



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

CAMPUS ARAGON

**“EL LASER: UN INSTRUMENTO PARA EL
DESARROLLO DE LA METROLOGÍA ÓPTICA ”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO
P R E S E N T A :
ANTONIO PINEDA VELAZQUEZ**

ASESOR ING JOSÉ R. DE LA HERRÁN V



MÉXICO, D.F.

2000



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A MI MADRE:

Como una ofrenda a ti, dedico mi esfuerzo para la culminación de lo que iniciaste con tanto amor.

A MI PADRE:

Te dedico el presente trabajo por la confianza que siempre has tenido en mí.

A MIS HERMANOS:

Cada uno de ustedes reciba mi total agradecimiento por su apoyo moral y económico.

A MI ESPOSA:

Por todo el amor, comprensión y dedicación que he recibido de ti.

A MIS HIJAS:

Con todo mi cariño y agradecimiento por su gran desempeño en la escuela.

AL ING. DE LA HERRAN.

Por compartir conmigo sus conocimientos y sus acertadas observaciones.

A MIS COMPAÑEROS DE TRABAJO:

Gracias por su valiosa colaboración para la terminación del presente trabajo.

A OSCAR A. PIÑA ARIAS:

Gracias por brindarme todo tu apoyo.

INDICE

INTRODUCCION	1
1. CONCEPTOS GENERALES	8
1.1. METROLOGIA Y EL SISTEMA INTERNACIONAL DE MEDIDAS	8
1.1.1. ERRORES EN LA MEDICION	10
1.1.2. ERROR ABSOLUTO Y ERROR RELATIVO	10
1.1.3. SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES	11
1.2. NATURALEZA DE LA LUZ	14
1.2.1. DIFRACCION	17
1.2.2. POLARIZACION	18
1.3. PRINCIPIOS BASICOS DE OPTICA	20
1.3.1. LEY DE LA REFRACCION	21
1.3.2. LEYES DE LA REFLEXION	25
2. LOS LASERES.	27
2.1. HISTORIA DEL LASER	27
2.2. FUNCIONAMIENTO DEL LASER	29
2.2.1. EMISION ESTIMULADA Y ESPONTANEA	29
2.2.2. INVERSION DE POBLACION	31
2.2.3. AMPLIFICACION	32
2.3. PROPIEDADES DE LOS LASER	32
2.3.1. COHERENCIA TEMPORAL	33
2.3.2. COHERENCIA ESPACIAL	33
2.3.3. CONMUTACION Q	34
2.3.4. MODOS LONGITUDINALES	34
2.3.5. MODOS TEM _{mn}	35
2.3.6. DIVERGENCIA	36
2.4. CLASIFICACION DE LOS LASER	37
2.4.1. LASER DE GAS	37
2.4.2. LASER SOLIDOS Y DE ESTADO SOLIDO	42
2.4.3. LASER DE SEMICONDUCTOR	44
2.4.4. LASERES LIQUIDOS	46

3. INTERFEROMETRIA	47
3.1. ONDAS DE LUZ	47
3.2. INTERFERENCIA	49
3.2.1. FRANJAS DE IGUAL INCLINACION	52
3.2.2. FRANJAS DE IGUAL ESPESOR	54
3.2.3. ANILLOS DE NEWTON	56
3.3 INTERFEROMETRO DE MICHELSON	58
3.3.1. INTERFEROMETRO DE TWYMAN-GREEN	61
3.3.2. INTERFEROMETRO DE MACH-ZHENDER Y DE JAMIN	65
3.4. INTERFEROMETRO DE YOUNG	66
4. HOLOGRAFIA	73
4.1. HISTORIA DE LA HOLOGRAFIA	73
4.2. HOLOGRAFIA DE HAZ DIVIDIDO	74
4.3. HOLOGRAMAS DE REFLEXION	77
5. APLICACIONES DEL LASER EN METROLOGIA	79
5.1. EFECTO DOPPLER	79
5.2. INTERFEROMETRIA Y EFECTO DOPPLER	80
5.2.1. LA ESCALA LASER DOPPLER	81
5.2.2. MEDIDOR DE FLUJO A LASER	84
5.3. CONSIDERACIONES EN LA PRECISION EN LOS INTERFEROMETROS	90
5.3.1. PRECISION DE LA LONGITUD DE ONDA DEL LASER	91
5.3.2. RESOLUCION DE LA MEDICION	91
5.3.3. ERROR DE LA NO LINEALIDAD DE LA OPTICA	92
5.3.4. ERROR POR COMPENSACION ATMOSFERICA	93
5.3.5. ERROR POR CAMBIOS DE LA MEDIDA DEL MATERIAL VS LA TEMPERATURA	95
5.3.6. ERROR POR LA DERIVA TERMICA DE LOS EQUIPOS OPTICOS	96
5.3.7. ERROR EN LA PRECISION DEL CAMINO OPTICO	98
5.3.8. ERROR COSENO	100
5.3.9. ERROR ABBE	101
5.3.10. DETERMINACION DE LA PRECISION	103

5.4. INTERFEROMETRIA HOLOGRAFICA	104
5.4.1. HOLOGRAFIA EN LAS MAQUINAS HERRAMIENTAS	105
5.4.2. MEDICION DE LA PROPAGACION DE LAS ONDAS TRANSVERSALES EN UNA ESTRUCTURA	109
5.5. MEDIDAS DE DISTANCIAS	111
5.6. VERIFICACION DE PLANICIDAD	112
5.6.1. VERIFICACION DE PLANICIDAD DE SUPERFICIES	112
5.7. LASERES PARA ALINEAMIENTO	117
5.8. CALIBRACION DE MAQUINARIA POR LASER	120
6. RASTREADOR LASER (LASER TRACKER)	128
7. EL LASER Y OTRAS MEDICIONES	133
7.1. MEDICION DE CONTAMINANTES	133
7.1.1. RETRODISPERSION ELASTICA	134
7.1.2. LIDAR (LIGHT DETECTION AND RANGING)	134
7.2 MEDIDA Y DEFINICION DEL METRO PATRON	138
7.2.1. METODO DE BENOIT, FABRY Y PEROT	139
CONCLUSIONES	142
APENDICE	143
BIBLIOGRAFIA	148

INDICE DE FIGURA

Figura 1.1. Imágenes de difracción en los bordes de objetos.	17
Figura 1.2. Luz polarizada.	19
Figura 1.3. Refracción de un rayo luminoso.	22
Figura 1.4. Formación de una imagen con una lente.....	24
Figura 1.5. Primera ley de la reflexión.....	25
Figura 1.6. Segunda ley de la reflexión.....	26
Figura 3.1. Representación gráfica de una onda sinusoidal.....	48
Figura 3.2. En fase (interferencia constructiva).....	50
Figura 3.3. Desfasadas (media longitud de onda). Interferencia destructiva.....	50
Figura 3.4. Desfasadas (una longitud de onda), interferencia constructiva.....	61
Figura 3.5. Franjas de igual inclinación.....	52
Figura 3.6 Interferencia en capas delgadas.....	55
Figura 3.7. Anillos de Newton	57
Figura 3.8. Montaje interferómetro de Michelson	60
Figura 3.9. Interferómetro de Twyman.....	62
Figura 3.10. Interferómetro de Twyman-Green.....	64
Figura 3.11. a) Interferómetro de Mach Zehnder, b) Interferómetro de Jamin.....	65
Figura 3.12. a) Experimento de Young, b) Diagrama de interferencia.	68

Figura 3.13. Interferencia causada por las desviaciones angulares.	69
Figura 4.1. Esquema del montaje de grabación de un holograma de haz dividido.	75
Figura 4.2. Reconstrucción de hologramas: a) de haz dividido b) de reflexión.	76
Figura 4.3. Montaje de grabación para un holograma de reflexión.	78
Figura 5.1. Esquema de la escala láser Doppler.	83
Figura 5.2. Disposición común de doble haz.	86
Figura 6.3. Disposición derivada del método Doppler en el que se aplica la luz difundida hacia la parte posterior.	87
Figura 5.4. La fuente luminosa se difunde hacia la parte anterior.	87
Figura 5.6. Interferómetro que utiliza el efecto Laser Doppler para la medición de la velocidad de superficies en movimiento.	89
Fig. 5.7. Error por no linealidad.	93
Figura 5.8. Interferómetro convencional de espejos planos.	97
Figura 5.9. Error por la precisión del camino óptico.	99
Figura 5.10. Error coseno.	101
Figura 5.11. Error Abbe.	102
Figura 5.12. Laboratorio en caverna para medición de vibraciones.	106
Figura 5.13. Disposición de los equipos en la medición de vibraciones.	107
Figura 5.14. Interferograma de la base de un microscopio.	108
Figura 5.15. Sistema de disparo automático.	110
Figura 5.16. Verificación de planicidad por medio de un vidrio óptico.	114

Figura 5.17. Detector de cuadrante para alineación.....	118
Figura 5.18 . Geometría del (PSDs.....	119
Figura 5.19. Cabezal de un alineador láser	121
Figura 5.20. Alineación horizontal con un alineador láser.....	122
Figura 5.21. Medición de rectitud y perpendicularidad.....	123
Figura 5.22. Ejemplos de otras mediciones en máquinas herramientas.....	124
Figura 6.1. Determinación espacial de 2 puntos por el “láser tracker”.....	129
Figura 6.2. Esquema del láser tracker.....	130
Figura 7.1. Esquema del sistema LIDAR	135
Figura 7.2. Metodo Fabry-Perot para determinar el metro patron.....	140

INTRODUCCIÓN

Si bien, los instrumentos de medición tradicionales como son los micrómetros, calibradores de vernier, indicadores de cuadrante, etc., proporcionan medidas con incertidumbres del orden de décimas a centésimas de milímetro, suficientes para obtener la precisión requerida para la fabricación de una máquina ó dispositivos, se hace necesario disponer de técnicas de medición más precisas, ya que estos instrumentos requieren ser calibrados con patrones de mayor precisión. Además, en algunos trabajos su uso es muy limitado por el diseño de las superficies de las piezas a medir. Y en otros como, es el caso de las deformaciones de milésimas de milímetro, no las pueden detectar.

La construcción de las máquinas modernas de coordenadas de tres ejes para medición, han sido dotadas con sistemas de posición interferométrica láser, las cuales aprovechan unas de las técnicas de la metrología óptica, rama de la óptica que estudia el empleo de las ondas de luz como escala para efectuar medidas de gran precisión y del uso del láser como fuente luminosa.

El láser, cuyo nombre es un acrónimo de la frase en inglés *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación), ha permitido el desarrollo de la metrología óptica. Con él se efectúan las medidas con mayor sencillez y precisión, por ser un instrumento diseñado para generar ondas de luz en forma de haces muy concentrados de alta coherencia tanto espacial como temporal, a diferencia de otras fuentes de luz que irradian luz de varias longitudes de onda y por ende en diferentes frecuencias, que no permiten la interferencia tan nitida como el láser.

Las técnicas que se emplean dentro de la metrología óptica son: la interferometría y la holografía; la primera se basa en el fenómeno de la interferencia que podemos producir cuando dos ondas luminosas, que provienen de la misma fuente de luz, de exactamente la misma frecuencia y sincrónicas se superponen.

La holografía teóricamente existía antes del desarrollo del láser y se volvió una realidad con la aparición de éste; mediante ella, es posible reconstruir un frente de onda de cualquier objeto que se desee, para después compararlo con otro frente de onda generado en un momento posterior. De esta manera se comparan ambos frentes de onda, para determinar las deformaciones del objeto aunque éstas sean tan pequeñas como la longitud de una onda de la luz producida por el láser.

Actualmente se usan técnicas interferométricas y holográficas, que utilizan el rayo láser como fuente de luz, para realizar las siguientes mediciones:

A) *Medida de las deformaciones de una superficie.* Esta medida es especialmente más precisa con la combinación de la holografía. Frecuentemente debido a causas muy variadas, una superficie puede tener deformaciones que no se pueden observar a simple vista. Como ejemplo podemos mencionar las fracturas microscópicas en el álabe de una turbina de avión ó en el eje de un máquina, etc., que tenga su origen en la fabricación o en condiciones de trabajo por un calentamiento anormal ó por fricción. Otro ejemplo es la deformación producida por esfuerzos mecánicos de la estructura de una máquina que ponen en peligro su estabilidad.

B) *Determinación de la forma exacta de una superficie.* Esta aplicación permite obtener superficies ópticas de manera que la desviación a su forma ideal, al tallarse no sea mayor que una fracción de la longitud de onda de luz. Los instrumentos ópticos modernos de alta precisión, como los telescopios astronómicos, presentan además un mayor problema cuando su superficie no es esférica, por ejemplo: un paraboloide ó hiperboloide de revolución, cuya superficie puede tener varios metros. Para realizar este trabajo es necesario realizar técnicas de interferometría combinadas con la holografía.

Si utilizamos en la interferometría una fuente láser, se consigue realizar con menor dificultad las siguientes mediciones:

C) *Determinación muy precisa de velocidades o de variaciones en su magnitud.* Cuando una fuente luminosa se mueve con respecto al observador, la onda luminosa se comprime cuando se dirige al observador y se alarga cuando se aleja, fenómeno conocido como efecto Doppler. Por interferometría se detectan y miden estas pequeñas variaciones de la longitud de onda, que permiten medir desplazamientos y cambios de velocidad de un objeto. Esta técnica se emplea para determinar la velocidad de los cabezales de las máquinas herramientas, la velocidad de rotación de los mismos y la velocidad del flujo de líquidos o gases.

D) *Medición de ángulos.* Los ángulos, también se pueden medir con gran precisión con técnicas interferométricas. Esto es importante, por ejemplo cuando se desea que el paralelismo entre dos caras de una placa de vidrio, ó el ángulo entre las dos caras de un prisma tengan en su medida una incertidumbre menor a un segundo de arco.

- E) *Medida y definición del metro patrón.* Michelson fue el primero que tomó la longitud de la luz como referencia para especificar medidas con su interferómetro, el cual se estudiará más adelante. La realización de esta tarea en sus inicios era muy laboriosa por la limitación en la coherencia del haz luminoso de las fuentes de luz usadas por Michelson. Actualmente con el láser es mucho más simple realizar esta medición e inclusive es posible definir algunas otras longitudes de barras patrón con gran precisión.
- F) *Determinación muy precisa de cambios del índice de refracción en materiales transparentes.* Todos los materiales de los componentes ópticos de plástico ó cristal, que se usan en lentes, prismas y demás elementos ópticos tienen que tener una alta homogeneidad en su transparencia, así como en su índice de refracción ya que esto determina la alta precisión del componente.

El empleo de luz láser con algunos componentes ópticos, y fotodetectores nos permite tener un instrumento de medición preciso, aprovechando su propagación en línea recta, y el conocimiento preciso de su longitud de onda, para una gran variedad de trabajos. Por ejemplo:

- G) *Alineación de objetos sobre una línea perfecta.* Es frecuente que aparezca la necesidad de tener una línea recta de referencia muy precisa en los siguientes ejemplos: la bancada de un torno debe ser tanto más recta, cuanto más preciso sea el torno, en la industria automotriz los rieles de montaje deben mantener esa línea recta, ya que a medida de que se desplaza la carrocería, los "robots" que aplican los puntos de soldadura, barrenos, ajuste de piezas, etc. usaran esa línea como referencia cuando se programan.

- H) *En las construcciones.* Usando la luz visible de un láser helio neón, se alinean túneles, caminos, surcos de cultivos, etc., además se puede usar para comprobar la horizontalidad y verticalidad, de las máquinas herramientas. Para realizar estas mediciones se requiere del auxilio de teodolitos y otros componentes ópticos.
- I) *En topografía.* Se emplea un rayo láser dirigido a un prisma retroreflector, que tiene la propiedad de reflejar la luz en un ángulo de 180° sin necesidad de estar totalmente perpendicular, como sería el caso de usar un espejo normal. El mismo láser tiene un detector de luz que mide el tiempo que tarda en regresar el disparo de luz, por lo que se tiene con precisión la distancia a la que se encuentra el prisma; tenemos que en ocasiones es el único método de medir distancias, por ejemplo cuando se quiere saber la distancia entre dos montañas, el cambio de la superficie de un volcán en un punto determinado, etc.
- J) *En medidas astronómicas.* Con el principio descrito en la sección anterior es posible medir la distancia de la luna a la tierra con una precisión de unos cuantos centímetros. Con este fin los astronautas del Apolo 11 colocaron prismas retroreflectores. Además ha sido posible determinar si la luna tiene movimientos telúricos. El mismo principio se utilizó para determinar el movimiento de placas en la tierra; para esto, se colocó en órbita un satélite geodinámico denominado Lageos cuya cubierta contenía 496 retroreflectores, el cual recibía disparos de láser de dos puntos diferentes en la tierra.

Finalmente describiremos brevemente uno de los dispositivos de medición más modernos que aprovecha el desarrollo de las técnicas de medición de distancias por interferometría, utilizando como fuente de luz, al láser.

K) *Láser Tracker*. El rastreador láser realiza mediciones en objetos tridimensionales de hasta 35 m, con una precisión de 25 μm por cada 5m, el cuál utiliza un rayo láser que es dirigido a una esfera con un espejo retroreflector, SMR (Spherically Mounted Retroreflector), que puede ser desplazado con la mano a través de la superficie del objeto a medir o bien ser colocado en una máquina para determinar la precisión de sus movimientos; el rayo láser de helio neón reflejado del SMR, se dirige a un interferómetro, en donde se detectan y miden las pequeñas variaciones de la longitud.

Para medir el ángulo de orientación del SMR, se dispone de un láser de semiconductor, que emite en el infrarrojo y esta sintonizado con el láser helio neón dirigido al centro del RMS. Cuando se pierde el centro del RMS, se genera un error en la señal eléctrica, por ambos láseres, que permite que dos decodificadores miniaturizados, controlen el movimiento de dos motores, que mantengan la posición del ángulo del eje horizontal y otro el ángulo del eje vertical del rayo láser sobre el centro del RMS. Con las medidas obtenidas de los dos decodificadores y la distancia del interferómetro es suficiente para determinar la localización precisa del centro del SMR.

MEDIDAS DE SEGURIDAD EN EMPLEO DEL LÁSER.

La seguridad en el empleo de cualquier láser es muy importante, hay que recordar que la potencia de salida del láser puede afectar a la persona que trabaje con ellos. Con respecto a la piel, un láser de 5mW es completamente inocuo. Sin embargo esta misma potencia puede afectar la vista por la incidencia de un haz láser de tan baja potencia en la retina. Esto es para el caso de los láseres que son de luz visible, pero los que trabajan en la zona no visible, como los infrarrojos, requieren de mayores dispositivos de seguridad para su empleo

En el apéndice se establece la clasificación de los láseres en función de su potencia de salida dada por el Centro para la Salubridad de Equipos y Sistemas Radiológicos (CDHR, *Center for Devices and Radiological Health*) del gobierno de los Estados Unidos; ya que en México no existe una norma similar, se suele utilizar ésta.

1. CONCEPTOS GENERALES

Debido principalmente a que en este trabajo tratare algunos aspectos de la metrología, se hace importante la definición de esta ciencia y además una breve historia y descripción del Sistema Internacional de Unidades, ya que todas las cantidades físicas que se describirán, se definirán en los términos de este sistema. Posteriormente se describirá brevemente la historia de los descubrimientos que sentaron las bases acerca de: la naturaleza de la luz y de la óptica tradicional. Con el fin de comprender el funcionamiento del láser, así como su desarrollo y empleo en las técnicas de la metrología óptica que son: la interferometría y la holografía.

