, paralelo a la rendija y la red en la posición de frecuencia espacial cero, ha sido previamente calibrada. En este punto se ha de comprobar que el retículo, la red y la rendija2, son paralelas. En caso contrario habría que volver a calibrar el retículo pues en base a su posición se orientó la rendija1. Los errores en este punto

repercutirán en errores de Normalización, Errores en la escala de frecuencias, Errores en la forma de la curva a baja frecuencia.

5.- Buscar la posición de mejor foco. Para esto, hay que tener en cuenta las ligaduras del sistema. Por ejemplo, para un objetivo de fotocopiadora las distancias objeto e imagen están previamente determinadas, con lo cual hay que medir en las posiciones que vengan impuestas, aunque en principio no coincidan más que aproximadamente con las posiciones de mejor respuesta de nuestro sistema. Para un objetivo fotográfico, la distancia entre la imagen y la carcasa mecánica del objetivo está predeterminada, es decir, el plano de la película es inamovible (generalmente). Sin embargo podemos variar la distancia objeto o "enfocar" el objetivo como se enfocaría en la cámara. Para un sistema afocal las distancias al colimador no tienen ninguna influencia.

Pero, sea cual sea la distancia cuya variación permita el enfoque, hay unas directrices generales que hay que seguir para buscar la posición de mejor MTF.

Un enfoque "a ojo" es útil para realizar una primera aproximación al mejor plano. Pero de ningún modo es suficiente. El ojo es insuficiente para detectar variaciones de la MTF de hasta un diez por ciento en el área bajo la curva.

Tal y como indican Williams y colaboradores²² la medida de la MTF a una única frecuencia espacial da información suficiente para evaluar (comparativamente) la calidad de la imagen de sistemas del mismo tipo. Aprovechemos ese resultado para comparar la calidad de la imagen de un mismo sistema óptico en distintos planos. La frecuencia

elegida para cada sistema puede ser distinta, dependiendo las siguientes consideraciones:

- Debe estar en una región, entre cero y un máximo, donde la MTF no caiga a cero normalmente.

- La MTF a dicha frecuencia debería mostrar un razonable grado de variación con respecto al desenfoque.

- La frecuencia espacial elegida debería estar cerca del límite de bajas frecuencias, pues es ahí donde las variaciones de la MTF son más significativas generalmente. (Este punto depende del sistema. Por ejemplo, para instrumentos de visión, las bajas frecuencias llevan casi toda la información sobre el contraste de la imagen o la agudeza de los bordes. Sin embargo, sistemas de fotoimpresión para chips electrónicos, o de lectura de microfilms, sólo serán bien especificados por la MTF a una frecuencia espacial muy alta).

Por lo general un barrido de los distintos planos a una única frecuencia espacial entre 5 y 10 lp/mm nos dará el plano de mejor enfoque.

Hay que tener en cuenta la existencia de ruido en forma de variabilidad del detector. Es decir, no sería correcto ir variando la posición de enfoque hacia donde se vaya obteniendo mejor MTF, hasta llegar a un punto en el que no se pueda mejorar más. Lo correcto es realizar un barrido desde planos de baja MTF, muy desenfocados, a otros planos de baja MTF al otro lado del foco. Localizar la posición de máximo, y luego retornar a él.

Un sistema de apertura numérica grande tendrá profundidad de foco pequeña, y el plano de enfoque será crítico. Para sistemas de apertura numérica pequeña el enfoque no necesita ser tan cuidadoso.

De forma simultánea a la búsqueda del mejor foco, se debe realizar el alineamiento del sistema, teniendo especial cuidado en colocar ambas rendijas en el eje óptico del sistema a testear. Nos ayuda el hecho de que, salvo sistemas especiales, la mejor MTF corresponde al testeo en eje.

6.- Comprobar que la imagen se mantiene a todas las frecuencias. En el caso de un banco óptico insuficientemente rígido, el hecho de variar la frecuencia, al ser un movimiento de carácter mecánico, destruye el alineamiento, es decir, la imagen se sale del ocular. Hay que comprobar que esto no es así, y que para todas las frecuencias la imagen se mantiene.

7.- Normalizar el flujo de luz. Quitamos el espejo del ocular. Si utilizamos el modo manual, MAN, se trata de controlar el EHT del fotomultiplicador y la ganancia de forma que la medida correspondiente a LIGHT FLUX sea 1. En modo AUTO esta operación se realiza automáticamente, y se evita el problema de las oscilaciones de la fuente o las variaciones de la luz ambiente.

8.- Normalizar la MTF. Se trata, mediante el control de BALANCE, de conseguir que $MTF(0) = 1$. Es importante realizar esta operación con cuidado ya que afectará a toda la medida.

9.- Realizar la medida. Anotar el valor de MTF para las distintas frecuencias espaciales.

10 .- Es conveniente realizar la comprobación de que no han variado las condiciones durante la medida: Comprobar que los puntos 8 y 6 siguen cumpliéndose.

3.2.- MEDIDAS REALIZADAS.

Siguiendo el protocolo de medida descrito anteriormente, se procedió a la realización de una serie de medidas distintas, a modo de ejemplo. Se presentan a continuación estas medidas, junto con unos breves comentarios de los aspectos más significativos de cada una de ellas.

3.2.1.- Comparación de la MTF correspondiente a distintos filtros.

Para una lente determinada, se midió la MTF resultante de la utilización de distintos filtros: Un filtro interferencial, anchura despreciable para esta aplicación, centrado en torno a 658nm para medir la MTF monocromática. Un filtro con el perfil de la curva de sensibilidad espectral del ojo, que orientativamente se puede tomar como una función gaussiana centrada en 555 nm y que cae a cero en 400 y en 700 nm con lo que mediremos la MTF policromática más usual. Y por último, se utilizó el espectro completo de la luz halógena, que en este caso está comprendido entre 400 y 850 nm para medir una MTF extremadamente policromática.

El resto de condiciones, que quedaron inalteradas en las tres medidas, se detallan a continuación:

Lente:

Lente simple plano convexa.

- Radios de curvatura de las lentes: Lado objeto: 91'566 (centro de curvatura en la dirección del centro de la lente). Lado imagen: infinito
- Espesor en eje: 8 mm
- Vidrio: Schott KF9 ($n_d=1.523$; $v_d = 51.5$)

Por tanto, contamos con una focal de aproximadamente 174 mm.

Diafragma:

- Diámetro 9 mm.
- Localización: dos milímetros tras la superficie plana de la lente.

Distancias:

Se utilizó como restricción que el aumento fuera 0'3. Es decir, la imagen es tres veces más pequeña que el objeto.

Con esto se consigue un compromiso aceptable entre los efectos siguientes:

- El comportamiento de la lente es mejor cuanto mayor sea la distancia objeto. Con 0.33 aumentos de la lente test se consigue una PSF no apodizada para la lente transportadora de 5 aumentos que a su vez produce una MTF de variación significativa en el rango 0-25 lp/mm, para los tres filtros a medir.

- El utilizar aumentos menores que uno permite el uso de rendijas mayores.

- Sin embargo, el aumento de la distancia disminuye considerablemente la cantidad de luz que llega al detector, y esto va a ser muy crítico en la medida monocromática.

- Efectos difraccionales. Para la medida monocromática (686 nm) la frecuencia espacial de corte de la curva del límite difraccional está en 28 lp/mm 0,33 aumentos. Pretendemos medir valores significativos en todo el rango de medida (0-25 c/mm) luego no podemos forzar más la disminución de la imagen.

Las distancias se condicionan a los aumentos que producen. Para determinarlas, se utilizó un microscopio con un ocular y un retículo. Un objeto genérico se coloca en el plano de la rendija objeto. Se mide su tamaño con el retículo del microscopio. Se coloca la lente y se traslada el microscopio al plano imagen de la misma. Se considera que la distancia objeto de la lente cumple la posición de 0.33 aumentos cuando la imagen que produce en el retículo es tres veces más pequeña que el objeto. Se retira el conjunto ocular-retículo-microscopio y se coloca el resto de la unidad de medida. Se busca la posición de mejor foco conforme a lo descrito en el protocolo de medida.

Los valores de MTF que se obtienen para el barrido de mejor foco no son representativos. Este barrido tan sólo sirve para localizar (por comparación) la posición de mejor MTF. Tras el barrido se normaliza para obtener la MTF real.

(Se utiliza la terminología: Monoc = filtro interferencial: monocromática-

Verde = Filtro de eficiencia espectral del ojo:

Policromática moderada

Sin filtro = Distribución espectral de la lámpara

halógena: policromática extrema.)

Las medidas realizadas, tal y como se obtienen de la unidad de medida, son las siguientes:

Luz Monocromática

Como se ha dicho anteriormente, la medida monocromática es muy crítica.

El uso de un filtro interferencial hace que la cantidad de luz que llega al detector sea insuficiente para garantizar una buena medida.

Se podría haber cambiado la anchura de rendija, y realizar posteriormente la corrección del error introducido, tal y como se describió en 2.3.1.

En este caso, se prefirió mantener una rendija que no introdujera error y estudiar el efecto que la escasez de luz produce en la medida. Las razones fueron, por un lado, evitar el movimiento mecánico del cambio de rendija (desalineamientos), pues se pretenden realizar comparaciones con las otras medidas, y por otro lado, estudiar este nuevo efecto.

La cantidad de luz es tan pequeña, que a través del ocular no se percibe la localización del punto de luz. La alineación y ajuste, son necesarios realizarlos con luz policromática. Este cambio de filtro hay que realizarlo para cada una de las posiciones focales del barrido.

En las medidas de prueba que se realizaron, se obtuvieron curvas de MTF muy por encima del límite difraccional correspondiente a los parámetros de la medida. Esto es algo completamente inadmisibles, y sintomático de la existencia de fuertes errores en la medida, que se achacaron a la escasez de luz.

Pese a hacer las medidas en absoluta oscuridad, aparece gran cantidad de ruido. Este ruido se debe principalmente a la corriente de oscuridad del detector o ruido térmico, es decir, aparece una señal en el detector debida a una corriente de electrones en el tubo fotomultiplicador que no está asociada a la excitación de

fotones. Este ruido está presente en todas las medidas con fotomultiplicadores, pero generalmente no es significativo a no ser que, como este caso, la amplitud de la señal sea ínfima.

Este ruido se traduce en nuestra unidad de medida, por una lado en la aparición de una luz de fondo ficticia, que no varía ni con la calidad de imagen, posición focal, ni con el barrido de frecuencias espaciales. Por otro, al ser la señal tan pequeña, es más sensible a variaciones en las fuentes de alimentación de la fuente o el detector, así como otras causas de error genéricas. El resultado es que la salida del dispositivo electrónico es rápidamente variable (variaciones de hasta un 7 por ciento).

La variabilidad se puede compensar tomando muchas medidas y haciendo la media.

En cuanto a la luz de fondo, el efecto que produce en nuestra medida de MTF es el siguiente:

Al normalizar la cantidad total de luz, LIGHT FLUX, en lugar de normalizar $(I_{máx}-I_{mín})$ a cien, normaliza $(I_{máx}+I_{ruido}-I_{mín})$.

Al normalizar la MTF a cien, normaliza $(I_{máx}+I_{ruido}-I_{mín}) / (I_{máx}+I_{ruido}+I_{mín})$.