1.1 METROLOGIA Y EL SISTEMA INTERNACIONAL DE MEDIDAS.

Conocer qué es la: *metrología* y el *Sistema Internacional de medidas*, nos ayudará a establecer una uniformidad en las unidades de medición que se empleen a lo largo del presente trabajo.

Metrología. Se define en el diccionario "Pequeño Larouse de Ciencias y Técnicas", como: ciencia que trata de las medidas, de los sistemas de unidades adoptados y de los instrumentos usados para efectuarlas e interpretarlas. Otra definición de *metrología*, es: ciencia que estudia la medición de las magnitudes físicas fundamentales (longitud, masa y tiempo) y de las derivadas de estas. (De acuerdo con la Gran Enciclopedia de la Ciencia y la Técnica).

La metrología puede clasificarse de acuerdo a su función en:

Metrología legal. Establece el cumplimiento de la legislación metrológica oficial en la conservación y mantenimiento de los patrones internacionales y de los laboratorios que reproduzcan estos.

Metrología científica. Es aquella que se encarga de encontrar los patrones más adecuados para los descubrimientos que se hacen a futuro y analizar su empleo en el sistema internacional de unidades.

Metrología industrial. Compete a los laboratorios autorizados, su función es dar servicio de calibración de patrones y equipos a la industria y el comercio.

Con lo anterior se debe establecer la comparación en orden descendente desde el patrón primario, hasta un determinado patrón usado en la industria, para conocer en este último la desviación que existe con respecto al primero. Este concepto conlleva al deseo de que las medidas siempre tengan uniformidad, sean confiables, precisas y se integren en los niveles deseados para que se mantengan siempre calibrados los aparatos de medición. Por otra parte la metrología, también puede ser dividida de acuerdo al tipo y técnica de medición, teniendo las siguientes divisiones: Metrología geométrica, Metrología eléctrica, Metrología térmica y Metrología química. El presente trabajo se enfoca al estudio de la Metrología geométrica la cual generalmente estudia los procesos para determinar magnitudes lineales y angulares; así como la evaluación de características como redondez, paralelismo, concetricidad, planicidad, etcétera.¹

¹ Roberto Galicia Sánchez, 1999.p.3

1.1.1 ERRORES EN LA MEDICION.

Cuando se hacen mediciones y se repite una de ellas, aunque la pieza, el aparato de medida e incluso el operario sean los mismos, se comprueba la existencia de pequeñas variaciones de lectura, que al mismo tiempo dan lugar a errores variables, y a una inexactitud o incertidumbre de valor constante.

Inexactitud o incertidumbre. Es el intervalo entre los valores máximos y mínimos que puede dar lectura de la escala del aparato que mide una magnitud real constante.

$$\text{Error} = \text{Valor leído} - \text{dimensión real.}$$

El signo nos indica si la lectura es mayor o menor que la dimensión real.

1.1.2. ERROR ABSOLUTO Y ERROR RELATIVO.

En general, se define como error absoluto de una medida a la diferencia existente entre el valor exacto de la magnitud y el valor obtenido experimentalmente. Ahora bien, como no podemos saber el valor exacto, tampoco podemos conocer el error absoluto así definido. El objetivo de la teoría de errores es la estimación de la incertidumbre asociada a un resultado dado. A esta incertidumbre se le denomina también **error absoluto**, y es esta segunda definición la que se utilizará. Obsérvese que el error absoluto tiene las mismas dimensiones físicas y por tanto las mismas unidades que la medida a la que acompaña.

Por tanto, el resultado de la medida m de cualquier magnitud M debe expresarse como: $m \pm E$. Siendo E el error absoluto. El doble signo se coloca porque el error puede producirse por exceso o por defecto.

No obstante, el error absoluto de una medida no nos informa por sí solo de la *bondad* de la misma. Es evidente, que no es igual de grave tener un error absoluto de 1 cm al medir la longitud de una carretera que al medir la longitud de un folio. Por ello, se define como **error relativo** al cociente E/m , que a veces se multiplica por cien, cualificando la incertidumbre en porcentaje de la medida realizada. Nótese que el error relativo es adimensional, es decir, sin unidades.

1.1.3. SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES SI.

Con objeto de garantizar la uniformidad y equivalencia en las mediciones, así como facilitar todas las actividades tecnológicas industriales y comerciales, diversas naciones del mundo suscribieron el Tratado de la Convención del Metro, en el que se adoptó el Sistema Internacional de Unidades (SI). Este Tratado fue firmado por 17 países en París, Francia, en 1875. México se unió a la Convención al firmar el Tratado el 30 de diciembre de 1890. Cuarenta y ocho naciones participan actualmente en la Convención, la cual otorga autoridad a la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM - Conferencia General de Pesas y Medidas), al Comité International des Poids et Mesures (CIPM - Comité Internacional de Pesas y Medidas) y al Bureau International des Poids et Mesures (BIPM - Oficina Internacional de Pesas y Medidas), para actuar a nivel internacional en materia de metrología.

La CGPM está constituida por los delegados que representan a los gobiernos de los países miembros, quienes se reúnen cada cuatro años en París, Francia. Cada Conferencia General recibe el informe del CIPM sobre el trabajo realizado. En su seno se discuten y examinan los acuerdos que aseguran el mejoramiento y diseminación del Sistema Internacional de Unidades (SI); se validan los avances y los resultados de las nuevas determinaciones metroológicas fundamentales y las diversas resoluciones científicas de carácter internacional y se adoptan las decisiones relativas a la organización y desarrollo del BIPM.

La última reunión de la CGPM, la vigésima primera realizada desde su creación, se llevó a cabo del 11 al 15 de octubre de 1999 en París, con la participación del CENAM en representación de México.

El Sistema Internacional de Unidades se fundamenta en siete unidades de base correspondientes a las magnitudes de longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura, cantidad de materia, e intensidad luminosa. Estas unidades son conocidas como el **metro**, el **kilogramo**, el **segundo**, el **ampere**, el **kelvin**, el **mol** y la **candela**, respectivamente. A partir de estas siete unidades de base se establecen las demás unidades de uso práctico, conocidas como unidades derivadas, asociadas a magnitudes tales como velocidad, aceleración, fuerza, presión, energía, tensión, resistencia eléctrica, etc.

A continuación se definen las siete unidades fundamentales que componen el SI. Las unidades restantes se derivan de éstas y los múltiplos y submúltiplos se expresan en sistema decimal.¹

El **metro (m)** se define como la longitud de la trayectoria recorrida por la luz en el vacío en un lapso de $1 / 299\,792\,458$ de segundo (17ª Conferencia General de Pesas y Medidas de 1983).

El **kilogramo (kg)** se define como la masa igual a la del prototipo internacional del kilogramo (1ª y 3ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1889 y 1901).

El **segundo (s)** se define como la duración de $9\,192\,631\,770$ períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado base del átomo de cesio 133 (13ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1967).

¹ Ver en el anexo tabla I recopilación de unidades y símbolos del sistema internacional (SI)

El **ampere (A)** se define como la intensidad de una corriente constante, que mantenida en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable, colocados a un metro de distancia entre sí en el vacío, produciría entre estos conductores una fuerza igual a 2×10^{-7} newton por metro de longitud (9ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1948).

El **kelvin (K)** se define como la fracción $1/273,16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua (13ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1967).

El **mol (mol)** se define como la cantidad de materia que contiene tantas unidades elementales como átomos existen en 0,012 kilogramos de carbono 12 (^{12}C) (14ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1971).

La **candela (cd)** se define como la intensidad luminosa, en una dirección dada de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz y cuya intensidad energética en esa dirección es de $1/683$ watt por esterradián (16ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1979).

La Ley Federal sobre Metrología y Normalización establece que el Sistema Internacional es el sistema de unidades oficial en México.

1.2 NATURALEZA DE LA LUZ.¹

Una respuesta primitiva, será que la luz es esa radiación emitida ó reflejada por un cuerpo luminoso, que al penetrar en nuestros ojos produce una sensación visual, esta era la creencia de Aristóteles, aunque los filósofos Platon, Euclides y Tolomeo, planteaban lo contrario, es decir que la radiación se originaba de los ojos para iluminar los objetos. Alhazen en Arabia compartía la idea de Aristóteles, pero no explicaba aun la naturaleza de esas radiaciones.

Francesco Grimaldi en 1648 al realizar el experimento de dejar pasar la luz del sol, en un cuarto oscuro y posteriormente a través del orificio de una cartulina llego a la conclusión de que lo que veía era debido al fenómeno de la difracción de la luz, por lo que concluyó la naturaleza ondulatoria de la luz. Christian Huygens en 1678, postuló que la luz era de naturaleza ondulatoria, cometiendo el error de suponer que se trataba de una onda longitudinal como el sonido, es decir, que la vibración ocurría en la misma dirección de la propagación, aún así de esta manera explicó la refracción, reflexión, interferencia y difracción de forma cualitativa.

En la Edad Media se hizo la primera suposición más o menos razonada, en el sentido que la luz era un flujo de partículas de origen desconocido. Newton pensó con muy buenos argumentos científicos, que la luz estaba formada por partículas de diferentes tamaños y velocidades, que producía vibraciones en el medio en que se propagaba la luz, al que llamó éter. Sin embargo no definió si la luz era una partícula ó una onda.

¹ Daniel Malacara, 1990 p 36-48

Robert Hooke en 1665 descubrió la interferencia, al observar los brillantes colores de las pompas de jabón y las películas de aceite en agua. Hooke propuso que la luz se propagaba en ondas transversales, introduciendo el concepto de polarización de la luz. Thomas Young, describió en 1801 su famoso experimento de la doble rendija, con lo que demostró la existencia de la interferencia de la luz, esto lo colocó como uno de los principales defensores de la teoría ondulatoria. En 1808, Etienne-Louis Malus descubrió la polarización de la luz, por medio de la reflexión, al observar que la luz al reflejarse en vidrio o agua, hace desaparecer o aparecer la imagen según su orientación.

Sir David Brewster en 1815 hizo un estudio bastante completo del fenómeno de la polarización, el cual postula que la luz reflejada queda polarizada completamente cuando la tangente del ángulo de incidencia es igual al índice de refracción, ángulo de Brewster.

La energía electromagnética tiene varias características comunes: la principal (la que hace posible el uso de la luz como escala para medir), es que se propaga en forma de ondas. El físico escocés James Clerk Maxwell en 1865 dedujo que una carga oscilante radia campos eléctricos y magnéticos y que su velocidad de propagación es la misma que la velocidad de la luz, por lo que concluyó que la naturaleza de las ondas luminosas era electromagnética, lo cual fue confirmado por Heinrich Hertz al hacer su descubrimiento de las ondas de radio.

En 1900 Max Planck, explicaba de forma exacta el espectro de radiación de un "cuerpo negro". En su teoría incluía un concepto revolucionario: el "cuanto" de energía luminosa, según este concepto, el "cuanto" es la cantidad más pequeña en que podemos dividir la energía luminosa, es un valor que depende de la frecuencia, mientras más grande sea la longitud de onda, menor es la frecuencia y más difícil es detectar el "cuanto" individualmente.

Hertz, encontró también el efecto fotoeléctrico, que consiste en la expulsión de electrones de un metal cuando incide un haz luminoso sobre él, la energía cinética es directamente proporcional a la frecuencia de la luz que ilumina el material. Finalmente Albert Einstein dio la explicación satisfactoria tanto cuantitativa como cualitativa al postular que la luz está formada por unas partículas a las que G.N. Lewis nombró fotones.

A través de esta descripción de la historia de la naturaleza de la luz, se presenta una dualidad en esta, pues no puede ser una onda y al mismo tiempo una partícula, Louis Victor de Broglie, afirma que onda y partícula son solamente dos manifestaciones diferentes del mismo ente, que se presentan según las circunstancias del experimento. Con ello predice entonces que lo que suponemos como partículas, como los electrones, bajo ciertas condiciones debe manifestarse como ondas.

Los primeros intentos de medir la velocidad de la luz, los realizó Ole Römer, por medios astronómicos de manera indirecta; usando los periodos de translación de Júpiter y la Tierra, él notó que los intervalos de tiempo, para observar algún eclipse de los satélites de Júpiter, era más corto cuando Júpiter y la Tierra se acercaban y tardaba más cuando se alejaban ambos planetas. "Haciendo uso de la diferencia de tiempos observada y de la distancia entre los dos planetas, él dedujo que la luz viaja una velocidad definida, la cual estimó en 214 000 000 m/s, cuyo valor es menor que el actualmente aceptado". En 1849 H:L: Fizeau midió por primera vez en forma directa la velocidad de propagación de la luz, que generalmente se representa por c y su valor actual es de 299 792 458 m/seg., que corresponde al vacío. Leon Foucault demostró experimentalmente en 1850 que la velocidad de la luz es menor en medio denso, obteniendo que el factor en el que se reduce esta velocidad es justamente el índice de refracción del material que compone el medio denso.¹

¹ Daniel Malacara, 1989 p. 411 encontrará más datos sobre los primeros intentos en la determinación de la velocidad de la luz.

1.2.1. DIFRACCION.¹

El fenómeno de la difracción nos describe el proceso, normalmente débil pero apreciable, de la luz cuando pasa por el borde de un objeto y parece curvarse hacia él. El resultado directo de la difracción es que la luz procedente de los bordes de un obstáculo colocado en su camino no nos va a dar una sombra abrupta.

A



ESTE EFECTO NO ES VISIBLE A SIMPLE VISTA, SE REQUIERE DE ACERCAR EL BORDE DE LA NAVAJA CERCA DE LA VISTA Y EN DIRECCIÓN A UNA FUENTE DE LUZ.

B



SEPARACIÓN ENTRE DEDOS, AUMENTADO EN EL DIBUJO, PARA SU MAYOR COMPRENSIÓN

Figura 1.1. Imágenes de difracción en los bordes de objetos. a) Navaja de afeitar y b) Ranura entre dos dedos.

¹Daniel Malacara, 1989 p 333

Tomemos el ejemplo clásico; si iluminamos nuestro obstáculo que es una navaja de afeitar con luz láser de helio neón, su sombra proyectada sobre una pantalla muestra que sus bordes no son abruptos, sino que tienen una serie de franjas claras y oscuras características de la difracción, otro ejemplo es si formamos una pequeña rejilla con dos dedos y los dirigimos hacia alguna fuente de luz, natural o artificial, observaremos esas franjas.

El fenómeno de la difracción está muy relacionado con la interferencia. Las franjas se han producido por la interferencia sufrida por la luz entre las regiones próximas al borde de la navaja de afeitar o de los dedos. La frecuencia (y/o longitud de onda) interviene de forma importante en la difracción. las frecuencias mayores, luz ultravioleta, por ejemplo, sufren menos difracción que la luz roja.

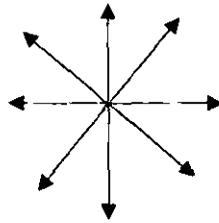
1.2.2. POLARIZACION.¹

El campo eléctrico se puede orientar en cualquier ángulo, pero el campo magnético debe ser perpendicular respecto a este, independientemente de la orientación del primero. En la Figura 1.2, con el fin de simplificarla, se ha representado sólo el campo eléctrico. En la Figura 1.2a un haz de luz no polarizado. Los campos eléctricos y magnéticos pueden vibrar en todas las direcciones perpendiculares a la dirección de propagación. En la Figura 1.2b y 2c se muestra un haz de luz polarizada en el cual la vibración sólo se produce en determinada dirección perpendicular a la de propagación del haz. Este es el llamado plano de polarización.

Para polarizar un haz de luz, se emplea una lámina de plástico transparente en la cual se han introducido cristales de sulfato de iodiquinina. Estos cristales se han orientado en una determinada dirección.

¹ Jovine Jhon, 1992 p. 172

El resultado es que únicamente la lámina será atravesada solo si el plano de polarización tiene una dirección determinada. Si se coloca posteriormente otra lámina transparente con los cristales orientados en forma perpendicular a los de la primera. En los casos donde se utilicen polarizadores en el presente trabajo, será para asegurar el máximo de interferencia.



a. No Polarizada



b. Polarizada verticalmente



c. Polarizada horizontalmente

Figura 1.2. Luz polarizada. El haz esta saliendo de la página. El campo eléctrico estará oscilando en las direcciones indicadas.

1.3. PRINCIPIOS BÁSICOS DE ÓPTICA.¹

Podemos definir a la óptica como el estudio de la luz, de la manera que es emitida por los cuerpos luminosos, de la forma en la que se propaga a través de los medios transparentes y de la forma en que es absorbida por otros cuerpos. La óptica, al estudiar los cuerpos luminosos, considera los mecanismos atómicos y moleculares que originan la luz. Al estudiar la propagación, lógicamente estudia los fenómenos luminosos relacionados con ella, como la reflexión, la refracción, la interferencia y la difracción. La absorción de la luz ocurre cuando llega a su destino y se manifiesta por producir un efecto físico o químico por ejemplo, en la retina de un ojo, en una película fotográfica, o en cualquier otro detector luminoso.

La óptica, ha desempeñado un papel importante en el desarrollo del láser, que tiene su principio de funcionamiento en un experimento óptico. Por lo tanto el desarrollo de las modernas máquinas de medición tienen una base óptica. A continuación se describirá una breve historia del desarrollo de la óptica, desde los comienzos en que se tienen evidencias.

Mucho antes de que se iniciaran los estudios metódicos y formales de los fenómenos ópticos, se construyeron espejos y lentes para mejorar la visión, naturalmente estos espejos eran solamente unos trozos de metal con un pulido imperfecto. En las ruinas de Nínive, se encontró una pieza de cristal de roca que tenía toda la apariencia de una lente convergente, Confusio (500 a.C.) decía que las lentes mejoraban la visión, otra mención de ellas se encuentran dentro del libro de Aristofanes, *Las Nubes*, donde describe unas piedras transparentes que encienden el fuego con la luz del sol, obviamente se trataba de lentes primitivas.

¹ Daniel Malacara, 1989 en su introducción encontrará una amplia historia de la óptica.

La primera mención al fenómeno de la refracción la realizó Platón; Euclides (300 a.C.), estableció por primera vez la ley de la reflexión y algunas propiedades de los espejos esféricos. Herón de Alejandría (250 d.c.) se acercó al Principio de Fermat al decir que la luz al reflejarse sigue la mínima trayectoria posible.

Claudio Tolomeo (130 d.C.) estableció que el rayo incidente, la normal a la superficie y el rayo reflejado están en un plano común y encontró una forma aproximada de la ley de refracción, válida únicamente para ángulos pequeños.

Durante la edad media fueron los Arabes los que lograron los avances en la óptica, Al Kindi (813-880 d.c.) en su libro sobre óptica llamado *De Aspectibus*, hace algunas consideraciones generales acerca de la refracción de la luz.

En 1266, Roger Bacon talló las primeras lentes con forma de lenteja, de aquí proviene su nombre, además describió claramente las propiedades de una lente para amplificar la letra; después de esto, el paso natural era montarlas en un armazón, con el fin de mejorar la visión de las personas con defectos visuales.

1.3.1. LEY DE LA REFRACCION.¹

Willebrord Snell (1591-1626), descubrió la ley de la refracción válida y exacta para cualquier magnitud del ángulo de incidencia y no sólo aproximada como la de Tolomeo. Esta ley es pilar para la teoría de la formación de imágenes con lentes y espejos. La ley de Snell² se enuncia diciendo que el cociente de los senos de los ángulos de incidencia y de refracción, respectivamente, es igual a una constante característica del

¹ Es importante entender bien los principios de las leyes de refracción y de reflexión, debido a que en ellas se encuentran los principios geométricos en que el rayo láser es desviado por lentes y espejos en su empleo en la metrología óptica.

² Daniel Malacara, 1989 trata esta ley y las de la reflexión desde un punto de vista vectorial el cual queda fuera del objetivo del presente trabajo

medio, η , a la que llamamos índice de refracción. Esto se puede representar por :

$$\text{sen}\theta_2/\text{sen}\theta_1 = \eta \quad (1)$$

donde θ_1 es el ángulo de incidencia y θ_2 es el ángulo de refracción, respectivamente que se miden con respecto a una línea imaginaria perpendicular a la superficie como se muestra en la Figura 1.3. Estos índices de refracción tienen valores característicos para diferentes materiales, como se muestra en el cuadro A del anexo, este índice es mayor en relación directa a la densidad del material.

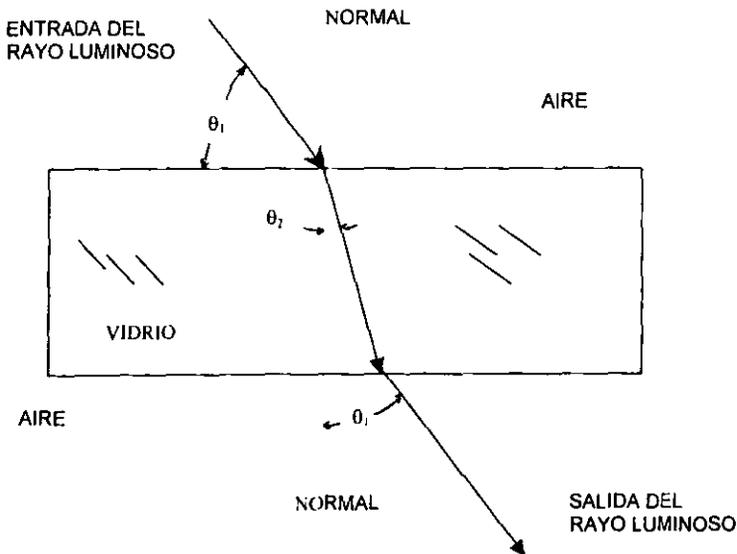


Figura 1.3. Refracción de un rayo luminoso, siguiendo la ley de Snell .
Muestra que los ángulos de entrada y salida del rayo luminoso son paralelos, al pasar a través del vidrio.

Pierre Fermat (1601-1655), establece el principio que dice que la luz al viajar de un punto al otro, atravesando uno o más medios con diferentes densidades, sigue la trayectoria que le tome el mínimo tiempo de recorrido. Sir William Rowan Hamilton probó en 1831 que el concepto de rayo de luz se puede usar con bastante precisión si la frecuencia de la onda de luz es muy alta, demostrando así que la óptica geométrica es un caso particular de la óptica de ondas. Con esto se validaba el concepto de rayo luminoso, que tanto se ha usado para diseñar sistemas ópticos.

Karl Friedrich Gauss (1777-1855). Su contribución a la óptica fue el establecimiento de la teoría de primer orden de la óptica geométrica, que se basa en la ley de la refracción y en consideraciones geométricas, para calcular las posiciones de las imágenes y sus tamaños, en los sistemas ópticos formados por lentes y espejos; con ella por ejemplo, podemos calcular las posiciones del objeto y de la imagen formada por una lente convergente simple, es decir, aquella que hace que los rayos que entren paralelos a la lente converjan a un punto llamado foco, como se muestra en la figura 1.4.

En ella tenemos que el objeto, parten diferentes líneas, de un punto del objeto, las cuales se dirigen a la lente, que se unirán después de atravesar la lente en un mismo punto del objeto, invirtiendo la imagen y cambiando el tamaño de esta, de acuerdo a la geometría de la lente. Todos los rayos que parten de la flecha se desvían, de acuerdo con la ley de Snell, al atravesar la lente en diferentes puntos y con ángulos de incidencia distintos.¹

¹ En este ejemplo la fuente de luz es idealizada, un rayo láser por sus características se aproxima bastante a esta fuente de luz ideal

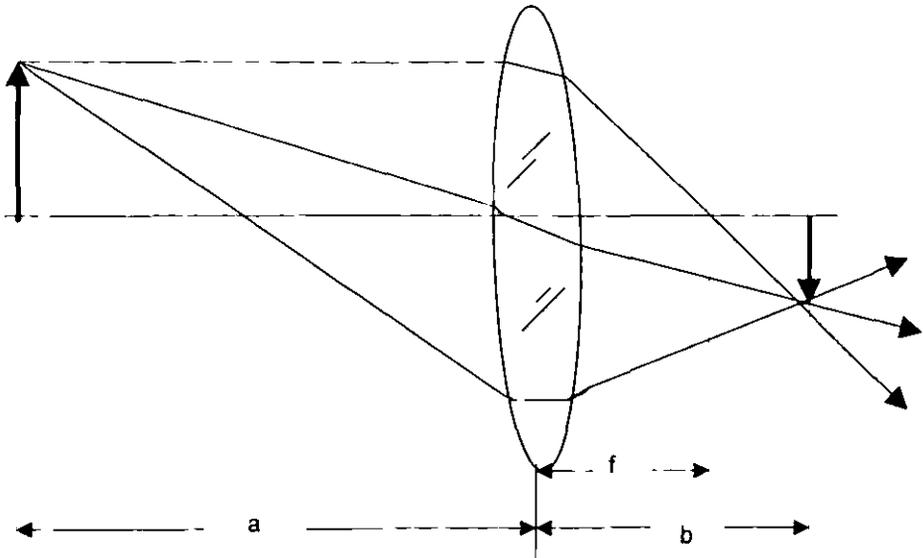


Figura 1.4. Formación de una imagen con una lente.

1.3.2 LEYES DE REFLEXION.

Las leyes de reflexión se pueden derivar de las ecuaciones de Maxwell, es decir que éstas son válidas para todas las regiones del espectro electromagnético y establecen lo siguiente:

1. El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado se encuentran siempre en el mismo plano.
2. El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

La primera ley es bastante fácil de comprobar. Si un rayo incidente que llega a un espejo plano con un ángulo de incidencia Q , se reflejara con un ángulo de reflexión igual al ángulo de incidencia, observando la figura 1.5, vemos que todo esto sucede en el mismo plano (la hoja del papel)

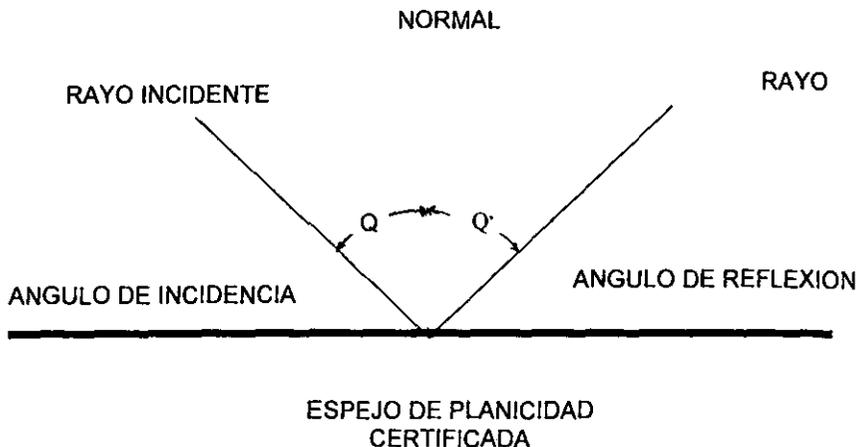
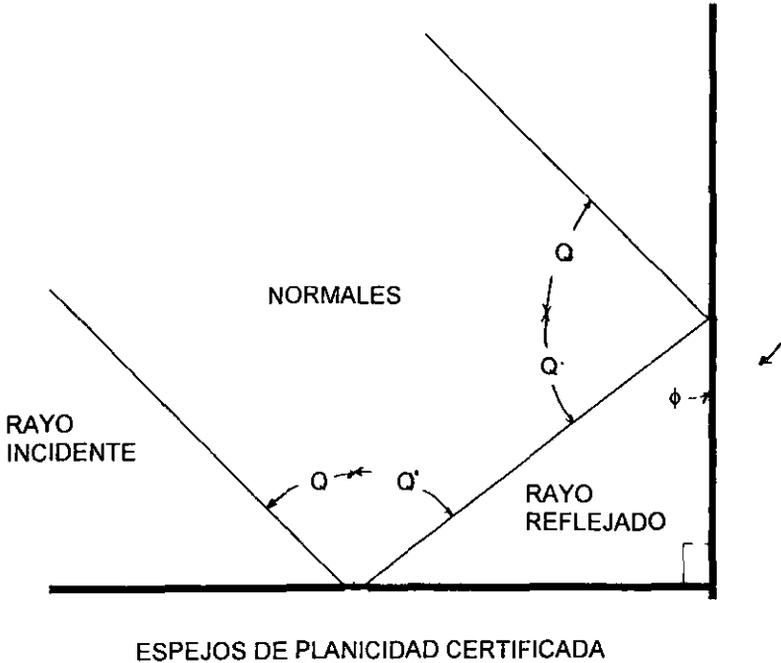


Figura 1.5. Primera ley de la reflexión.

La segunda ley se puede comprobar analíticamente observando que un rayo que incide sobre dos espejos colocados perpendicularmente, formara un paralelogramo con las líneas formadas por los rayos reflejados, y los ángulos de ambos rayos serán iguales, al ser divididos por las normales de los espejos, según se muestra en la figura 1.6.



$$\phi = \pi - 2Q' = \pi - 2(\pi/2 - Q) = 2Q \quad (2)^b$$

Figura 1.6. Segunda ley de la reflexión.

^b Esta fórmula es la demostración analítica de la segunda ley de la reflexión y de muy fácil comprobación de acuerdo con la figura. Recuerde que π radianes es igual a 180 grados.

2. LOS LÁSERES.

El láser es simplemente una fuente luminosa con dos propiedades muy especiales e importantes de su luz, que técnicamente reciben el nombre de *coherencia espacial* y *coherencia temporal*. Como veremos a lo largo del presente capítulo estas dos propiedades son fáciles de comprender; es importante el concepto de coherencia espacial ya que permite que la fuente luminosa tenga un frente de onda único, que permite concentrar la energía luminosa en un punto muy pequeño a fin de obtener una densidad de energía muy alta, o para enviar el haz luminoso a gran distancia, la segunda propiedad del láser tiene que ver con la cantidad de colores que emite la fuente luminosa simultáneamente, es decir, con el grado de monocromaticidad. El láser tiene una coherencia temporal casi perfecta. La interferometría y holografía existían antes que el láser pero estas dos características indudablemente permiten que actualmente se utilice el rayo láser como un instrumento en metrología.

2.1. HISTORIA DEL LÁSER.

Los descubrimientos que dieron origen al láser se iniciaron en 1916, cuando Albert Einstein estudió y predijo el fenómeno de emisión estimulada en los átomos; por regla general, los electrones son capaces de absorber o emitir luz espontáneamente sin ninguna intervención externa. Einstein previó la posibilidad de estimular los electrones con una luz adicional. El siguiente trabajo fundamental para el desarrollo del láser fue el del bombeo óptico, que simplemente es utilizar la propia luz para excitar los átomos, por Alfred Kastler, basado en las técnicas de resonancia ópticas, método que se utilizaba para subir el nivel energético de los átomos.

Charles H. Townes en su intento por encontrar un método para producir y amplificar ondas de radio de longitud de onda muy corta, del orden de milímetros, uso el fenómeno de emisión estimulada, basándose en las predicciones de Einstein y en los trabajos de Kastler sobre el bombeo óptico.

Tres años tardó en construir el dispositivo que amplificaba microondas mediante la emisión estimulada, al que llamo máser (*amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación*).

Independientemente Nicolai G. Basov y Aleksandr M. Prokhorov obtuvieron resultados similares, por lo que los tres compartieron el premio Nobel de física en 1964. En 1957 Townes y Arthur Scholow, comenzaron a pensar en el problema de construir un dispositivo similar al máser, pero que emitiera luz visible, en lugar de microondas. Curiosamente Townes solicitó una patente por este dispositivo, pero también Gordon Gould hizo lo mismo, por lo que a la fecha sigue el pleito legal sobre la primer patente del rayo láser.¹

Finalmente, Theodore H. Maiman logró construir el primer láser en 1960 en los laboratorios de investigación de la compañía aérea Hughes. Este láser de manera breve, constaba de una barra de rubí sintético de unos 4 cm. de longitud, la cual estaba rodeada por una lámpara de destello en espiral semejante a las utilizadas en la fotografía estroboscópica de alta velocidad. Al poner la lámpara en funcionamiento, un brillante rayo láser de luz roja emergió de la barra de rubí; el impulso de luz láser duro sólo una 300 millonésima parte de segundo.

¹ Hecht J. Teresi, 1987 narra una interesante historia sobre los derechos de patente del Laser

En México en los años de 1968-1970, se hicieron cerca de 60 tubos láser que después se vendieron a escuelas y universidades del país, por medio del Instituto de Astronomía de la UNAM. Los diseñadores y ejecutores de esas piezas fueron el doctor Daniel Malacara y el ingeniero Ignacio Rizo, además de la asesoría en el aspecto eléctrico del ingeniero José Ruiz De la Herrán.¹

2.2.FUNCIONAMIENTO DEL LÁSER

Para comprender porque el láser nos permite su aplicación en la metrología es necesario repasar los principios fundamentales de su funcionamiento así como de las características que nos permiten utilizarlo como un instrumento en esta área.

2.2.1. EMISION ESTIMULADA Y ESPONTANEA.

El primer modelo "moderno" del átomo fue proporcionado por Ernest Rutherford. Este modelo indica que el átomo está formado por un núcleo muy masivo con carga positiva, alrededor del cual giran los electrones, con carga negativa, formando un sistema similar, guardando proporciones, a nuestro sistema planetario. Este modelo presentaba el problema de no ser congruente con algunos fenómenos de la física clásica, por lo que el modelo propuesto por Niels Bohr vino a solucionar esto; Bohr propuso un modelo en el cual los electrones únicamente pueden encontrarse en un número discreto de órbitas alrededor del núcleo; para que un electrón pase de una órbita a otra debe emitir (o absorber, según el caso) un cuanto de energía.²

Para que un electrón pase de la primera a la segunda órbita necesita recibir un cuanto de energía exactamente igual a la diferencia de energía entre la primera y la segunda órbita, de igual manera sucede para el paso

¹ Comentario realizado por el Ing. José R. De la Herrán
² Iovine John, 1992 p. 184

de un electrón de una órbita superior a otra inferior, en este caso emite un cuanto con energía igual a la diferencia de energía entre dichas órbitas.

En la primera órbita el electrón no emite energía, puesto que ya no hay órbitas de menor energía que descender, en el lado opuesto cuando se trata de la última órbita, al recibir el cuanto de energía el electrón pasará a ser un "electrón libre", en este caso se dice que el átomo está ionizado.

A continuación veremos los procesos básicos de interacción entre la materia y la radiación electromagnética, que es la base del rayo láser. Tomaremos el caso de un sistema atómico elemental con dos niveles de energía E_1 y E_2 , E_1 es el nivel que corresponde a un electrón en su órbita inferior y E_2 corresponde a un electrón en su nivel superior. E_1 corresponde a un átomo en su estado base y E_2 a un átomo en su estado excitado. Por brevedad llamaremos fotón a un "cuanto de radiación electromagnética". El primer proceso de interacción átomo fotón que veremos es el proceso de absorción. El átomo se encuentra inicialmente en su estado base y al interactuar con el fotón "absorbe" su energía para pasar a un estado excitado.¹

El siguiente proceso es el de emisión espontánea.² Ahora tenemos un átomo ya excitado inicialmente, que en forma espontánea (y generalmente en un tiempo breve del orden de 10^{-18} segundos) pasa a su estado base emitiendo en el proceso un fotón con energía igual a la diferencia de energía entre los dos estados. El fotón se emite en una dirección totalmente aleatoria.

¹ Es interesante el estudio más profundo de este concepto, pero queda fuera del campo del presente trabajo.

² Concepto importante para la comprensión de los de emisión estimulada y espontánea.

Finalmente, el otro proceso importante es la emisión estimulada, y es el proceso fundamental gracias al cual existe el láser. En él tenemos la interacción entre un fotón y un átomo que inicialmente se encuentra en su estado excitado. Como resultado el átomo pasa a su estado base emitiendo en el proceso un fotón que tiene las mismas características de dirección y de fase que el fotón inicial, por lo tanto decimos que la radiación electromagnética que resulta es coherente.

La emisión espontánea es claramente dominante en condiciones normales y la emisión estimulada rara vez se produce. Esto es debido a que los átomos se mantienen excitados durante un período tan breve de tiempo, menos de un microsegundo, que la probabilidad que un fotón apropiado llegue en el momento adecuado para producir la emisión estimulada, es casi nula.

2.2.2. INVERSION DE POBLACION.

Ya describimos que en condiciones normales, hay más átomos en el estado base que en el estado excitado, además los electrones que se encuentran en el nivel de mayor energía es menor. Así es más probable que un fotón pueda provocar el proceso de absorción, que el de emisión estimulada, esta distribución se considera normal y es imposible que exista la luz láser así.

Para conseguir luz láser, hay que invertir la población, es decir, que existan más átomos en estado excitado que en estado base, la manera de invertir esto es, "bombeando" los átomos o moléculas con alguna forma de energía, de forma que los electrones pasen a ocupar niveles de energía superiores.¹ Para esto el "bombeo" debe ser de manera precisa y con la cantidad justa de energía; actualmente existen varias formas de "bombeo" como son: el "bombeo" óptico (utiliza la propia luz para excitar), y con

¹ Vicente Aboites, 1991 p 27

mayor frecuencia se utilizan los arcos voltaicos, lámparas estroboscópicas y la luz de otros láseres.

2.2.3. AMPLIFICACION.

El producto de la emisión estimulada no tiene porque ser un haz de luz; después del "bombeo", el material que sirve para el láser se limita a producir un resplandor a lo largo del recipiente que lo contenga, de esta manera, el láser sería una simple curiosidad de laboratorio. Afortunadamente Maiman al trabajar en el primer láser, colocó una superficie semi reflectora (en cada extremo de la barra de rubí, resultando que los fotones producidos por la emisión estimulada en sentido longitudinal, regresaran, retroalimentando a la emisión estimulada), los fotones que escapan por los costados se pierden definitivamente.