Es decir, para frecuencia espacial cero, obtenemos $MTF=1$ (correctamente) pero para valores de frecuencia altos, donde se esperaría $I_{máx}=I_{mín}$ (pérdida total de modulación, $MTF = 0$), lo que realmente se obtiene es

$MTF=(I_{ruido}) / (I_{máx}+I_{ruido}+I_{mín})$ es decir, el valor del ruido normalizado a cien.

Tenemos, por tanto, que este fondo de luz ficticia se comporta como una modulación que no desaparece por muy altas que sean las frecuencias espaciales.

Lo que se hizo en nuestra medida, fue medir el valor del ruido en frecuencias espaciales superiores a la frecuencia de corte de la curva límite difraccional. Más allá no puede existir modulación real, y la MTF ha de ser necesariamente cero.

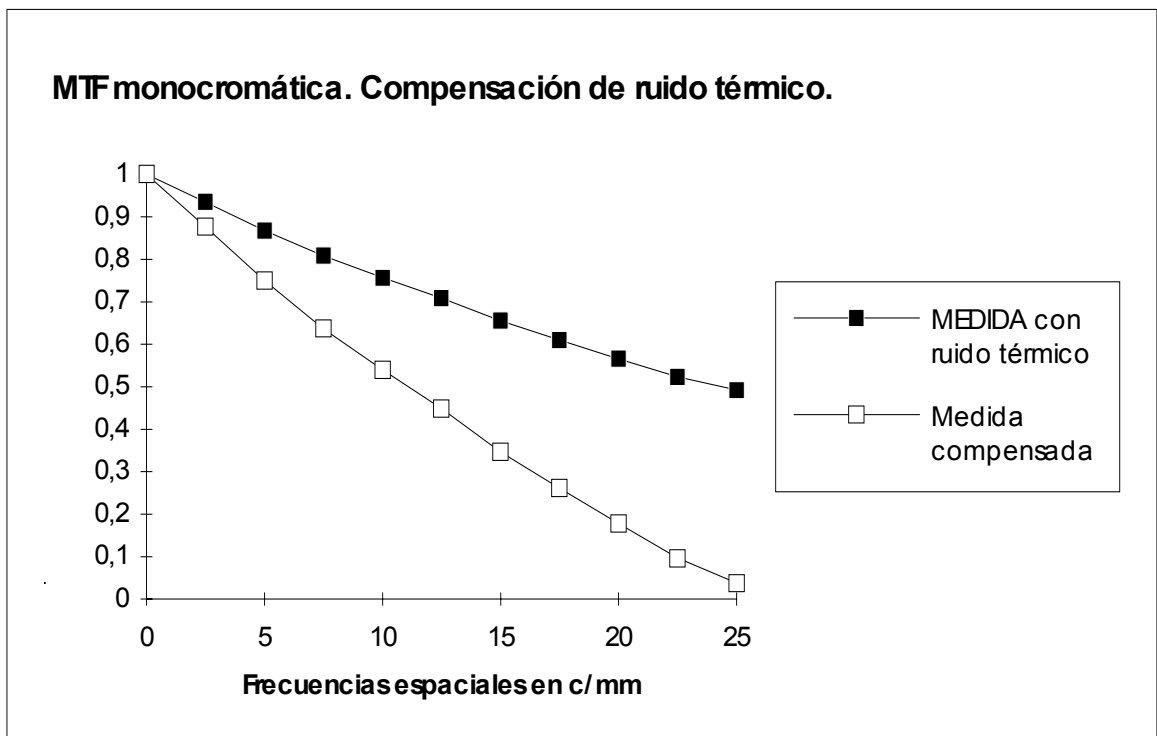
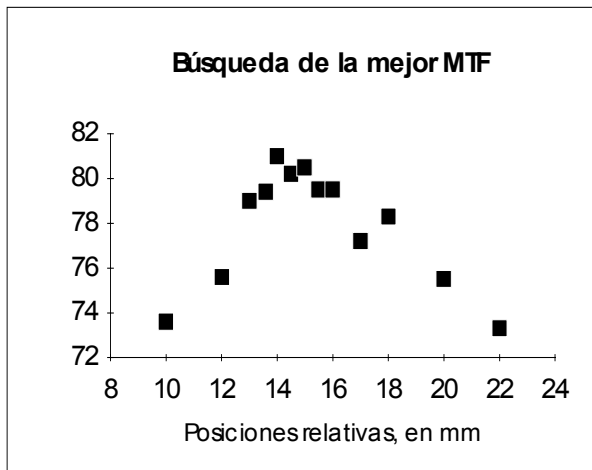
Se obtuvo que la MTF debida a la corriente térmica era 47,2 sobre 100. Un valor significativo. Indica que la señal máxima es sólo el doble del ruido térmico.

Se cambió la curva de MTF (promedio) medida, reposicionando el valor cero en 47,2 y volviendo a normalizar.

Los resultados obtenidos se expresan en la siguiente gráfica, junto con la transformación para eliminar el ruido térmico.

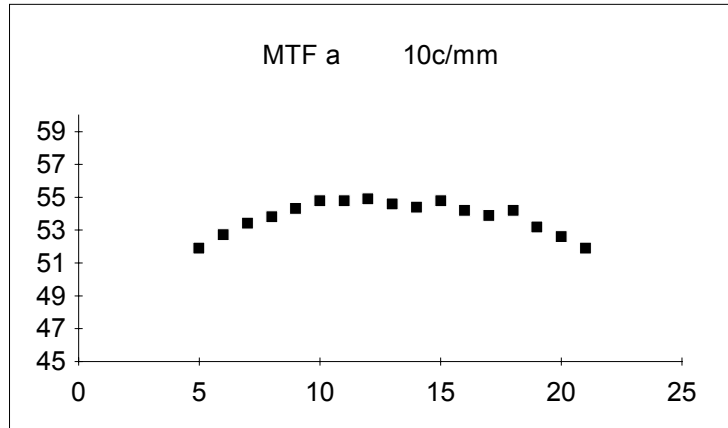
La comprobación de la exactitud de este proceso se realizó mediante simulación computacional, que se detalla en el apartado siguiente.

Posiciones relativas, en mm	MTF a 10c /mm	Frecuencias espaciales	MEDIDA con ruido térmico	Medida compensada
10	73,6	0	1	1
12	75,6	2,5	0,935	0,876893939
13	79	5	0,868	0,75
13,6	79,4	7,5	0,808	0,636363636
14	81	10	0,757	0,539772727
14,5	80,2	12,5	0,709	0,448863636
15	80,5	15	0,655	0,346590909
15,5	79,5	17,5	0,61	0,261363636
16	79,5	20	0,566	0,178030303
17	77,2	22,5	0,523	0,096590909
18	78,3	25	0,492	0,037878788
20	75,5			
22	73,3			

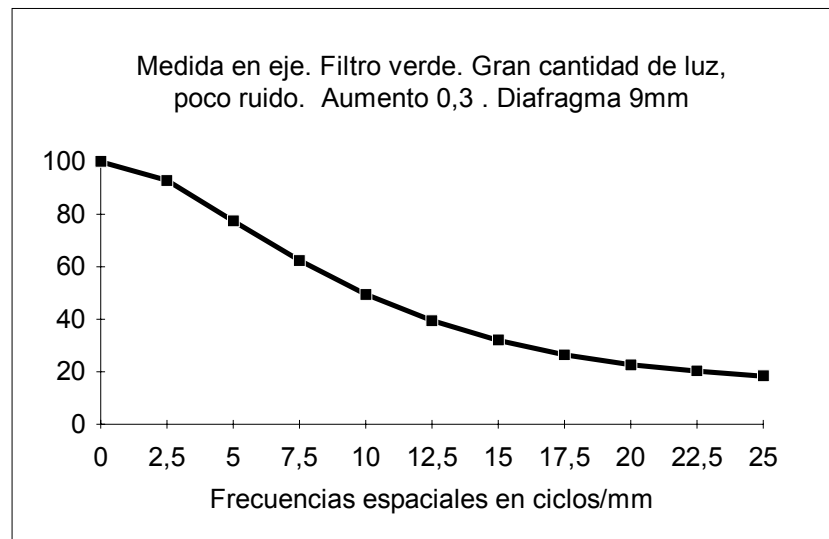


Filtro de eficiencia espectral del ojo:

posiciones relativas, en mm	MTF a 10c/mm
21	51,9
20	52,6
19	53,2
18	54,2
17	53,9
16	54,2
15	54,8
14	54,4
13	54,6
12	54,9
11	54,8
10	54,8
9	54,3
8	53,8
7	53,4
6	52,7
5	51,9

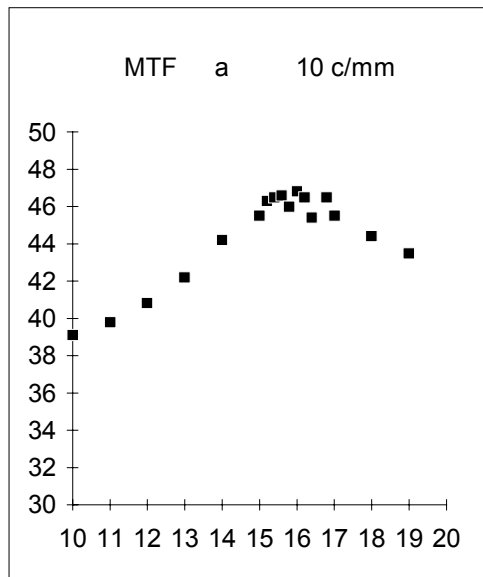


	MTF en la posición 12 mm
0	100
2,5	92,9
5	77,5
7,5	62,4
10	49,5
12,5	39,5
15	32
17,5	26,5
20	22,7
22,5	20,3
25	18,3

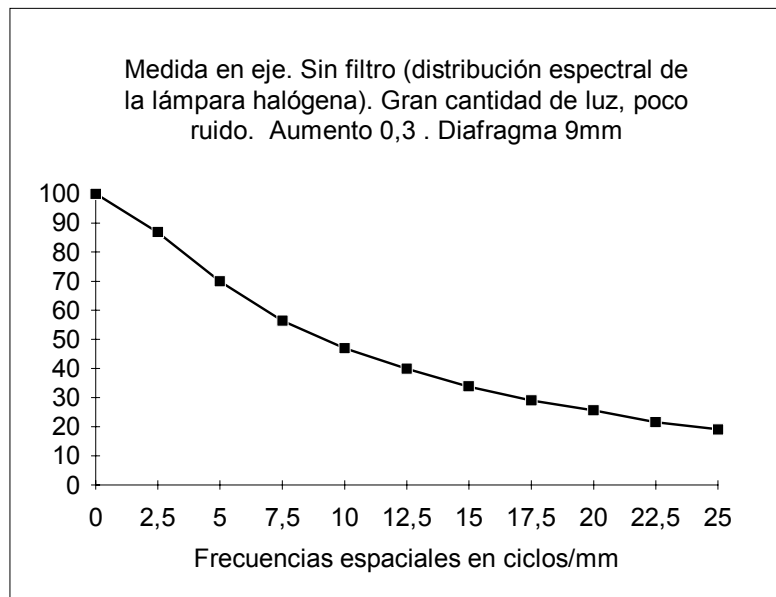


Distribución espectral de la lámpara halógena (sin filtro):

posiciones relativas, en mm	MTF a 10 c/mm
10	39,1
11	39,8
12	40,8
13	42,2
14	44,2
15	45,5
15,2	46,3
15,4	46,5
15,6	46,6
15,8	46
16	46,8
16,2	46,5
16,4	45,4
16,8	46,5
17	45,5
18	44,4
19	43,5