Pero este proceso no puede durar indefinidamente ya que en algún momento, no habrá más átomos excitados que permitan continuar el proceso de emisión estimulada. Maiman acertadamente hizo que uno de los espejos no fuera 100% reflejante, lo que permitió que un haz de luz escapara y así el proceso entre los límites de los dos espejos continuara. Observamos entonces que dentro de esos límites es mayor la intensidad de generación de luz láser por el fenómeno de reflexión que se presenta, técnicamente se conoce con el nombre de oscilación y el lugar donde se produce se denomina resonador ó cavidad láser.¹

2.3. PROPIEDADES DE LOS LÁSER.

De la descripción de los principios físicos fundamentales del láser, encontramos las cualidades que nos permiten usar el rayo láser como un instrumento de la metrología óptica. Los láseres pueden ser fabricados con los más diversos tipos de materiales, como pueden ser cristales, gases, líquidos, semiconductores, etc. Sin embargo tienen propiedades que son

¹ Vicente Abottes, 1991 p. 31

comunes, además de las propias de cada material con que se construye un láser; observemos primero las propiedades comunes y en la descripción de cada tipo de láser se mencionarán las propias.

2.3.1 COHERENCIA TEMPORAL

Los láseres producen luz en muy definidas frecuencias, es decir, prácticamente de un solo color. Se dice que su luz es por completo monocromática, de una longitud de onda fija en cualquier instante. Esto es muy importante para la metrología óptica ya que se toma como medida dicha longitud de onda, en la interferometría, aunque en la práctica la luz emitida por un láser se ensancha en una gama de longitudes de onda, que varía según la óptica y el material láser que se utilicen, sin embargo comparado con otras fuentes luminosas, es más estrecha.

2.3.2 COHERENCIA ESPACIAL

Esta propiedad es posible gracias al proceso de emisión estimulada. Cuando un fotón estimula, la emisión de otro, el nuevo fotón, comienza su vida en la misma fase que el fotón que lo ha estimulado, es decir, que sus ondas están exactamente acopladas, alcanzando ambas sus puntos máximos y mínimos al mismo tiempo. En otras palabras, son coherentes y mantienen su coherencia a lo largo de muchas longitudes de onda puesto que tienen la misma frecuencia.

La distancia a lo largo de la cual el láser mantiene su coherencia (longitud de coherencia) esta limitada a varios kilómetros, comparada con otras fuentes luminosas, como las lámparas espectrales que emiten luz casi monocromática, tiene una longitud de coherencia no mayor a algunos centímetros y la longitud de coherencia de una bombilla normal es despreciable. La holografía, otra de las técnicas de la metrología óptica, se ha desarrollado precisamente por la longitud de coherencia del láser.

2.3.3. CONMUTACION Q.¹

Existen láseres que producen rayos de manera continua y otros que emiten breves pulsaciones, en general, el tiempo que dura un pulso de láser depende de la duración del "bombeo" óptico. Los pulsos de salida de un láser pueden controlarse por medio de un proceso conocido como conmutación Q. Para muchas aplicaciones prácticas la duración de tales pulsos láser es bastante grande y la intensidad del pulso es demasiado pequeña, y en otras el pulso es breve y la intensidad es muy alta, para la metrología óptica ambas maneras de producción de luz láser tienen su utilidad, se requiere de un rayo continuo e intensidad pequeña cuando se toma como referencia, para marcar el nivel de las máquinas, elementos estructurales, etc., en la interferometría y holografía se requiere que sea continuo y estable.

Mientras que un rayo con breve pulsación y de muy alta intensidad, es útil para medir grandes distancias, ya que se requiere que pueda ser detectado por un fotosensor, después de realizar el viaje de ida y vuelta, de la salida del rayo, a la distancia que se necesita medir, donde se coloca el retroreflector, que permite su retorno nuevamente a un punto cercano al de salida del rayo.

2.3.4. MODOS LONGITUDINALES

La distancia de ambos espejos que se utilizan para amplificar la emisión estimulada, debe ser un número entero de semilongitudes de onda, con el fin de tener una onda estacionaria dentro de la cavidad.

Cualquier otra longitud de onda que no cumpla esta condición estará siendo reflejada de forma que entre dos pasadas sucesivas no habrá un perfecto ajuste de fase, y por lo tanto, desaparecerá dicha onda. La

¹ Irvine John, 1992 p. 189

distancia que atraviesa la luz en un viaje de ida y vuelta es $2L$, donde L es la longitud de la cavidad; por tanto:

$$2L = m\lambda$$

donde m es un número entero, en general bastante grande.

Si la longitud de la cavidad es de 25 cm entonces el recorrido total en viaje de ida y vuelta del haz láser será $2L$ o 50 cm, que son aproximadamente igual a 790 000 longitudes de onda de un láser helio neón trabajando a 632.8 nanómetros. Sin embargo, la resonancia no sólo ocurrirá cuando tengamos 790 000 longitudes de onda, sino también a 790 001, 790 002, etc. Estas otras longitudes de onda también pueden oscilar dentro de la cavidad del láser. Estas longitudes de onda están muy próximas a 632.8 nanómetros y reciben el nombre de modos longitudinales del láser.

2.3.5. MODOS TEM_{mn}

MODOS TEM_{mn} significa modos transversales eléctricos y magnéticos., los cuales son la configuración de los campos de vectores electromagnéticos a través de la sección transversal de la cavidad láser. Estos modos transversales se designan con dos subíndices m y n . Estos subíndices se refieren al número de ceros (puntos con intensidad nula) en una sección transversal correspondientes a los campos eléctricos y magnéticos respectivamente. Ambos campos son perpendiculares entre si.

Para trabajar en holografía es preciso utilizar un láser que funcione solo en el modo TEM_{00} . En este modo se obtiene la distribución de energía transversal más uniforme, además de las mínimas pérdidas por difracción, mínima divergencia del haz y, además, puede enfocarse en un punto del menor diámetro posible.

2.3.6. DIVERGENCIA.¹

La divergencia del haz láser depende en gran parte del tipo de cavidad óptica utilizada. Este parámetro suele ser una de las características que nos da el fabricante. El hecho de que los rayos láser emitan un estrecho haz de luz, es consecuencia del resonador que se utiliza; en la mayoría de ellos, los fotones se desplazan dentro de la cavidad esencialmente en líneas paralelas, ya que los que no lo hacen escapan por los costados y no forman parte del estrecho haz de luz que sale de cualquier láser.

El resultado de semejante estrechez en el haz de luz, permite que en un láser de baja calidad, exista un valor típico de divergencia (o abertura) de 0.057 grados, equivalente a un miliradian. Para tener una idea de lo que esto significa, después de recorrer un kilómetro el rayo se abrirá a un diámetro de solo 1 metro. Es decir por cada metro recorrido el rayo apenas se desviara 1mm en su diámetro, por lo que el haz luz de un láser proporciona suficiente precisión para la nivelación de máquinas herramientas, terrenos para construcción de casas y de autopistas, agricultura, etc.

¹ Es la característica que hay que tener más cuidado cuando se emplea un laser en medición de distancias.

2.4. CLASIFICACION DE LOS LÁSER.

Los principales tipos de láseres que existen se pueden clasificar en continuos o pulsados, de baja potencia o de alta potencia, según la longitud de onda de la luz que emiten, o según el material del que están fabricados. A continuación se mencionarán los principales láseres, clasificándolos según el estado del material que se usa como medio amplificador.

2.4.1. LÁSER DE GAS

Los láseres de gas constituyen una categoría tan amplia que, con diversos criterios se subdividen en varios grupos. Para clasificarlos es necesario tomar arbitrariamente, la forma de excitar sus átomos y moléculas. Es decir los procedimientos utilizados para su "bombeo".

El más común de los métodos utilizados para bombear o excitar un láser de gas consiste en hacer que una corriente eléctrica atraviese el gas (por lo general, una mezcla de dos ó más gases) contenido en el interior de un tubo, generalmente a baja presión. Se coloca un electrodo en cada extremo del tubo y se le suministra un voltaje lo suficientemente elevado para que la corriente fluya de un extremo al otro. La tensión requerida para esta operación es de 1200 y 3000 voltios, mientras que la corriente es de entre 3 y 7 mA. Lo que se consigue es la llamada descarga eléctrica que logra que los electrones transfieran parte de su energía para producir una inversión de población.

LÁSER HELIO-NEON

Uno de los ejemplos más comunes de esta forma de operar de los láseres de gas lo constituye el familiar *láser de helio-neón*. Éstos son sin duda los láseres más comunes y útiles que actualmente se emplean, los

encontramos en los laboratorios de física que experimenten con láser, en las cajas de los supermercado donde por medio de ellos se lee el código de barras de los productos que contiene la información del precio y tipo de producto del que se trata, para la metrología se utiliza para alinear máquinas herramientas.

La potencia de estos láseres es normalmente baja, alcanzado apenas unas milésimas de watt, pero es capaz de concentrar la luz que produce en un haz cuyo diámetro aproximado es de 1mm. En el láser helio-neón, la descarga excita a los átomos de helio, los cuales transfieren su energía a los de neón y estos emiten entonces luz roja de una longitud de onda de 632.8 nanómetros. Estos láseres se construyen con un tubo de vidrio, que forma la cavidad que contiene en sus extremos los espejos reflejantes y los dos electrodos internos para mantener la ionización eléctrica a través del gas. Algo parecido ocurre en los tubos de neón o en los fluorescentes, pero evidentemente sin que produzcan haces de luz láser.

Las principales aplicaciones de estos láseres se presentan en el campo de la metrología, la holografía y la interferometría holográfica, por ejemplo para la realización de pruebas mecánicas no destructivas para determinar el estado de fatiga de tanques de alta presión, estructuras mecánicas, ejes de máquinas, etc. De este modo, utilizando una simple prueba óptica se puede saber la resistencia y confiabilidad de cada elemento sujeto a esta prueba. Lo que se consigue con estas pruebas es introducir un factor de seguridad nunca antes imaginado.

El uso de estos láseres es necesario para la alineación de cualquier experimento óptico de precisión, también se pueda usar para las máquinas herramientas que requieren una perfecta alineación, para garantizar la precisión obtenida durante su funcionamiento

LÁSER HELIO-CADMIO.

Su construcción es idéntica al de helio-neón, pero utiliza como elemento activo al vapor de cadmio, caracterizados por emitir un rayo visible de luz azul de 441.6 nanómetros, en lugar de la luz roja, la potencia típica obtenida en este láser es de los 10 miliwatt. Tiene una forma de operación de manera continua. Este láser puede utilizarse (junto con otros que emitan otros colores), para la fabricación de hologramas de color. Su longitud de coherencia es menor que la de un láser de helio-neón.

Una segunda categoría de láseres de gas son los de gas ionizado, por ejemplo, los de argón (Ar^+) y kriptón (Kr^+) ionizados. Estos láseres requieren de una corriente del orden de Amperes, para poder ionizar el gas y producir la inversión de población. La corriente tan alta impone muchas restricciones de tipo práctico para su construcción, ya que es necesario diseñar sistemas de enfriamiento por agua, para disipar la energía calorífica que la corriente ocasiona, el tubo debe tener una construcción muy complicada y especializada. Además la vida de estos láseres es corta, comparando con la de otros láseres de gas. Presentan la enorme ventaja de suministrar potencias del orden de watts.

LÁSER DE ARGON.

Estos láseres pueden emitir dentro de una muy amplia gama de longitudes de onda, pero las que más se utilizan son el verde 514.5 nm. y azul 488nm., visibles en su mayor parte, se construyen para operar de manera continua o pulsada y alcanzan potencias típicas de 0.5 y 1.0 watt. Debido a su alta potencia y corta longitud de onda, este láser se utiliza en fabricación de hologramas de transmisión. Tiene la desventaja de requerir refrigeración por ventilación forzada o agua, además de presentar un ensanchamiento Doppler importante debido a la elevada temperatura y la presencia de numerosos modos longitudinales. Además de requiere de un "etalón" o prisma dispersor dentro de la cavidad del láser para mejorar su coherencia temporal.

LÁSER DE KRIPTON.

La mezcla de argón y kriptón en un láser llega a posibilitar que se disponga de una gama más extensa de colores visibles, lo que ha motivado que se adaptaran para la realización de espectáculos luminosos, como los realizados en el Monumento a la Revolución, con motivo de las fiestas patrias, en la Ciudad de México. En Universum (Museo de las Ciencias) de la U.N.A.M., los encontramos en el espectáculo visual que se realiza en el láserium.

LÁSER DE BIOXIDO DE CARBONO.

Este láser funciona con niveles de energía moleculares en lugar de atómicos. La longitud de onda de la luz que emite es infrarroja, y por lo tanto invisible, dentro de una banda de longitudes de onda y cuyo centro se halla circunscrito en los $10\mu\text{m}$, diez veces mayor que los láseres anteriormente descritos, lo que determina que los láseres de CO_2 resulten eficientes para emitir de manera continua, potencias que oscilan entre fracciones de watt y centenares de watt.

Debido a su elevada potencia estos láseres tienen su principal campo de aplicación esta en la industria metal mecánica, plástica y textil entre muchas otras. Son usados en el tratamiento térmico de metales, así como en el corte, soldadura y perforación. En la mayoría de estas aplicaciones el uso del láser está sincronizado con elementos de control automático. De esta forma el corte de complicados diseños en diversos materiales puede realizarse en forma rápida y precisa.

Un claro ejemplo de la precisión que se logra con este láser; es en su aplicación en cirugías de la piel en donde es posible regular la energía del mismo con el fin de evaporar unos cuantos micrómetros de espesor de la piel únicamente, sin dañar las capas subcutáneas adyacentes.

2.4.2. LÁSER SÓLIDOS Y DE ESTADO SÓLIDO.

Se entiende por láser sólido aquel en el que el medio activo es un cristal sólido, aunque dentro de esta clasificación podemos incluir a los láser de semiconductor. Obviamente no se efectúa el "bombeo" eléctrico para este tipo de láser, y se emplea el "bombeo" óptico, que como ya vimos se realiza por medio de una lámpara de destellos (flash).

LÁSER DE RUBÍ

Este fue el primer tipo de láser que existió en el mundo. Fue construido por Theodore Maiman en 1960, quien usó como medio activo un cristal de rubí sintético. El rubí es una piedra preciosa formada por cristales de óxido de aluminio, que contiene impurezas de óxido de cromo, en una proporción de menos del 0.05%, este es el que hace que el rubí tome ese color rojizo. La forma geométrica típica que adopta el rubí usado en un láser es la de unas barras cilíndricas de 10 a 15 mm de radio y algunos centímetros de largo.

La excitación del rubí se realiza mediante la energía óptica proporcionada por lámparas de destello, conectadas a un banco de capacitores, con el fin de disponer de una elevada descarga; esta forma de "bombeo" tiene la desventaja de producir luz láser con baja eficiencia, por lo general es menor del 0.1%. Otra desventaja del láser de rubí es la dificultad del crecimiento de los cristales sintéticos de rubí.

La longitud de emisión del láser de rubí es de 694.3 nm dentro del rojo visible. Si opera con un dispositivo de "Q-switch" se pueden obtener pulsos de 10 a 50 MW de una duración que oscila entre 10 y 20 ns. Este láser trabaja en régimen pulsado, aunque se pueden obtener pulsos dobles, separados menos de un microsegundo, con el fin de emplearlos en la holografía interferométrica.

Entre sus aplicaciones industriales destaca su uso en la micro perforación, así como en la producción de componentes electrónicos de precisión, como por ejemplo las resistencias, en las cuales es necesario volatilizar muy pequeñas cantidades de material para calibrar con muy alta precisión.

LÁSER DE Nd-YAG.

Recibe esta denominación, por sus siglas en inglés: *Neodimium-Yttrium Aluminum Garnet*, tiene como elemento activo el neodimio, hospedado en una barra de YAG, por cierto este cristal es de mejor crecimiento en laboratorios, por lo que ha sustituido notablemente a los láseres de rubí.

Este tipo de láser es el más utilizado de forma industrial dentro del grupo de láseres de estado sólido. La longitud de onda que emite es generalmente de $1.06 \mu\text{m}$ y se encuentra en el infrarrojo cercano. El orden de potencias de este tipo de láseres va desde menos 1 watt hasta unos 150 watts en modo continuo. Alcanza varios cientos de Kilowatts de potencia pico en modo pulsado, y puede llegar a pulsos del orden de 50 MW operando en "Q-switch".

En este tipo de láseres el medio activo está constituido por cristales o vidrios que se han contaminado con impurezas de iones de neodimio, responsables de la acción láser del material. Al igual que el láser de rubí se excita con una lámpara de Xenón pulsada. Por lo tanto, para prácticamente todas las aplicaciones anteriormente descritas para el láser de rubí, se puede usar indistintamente uno de Nd-YAG.

2.4.3. LÁSER DE SEMICONDUCTOR.

Un semiconductor es un material cuyas propiedades eléctricas están a mitad de camino entre un conductor y un aislante, de aquí su nombre de semiconductor. Hay un gran número de materiales semiconductores hoy día, pero el más conocido y utilizado es el silicio. El silicio puro no es de gran utilidad para emitir luz láser, pero si se contamina (introducir una pequeña cantidad de otro elemento en la red cristalina del silicio), por ejemplo con boro, arsénico y fósforo, podemos aumentar su conductividad en un factor de 12. El silicio contaminado con boro, realiza la conducción por el movimiento de los huecos de la red cristalina, de ahí que este tipo de semiconductor recibe el nombre de p (p se refiere a positivo).

El material contaminado con arsénico, recibe el nombre de semiconductor tipo n , debido a que la conducción eléctrica se realiza por medio de un flujo de electrones con carga negativa (n procede de negativo).

Si juntamos dos trozos de semiconductor, uno de tipo p y otro de tipo n , la superficie que queda entre ambos se conoce como unión pn . Esta unión suele denominarse diodo. Un diodo conduce la corriente eléctrica en un sentido.

La unión pn puede emitir fotones de luz, dependiendo del material, por ejemplo: sulfuro de aluminio, galio e indio, utilizado para la fabricación de la unión, en este caso el diodo recibe el nombre de LEDs (diodos electroluminiscentes). La eficiencia de emisión de luz de un LED es mayor que la mayoría de las otras fuentes luminosas. Cuando el electrón atraviesa la unión pn , un fotón de luz se emite cuando se recambian con un hueco positivo, de forma bastante similar a las transiciones de energía dentro de un átomo.

Esto ha permitido en los últimos años una gran avance en la tecnología de los diodos láser. Los cuales tienen su principal aplicación en la llamada electrónica de consumo: reproductores de disco compacto, impresoras láser, punteros láser, miras láser para fusiles y las comunicaciones de fibra óptica. Pero en la holografía también se han fabricado algunos modelos que han sido utilizados por varios fabricantes americanos de hologramas con éxito.

El diodo láser es parecido a un LED. La luz se genera por medio de la recombinación de un par electrón hueco en la zona de unión *pn*. La cavidad óptica de un diodo láser es muy pequeña, alrededor de 500 μm de longitud. Los espejos de la cavidad están formados por las caras talladas del material semiconductor. La reflexión de estos espejos es sólo de un 30 por ciento de la luz que incide sobre ellos. Incluso con coeficientes de reflexión tan bajos, el diodo láser puede funcionar debido a la altísima ganancia del material semiconductor. El perfil de salida del haz láser suele ser elíptico, y la divergencia del haz es grande. Afortunadamente estos defectos pueden corregirse por medio de lentes externas. Podría pensarse que, debido a la pequeña longitud de la cavidad óptica, un diodo láser sería muy coherente, sin embargo esto no es cierto. La cavidad óptica es capaz de mantener un número grande de modos longitudinales. En cualquier caso existen métodos para aumentar la longitud de coherencia de un diodo láser. Hay modelos de diodos láser que pueden trabajar en onda continua, o bien en modo pulsado.