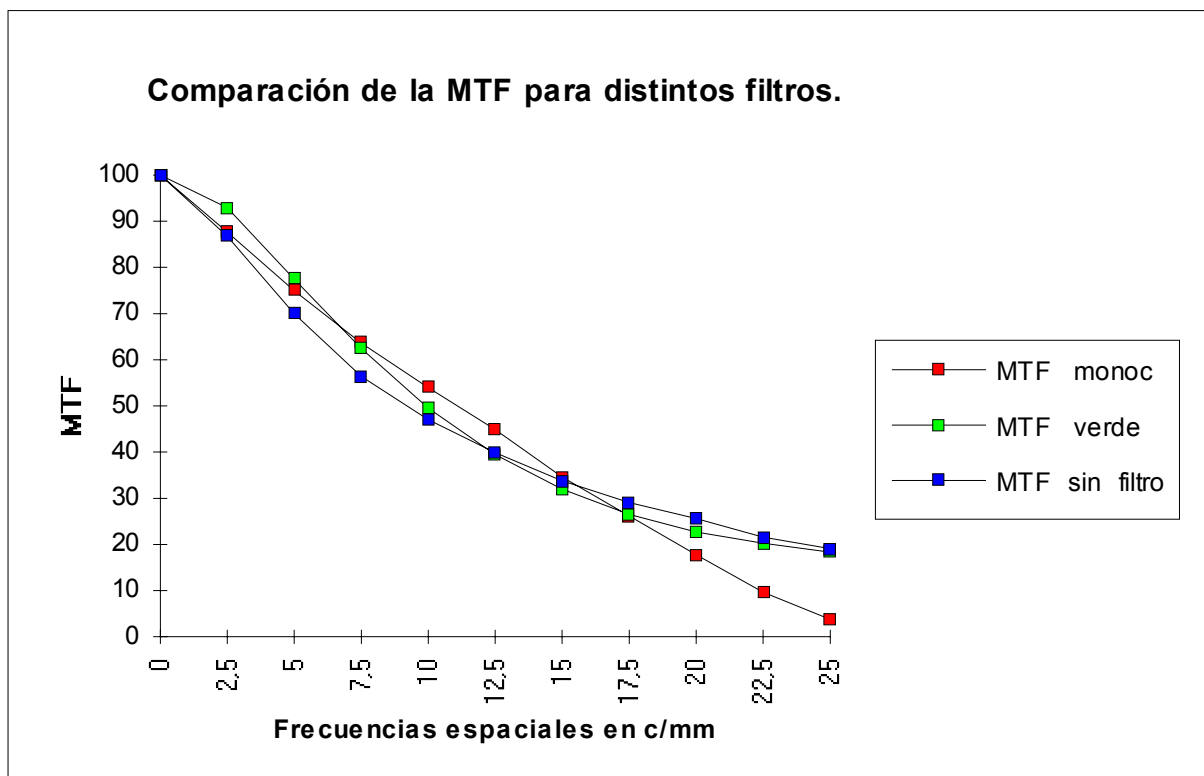
	MTF en 16
0	100
2,5	86,8
5	70
7,5	56,4
10	47
12,5	39,9
15	33,8
17,5	29,1
20	25,6
22,5	21,6
25	19,1



Las curvas de MTF en función del foco no son completamente uniformes. Esto es debido a la presencia de ruido en las medidas. Para localizar la posición de mejor foco no es suficiente una búsqueda manual de la posición en la que la MTF 'deja de crecer '. Esto daría lugar a multitud de errores, como se puede apreciar. Se comprueba la necesidad de incluir un barrido sistemático en el protocolo de medida.

Comparación.

Lo primero que vamos a comparar es la MTF obtenida:



La MTF monocromática es, en frecuencias medias mejor que las MTF policromáticas, comparable en bajas frecuencias y manifiestamente peor a altas frecuencias. La calidad general es comparable en las curvas MONOC y VERDE.

Esto en principio podría parecer contrario a la intuición de que las imágenes formadas con luz monocromática tienen mayor calidad óptica que las imágenes formadas con luz policromática (por la ausencia de aberraciones cromáticas). Pero no hay que olvidar que la MTF contiene información de degradaciones de calidad debidas tanto a efectos geométricos como difraccionales.

La MTF monocromática está degradada por efectos difraccionales, se acerca muchísimo al límite difraccional, como veremos en la sección siguiente. Al utilizar una apertura numérica tan pequeña, las aberraciones geométricas no tienen apenas influencia por estar utilizando un pincel de luz centrado en la pupila, con lo que se puede considerar óptica paraxial, sin aberraciones.

La frecuencia de corte para la MTF limitada por difracción en esta posición para la frecuencia 658 nm está en torno a 28 c/mm.

Sin embargo, el límite difraccional para luz policromática está mucho más alto. Por ejemplo para 555 nm (el centro de la curva de respuesta espectral del ojo, filtro verde) la frecuencia de corte difraccional está en 34 c/mm, y para 400 nm en 46 c/mm. Lo que sucede es que hay muchas aberraciones cromáticas, como se observará en el capítulo 4, especialmente para la curva 'sin filtro'.

Comparando las medidas policromáticas, la 'verde' es mejor que la 'sin filtro' a frecuencias altas entre un 6 y un 7,5 %. A frecuencias bajas, sin embargo, la puramente policromática aparece mejor en torno a un 2%.

Este resultado es poco significativo por las siguientes razones:

- La MTF ha sido optimizada para frecuencias altas. Que se consideran más significativas en general de la calidad de imagen. A altas frecuencias, se comprobó que las variaciones de la MTF en la curva 'sin filtro' son muy bruscas, y no van necesariamente correlacionadas con la calidad de imagen, mientras que a bajas frecuencias, la MTF es más lentamente variable, en consonancia con la calidad del sistema.

En posiciones cercanas décimas de milímetro al punto que hemos considerado de mejor foco para la curva 'sin filtro' se comprobó que la MTF a altas frecuencias sufría descensos por debajo de la curva 'verde'. Puede considerarse,

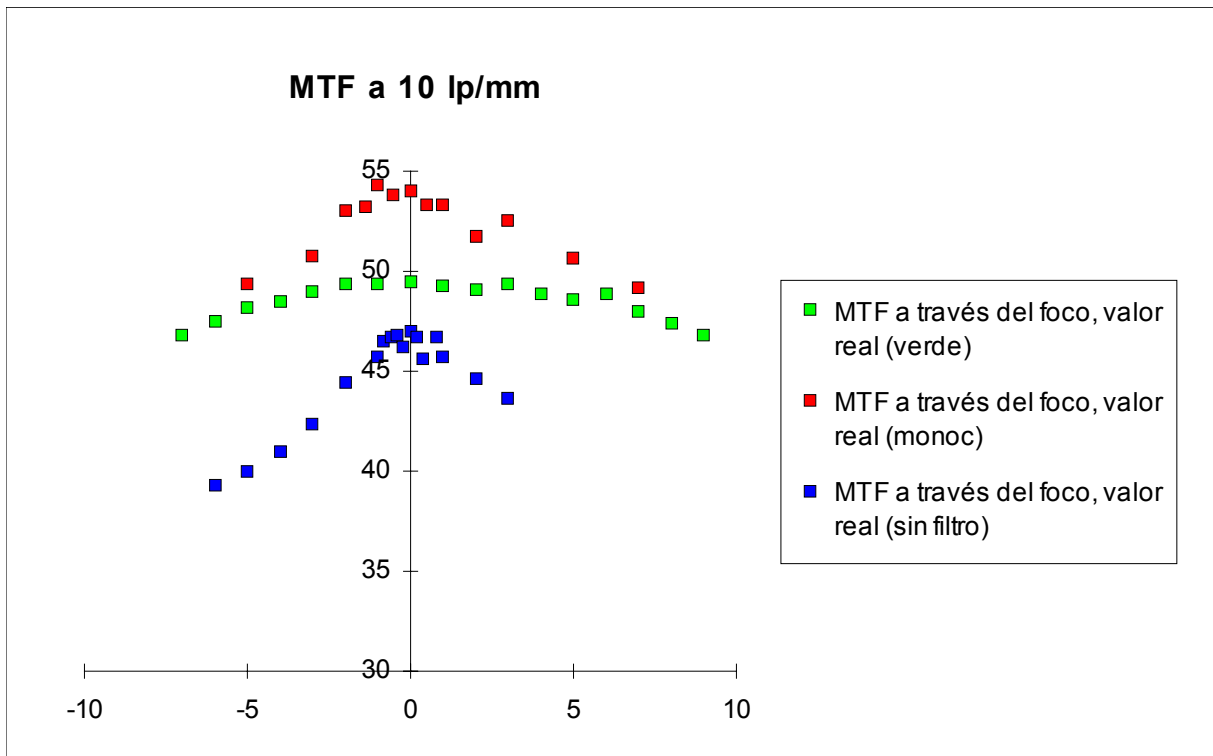
por tanto, que a bajas frecuencias, que son las que hemos optimizado, obtenemos un resultado satisfactorio y de lógica interpretación, mientras que a bajas frecuencias tenemos efectos residuales poco significativos.

Además, la diferencia a bajas frecuencias (de más del 6%) puede tomarse como significativa, mientras que la diferencia a altas frecuencias (2 %) es menor que el ruido que se puede observar en ambas curvas, y que el error habitualmente admisible en medidas MTF.

3.2.2.- Estudio de la profundidad de foco.

Las curvas obtenidas para hallar la posición de mejor foco pueden servir para visualizar algunos conceptos relativos a la teoría de la MTF.

Representamos juntas las tres curvas, y en la misma escala, con objeto de facilitar las comparaciones. Se escalan los valores del eje vertical por el valor obtenido de la medida normalizada para cada una de las curvas.