Como ejemplo: un diodo láser utilizable en holografía, tiene una longitud de onda de 670 nm, su potencia de salida es de 3.5 miliwatt, con una divergencia de 1.2 miliradianes (con óptica externa) y un tiempo de vida de 100 000 horas. La longitud de coherencia del diodo láser no se conoce.

2.4.4. LÁSERES LIQUIDOS

Como su nombre lo indica, en estos láseres el medio activo es líquido y generalmente es un colorante, como la rodamina 6G, disuelta en un líquido. Normalmente tienen una capacidad de emisión en un intervalo de longitudes bastante amplio, permitiendo sintonizar una longitud de emisión dentro de una banda. Cambiando el tipo de colorante podemos cubrir distintas partes del espectro visible. Estos láseres pueden funcionar en régimen de impulsos o en modo continuo, pero suelen utilizarse de forma similar a los de estado sólido. Tienen la gran desventaja, el que su excitación tiene que hacerse con el haz coherente de otro láser, como el del argón.

3. INTERFEROMETRIA.

La interferometría se basa en el fenómeno de la interferencia, que se produce cuando dos ondas luminosas de exactamente la misma frecuencia se superponen sobre una pantalla. Además de tener la misma frecuencia estas ondas deben ser sincrónicas, es decir que sus diferencias de fase, y por lo tanto las distancias entre ambas crestas de las ondas, deben permanecer constantes con el tiempo. Esto es prácticamente sólo posible si la luz de ambas ondas que se interfieren provienen de la misma fuente luminosa. Pero si es solamente una fuente luminosa la que produce la luz, los dos haces luminosos que se interfieren deben generarse de alguna manera del mismo haz.

Existen dos procedimientos para lograr esto: denominamos al primero, división de amplitud y al segundo, división de frente de onda. Usando estos dos métodos básicos se han diseñado una gran cantidad de interferómetros, con los que se pueden efectuar medidas sumamente precisas. Dos de los interferómetros más comunes que estudiaremos con gran detalle son: el sistema de dos rendijas de Young, que produce interferencia por frente de onda y el segundo es el de Michelson, que produce interferencia por división de amplitud.

3.1. ONDAS DE LUZ.

La metrología óptica depende fundamentalmente del concepto de considerar a la luz como onda transversal. Como veremos más adelante para entender la interferometría y la holografía, se precisa entender bien qué son las ondas, por lo que conviene recordar varios conceptos y definiciones relacionados con dichas ondas.

En la figura 3.1, se muestra la representación gráfica de una onda sinusoidal. La longitud de la onda puede medirse entre dos puntos que determinan un ciclo completo. Un ciclo queda definido por el punto de comienzo de la onda y termina cuando volvemos a la misma condición. En la misma figura podemos ver que un ciclo puede medirse entre dos puntos donde la amplitud es la misma o entre dos puntos de paso cero. Para indicar la longitud de onda se utiliza la letra griega lambda (λ).

AMPLITUD

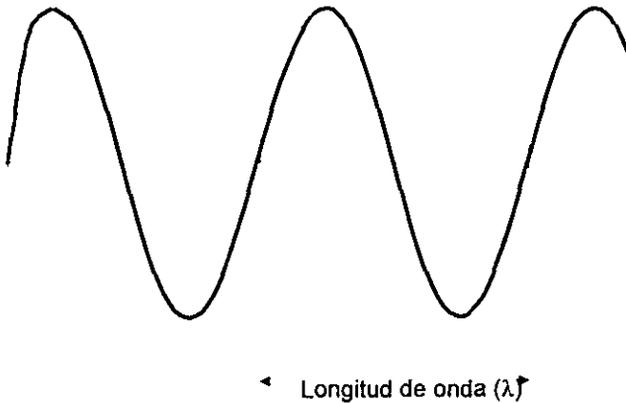


Figura 3.1. Representación gráfica de una onda sinusoidal

El periodo viene definido por la duración de un ciclo. La frecuencia nos da el número de ciclos que ocurren en un segundo. Se utiliza como unidad de frecuencia el hertz, y se abrevia Hz. la frecuencia ν , nos da el número de crestas que pasan por un lugar en un segundo. La longitud de onda varía en proporción inversa a su frecuencia. Cuanto mayor sea la frecuencia, menor será la longitud de onda.

Estas dos cantidades no son independientes, sino que están relacionadas entre sí por la velocidad c , con la que viaja la luz. Las expresiones matemáticas siguientes relacionan la longitud de onda con la frecuencia, y viceversa:

longitud de onda = velocidad de la luz / frecuencia

$$\lambda = c / \nu \quad (3)$$

frecuencia = velocidad de la luz / longitud de onda

$$\nu = c / \lambda. \quad (4)$$

3.2.INTERFERENCIA.¹

La interferencia de la luz, es un concepto importante, ya que la interferometría y la holografía se basan en ella. Es sencillo de entender el principio básico de las interferencias constructivas y destructivas. Podemos producirlas cuando dos o más ondas luminosas de exactamente la misma frecuencia y amplitud, es decir que se encuentran en fase y que han hecho recorridos distintos, coinciden en el mismo punto y en el mismo instante, la

¹ No confundir con el fenómeno que se presenta también en las ondas de radio, y causan problemas en su transmisión.

amplitud en ese punto es la suma de las amplitudes instantáneas de las ondas individuales. En la figura 3.2 podemos ver esto. La interferencia constructiva es el refuerzo que ocurre si las ondas llegan en fase.



Figura 3.2. En fase (interferencia constructiva)

La interferencia destructiva nos describe la cancelación completa o parcial de las ondas cuando están en oposición de fase, en la figura 3.3 podemos ver que una de las ondas está desfasada 180 grados con respecto a la otra. Hay que tener en cuenta que lo normal es obtener un resultado intermedio entre las interferencias constructivas y destructivas.



Figura 3.3. Desfasadas (media longitud de onda). Interferencia destructiva

Otro caso se presenta en la figura 3.4. Aquí una de las ondas ha sido desplazada un ciclo completo respecto de la otra (360 grados). Nos volvemos a encontrar con interferencia constructiva. Si el desfase es un número entero de longitudes de onda, 1λ , 2λ , 3λ , etc., obtendremos interferencia constructiva.

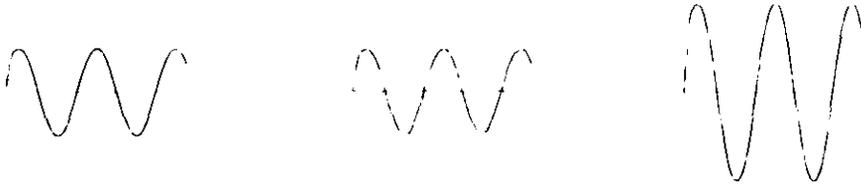


Figura 3.4. Desfasadas (una longitud de onda), interferencia constructiva.

La suma algebraica de las funciones de onda en un punto reciben el nombre de superposición.

Además de tener la misma frecuencia, estas ondas deben ser sincrónicas, es decir que sus diferencias de fase, y por lo tanto las distancias entre las crestas de ambas ondas, deben permanecer constantes con el tiempo.

3.2.1 FRANJAS DE IGUAL INCLINACION.

Para comprender como se forman las “franjas de igual inclinación”, consideremos el siguiente experimento idealizado: hacemos incidir un rayo de luz láser, que es monocromática, sobre un vidrio parcialmente reflexivo, de espesor “ d ”, el rayo incidente se divide en dos haces; el transmitido que continuara su dirección paralela a la del rayo incidente, modificada de acuerdo con la ley de Snell, después de atravesar vidrio. Mientras del reflejado, obtendremos dos rayos, debido a su reflexión en la cara exterior e interior del vidrio, que interferirán de manera constructiva o destructiva, dependiendo del ángulo de incidencia y del índice de refracción del material.

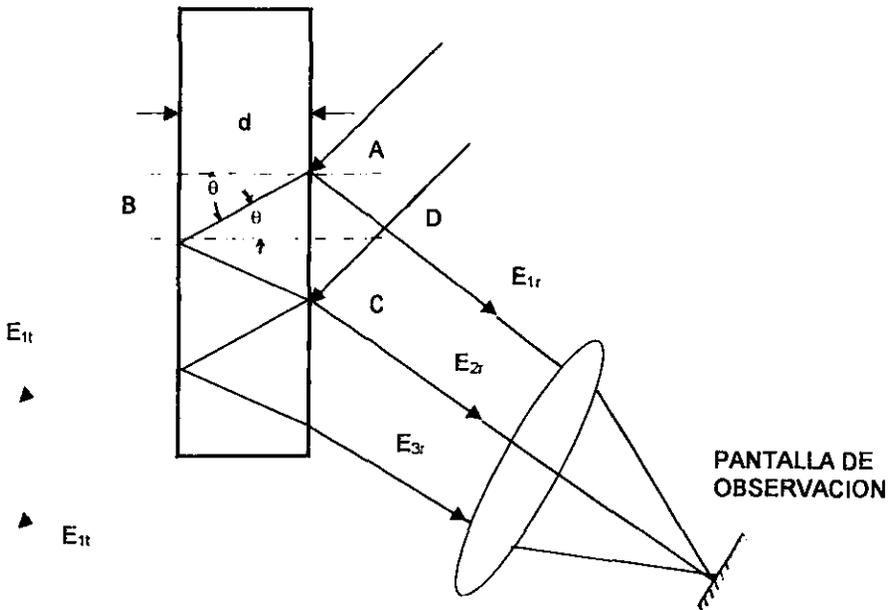


Figura 3.5. Franjas de igual inclinación

De la figura 3.5 observamos que la diferencia de caminos ópticos, la distancia que recorren ambos rayos reflejados E_{2r} y E_{1r} esta dada por:

$$\Lambda = \eta_t (AB+BC) - \eta_t (AD) \quad (5)$$

donde: Λ es la diferencia de camino óptico en esta expresión tenemos, la diferencia de caminos ópticos Λ es función del índice de refracción η , ya que la velocidad de la luz c se reduce, y por lo tanto la distancia que recorre, cuando pasa de un medio a otro con diferentes índices de refracción, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$c / v = \eta \quad (6)$$

De la figura:

$$AB = BC = d / \cos \theta_t$$

$$AD = AC \text{ sen } \theta_t$$

$$AC = 2D \tan \theta_t \quad (7)$$

La ley de Snell nos dice que:

$$\eta_1 \text{ sen } \theta_1 = \eta_t \text{ sen } \theta_t$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (1):

$$\Lambda = 2d \eta_t / \cos \theta_t (1 - \text{sen}^2 \theta_t)$$

Finalmente:

$$\Lambda = 2d \eta_t \cos \theta_t \quad (8)$$

Para el caso en que los índices de refracción sean iguales, la diferencia de caminos ópticos es función del espesor del divisor de haz y del ángulo de reflexión.

Si $\Lambda = N\lambda$ (números enteros de longitudes de onda), se tendrán máximos de amplitud, en la interferencia de las ondas.

para $\Lambda = ((2N+1)/2) \lambda$ se tendrán mínimos de amplitud, en la interferencia de las ondas.

Por medio de la lente, los rayos que viajan en una misma dirección son concentrados en un punto P, que se encuentra sobre la pantalla de observación o una placa fotográfica.¹

3.2.2.FRANJAS DE IGUAL ESPESOR.¹

Las "franjas de igual espesor", nos permiten comprender la interferencia que tenemos en las burbujas de jabón o en las películas delgadas. A continuación se describirá cómo se producen utilizando un láser helio-neón. La figura 3.6 nos muestra dos placas de vidrio iluminadas por el láser. La "cuña" que se forma entre las dos placas de vidrio se ha exagerado en el dibujo. Las "franjas de igual espesor" proceden de la interferencia entre la luz reflejada de las superficies superior e inferior de la cuña. Las franjas brillantes corresponden con interferencia constructiva. En este caso, las ondas reflejadas están bien en fase o en un número entero de longitudes de onda de desfase. Las franjas oscuras representan la interferencia destructiva y la luz esta desfasada media longitud de onda o múltiplos de ella.

Observando el punto donde se unen ambas placas de vidrio, veremos que hay una franja oscura. Ya que los caminos ópticos en este punto son los mismos, se puede pensar que debería haber una franja brillante. Lo que realmente sucede es, como vimos en la sección anterior, que cuando la luz pasa de un medio a otro con diferente índice de refracción, su velocidad disminuye y por ello sufre un desplazamiento de

¹ Hecht Eugene, 1990 p 525

($\frac{1}{2} \lambda$ o 180 grados), que produce una interferencia destructiva, debido a lo oposición de fases de ambas ondas.

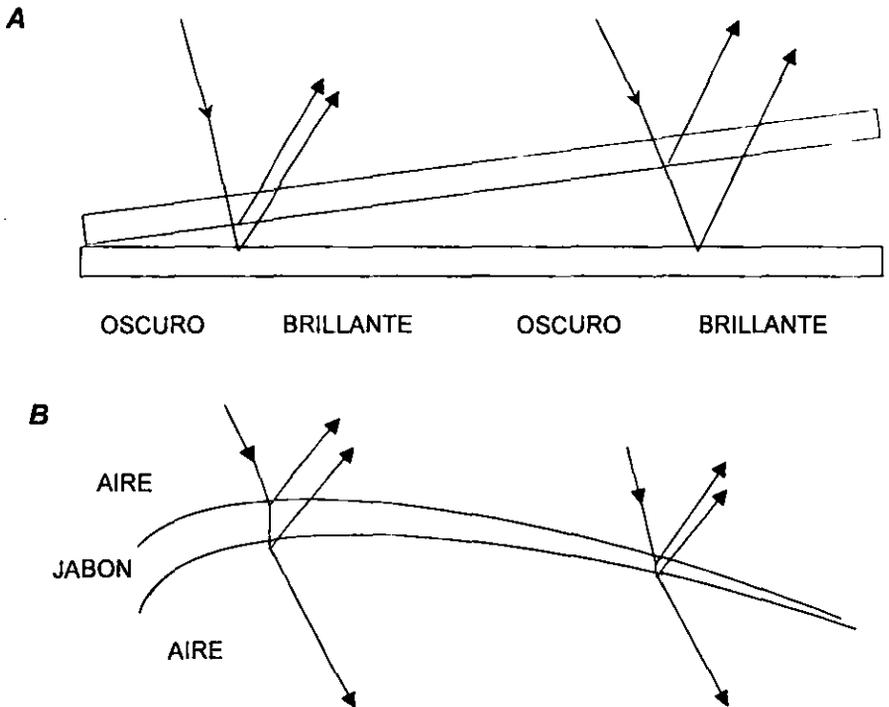


Figura 3.6 Interferencia en capas delgadas.

Concluyendo, las franjas así obtenidas reciben el nombre de "franjas de igual espesor", porque representan zonas para las cuales la separación es uniforme. En el caso de las burbujas de jabón, cuando se iluminan con luz blanca, las líneas que tienen igual color y brillantes representan las zonas de igual espesor en la burbuja, algo parecido a lo que vemos en los mapas topográficos donde las líneas representan lugares con igual altitud.

3.2.3. ANILLOS DE NEWTON.¹

El fenómeno de los anillos de Newton aparece cuando una lente plano convexa se coloca sobre un vidrio plano y se ilumina con luz monocromática (figura 3.7). Como se describió antes para las franjas de igual espesor, la luz es reflejada prácticamente de la misma forma.

Debido a que el espesor de aire aumenta con la distancia medida desde el centro (puntos de contacto), la figura de interferencia consiste en una serie de círculos concéntricos claros y oscuros. Si iluminamos este sistema con luz monocromática de un láser helio neón (633nm), ¿cual será el espesor de la capa de aire correspondiente a la séptima franja oscura?

El centro es oscuro debido al desplazamiento de fase de 180 grados ($\lambda/2$) de la luz reflejada. Si nos apartamos del centro hacia la primera franja oscura el desfase debe ser λ , el cual nos da que la capa de aire debe ser la mitad, o sea $\lambda/2$ (recuerde que la luz atraviesa la zona de aire dos veces: primero al bajar y luego al subir). Si repetimos el proceso para el segundo anillo, el espesor de aire debe haber aumentado otros $\lambda/2$. Por tanto, en el séptimo anillo, el espesor del aire será:

¹ Daniel Maracara 1989 p 293

$$7 \times \text{longitud de onda} / 2 = 7(633 \times 10^{-9}) / 2 = 2215.5 \times 10^{-9} \text{ m}$$

o sea igual a $2.16 \mu\text{m}$.

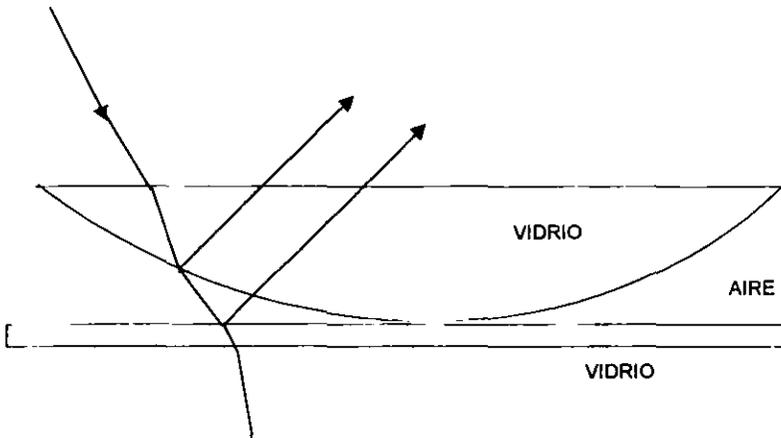


Figura 3.7. Anillos de Newton

3.3. INTERFERÓMETRO DE MICHELSON.¹

Sin duda el personaje más importante en el terreno de la interferometría es Albert Abraham Michelson (1852-1931). Ingresó a la Academia Naval de los Estados Unidos, con ayuda del presidente Grant, graduándose en 1873. En el curso de su carrera demostró una gran vocación para la óptica, más que para las actividades navales.

Después estudió en Europa y a su regreso ingresó a Case School of Applied Science, donde conoció al profesor de química Edwin Williams Morley (1838-1923). Juntos efectuaron un experimento interferométrico que había comenzado Michelson en Europa, para determinar si la tierra estaba en reposo o en movimiento con respecto al éter, es decir, al medio en el que supuestamente se propagaba la luz. Después de repetir el experimento varias veces, llegaron a la conclusión de que la franja de interferencia no se movía de posición como lo esperaban y por lo tanto, no encontraron una explicación satisfactoria para el resultado del experimento.

Una de las explicaciones era suponer que el éter estaba inmóvil en relación con la tierra. Sin embargo, esta conclusión no era aceptable, porque otros experimentos demostraban que esto era imposible. Finalmente Albert Einstein con su teoría de la relatividad especial, que postuló que la velocidad de la luz es siempre exactamente la misma en el vacío, independientemente de las velocidades relativas de la fuente luminosa y del observador. Esta teoría hacía completamente innecesaria la hipótesis de la existencia del éter. De esta manera quedaba explicado el resultado del experimento de Michelson y Morley.

¹ Se trata de los interferómetros más estudiados por lo que no se puede nombrar a un autor en especial, en la bibliografía se pueden consultar más de tres de ellos.