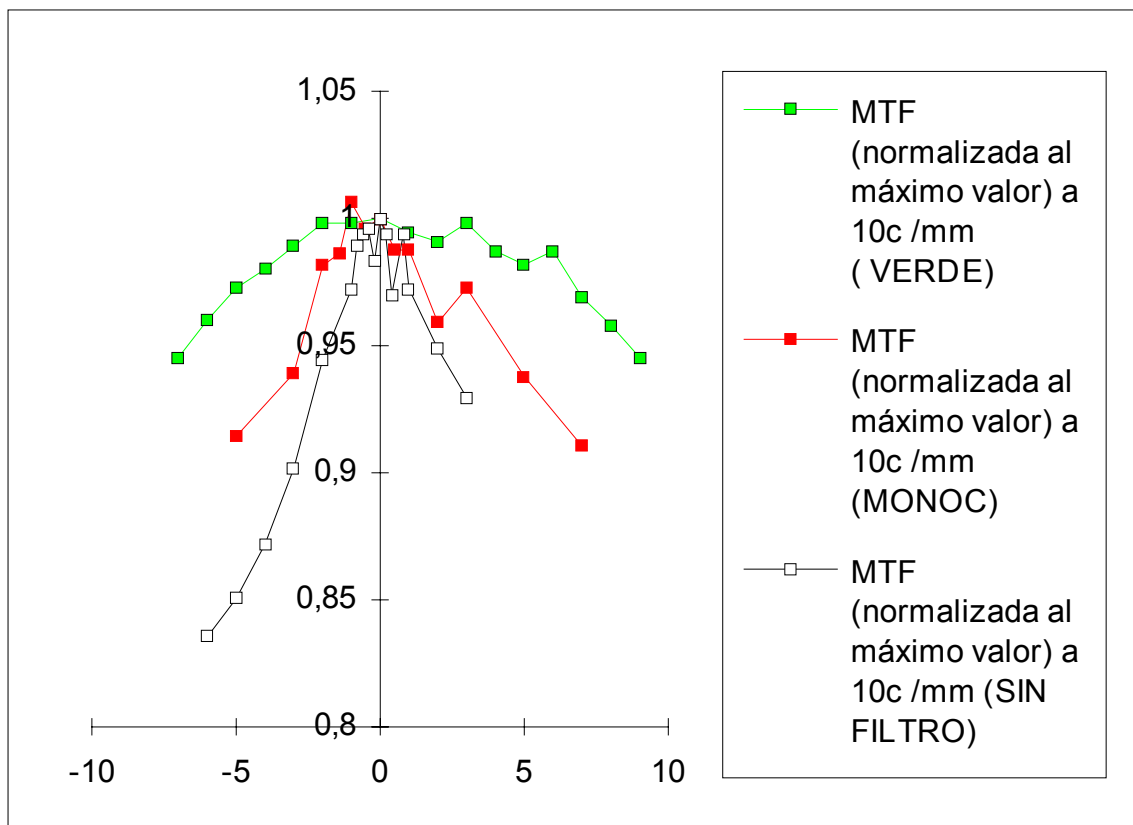


Se observa claramente que la calidad de imagen que produce el sistema óptico en estudio a esta frecuencia espacial es mejor para luz monocromática que

policromática. En esta representación se ve más claramente que el filtro verde mejora la respuesta del sistema con respecto a no usar filtro alguno.

Se puede estudiar la profundidad de foco del sistema con las distintas composiciones de luz. Para ello, normalizamos cada curva a su valor máximo.

Obtenemos la curva siguiente:



Por cualquiera de los criterios existentes para cuantificar la profundidad de foco obtendríamos los mismos resultados. Para el estudio en términos de MTF se suele emplear el criterio de Hopkins: La profundidad de foco a una determinada frecuencia espacial se define como el rango en milímetros para el cual la modulación no decae por debajo de 0,8 de su valor máximo a esa frecuencia.

Por tanto, obtenemos una profundidad de foco enorme, de más de 15 mm, para las tres curvas. Esto es debido a que hemos utilizado una pupila de entrada muy pequeña.

Sin embargo, se aprecian algunas diferencias entre las curvas. Obtenemos que la profundidad de foco mayor corresponde a la luz verde, seguida de la Monocromática, y de la luz sin filtro. No hay que olvidar que la calidad de imagen es muy superior para la luz monocromática (Las gráficas están normalizadas a su valor máximo).

La presencia de aberraciones cromáticas longitudinales, (que de hecho hemos observado que existen para esta lente, ver capítulo 4), pueden dar lugar a una profundidad de foco mayor, teniendo, lógicamente, una peor MTF.

En términos de PSF este efecto es fácil de entender. La PSF monocromática es más estrecha (peor MTF) pero es más sensible a la posición focal, haciéndose más ancha rápidamente al salirnos de la posición óptima. La PSF policromática, produce una PSF más ancha (peor MTF), pero al salirnos de la mejor posición la anchura crece lentamente con la distancia de alejamiento.

La interpretación en términos de MTF es más fácil con una simulación - ejemplo:

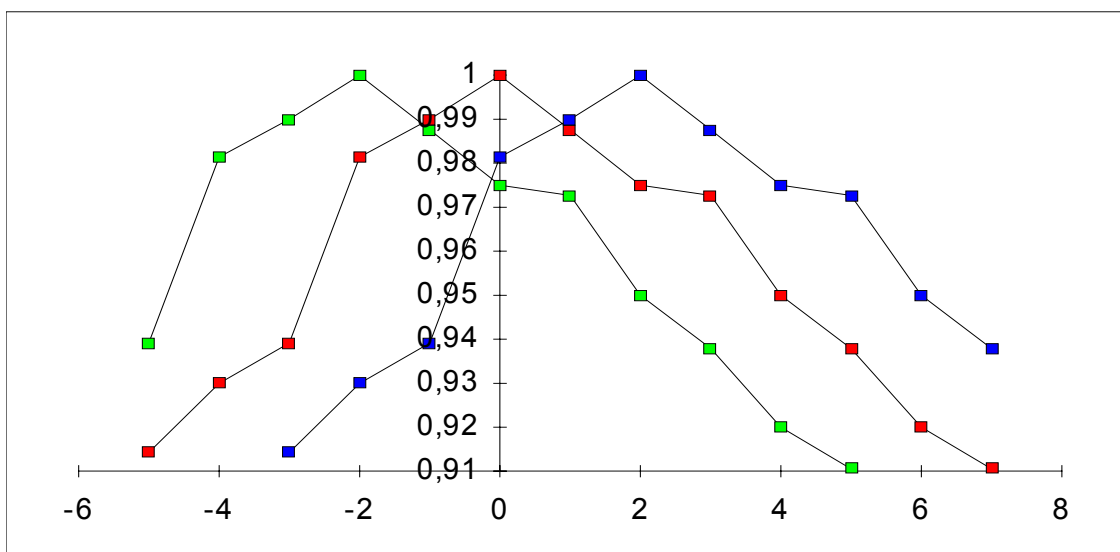
Recordemos que una MTF policromática se puede considerar como suma de funciones de transferencia monocromáticas multiplicados por unos ciertos factores de peso.

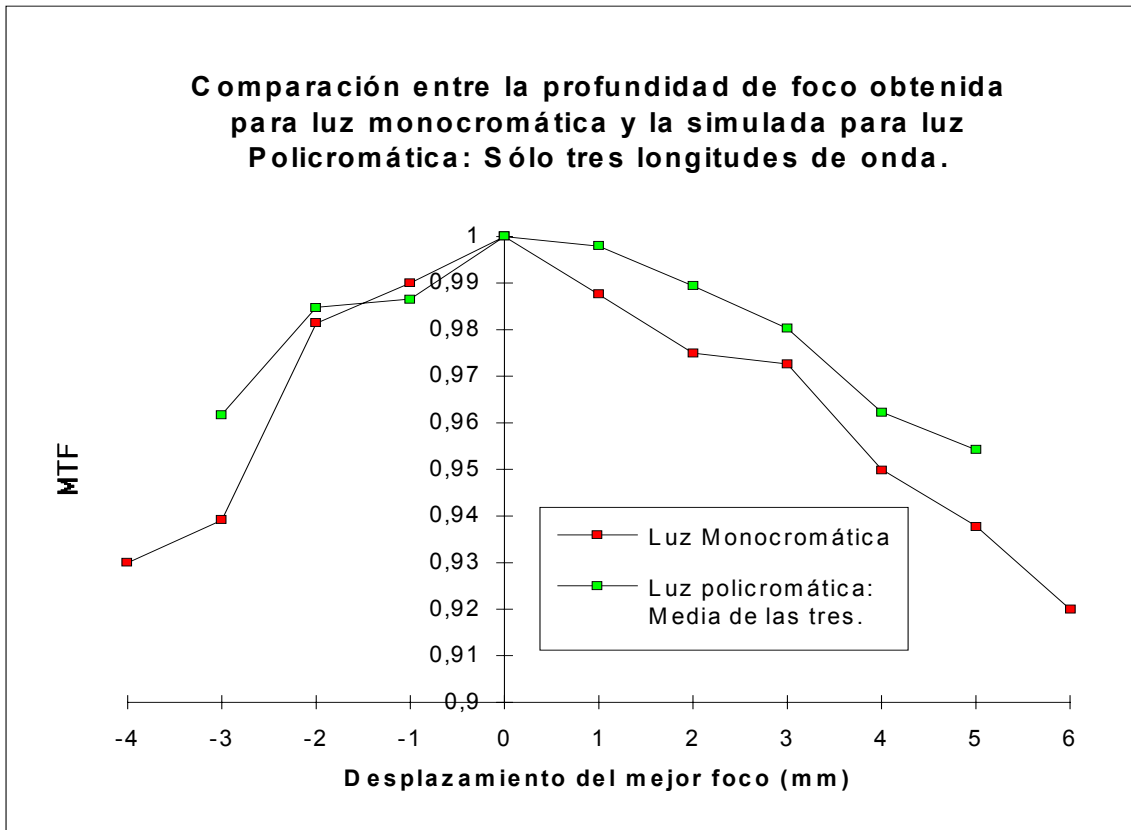
Para analizar un caso sencillo, supongamos una luz compuesta por sólo tres longitudes de onda. El sistema óptico tiene la misma respuesta a través del foco para las tres, pero ligeramente desplazadas (Aberración cromática longitudinal). Supongamos que la fuente y el detector tienen el mismo comportamiento para las tres frecuencias.

En estas condiciones, los factores de peso son todos la unidad, y la MTF policromática para cada frecuencia espacial y para cada posición focal es igual a la media de los valores de MTF de las distintas longitudes de onda, a esa frecuencia espacial y posición focal.

Esto es así porque sumar las curvas de MTF completas en cada posición focal, y normalizar el resultado equivale a sumar en cada frecuencia espacial y dividir por el número de sumandos, es decir, número de longitudes de onda. (Normalizar equivale a dividir por el valor a frecuencia espacial cero, y este valor es el múltiplo del número de sumandos por la unidad).

A continuación se pueden ver las tres curvas monocromáticas utilizadas en la simulación, así como la curva 'tricromática' resultante.





Obtenemos que la luz tricromática tiene una profundidad de foco mayor que la monocromática.

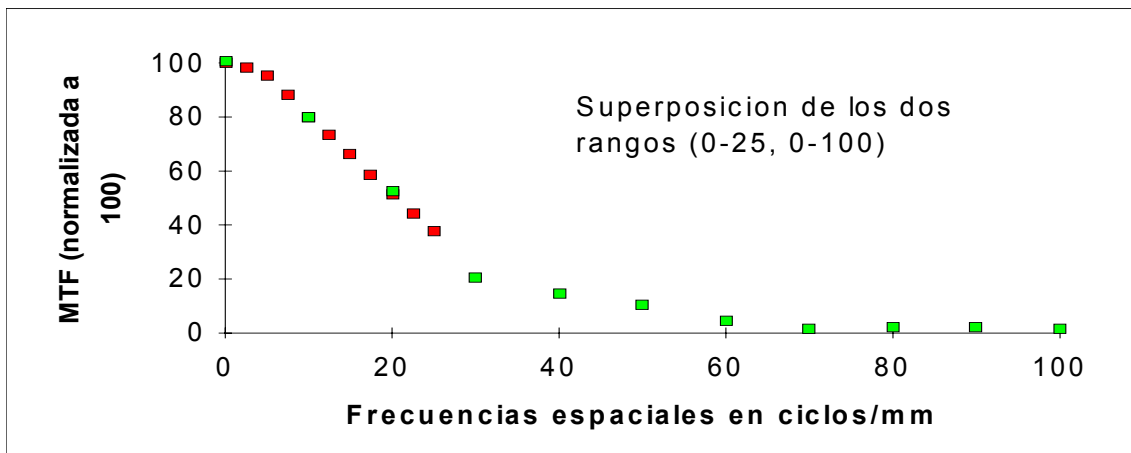
En casos realistas, la distribución espectral es de gran importancia a la hora de analizar la caída de MTF o la profundidad de foco, tanto como la forma de la respuesta del sistema a luz monocromática.

3.2.3.- Medida del rango : 0 - 100 lp/mm

Este rango será utilizado solamente para sistemas ópticos de gran calidad, o cuando interese observar la caída de la MTF a altas frecuencias. Hay que tener especial cuidado con la apodización, pues la lente transportadora de 20 aumentos, hace que a menudo la PSF observada sea demasiado grande.

Conviene, para evitar este problema, medir ambos rangos y superponer los resultados de ambas medidas. Así, el grado de solapamiento entre ambos rangos nos dará idea del grado de exactitud de las medidas.

Ejemplo:



3.2.4.- Medidas fuera de eje.

A la hora de medir fuera de eje, hay que considerar cómo es la superficie imagen que tiene que satisfacer el sistema en cuestión. Por ejemplo, para un objetivo fotográfico, las medidas fuera de eje hay que hacerlas considerando un plano imagen, correspondiente al plano de la película. Esta es la situación más frecuente, pero no la única.

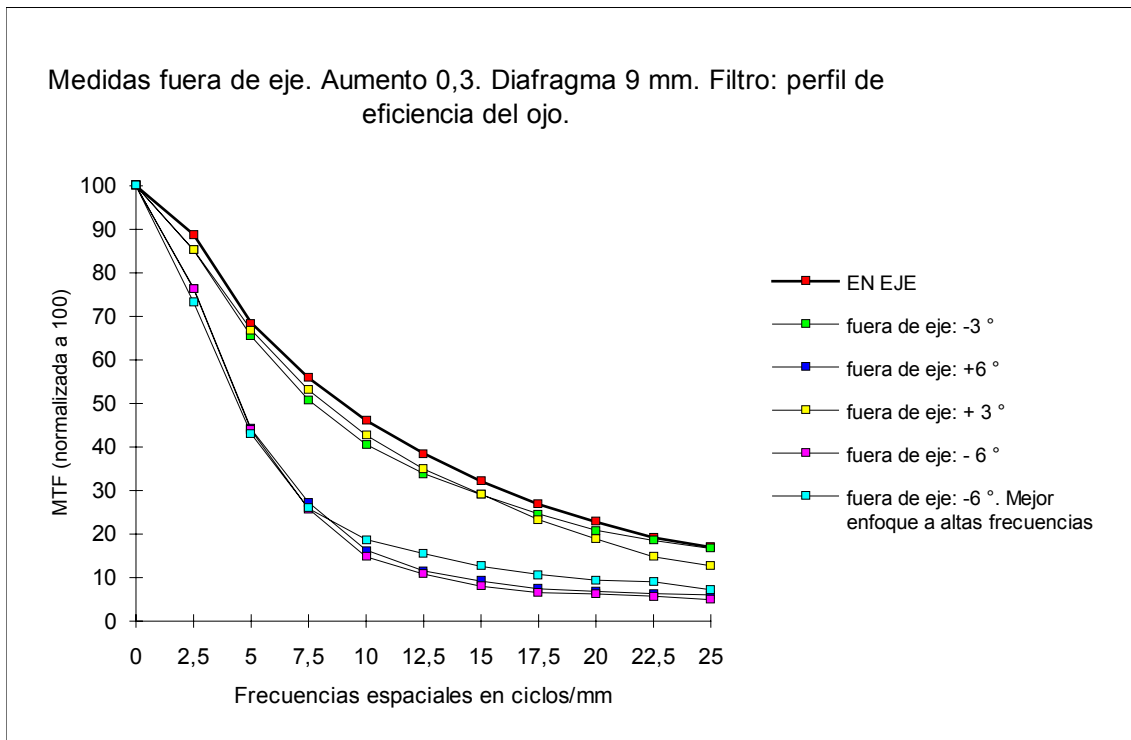
Para un sistema de visión, las curvaturas no son muy perjudiciales, y no es necesario ser tan estricto con la planitud de la superficie imagen. Es decir, se puede hacer un barrido de la MTF para distintas posiciones focales fuera de eje. Si la MTF mejora substancialmente en posiciones no demasiado alejadas de un plano, este dato es más representativo de la calidad del sistema.

En general las curvaturas sí son perjudiciales, y la imagen ha de ser plana.

En cuanto a cómo pasar a posiciones fuera de eje, para superficies objeto e imagen planas, basta con desplazar la rendija objeto a lo largo del plano objeto hasta formar el ángulo de campo que se desee. La segunda parte de la unidad de medida (rendija2-red-detector), se desplaza paralelamente (para seguir en el plano imagen), hasta encontrar la imagen. Para ángulos de campo moderados, no es necesario que el objetivo de microscopio esté orientado hacia la lente, ya que este está corregido para campos grandes, y en esta aplicación es casi telecéntrico.

Como ejemplo de una medida fuera de eje, se realizó la siguiente:

	EN EJE	fuera de eje: -3 °	fuera de eje: +3 °	fuera de eje: +6 °	fuera de eje: -6 °	fuera de eje: -6 °. Mejor enfoque a altas frecuencias
0	100	100	100	100	100	100
2,5	88,8	85,2	85,3	76,5	76,3	73,2
5	68,5	65,4	66,9	44,1	43,8	43
7,5	55,9	50,8	53,1	27,3	25,8	25,9
10	46,1	40,6	42,7	16,3	14,8	18,7
12,5	38,5	33,9	34,9	11,5	10,8	15,5
15	32,1	29	29,2	9,2	8	12,6
17,5	26,8	24,6	23,3	7,4	6,5	10,7
20	22,8	20,9	18,9	6,8	6,2	9,4
22,5	19,2	18,5	14,8	6,3	5,7	9
25	17	16,7	12,7	6	4,9	7,2



Las características de la lente que se midió están detalladas en el apartado 3.2.1.

Para ángulos de campo de 3° la calidad decrece ligeramente. Pero la lente tiene un comportamiento nefasto para más de 6°.

Se aprecia la presencia de pequeñas curvaturas, pues el plano de mejor enfoque en eje y fuera de eje no coinciden.

Para medidas fuera de eje, es de importancia primordial el realizar medidas a distintos azimuts, pues la PSF es generalmente asimétrica, y el comportamiento en distintas orientaciones puede variar drásticamente.

3.3.- SIMULACIÓN TEÓRICA DE LAS MEDIDAS. COMPARACIÓN.

Con objeto de comprobar la exactitud de las medidas realizadas con nuestro dispositivo, se procedió a una simulación teórica de las mismas. Se utilizó el Software de diseño óptico CodeV, una de las herramientas más avanzadas de simulación de sistemas ópticos.

Esta comparación en realidad nos servirá para evaluar la exactitud de la calibración realizada, ya que la posible discrepancia procederá en su mayor parte de errores de la unidad de medida (además de errores de simulación: mala especificación de los parámetros de la simulación, o errores de fabricación de la lente).

A la hora de interpretar una comparación de este tipo, es importante hacer constar el siguiente hecho: Los posibles errores accidentales de la unidad de medida, errores de alineamiento, errores introducidos por la óptica auxiliar, etc., hacen siempre disminuir la MTF medida en relación con la MTF calculada. Por tanto, la MTF calculada ha de ser considerada un límite superior, que no debería ser traspasado (dentro de los límites de error impuestos por el ruido aleatorio del detector).

Si se sobrepasa considerablemente ese límite superior, hay que interpretar que se están produciendo errores sistemáticos inaceptables en la medida. Por ejemplo, errores de normalización, errores en la definición de la escala de frecuencias, sobrecorrección de efecto de anchura de rendija (si la hubiera), ruido térmico excesivo...

Es de importancia primordial la correcta introducción de los parámetros de la

simulación. De todos ellos, el más crítico, en medidas policromáticas, es el de la composición espectral de la luz. Esto es debido a que, por lo general, los programas calculan la MTF policromática a partir de un espectro discreto de curvas de MTF monocromáticas, sumadas con distintos pesos. Por lo tanto, los datos de entrada del espectro de la luz utilizada consisten en un conjunto discreto de longitudes de onda con sus pesos correspondientes, mientras que la luz policromática real tiene un espectro continuo de longitudes de onda.

Para realizar una comparación independiente de estos parámetros tan conflictivos, se realizó la medida monocromática en el apartado anterior, pese a las dificultades de medida que presenta con esta unidad.

El proceso que se siguió en la simulación es el siguiente:

- Introducción de los datos de la lente y diafragma.
- Introducción de los ángulos de campo, espectro de la luz, apertura.
- Restricción de las distancias objeto e imagen a un aumento de 0,3.
- Optimización de las distancias objeto e imagen a la posición de mejor MTF, con las restricciones anteriores.
- Cálculo de la MTF. (límite difraccional, MTF real en posiciones tangencial y sagital..)

Pasamos a enumerar los parámetros de la simulación.

Superficies	radios	espesores	vidrio
	RDY	THI	GLA
OBJ:	INFINITY	686.488381	
1:	91.56600	8.000000	KF9_SCHOTT
2:	0.1e12	2.000000	
> STO:	0.1e12	232.178966	
IMG:	INFINITY	0.000000	

SPECIFICATION DATA

WL	656.00	546.00	486.00	Longitudes de onda
REF	2			Longitud de onda de referencia
WTW	1	3	1	Pesos
XAN	0.00000			Definición de los ángulos de campo
YAN	0.00000			
VUY	0.00000			Campo en función del tamaño del objeto
VLY	0.00000			

REFRACTIVE INDICES

			Vidrio - Índices de refracción	
GLASS CODE		656.00	546.00	486.00
KF9_SCHOTT		1.520361	1.525836	1.530527

RED	3.000000	Restricción de aumento -0.3
------------	-----------------	-----------------------------

INFINITE CONJUGATES

		Parámetros de la lente en posición de infinitos conjugados
EFL	174.1342	Distancia focal efectiva
BFL	166.8912	Distancia focal trasera
FNO	19.3482	Número F

AT USED CONJUGATES

		Parámetros de la lente en los puntos conjugados usados.
RED	3.0000	Aumento - 0.3
FNO	79.9262	Número F
OBJ DIS	686.4884	Distancia Objeto
TT	928.6673	Longitud total
IMG DIS	232.1790	Distancia Imagen
OAL	10.0000	Tamaño del sistema

PARAXIAL IMAGE

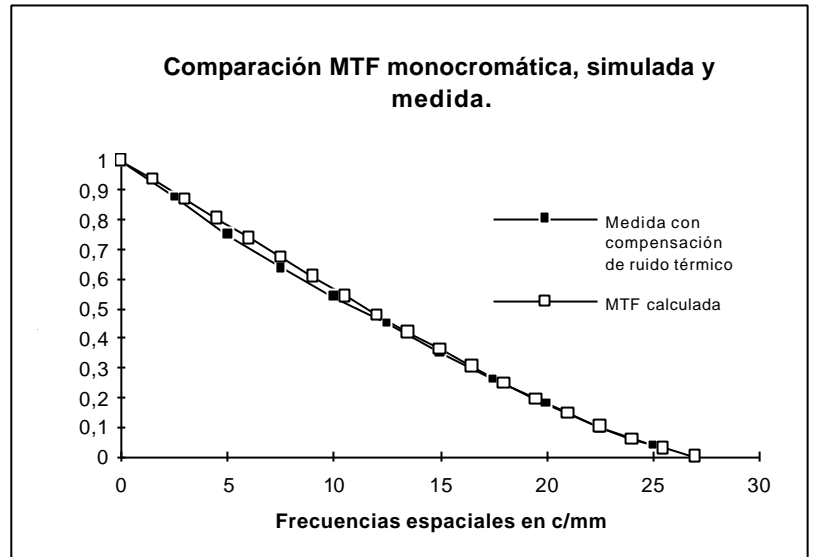
		Imagen paraxial
HT	0.0000	Altura
THI	235.2939	Distancia desde la última superficie
ANG	0.0000	Ángulo de campo

EXIT PUPIL

		Pupila de salida
DIA	9.0000	Diámetro
THI	0.0000	Distancia desde el diafragma.