Albert Michelson hizo multitud de experimentos metrológicos, que sin duda lo hacen merecedor del título de padre de la interferometría. Otro de sus trabajos importante fue la medición de longitudes por medio de interferómetros, superando la precisión de cualquier medida efectuada hasta entonces. Michelson recibió el premio Nobel de física por sus trabajos interferométricos de precisión, en 1901.

El interferómetro de Michelson que se describirá, (ver figura 3.8) es un divisor de amplitud que produce franjas de igual inclinación. Su construcción es idéntica al usado inicialmente por Michelson y Morley en el año de 1887, en su famoso experimento para detectar el movimiento de la tierra con respecto al "éter", pero incluye elementos modernos.

Tenemos primero una fuente de luz; nosotros usaremos un láser helio neón, ya que por sus propiedades de coherencia temporal y espacial, los resultados obtenidos en medición con este interferómetro son sumamente preciso. Michelson obviamente no contaba con este tipo de fuente luminosa por lo que empleó una fuente de luz incoherente.

Dirigimos el haz de luz láser hacia un espejo de primera cara E1, este espejo tiene la característica de que la superficie reflejante es anterior al vidrio de soporte, y no, como sucede en los espejos caseros que ésta se encuentra posterior al vidrio, lo que ocasiona un haz secundario. Ajustando el espejo E1, dirigimos el haz a un punto cercano, al de salida en el láser, una vez realizado esto, colocamos un divisor de haz a 45° con respecto al haz aproximadamente a la mitad del camino de la salida del láser y el espejo, este divisor reparte la amplitud del haz de luz incidente entre otros dos haces a su salida. Usamos un divisor de haz con una relación de 1:1, refleja un 50% y permite el paso del otro 50%. El haz primario continua su camino sin desviarse, mientras que el haz secundario se refleja a 90° .

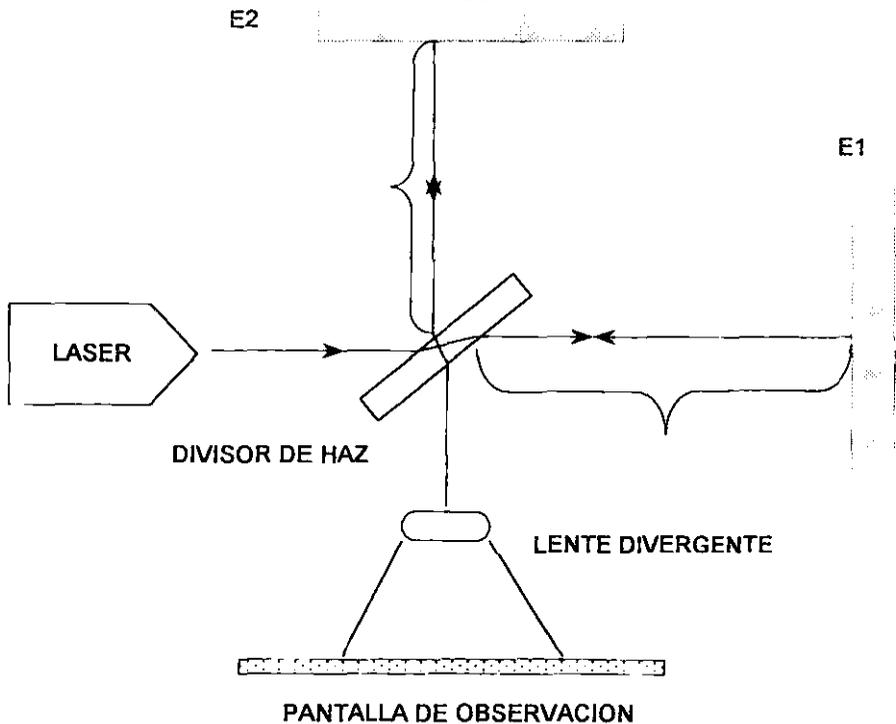


Figura 3.8. Montaje interferometro de Michelson

Colocamos el segundo espejo de primera cara E2, de acuerdo con la figura. Y en el lado opuesto la pantalla de observación. Esta puede ser una tarjeta blanca. El siguiente paso es ajustar el segundo espejo E2, hasta que el haz secundario atravesase el divisor de haz y vaya hacia la pantalla. En este momento tendremos una pantalla totalmente brillante, movemos ligeramente el segundo espejo hasta que aparezcan las franjas claras y oscuras de interferencia entre ambos haces y que corresponden a la descripción de las franjas de igual inclinación.

Cuando las distancias A y B son idénticas se obtendrá el mejor contraste en las franjas de interferencia, además de que la lente divergente expande el haz para aumentar la superficie de observación de estas en la pantalla.

Nótese que la luz que se refleja en el espejo E2 atraviesa tres veces el divisor de haz, antes de llegar a la pantalla de observación, mientras que el otro haz que se refleja en el espejo E1 solamente la atraviesa una vez. Este interferómetro está no compensado. Si colocamos un vidrio con igual espesor que el divisor de haz en el brazo del interferómetro que tiene el espejo E1, ambos haces recorren igual cantidad de caminos ópticos. Entonces se dice que el interferómetro está compensado. Para el caso de usar luz láser como fuente luminosa, se puede compensar simplemente moviendo uno de los espejos a lo largo de su eje óptico, es decir anulando la diferencia de camino óptico. Sin embargo, si la luz es blanca, o de varias longitudes de onda, es necesario que el interferómetro esté compensado.

Todos los componentes ópticos que se mencionaron se colocan en soportes magnéticos que permitan una libertad de tres grados de movimiento para que los ajustes se realicen convenientemente, además es posible sustituir los dos espejos por retroreflectores (reflectores de esquina), que se forman haciendo un simple corte a un prisma cúbico de caras internas reflectoras, de tal forma que la pieza resultante tenga sus tres caras perpendiculares entre sí. En cada superficie interna los ángulos de reflexión y de incidencia son iguales, por lo que su principal propiedad, es la de reflejar la luz, en una dirección paralela a la incidente, previniéndose con ello hasta el más ligero defecto de alineación.

3.3.1. INTERFERÓMETRO DE TWYMAN-GREEN.¹

Si en el interferómetro de Michelson se cambia la fuente de luz por una puntual y se cambian los espejos planos, por espejos esféricos (M1 y

¹ Harris Muñoz, 1964 p. 25

M2) con centro de curvatura en la fuente puntual, se obtiene un interferómetro de Twyman. Por la figura 3.9 se observa que este interferómetro produce franjas de igual espesor.

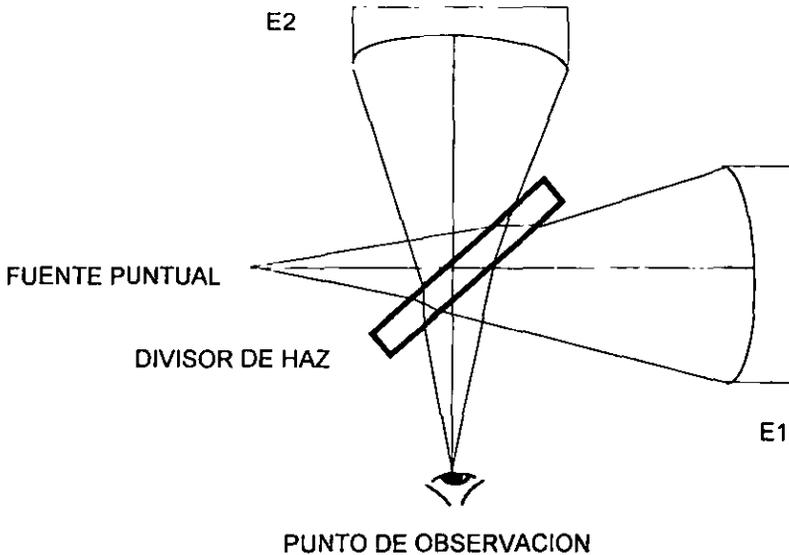


Figura 3.9. Interferómetro de Twyman

Sus aplicaciones se restringen a la prueba de espejos cóncavos; si el radio de curvatura del espejo en prueba es muy grande, la dificultad para orientar el sistema es mayor, lo cual dificulta también la localización de las franjas de interferencia. Debido a la baja eficiencia y lo limitado de sus aplicaciones este interferómetro no se ha vuelto a usar, pues existen métodos más eficaces para probar espejos cóncavos. Sin embargo el interferómetro de Twyman ha servido de puente entre el de Michelson y el de Twyman-Green.

Si en el interferómetro de Twyman se transforma el frente de onda esférico producido por la fuente puntual, en un frente de onda plano, se obtiene el interferómetro de Twyman-Green. Para transformar el frente de onda esférico a plano, basta poner una lente con su foco en la fuente luminosa (lente colimadora).

El interferómetro de Twyman-Green es otra modificación del de Michelson. La figura 3.10 ilustra este interferómetro, donde L1 es una lente colimadora y L2 una lente que dirige todos los rayos a un punto de observación en la pantalla, no pueden existir franjas de igual inclinación y sólo se podrán observar las de igual grueso. La lente L2 es necesaria a fin de poder observar las franjas sobre toda la apertura.

En este interferómetro se tienen dos frentes de onda planos que interfieren entre sí al unirse nuevamente después de atravesar el divisor de haz. El hecho de tener un frente de onda plano aumenta considerablemente las posibilidades de aplicación de este interferómetro; por ejemplo es posible medir las irregularidades en cualquier superficie plana; en prismas y placas se pueden determinar errores en los ángulos con una precisión de segundos de arco.

En una lente se pueden medir las desviaciones del frente de onda producidas por las aberraciones con una precisión de hasta 10^{-4} cm. Todas estas mediciones se hacen por comparación entre dos frentes de onda, uno que no se altera y otro que se hace reflejar o se deja transmitir en la pieza que se desea probar. Cuando la parte óptica bajo prueba es perfecta, el frente de onda se conserva; cualquier irregularidad en la superficie o en el vidrio modifica el frente de onda produciéndose franjas de interferencia características en cada caso.

Con este interferómetro también es posible determinar el ancho de las líneas espectrales, medición que es importante en la determinación de los contaminantes en la atmósfera. Este interferómetro no está compensado y con frecuencia se utiliza con grandes valores de la diferencia de camino óptico, por lo que la fuente ideal de utilización para este interferómetro es la luz láser, por su alta monocromaticidad.

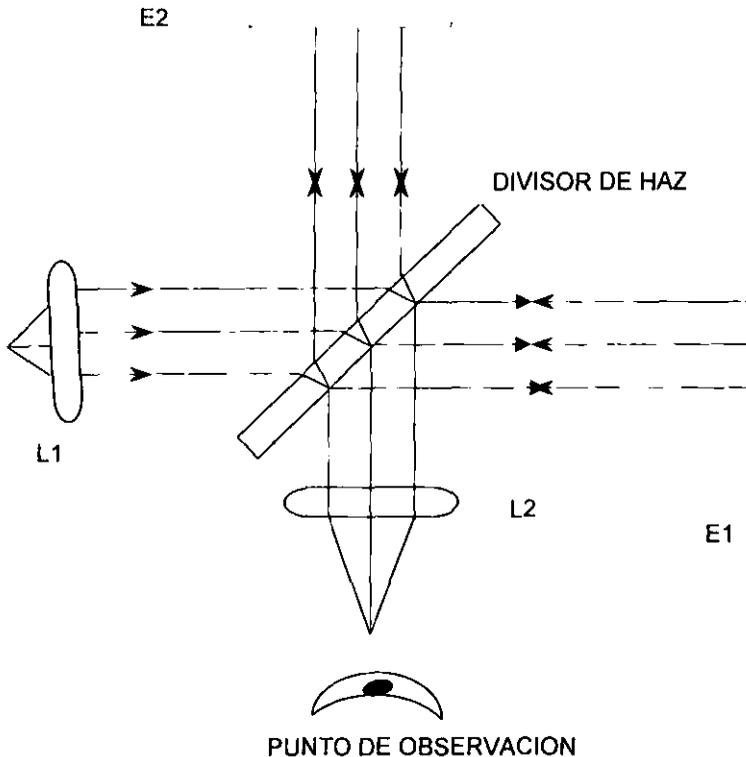


Figura 3.10. Interferómetro de Twyman-Green

3.3.2. INTERFERÓMETROS DE MACH-ZHENDER Y DE JAMIN.¹

Estos interferómetros se puede considerar también como modificaciones del interferómetro de Michelson. La diferencia consiste en que estos interferómetros se usan dos divisores de haz con el fin de que la luz no pase de regreso por el mismo divisor como en el de Michelson, según se muestra en la figura 3.11. Esto es con la finalidad de que la luz pase solo una vez a través de la muestra que se está examinando de forma interferométrica.

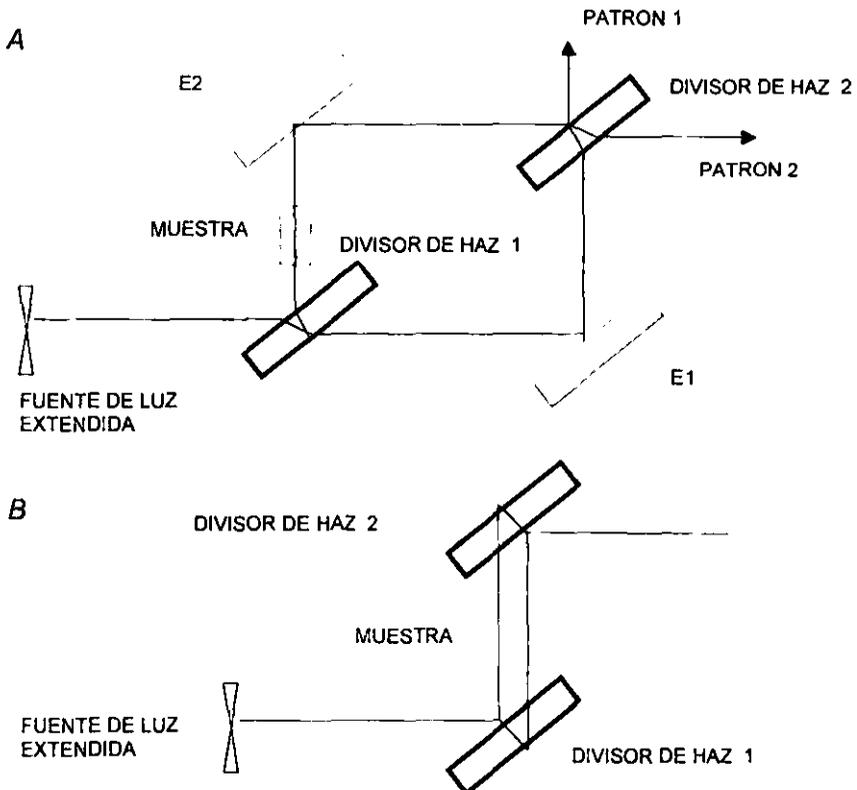


Figura 3.11. a) Interferómetro de Mach Zhender, b) Interferómetro de Jamin

Como se puede observar, estos interferómetros tienen la ventaja de estar ambos compensados, pues los dos haces atraviesan la misma cantidad de vidrio, por lo que pueden usarse con luz blanca. Estos instrumentos se usan con frecuencia para observar pequeñas variaciones en el índice de refracción de algunos materiales, como los gases. El interferómetro de Jamin es similar al de Mach Zehnder, con la sustitución de un espejo y una placa simple con su cara posterior metalizada. Esta sustitución hace el ajuste mucho más simple, pero a la vez más caro, ya que las placas son mucho más gruesas que en Mach Zehnder.

3.4. INTERFERÓMETRO DE YOUNG.¹

La interferencia con luz blanca es muy difícil de observar. La luz visible está constituida por multitud de longitudes de onda, todas ellas muy cortas. Hay que recordar que la luz visible del espectro electromagnético se extiende entre los 400 nm y 700 nm. Otro factor que dificulta la observación de la interferencia es la coherencia de la luz. La luz emitida por las fuentes naturales es espontánea y de fase aleatoria, dependiendo del momento en que el átomo liberó al fotón. Aun en contra de todos estos obstáculos Thomas Young, en 1801, demostró la interferencia de la luz con su experimento de la doble ranura.

El experimento realizado por Young, ver figura 3.12a, es el siguiente: colocó frente a una fuente luminosa una pantalla obturadora, que impedía el paso de la luz, excepto por una ranura muy estrecha. A continuación colocó otra pantalla con dos ranuras similares, enfrente de la anterior. Y finalmente enfrente de esta pantalla obturadora, colocó otra de observación. El proceso funciona de la siguiente manera: La luz que atraviesa la primera ranura produce un frente de onda de acuerdo con el principio de Huygens. Este frente atraviesa, a continuación, las ranuras de la segunda pantalla. Cada una de éstas emitirá a su vez frentes de onda

¹ Iovine John 1992 p. 162

secundarios, pero éstos serán coherentes, ya que proceden del mismo frente de onda, el producido por la primera ranura. En la pantalla de observación, debido a la interferencia de ambas ondas, obtendremos un diagrama de líneas alternativamente claras y oscuras.

En la figura 3.12b las franjas brillantes, corresponden a los puntos, donde las ondas que llegan a este punto, están totalmente en fase y se refuerzan unas a otras (interferencia constructiva), y las franjas oscuras corresponden a las zonas, donde las ondas están en oposición de fase (interferencia destructiva).

En las franjas brillantes las ondas de tienen un número entero de longitudes de onda en fase, cuando salen de las ranuras. Mientras que las franjas oscuras, la diferencia de fase a la salida de ambas ranuras es de $(N/2)\lambda$. Esto se muestra con mayor detalle en la figura 3.13, y de ella deducimos la siguiente ecuación:

$$N\lambda = d \text{ sen } \theta \quad (10)$$

Esta ecuación relaciona, N el número de la franja, "d" es la separación entre las ranuras, λ la longitud de onda de la luz y θ es el ángulo de desviación.

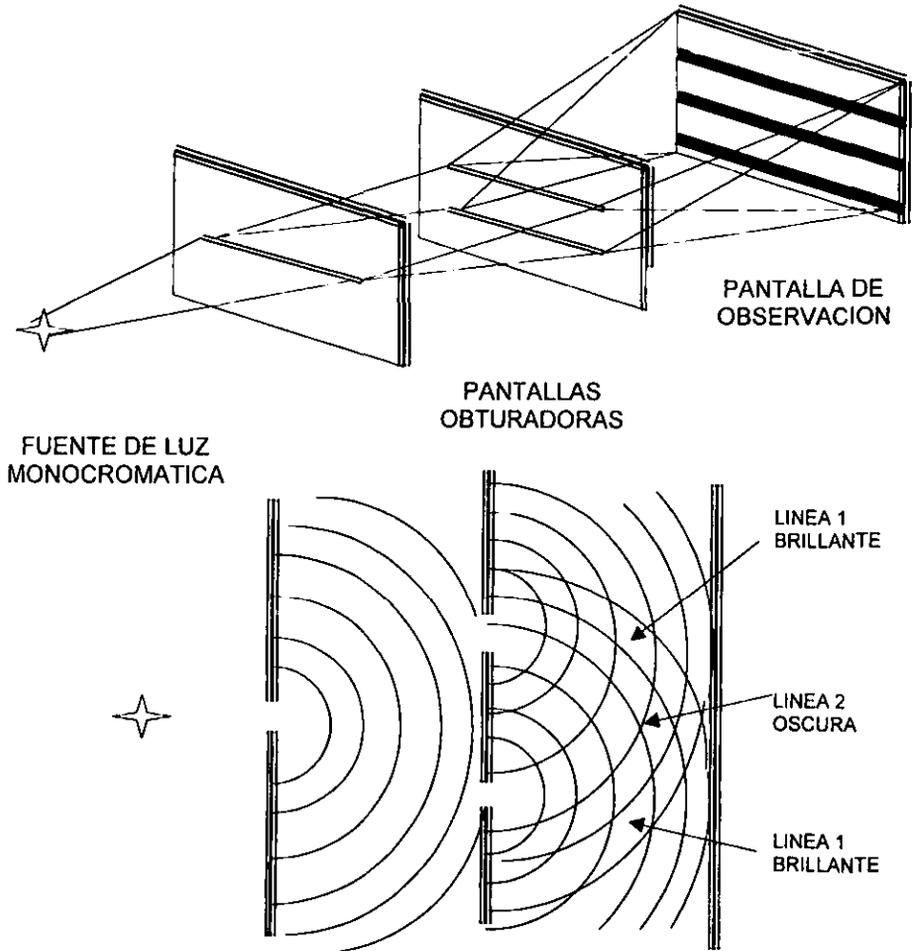


Figura 3.12. a) Experimento de Young, b) Diagrama de interferencia.