En estas condiciones, realizamos la simulación para la luz monocromática de longitud de onda de 658 nm en eje. Comparando con nuestra medida, obtenemos:

Frecuencias espaciales.	Medida con compensación de ruido térmico	MTF calculada
0	1	
2,5	0,876893939	
5	0,75	
7,5	0,636363636	
10	0,539772727	
12,5	0,448863636	
15	0,346590909	
17,5	0,261363636	
20	0,178030303	
22,5	0,096590909	
25	0,037878788	
0		0,999
1,5		0,935
3		0,869
4,5		0,804
6		0,738
7,5		0,672
9		0,607
10,5		0,542
12		0,477
13,5		0,419
15		0,362
16,5		0,304
18		0,246
19,5		0,195
21		0,145
22,5		0,101
24		0,058
25,5		0,029
27		0



La MTF límite difraccional también se calculó. Se obtuvo similar a la MTF simulada en más de un 99,5 % en todos los puntos, y no se ha dibujado por razones de claridad de la gráfica.

La coincidencia es grande, con lo cual se confirma el buen funcionamiento de la unidad de medida de MTF.

Hay que hacer notar, y esto será importante en simulaciones posteriores, que puede existir una pequeña discrepancia entre la medida y la simulación, debido al distinto criterio con el que se busca la posición de mejor foco.

Al medir, se ha buscado como mejor foco, la mejor MTF a 10 c/mm. Sin embargo, el ordenador busca la mejor curva completa. Estas pequeñas discrepancias, sin embargo, no deberían influir en la descripción global de la calidad del sistema.

Para luz monocromática en eje, la MTF está muy cerca de su límite difraccional, porque el diafragma tan pequeño hace que la difracción sea importante, mientras que el comportamiento del sistema puede considerarse paraxial: hay pocas aberraciones.

Veamos los resultados obtenidos en las simulaciones con luz policromática:

El filtro de respuesta espectral del ojo se suele simular en este programa como:

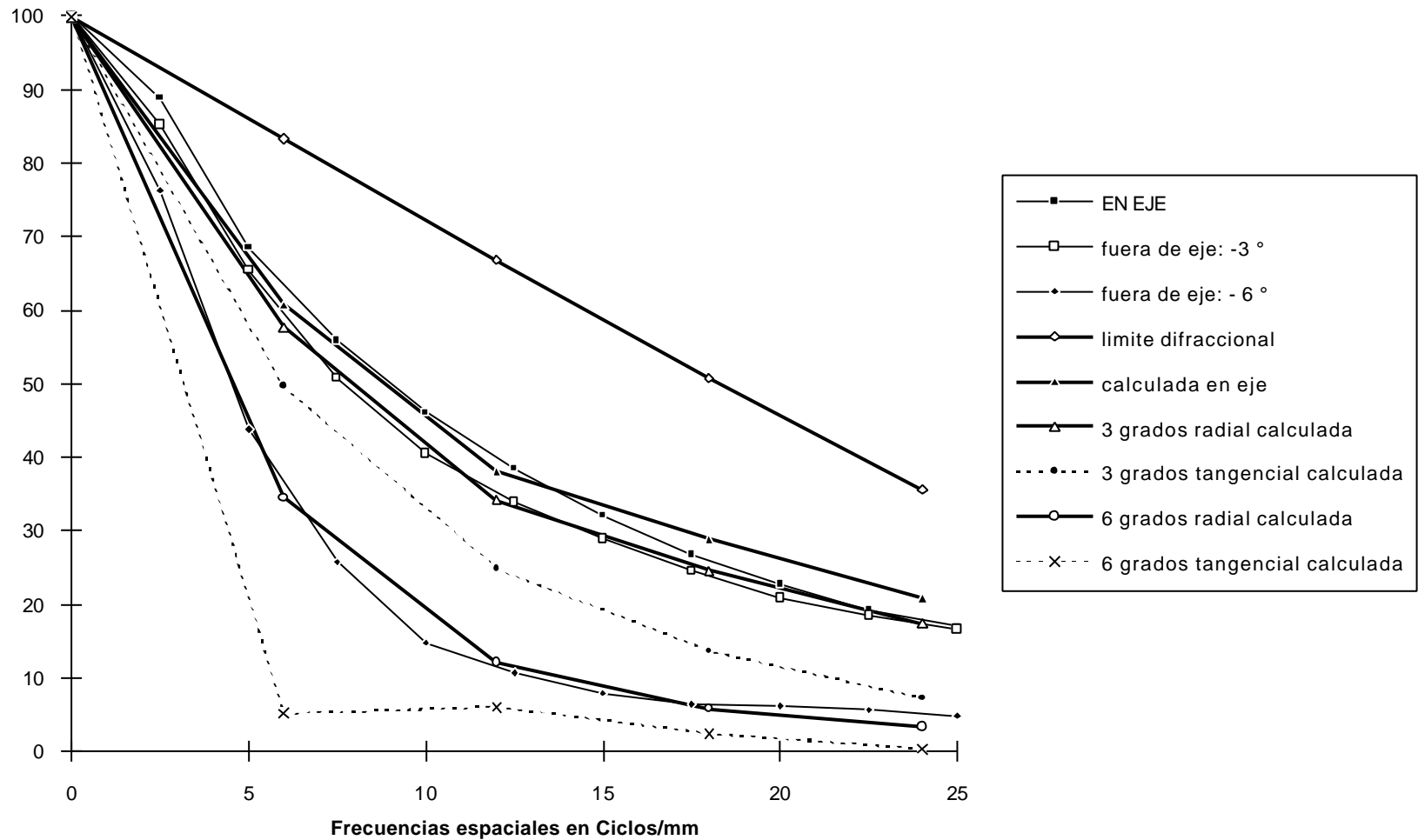
Longitudes de onda	656	546	486
Pesos	1	3	1

Se respetó este criterio en nuestra simulación.

Los resultados obtenidos de la simulación para las distintas posiciones de campo, junto con las medidas, se exponen a continuación:

frecuencias espaciales en c/mm	EN EJE	fuera de eje: -3 °	fuera de eje: - 6 °	límite difraccional	calculada en eje	3 grados radial calculada	3 grados tangencial calculada	6 grados radial calculada	6 grados tangencial calculada
0	100	100	100						
2,5	88,8	85,2	76,3						
5	68,5	65,4	43,8						
7,5	55,9	50,8	25,8						
10	46,1	40,6	14,8						
12,5	38,5	33,9	10,8						
15	32,1	29	8						
17,5	26,8	24,6	6,5						
20	22,8	20,9	6,2						
22,5	19,2	18,5	5,7						
25	17	16,7	4,9						
0				99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9
6				83,3	60,8	57,7	49,7	34,5	5,2
12				66,8	38,2	34,2	24,9	12,2	6,1
18				50,8	29	24,6	13,7	5,8	2,5
24				35,6	20,9	17,4	7,3	3,4	0,4

Comparación entre Simulación y medida para el filtro de respuesta espectral del ojo



Existe una gran coincidencia entre las dos series de curvas. Más allá de una comparación punto por punto, que se hará más adelante, es indiscutible que las dos curvas, la medida y la calculada coinciden plenamente al describir la calidad general del sistema en cada posición de campo.

El acercamiento es mejor del que aparece aquí: hay menos puntos en las curvas calculadas que en las medidas, y al realizar una interpolación lineal entre puntos se comete error. Hay que hacer la comparación en las inmediaciones de los puntos calculados.

Podría parecer que en el rango 0-5 c/mm la curva medida está significativamente por encima de la calculada. En realidad esto no es así, es otro efecto de la interpolación. La calculada falsea la curvatura que se produce de 0 a 5 c/mm al sustituir ese tramo por una recta.

Análisis de las fuentes de error.

Una vez que se ha comprobado que el caso monocromático coincide, es decir, que la unidad está bien calibrada, las discrepancias en el caso policromático deben achacarse a los nuevos parámetros de la simulación.

Tal vez la más importante es la definición exacta de la composición espectral de la luz. Aquí se han utilizado solamente tres longitudes de onda, con distinta influencia, según los pesos: 1 3 1. Esto puede simular el filtro, y a grandes rasgos prever su comportamiento, pero no es del todo exacto.

Otra posible causa de la pequeña discrepancia que se observa es la manera en que hemos localizado la posición de mejor foco.

Nosotros hemos optimizado a una sola frecuencia, 10 c/mm, mientras que el ordenador utiliza toda la curva. Optimiza también las altas frecuencias, que nosotros hemos considerado menos significativas. Esto queda ilustrado en la gráfica, donde la coincidencia es mayor en las posiciones 6 y 12, que en 18 y 24, donde la curva tiene menos pendiente y sería de esperar, por tanto una más fácil coincidencia.

Las curvas punteadas no se han medido, pero ilustran la gran diferencia de MTF en los distintos azimuts: lo asimétrica que es la PSF fuera de eje.

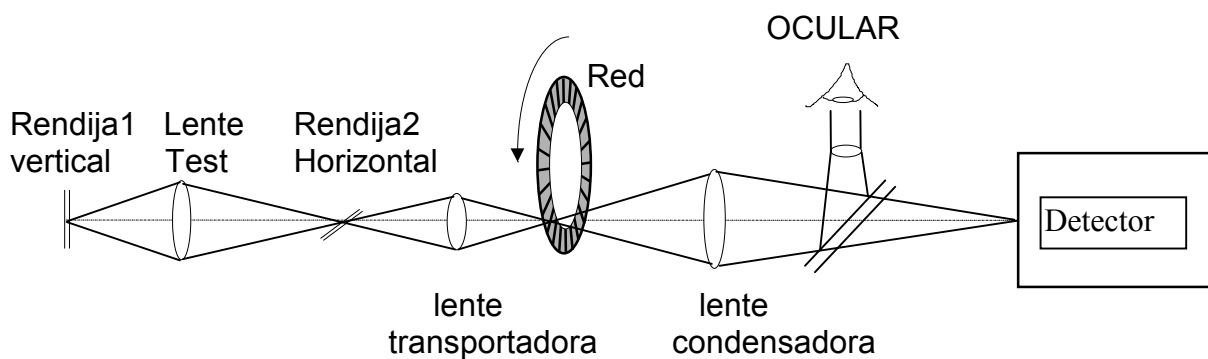
La medida policromática extrema (sin filtro) también se intentó simular. Pero los resultados, debido a la dificultad de modelización del espectro de la lámpara halógena con unas pocas longitudes de onda, no fueron satisfactorios.