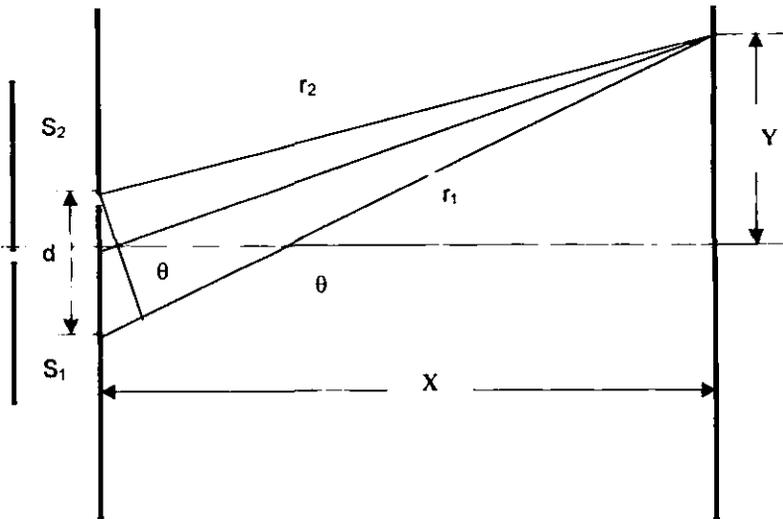
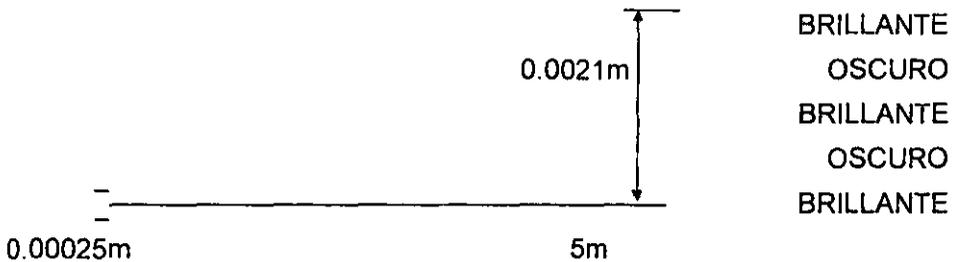


Figura 3.13. Interferencia causada por las desviaciones angulares.

Esto permitió a Young calcular la longitud de onda de la luz. Cuando realizó su experimento, Young utilizó un haz estrecho de luz del sol, y ya que ésta tiene un número infinito de longitudes de onda y cada longitud de onda produce una franja brillante con un determinado ángulo. Las franjas

que Young observó estaban coloreadas, las más cercanas al centro eran azules, mientras las más externas eran rojas.

La pantalla de observación se encontraba a 5 m, y la separación entre las ranuras era de 0.00025 m, la distancia que él midió desde el centro del diagrama de interferencia, a la franja brillante más cercana fue de 0.021 m.



Utilizando la función tangente, tenemos que: $\tan \theta = 0.021/5 = 0.042$,

a partir de la cual obtenemos $\theta = \arctan 0.0042 = 0.24$ grados. Young utilizó este dato para calcular la longitud de onda de la luz:

$$2\lambda = d \sin \theta, \quad \text{de la ecuación (10)}$$

$$\lambda = d \sin \theta / 2 = 0.00025 \sin 0.24 / 2 = 523 \times 10^9 = 523 \text{ nm}$$

Young llegó a la conclusión de que la longitud de onda de la luz era de alrededor de 500 nanómetros, con las longitudes de onda correspondientes al azul un poco más cortas y las correspondientes al rojo un poco mayores.

Hay varios problemas de tipo práctico en el interferómetro de Young: uno de ellos es que las franjas brillantes son de hecho bastante poco brillantes y en segundo lugar, que las líneas son anchas, dificultando la medida de sus centros. Además la fuente luminosa que él utilizó no era monocromática. La distancia donde se coloca la pantalla de observación era muy grande. La utilización de luz láser como fuente luminosa elimina

el problema de las franjas brillantes y su ancho, ya que hace más claro el diagrama de interferencia y si utilizamos una red de difracción se disminuye la distancia a la que tenemos que colocar la pantalla de observación.

La difracción es el aparente curvamiento, para doblar el obstáculo, de la luz cuando pasa por una zona de tamaño comparable a su longitud de onda. Como vimos anteriormente una fuente de luz monocromática, de gran calidad nos la proporciona un láser de helio neón que emite luz roja de una longitud de onda 632.8 nm.

A continuación calcularemos el ángulo de desviación que nos proporciona un láser helio neón utilizando una red de difracción en lugar de la doble ranura propuesta por Young. La red de difracción consta de un gran número de ranuras espaciadas entre si por igual distancia y paralelas entre sí. El efecto de estas múltiples ranuras acentúa y define con mayor precisión cada una de las líneas brillantes.

Las redes de difracción se consiguen con proveedores de equipos ópticos, y tienen entre 600 y 1200 líneas por milímetro, a un costo elevado, existen también otras más baratas fabricadas en plástico, estas redes tienen 527 líneas por milímetro, y para darnos una idea de la distancia que hay entre estas y el experimento de la doble ranura de Young, veamos la separación que tiene esta red entre ranuras:

$$\text{milímetro} = 10^{-3} \text{ m}$$

por tanto:

$$10^{-3} \text{ m/mm} / 527 \text{ líneas/mm} = 1.89 \times 10^{-6} \text{ m/línea}$$

Introduciendo los valores de la longitud de onda del láser y esta separación entre las ranuras, en la ecuación (1) anteriormente vista, tenemos que:

$$N\lambda = d \text{ sen } \theta \quad (11)$$

donde $N = 1$, la posición de la primera franja brillante a partir del centro.

Nos da:

$$\text{sen } \theta = N \lambda / d \quad (12)$$

Sustituyendo valores:

$$\text{sen } \theta = (1)(632.8 \times 10^{-9}) / 1.89 \times 10^{-6} = 0.335$$

$$\text{arcsen } 0.335 = 19 \text{ grados}$$

La desviación angular correspondiente a la difracción de primer orden es de 19 grados, que comparados con los 0.24 grados obtenidos del experimento de Young, nos da una idea de la diferencia entre ambos experimentos.

Existen actualmente otros tipos de interferómetros que se basan en el principio físico y matemático que se describió anteriormente para el interferómetro de Young, que es la división del frente de onda, para causar la interferencia de ondas. Los más comúnmente utilizados son: el de Fresnel de doble espejo, el de Fresnel de doble prisma y el de Lloyd de espejo.

El de Fresnel de doble espejo consiste en dos espejos planos con el frente plateado, inclinados uno con respecto al otro en un pequeño ángulo, en el de Fresnel de doble prisma se emplean dos prismas delgados unidos por sus bases de mayor espesor, cuyo ángulo de inclinación es de aproximadamente 1° y finalmente el de Lloyd, que utiliza una pieza de metal o dieléctrico que sirve como un espejo, la cual refleja una parte del frente de onda cilíndrico.

4. LA HOLOGRAFIA.

La holografía como la fotografía, es una técnica que produce una imagen en una película. El método utilizado para la impresión es completamente distinto. Una fotografía crea una imagen en dos dimensiones del objeto. La tercera dimensión, la profundidad del objeto, queda perdida al exponer la imagen en el plano de la película.

La holografía, por el contrario, produce una imagen llamada holograma, donde queda registrada toda la información visual procedente de la escena tridimensional, incluida la profundidad. Al reproducirlo podremos ver no sólo la escena original en tres dimensiones, sino también cambiar la perspectiva moviendo la cabeza para mirar desde otro ángulo.¹

4.1. HISTORIA DE LA HOLOGRAFIA

El inventor de la holografía fue Dennis Gabor (1900-1981). En 1947, más de diez años antes de que se construyera el primer láser helio neón, Gabor buscaba un método para mejorar la resolución y definición del microscopio electrónico, compensando por medios ópticos las deficiencias de su imagen. Él se propuso realizar esto mediante un proceso de registro fotográfico de imágenes al que llamo holografía, que viene del griego *holos*, que significa completo, pues el registro que se obtiene de la imagen es completo, incluyendo la información tridimensional.

El método ideado por Gabor consistía en dos pasos, el primero de los cuales era el registro, en una placa fotográfica, del patrón de difracción producido por una onda luminosa (o un haz de electrones en el caso del microscopio electrónico) cuando pasa por el objeto cuya imagen se desea formar. El segundo paso era pasar un haz luminoso a través del registro fotográfico, una vez revelado. La luz, al pasar por esta placa, se difractaría

¹ Quizás usted conozca más los hologramas como objetos decorativos y no como instrumentos de medición, aunque para su elaboración se requiere para ambos el mismo equipo

de tal manera que en una pantalla colocada adelante se formaría una imagen del objeto. Gabor no tuvo éxito con su propósito fundamental, pero sí obtuvo un método nuevo e interesante para formar imágenes.

En 1950 Gordon Rogers exploró la técnica de Gabor, obteniendo una idea mucho más clara de los principios ópticos que estaban en juego, en 1952 Ralph Kirkpatrick y los estudiantes, Albert Baez y Hussein El-Sum, se interesaron en la holografía y contribuyeron a ampliar los conocimientos sobre ella. Adolph Lomann aplicó por primera vez en Alemania las técnicas de la comunicación a la holografía. Así los conocimientos sobre holografía avanzaban cada vez más, pero en todos estos el obstáculo principal era la falta de fuentes de luz coherentes suficientemente brillantes.

Finalmente la técnica inventada en 1961 y 1962 por Emmett N. Leith y Juris Upatnieks, consiguió separar estas imágenes y así eliminar el principal problema de la holografía de Gabor, de que no solamente se producía una imagen del objeto deseado sino dos, una real y una virtual que mezcladas entre sí y con la luz producían una imagen muy difusa. Como además ya existía el láser de gas, los resultados obtenidos fueron impresionantes.

4.2 HOLOGRAFIA DE HAZ DIVIDIDO.

La holografía se puede describir en muy pocas palabras como un sistema de fotografía tridimensional, sin el uso de lentes para formar la imagen. En holografía no se registra la imagen del objeto de la misma forma que una fotografía. Lo que se registra es la figura de interferencia generada por un haz de referencia y la luz reflejada por el objeto (haz objeto). La fuente de luz ideal para la holografía es la luz de un láser ya que es: monocroma (de una sola frecuencia) y coherente (frentes de onda en fase).

Para entender los elementos básicos de grabación de un holograma, describiremos la técnica inventada por Emmett N. Leith y Juris Upatnieks que actualmente se conoce como montaje de haz dividido. El método de haz dividido consiste primeramente en dividir un haz de luz láser en dos haces, ambos son dispersados por lentes en un cono de luz, el primero de ellos se dirige para iluminar totalmente el objeto cuya imagen se quiere grabar en el holograma. El segundo se dirige directamente sobre la placa fotográfica, donde se grabara el holograma, y esta se coloca en una posición tal que a ella lleguen la luz que se refleja en el objeto iluminado por el primer haz, así como, la luz del segundo haz directamente, ver Figura 4.1.

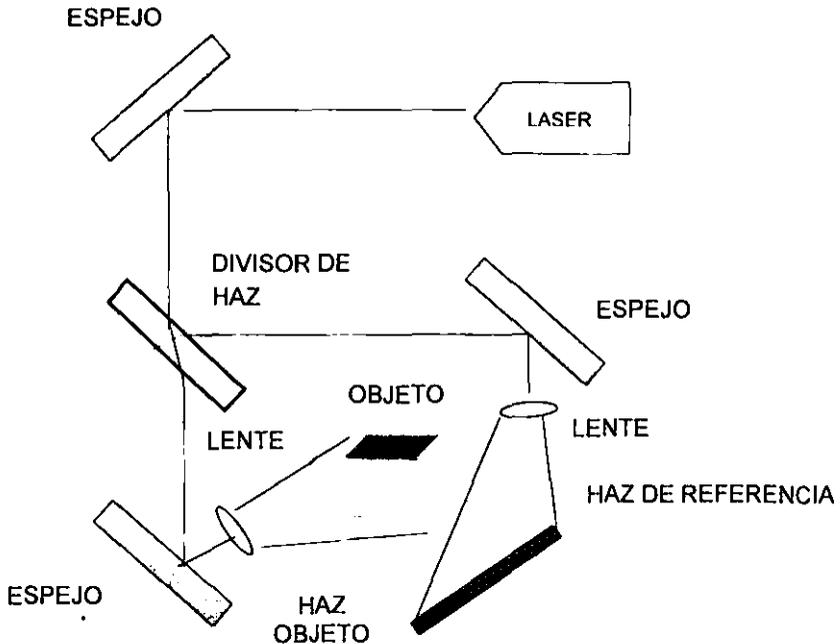


Figura 4.1. Esquema del montaje de grabación de un holograma de haz dividido

Al haz directo que no proviene del objeto se le llama haz de referencia y al otro se le llama haz del objeto. Estos dos haces luminosos interfieren al coincidir sobre la placa fotográfica. La imagen que se obtiene después de revelar la placa es un patrón de franjas de interferencia. Ya revelado el holograma, para reconstruir la imagen se coloca la placa fotográfica que contiene el holograma frente al haz directo del láser, en la posición original donde se colocó para exponerlo, como se ilustra en la figura. 4.2a.

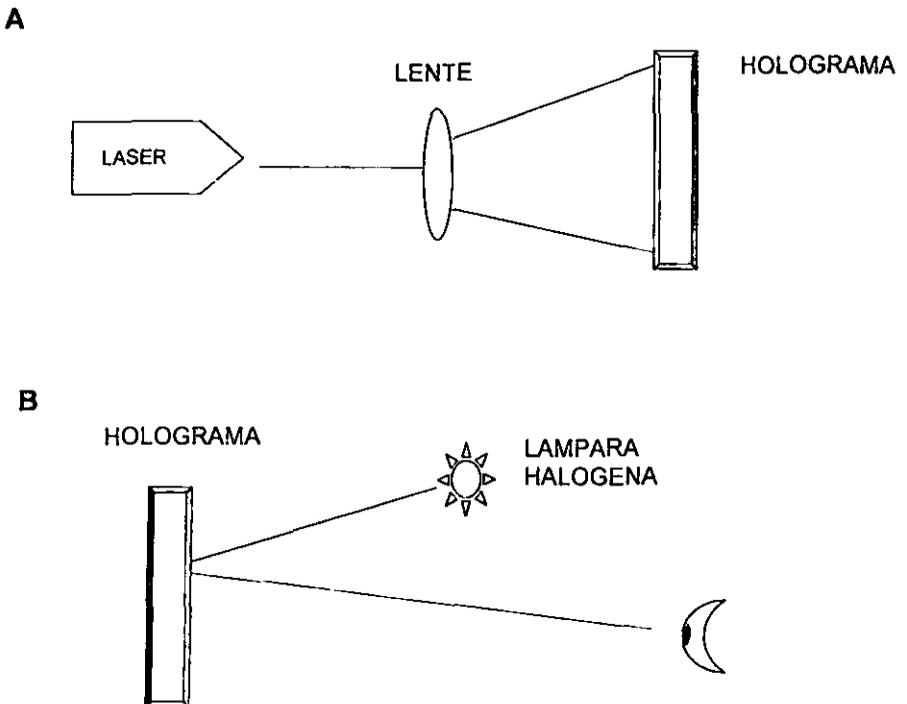


Figura 4.2. Reconstrucción de hologramas: a) de haz dividido b) de reflexión

La luz que llega al holograma es entonces difractada por las franjas impresas en el holograma, generando tres haces luminosos. Uno de los haces es el que pasa directamente sin difractarse, el cual sigue en la dirección del haz iluminador y no forma ninguna imagen.

El segundo haz es difractado y es el que forma una imagen virtual del objeto en la misma posición que al tomar el holograma. El tercer haz también es difractado, pero en la dirección opuesta al haz anterior con respecto al haz directo. Este haz forma una imagen real del objeto. La condición para grabar un holograma es que debe hacerse sobre una mesa estable. La mesa debe ser necesariamente estable, es decir aislada de las vibraciones del piso, a fin de que las franjas de interferencia que forman el holograma no se pierdan.

Estos hologramas son conocidos también como hologramas de Fresnel y son los más simples y también los más reales, pero tienen el problema de que sólo pueden ser observados con la luz de un láser.

4.3. HOLOGRAMAS DE REFLEXIÓN.

Los hologramas de reflexión, inventados por Y.N. Denisyuk en la Unión Soviética, se diferencian de los de Fresnel en que el haz de referencia, a la hora de tomar el holograma, llega por detrás y no por el frente, como se muestra en la figura 4.3. La imagen de este tipo de hologramas tiene la enorme ventaja de que puede ser observada con una lámpara de tungsteno común y corriente. En cambio, durante la toma del holograma se requiere una gran estabilidad y ausencia de vibraciones mayor que con los hologramas de Fresnel. Este tipo de hologramas tienen mucho en común con el método de fotografía a color por medio de capas de interferencia, inventado en Francia en 1891 por Gabriel Lippmann.