4.- ADAPTACIÓN AL SISTEMA DE WILLIAMS Y COLABORADORES. **UN MÉTODO DE VISUALIZACIÓN, ESTUDIO Y MEDIDA DE ABERRACIONES.**

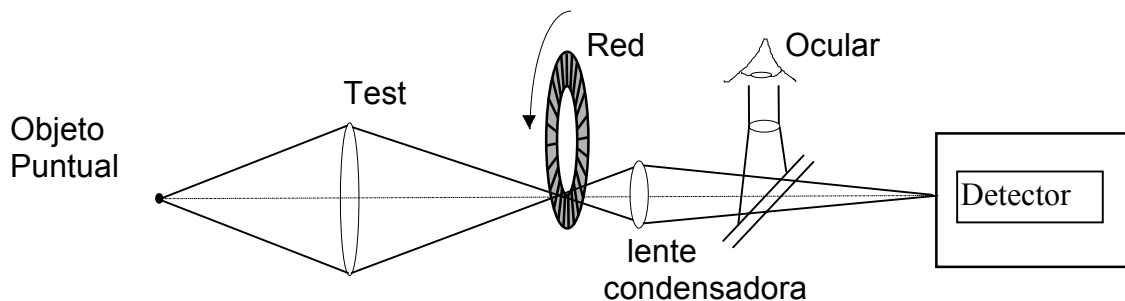
Una vez estudiada nuestra unidad de medida de la MTF, se propuso adaptarla a otro sistema de medida: al desarrollado por Williams y colaboradores²² (Sección 2.1).

Se pretendía obtener una unidad de medida de prestaciones completamente diferentes, utilizando el mismo material.

El aparato de Jones utiliza el siguiente montaje:



Williams utilizó el siguiente (para una lente entre posiciones conjugadas a distancia finita) :



La adaptación pasaba por resolver problemas como el paso de la LSF (Line Spread Function - Función de respuesta de línea), correspondiente a la rendija

utilizada hasta ahora, a la PSF (función impulso unidad) correspondiente al orificio objeto del nuevo dispositivo.

La relación entre ambas funciones es la siguiente:

$$LSF(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} PSF(x, y) \cdot dy$$

Como comentamos en la sección 1.3.1, la transformada de Fourier de la LSF en dirección perpendicular a la longitud de la línea (en este caso dirección x) es igual a la transformada de Fourier de la PSF en la misma dirección, e igual a la MTF (salvo fase).

Por tanto, al sustituir la rendija por un orificio circular, la MTF resultante debería ser la misma.

Con el dispositivo de Williams, perdemos la capacidad de producir una frecuencia espacial efectiva, y por tanto de variar la frecuencia. Mediremos a una única frecuencia, la correspondiente a la red. Además, no podremos normalizar nuestras medidas, al no poder medir a frecuencias cercanas a cero. Esta es la razón por la cual este sistema sólo puede ser utilizado para realizar medidas relativas: medidas por comparación.

El aparato de Williams original se usaba para control de calidad y por tanto medidas relativas eran suficientes. La señal se comparaba con un nivel DC de referencia. Una medida superior al nivel dado indicaba que el sistema óptico cumplía las especificaciones. Una medida inferior, que el sistema no daba la calidad mínima requerida.

Nosotros vamos a hacer lo mismo: realizar medidas relativas. No podemos realizar la normalización con el dispositivo de Jones y mantenerla al pasar al de Williams, pues cambiar la rendija por el orificio lleva consigo un cambio muy significativo en el flujo de luz total que llega al detector, y por tanto en la normalización.

En cuanto al problema del tamaño finito del diafragma objeto, tenemos el mismo problema que con la anchura de rendija. La diferencia es que, en este caso, al no pretender obtener medidas absolutas de la MTF, podemos utilizar un diámetro mayor, ya que el error que aparezca por esa causa se va a presentar siempre, con el mismo signo y valor, y no afecta a las comparaciones. Lo único que hay que tener en cuenta es que si el valor de la función SINC correspondiente a ese diámetro en la frecuencia espacial a medir tiene un valor demasiado bajo, no podremos realizar buenas comparaciones (arrastrará todos los valores de la MTF, grandes o pequeños, a valores cercanos a cero).

De los dispositivos experimentales se deduce claramente los pasos a seguir para realizar la transformación: Se quitan las rendijas y se coloca un diafragma pequeño inmediatamente después de la fuente.

Problemas de anchura de diafragma objeto y apodización.

El aparato de Williams es especialmente útil si realizamos medidas fuera de eje.

Es ahí donde se producen las mayores asimetrías de la PSF, y por tanto donde tiene más sentido realizar un barrido a distintos ángulos azimutales.

En todo este estudio, por su simplicidad, se están utilizando lentes simples. Para ángulos de campo grandes, éstas producen aberraciones muy superiores a las que se obtienen en eje.

Manteniendo la lente transportadora de 5 aumentos se mide a una frecuencia en el plano imagen de la lente de 25 lp/mm. La imagen queda aumentada y las aberraciones fuera de eje a menudo son suficientemente grandes como para producir apodización de la PSF : la luz está tan esparcida que no toda ella es recogida por la lente condensadora, no se observaba la imagen completa a través del ocular, no llega al detector toda la luz. Al perder luz se producen errores en la normalización. Estos errores dependen de la forma de la aberración, del centrado...En definitiva, de cada posición fuera de eje, de cada medida en particular. Una PSF apodizada no puede ser utilizada con garantías de obtener medidas de MTF, incluso si estas son relativas.

Esto sería motivo suficiente para descartar el uso de la lente transportadora de cinco aumentos con lentes tan aberrantes fuera de eje. Pero hay que tener en cuenta otro efecto: a 25 lp/mm la MTF será considerablemente más baja que a 5 lp/mm. Como se discutió anteriormente (Protocolo de medida - Búsqueda de la posición de mejor foco), la MTF a una sola frecuencia es representativa de la calidad del sistema sólo si esa frecuencia no decae a cero normalmente, muestra un razonable grado de variación con respecto a las aberraciones, está cerca del límite de bajas frecuencias... Condiciones que desaconsejan el uso de la frecuencia 25 lp/mm.

Además, desde un punto de vista práctico, utilizar el objetivo de microscopio sin la rendija es desaconsejable en este dispositivo. El anillo que soporta la rendija sirve además para fijar la última lente del microscopio. Sin la rendija, la última lente queda sin fijar, y la calidad del microscopio, así como el enfoque... varían con extrema facilidad. Además, se desajusta la posición de la rendija (enfoco, paralelismos...) respecto al microscopio, y habría que volver a calibrarla.

Medidas realizadas.

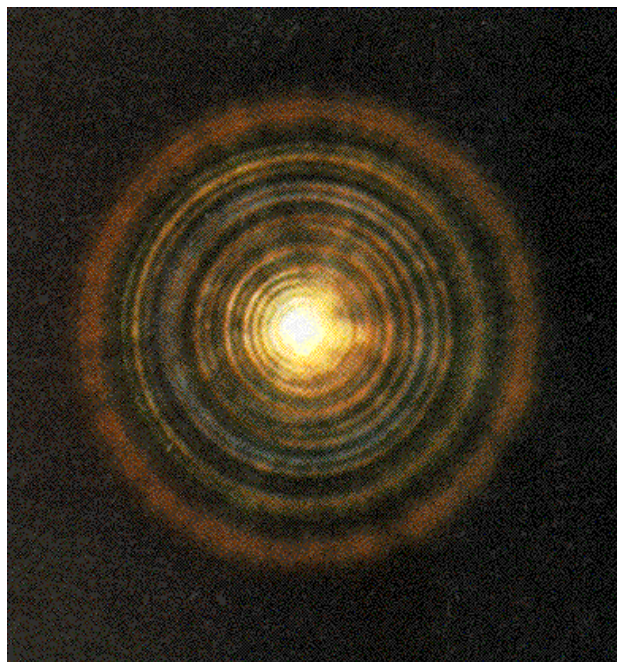
Utilizamos el dispositivo sin lente transportadora, para obtener medidas a una frecuencia de 5 lp/mm, mucho más aconsejable para medir la calidad general del sistema. Conseguimos, además, evitar la apodización en todas las medidas realizadas. Se utilizó un diafragma objeto de diámetro 25 micras. Se consideró un buen compromiso entre la cantidad de luz que llega al detector (que al final repercute en la cantidad de ruido) y el error debido al tamaño finito. Este error, como hemos visto, no estropea la medida, siempre que esté acotado. El diafragma objeto de 25 micras proporciona luz suficiente (con el sistema de iluminación del que dispone la unidad original) para obtener una buena repetitividad de las medidas, a la vez que multiplica todos los valores de MTF por 0.975 por efecto de anchura finita (para una lente test funcionando entre posiciones de aumento unidad), algo que no va a influir en absoluto en la comparación de nuestras medidas.

Lo más llamativo de los resultados obtenidos es la facilidad para el estudio de las aberraciones. Se compaginan la visualización clara y completa de la PSF (algo que no teníamos en el dispositivo anterior) con el estudio cuantitativo que representa la MTF. Aunque no estemos utilizando aumentos a través del microscopio, el ocular proporciona aumentos suficientes para visualizar las aberraciones del sistema.

La estructura mecánica en forma de módulos que soporta todo el dispositivo, permite cambiar filtros, pupilas, campo... Con extremada facilidad. Esto permite

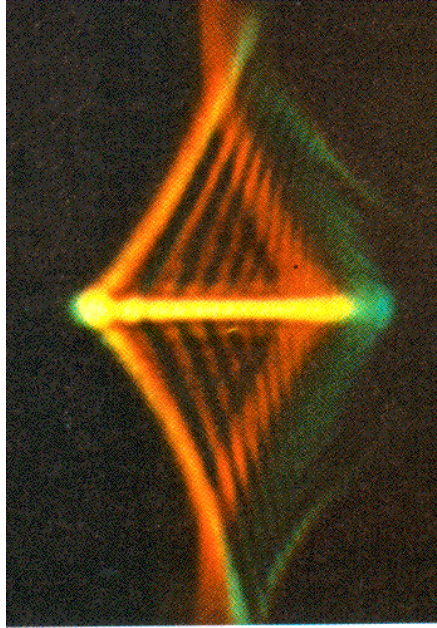
estudiar el efecto de distintas composiciones espectrales de la luz en la MTF de la lente y en la forma de la imagen, así como los efectos de difracción...

Por ejemplo, para una lente que produce aberración esférica, en eje pueden observarse imágenes como la siguiente:



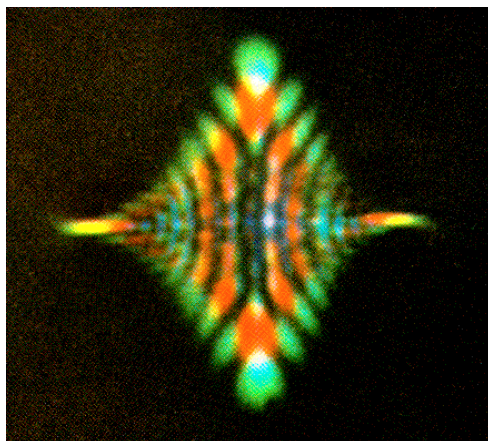
Se observa con nuestra unidad que la MTF para los distintos azimuts no varía, como era de esperar, pues la PSF es simétrica. La PSF parece presentar discontinuidades o irregularidades: Anillos en lugar de una caída uniforme con el radio. Esto es debido a la presencia de efectos difractivos por el uso de un diafragma pequeño.

Si añadimos esos efectos difractivos (disminuyendo la pupila) a una lente que produce astigmatismo, y utilizamos luz de suficiente rango espectral (para que sean visibles las aberraciones cromáticas), la PSF resultante puede tener la forma siguiente:



Si medimos la imagen en posiciones cercanas a las focales de Sturm, la MTF es manifiestamente dependiente del ángulo en el que se mide. Para la imagen anterior, la MTF en dirección vertical resultó ser más de diez veces mejor que la correspondiente a dirección horizontal a 5 pl/mm. (Las posiciones intermedias muestran MTF intermedias, con una variación continua).

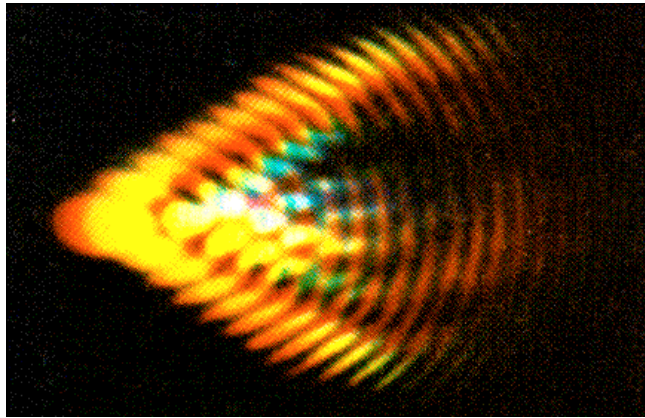
En la mancha de mínima confusión, se obtienen PSF del tipo:



La MTF tiene variaciones con la orientación, pero mucho menores que en el caso anterior. La dirección de mejor MTF no es siempre la misma para este tipo de PSF.

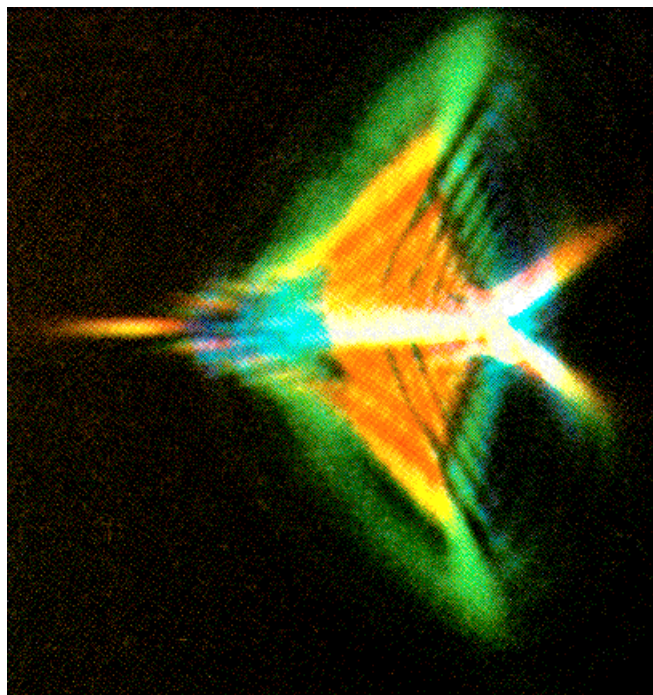
Nosotros, según la lente particular, y las condiciones de funcionamiento (aumentos, apertura, campo...) hemos obtenido como mejor dirección, unas veces la vertical, otras la horizontal, y otras 45 grados (positivos o negativos).

El coma siempre acaba apareciendo en lentes simples para posiciones extraxiales. Produce imágenes del tipo:



En estas, la dirección vertical (tal y como está orientada la fotografía ejemplo) ha resultado ser en nuestras medidas al menos tres veces mejor que la horizontal.

Por último, las imágenes genéricas suelen ser mezcla de todas las aberraciones, produciéndose figuras de difícil interpretación. Véase la figura siguiente:



Conclusiones.

El aparato de Williams en la versión aquí adaptada, proporciona una completa herramienta para el estudio de los parámetros de calidad de un sistema óptico.

Será especialmente útil en el estudio de sistemas de PSF marcadamente asimétrica, como suele suceder fuera de eje. Además, la visualización de la PSF completa puede aportar datos al evaluador, mucho más significativos de los que se pueden obtener de la LSF del aparato de Jones.

De cualquier forma, no hay que olvidar que el aparato de Williams sólo ofrece una idea estimativa de la calidad del sistema óptico. Y que una evaluación completa y objetiva, pasa por la medición de la MTF para todas las frecuencias con medidas absolutas, es decir, una correcta calibración del aparato y normalización a frecuencia espacial cero unidad. Esto hace que el aparato de Jones sea mucho más útil desde el punto de vista científico, que es el uso fundamental que se le pretende dar a esta unidad de medida.

Cabe destacar de todas formas que la simplicidad del dispositivo y la forma tan intuitiva en la que se realizan las medidas, hacen que el montaje de Jones sea más propicio para un primer acercamiento experimental al estudio de la calidad óptica de sistemas, en especial a las aberraciones de Seidel y a las técnicas de medida de la MTF.

5.- CONCLUSIONES.

- Se ha puesto en marcha, calibrado y ajustado un sistema de medida de la MTF por métodos directos.

- Se han realizado medidas de ejemplo que ilustran su adaptabilidad a distintos tipos de lentes, composiciones espectrales, rangos de frecuencia espacial, campos, posiciones objeto e imagen...

- Se ha estudiado minuciosamente de forma teórica y experimental el método de medida utilizado:
 - Se ha estudiado teóricamente el problema de anchura de rendija para medidas de MTF. Se ha comprobado el funcionamiento de un método que evita dicho problema y que a su vez puede ser utilizado para chequeo de toda la unidad de medida. Se han medido por un método difraccional las anchuras de las rendijas disponibles, con objeto de optimizar el uso en el futuro de esta unidad de medida.

 - Se ha propuesto un método de compensación del ruido térmico del detector, para medidas de escasa relación señal-ruido con resultados satisfactorios.

- Se ha desarrollado un método experimental de estudio del dispositivo electrónico, para comprobar el buen funcionamiento del fotomultiplicador, visualizar tanto la demodulación de la señal al variar las frecuencias espaciales como los ruidos de tipo mecánico, y chequear las operaciones electrónicas de filtrado y normalización de la señal que dan el valor final de la MTF.

- Se ha investigado la capacidad del sistema para estudio de la profundidad de foco de sistemas ópticos.

- Se han realizado simulaciones computacionales de los aspectos más conflictivos de la medida para cuantificar su efecto: Normalización, ruido térmico del fotomultiplicador, orientación de las rendijas y del retículo, influencia de la policromaticidad en la profundidad de foco...

- Se han comparado algunas de las medidas realizadas con nuestra unidad, con curvas de MTF procedentes de simulaciones teóricas, obteniéndose excelentes resultados que avalan la exactitud tanto del aparato de medida como de la calibración realizada.

- Por último. se realizó una adaptación del método original a otro de diferentes prestaciones, obteniéndose una herramienta complementaria que permite una mejor visualización de la calidad óptica del sistema, y la medida de la MTF a distintos ángulos dentro del plano imagen.

6.- REFERENCIAS.

- 1.- G. B. Airy, *On the Diffraction of an Object Glass with Circular Aperture*. Trans. Cambridge Philos. Soc. 5, 283 (1835).
- 2.- Born, M; Wolf, E. *Principles of Optics*, Pergamon Press (1993).
- 3.- L. Foucault, *Mémoire sur la Construction des Télescopes en Verre Argenté*. Ann. de L'Observatoire Imp de Paris 5, 197 (1859).
- 4.- E. Abbe, *Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der Mikroskopischen Wahrnehmung*. Arch. Mikrosk. Anat. 9, 413 (1873).
- 5.- J. W. Strutt (Lord Rayleigh), *On the Theory of Optical Images*. Philos. Mag., 8, 403 (1879).
- 6.- K. Strehl, Z. F. Instrumkde., 22, 213 (1902).
- 7.- W. D. Wright, *Television Optics*. Reports on Progress in Physics, Vol. 5, 1938.
- 8.- H. Friesser, *Photographic Resolution of Lenticular Films*. Zeits. f. Wiss. Photogr. 37, 261 (1938).
- 9.- K. Nienhuis and B.R.A. Nijboer, *Diffraction Pattern in the presence of Small Aberrations*. Physica 10, 679 (1947).
- 10.- H. H. Hopkins, *Wave Theory of Aberrations*. Oxford Univ. Press, Oxford, 1950.
- 11.- P. M. Duiffieu, *L'Intégral de Fourier et ses Applications à L'Optique*. Besancon, 1946.
- 12.- H. H. Hopkins, *The Frequency Response of Optical Systems*. Proc. Phys. Soc. (London), Ser. B 70, 1162 (1957).
- 13.- T. L. Williams, *The Use of Standard Test Lenses for Verifying the Accuracy of OTF equipment*. Applied Optics Vol 8. 10 (1969).
- 14.- E. O. Brigham, *The Fast Fourier Transform*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1974.

- 15.- R. Navarro , P. Artal, *Modulation Transfer of the Human Eye as a Function of Retinal Eccentricity*. J. Opt. Soc. Am. A. Vol.10, 2 (1993).
- 16.- A. Maréchal, M. Françon, *Diffracción: Estructura des Images*, Masson (1970).
- 17.- J.W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*. McGraw - Hill (1968).
- 18.- Ch. Williams, O. Becklund, *Introduction to the Optical Transfer Function*. John Wiley & Sons, 1989
- 19.- K. R. Barnes, *The Optical Transfer Function*. Monographs on Applied Optics No. 3. Adam Hilger (1976)
- 20.- P. Lindberg, *Optica Acta*, 1, 80 (1954).
- 21.- L.R. Baker, *Automatic Recording Instrument for Measuring Optical Transfer Functions* , J. Appl. Phys. Japan, 4, Supplement 1, 146. (1965).
- 22.- T.L. Williams, B.A. Leach, B.J. Biddles, *A workshop instrument for testing binocular and other sights using the m.t.f. criterion*, Optics and Laser Tech. June 1972.
- 23.- G. E. Jones, *Present progress and future prospects in MTF production testing*, *Optica Acta*, 1975, vol 22, NO 4, 379.
- 24.- R. E. Hopkins, D. Dutton, *Interlaboratory Comparisons of MTF measurements and Computations on a large wide-angle lens*, *Optica Acta* 18, 2 (1971).
- 25.- Marchant, Ironside, Attride, Williams, *The reproducibility of MTF measurements*, *Optica Acta* 22, 4 (1975).
- 26.- P. Kuttner, *Interlaboratory comparisons of MTF measurements and calculations*. *Optica Acta* 22, 4 (1975).
- 27.- M. Quintanilla, S. Mar, I. Arias, *A contribution to the holographic Measurement of the MTF and the wavefront aberration*. *Atti Della Fondazione G. Ronchi*, No 33, 2, 1978.
- 28.- I. Arias, M. Quintanilla, *Comparación entre la valoración visual e interferométrica de un sistema telescópico y su respuesta en frecuencias*. *Rev. Acad. Ciencias Zaragoza*, 33, 1978.