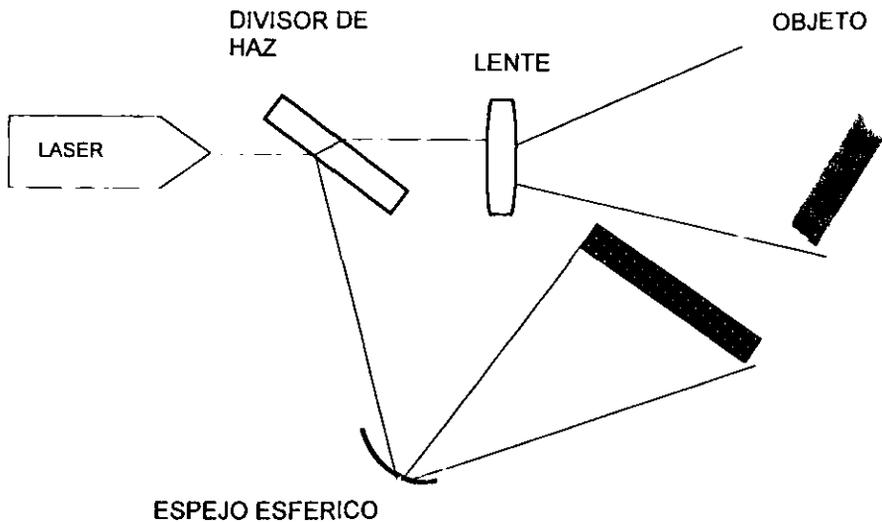


Figura 4.3. Montaje de grabación para un holograma de reflexión

Existen otros tipos de técnicas para hacer hologramas los cuales no se trataran en el presente trabajo por considerar que las dos anteriores cubren las necesidades para comprender la interferometría holográfica, que es una de las técnicas de estudio de la metrología óptica.¹

¹ Iovine John, 1992 es un buen libro para realizar hologramas inclusive contando con materiales de fácil acceso. Si usted desea más información sobre holografía puede suscribirse a una revista como *Holography Workshops Lake Forest*. Il 60045 (1-708) 234-3100

5. APLICACIONES DEL LÁSER EN METROLOGÍA.

Aunque existen muchas aplicaciones del láser en metrología, trataremos en detalle las referentes a sus aplicaciones en las máquinas herramientas, ya que la tendencia actual de los avances de la tecnología del láser permiten contar con nuevas técnicas para el control de los movimientos de éstas, la alineación de sus componentes (guías, mesas, cabezales, etc.), así como de las piezas que en ellas se fabrican. Y de manera breve aquellas aplicaciones que interesan por sus resultados en áreas de interés general, caso específico de la medición de los contaminantes.

5.1.- EFECTO DOPPLER.

Doppler descubrió que cuando una fuente de sonido se aproxima a un observador con una cierta velocidad, la frecuencia del sonido es más alta que cuando la fuente esta en reposo. Fizeau predijo que esto debería también ser observable con una fuente de luz. Este efecto se puede explicar desde un punto de vista de la física clásica y de la relatividad especial, la cual nos da un resultado más preciso.

La explicación relativista del efecto Doppler está íntimamente relacionada con la aberración de la luz. Difiere de la clásica en que mientras que en ella se obtiene un cambio de la frecuencia y en la velocidad de la fase, conservando constante la longitud de onda, en la relativista cambia tanto la longitud de onda como la frecuencia, conservando constante la velocidad de fase. Es un hecho que el efecto Doppler se presenta en forma interesante en la reflexión de las ondas de luz, en un objeto móvil. La longitud de onda reflejada disminuye si el objeto se esta acercando al foco, y aumenta si se aleja de él.

5.2.- INTERFEROMETRIA Y EFECTO DOPPLER.

Cuando se hace un cambio en la diferencia de camino óptico en un interferómetro de dos haces, por ejemplo en un interferómetro de Michelson, las franjas se desplazan. Podemos interpretar este desplazamiento de las franjas imaginándonos que al mover uno de los espejos del interferómetro, al frente de onda de ese espejo se le suma la mitad de la velocidad del espejo. Si éste se mueve con una velocidad constante, la diferencia de camino óptico irá cambiando debido a esta diferencia de velocidades en el frente de onda. Si el cambio en el camino óptico es ΔDCO , el desplazamiento será de N franjas según la relación:

$$\Delta DCO = N\lambda \quad (13)$$

Sin embargo, desde el punto de vista relativista este modelo presenta el inconveniente de que no es admisible pensar que la velocidad de fase de uno de los haces aumente a un valor mayor que c , debido al movimiento de alguno de los espejos. Lo correcto es que, tanto la longitud de onda como la frecuencia cambian debido al efecto Doppler, y por lo tanto este cambio en la frecuencia estará dado por:

$$\Delta v/v = u/c \quad (14)$$

donde v es la velocidad con que se mueve la imagen virtual de la fuente luminosa, debido al movimiento del espejo. Por lo tanto, los dos haces que interfieren se combinan para formar un haz senoidalmente modulado, cuya modulación tiene un periodo T dado por:

$$T = 1/\Delta v = c/uv = \lambda u \quad (15)$$

Esto demuestra que durante un periodo de modulación, la imagen de la fuente luminosa recorre una distancia igual a la longitud de onda. Esto explica el corrimiento de las franjas de interferencia

5.2.1.- LA ESCALA LÁSER DOPPLER.¹

Una aplicación práctica de utilizar el efecto Doppler en un interferómetro, es la posibilidad de obtener datos de gran validez referentes a maquinarias de precisión, como las de control numérico, en las que se requiere de una rigurosa precisión, del movimiento o desplazamiento que realizan sus cabezales, con una exactitud de micrómetros.

Un modelo característico de interferómetro es el fabricado por la compañía Hewlet Packard bajo la denominación de "modelo 5500A", y su funcionamiento es el siguiente: se tiene un láser con dos frecuencias ópticas F1 y F2 que se alinean, después de su dilatación, por medio de un cristal amplificador llamado Galileo. Seguidamente se introduce el rayo láser en un interferómetro, en donde por medio de fibras ópticas se aísla F2 para que nos sirva de referencia, mientras que F1 (de medición) pasa al retroreflector móvil dentro del interferómetro.

Si se desplaza el retroreflector móvil, F1 puede aumentar o disminuir en frecuencia, siguiendo el sentido de movimiento, de acuerdo a lo visto anteriormente por el efecto Doppler. El haz de referencia F2 y el de medición F1, modulado por el efecto indicado, se combinan pasando a un heterodino (donde las frecuencias de ambas ondas operan para obtener una frecuencia que posibilite su manejo). La frecuencia resultante se conoce bajo el nombre de señal Doppler, ubicándose en una limitada gama, que en el caso del interferómetro de Hewlett Packard es de 1.8 Mhz. (Figura .5.1)

En este interferómetro, una cantidad reducida de luz integrada por F1 y F2 se aparta del haz principal, mezclándose para proporcionar una señal de referencia (F1 menos F2) de frecuencia constante que es

¹ Juan Tur Terraza, 1987 p-45

aproximadamente de 1.8 Mhz. El sentido del movimiento se determina mediante la detención de la frecuencia Doppler.

La valoración de esta frecuencia, ya sea superior o inferior a la tomada como patrón, constituye una modalidad contraria a lo que sucede en interferómetros acoplados en corriente continua, que requieren una señal cuadrática para determinar el sentido espectral.

La señal Doppler, conjuntamente con la tomada como referencia, se acoplan de manera alterna a los circuitos protectores por medio de etapas preamplificadoras, ya que se modifica su frecuencia en sentido cuadrático para ampliar su resolución. De igual manera, los ciclos de cada una de las señales se cuentan separadamente de manera opuesta a lo que sucede en los circuitos interferométricos convencionales, que hacen uso de un contador reversible para determinar el número de franjas.

Un circuito integrado determina de manera constante, las diferencias existentes en los registros de la frecuencia de referencia y los que corresponden a la distancia recorrida por el retroreflector móvil, expresados en la cuarta parte de longitud de la onda de la luz. Esta cantidad se compensa, teniendo en cuenta los efectos de la temperatura y de la presión atmosférica, sobre la velocidad de la luz en el aire, considerándose el resultado en milímetros. Estos cálculos son realizados 200 veces por segundo por un circuito calculador integrado al instrumento.

Para determinar el parámetro de velocidad, la información de distancia se conserva en un registro de memoria, obteniéndose hasta diez veces por segundo de la información que también se conserva registrada, permitiendo valorar en cualquier momento la velocidad y distancia en el curso de la medición.

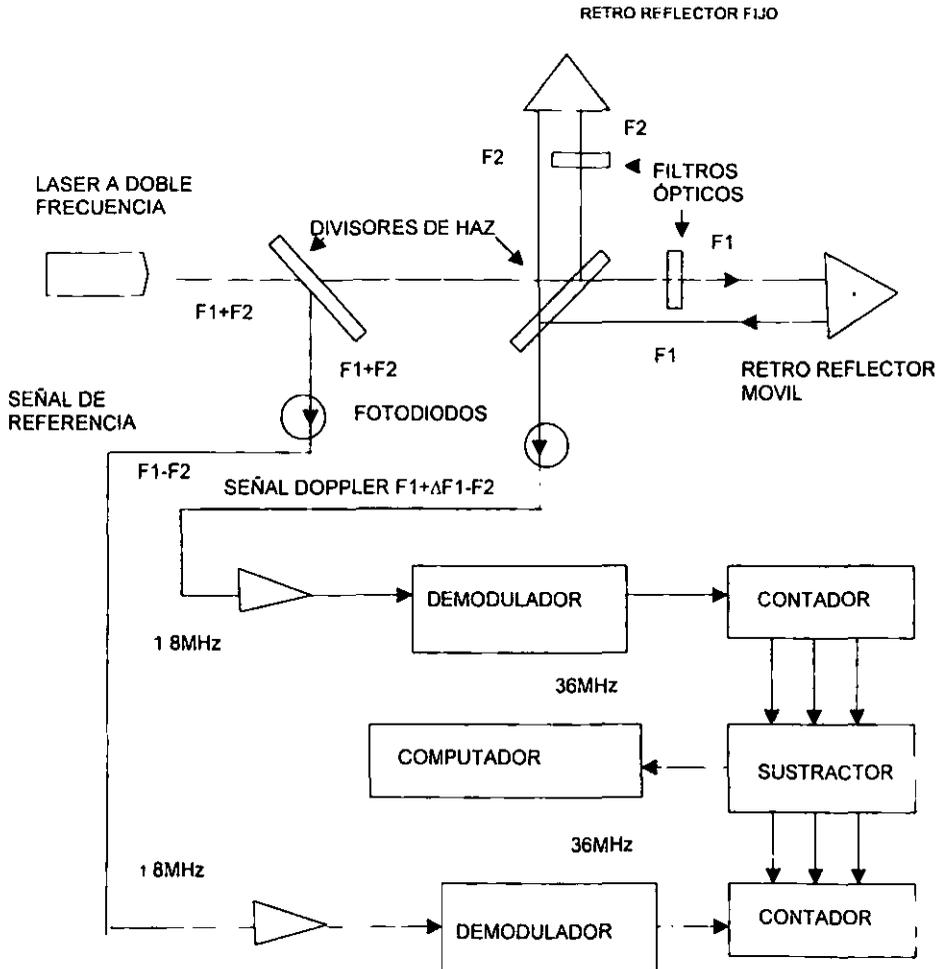


Figura 5.1. Esquema de la escala láser Doppler

La luz reflejada de una partícula en movimiento, tiene un cambio en su frecuencia en una cantidad proporcional al componente de velocidad a lo largo de la línea que divide el ángulo de iluminación y el de observación. Este cambio en la frecuencia puede ser detectado por el batido producido por la luz reflejada y un rayo de referencia o por los dos rayos de iluminación reflejados, que inciden en diferentes ángulos. La frecuencia inicial se ajusta, para poder ser usada para distinguir entre positivo y negativo el flujo de la dirección. Esta técnica es empleada extensamente en la medición de velocidades en líquidos.

5.2.2.- MEDIDOR DE FLUJO A LÁSER.¹

Casi todos los problemas prácticos con fluidos en ingeniería están relacionados con una medida precisa del flujo. Vamos a concentrar nuestra atención ahora únicamente a las medidas de velocidad o corriente. Por ejemplo: en los conductos que transportan sustancias químicas que se encuentran en estado fluido, como es el petróleo que debe transportarse a una refinería a través de un oleoducto y/o los gases en la industria química donde el gasto ó cantidad de volumen por unidad de tiempo debe ser controlado con gran precisión.

El instrumento tradicional que se utiliza para la medición de la velocidad de los gases es el medidor de flujo y su funcionamiento se basa en el método sencillo de estimación simple, pero efectivo, que es la introducción de partículas en la corriente de la cual se requiere determinar su velocidad, y únicamente se debe comprobar que las partículas realmente se mueven con el flujo.

¹ Drain. L, E, 1980 p. 66.

La aplicación del láser para realizar estas mediciones resulta muy interesante, dado que el haz láser por su gran coherencia no ocasiona ningún fenómeno perturbador. En este caso el láser proporciona un haz de luz muy intensa y monocromática que pasa a través del fluido. Cuando la luz es dispersada por una partícula arrastrada por el flujo, un observador fijo a tierra detectará una variación en la frecuencia de la luz dispersada respecto a la original, por el efecto Doppler. La variación Δf es proporcional a la velocidad de la partícula.

La Figura 5.2 muestra la disposición común de doble haz de este medidor de flujo. La óptica de emisión, es un dispositivo que divide al láser en dos haces y que permite se crucen después con un ángulo θ ; la intersección, forma un elipsoide de unos 0.5 mm de largo y 0.1 mm de diámetro y es el volumen de medida o resolución espacial, es un elipsoide de unos 0.5mm de largo y 0.1mm de diámetro, y las partículas que pasan por esta intersección dispersan la luz en dos haces; la luz dispersada pasa, a través de la óptica de recepción, a un fotodetector que convierte la luz en señal eléctrica. Un analizador de señales convierte la frecuencia eléctrica en voltaje que puede ser presentando en un indicador o almacenado en un microprocesador. Si λ es la longitud de onda del láser, la velocidad medida viene dada por:

$$V = \lambda \Delta f / 2 \sin(\theta/2)$$

Utilizando más de un fotodetector o con otros modos de operación, se puede medir más de una componente de la velocidad. Con este sistema se puede medir la velocidad de líquidos y gases siempre que haya partículas en el flujo. En los líquidos normales las impurezas sirven como partículas dispersantes, pero en los gases deben ser sembradas. Las partículas pueden ser tan pequeñas como la longitud de onda de la luz. El tubo donde circula el flujo debe ser transparente para permitir el paso de la luz.

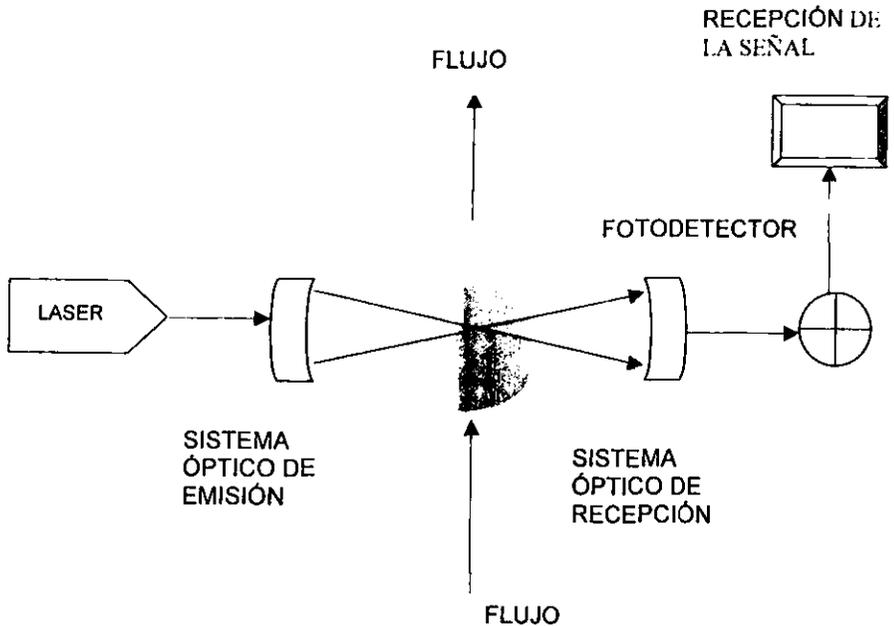


Figura 5.2. Disposición común de doble haz

Posteriormente se ha llegado a un segundo montaje, algo más complicado, en el que se crean, a partir de sendas fuentes láser, dos haces independientes que coinciden en el punto de medición, colocando el fotodetector bien sea en uno, en otro de los trayectos o en el lugar donde se reúnen.

En el primer caso, el ajuste se realiza automáticamente, debido a que el receptor recibe directamente al haz, pero en el segundo caso, la frecuencia de batido ya no depende de la disposición del fotodetector, poniendo de manifiesto que no se necesita ninguna actuación manual en el

transcurso de las pruebas. En la Figura 5.3 y 5.4 se muestra algunas variantes de tal disposición.

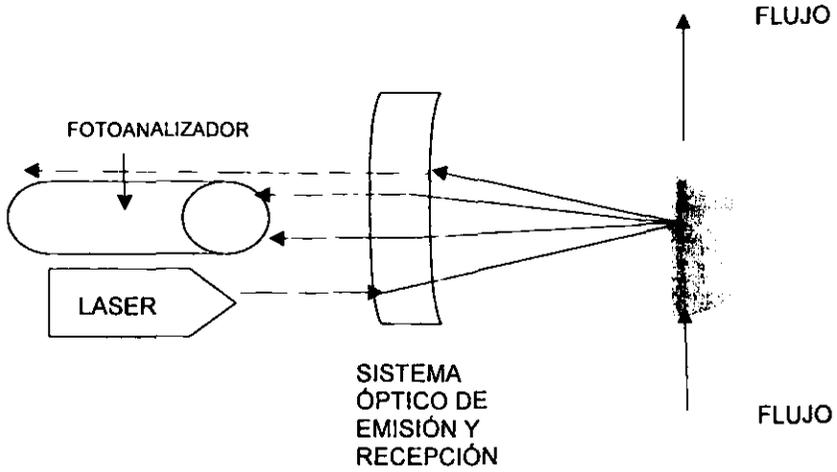


Figura 5.3. Disposición derivada del método Doppler en el que se aplica la luz difundida hacia la parte posterior.

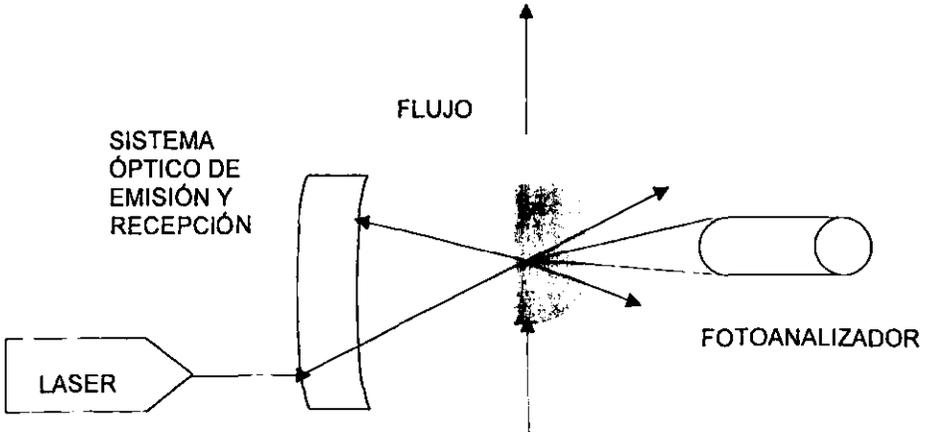


Figura 5.4. La fuente luminosa se difunde hacia la parte anterior.

Otra aplicación industrial del efecto Doppler utilizando la interferometría láser, es la determinación de la velocidad de un material sólido en movimiento como por ejemplo: en un tren de laminación de acero, en donde se requiere conocer la velocidad de desplazamiento del material para controlar la longitud de corte de las planchas. En la Figura 5.6 se muestra de manera esquemática un velocímetro desarrollado para este propósito. En ella se observan, dos rayos ortogonalmente polarizados producidos por un prisma Wollaston, que son enfocados sobre la superficie a medir por unas lentes y espejos con un ángulo de incidencia igual a $\pm\theta$.¹

La luz difundida es reunida por lentes en su regreso a un divisor de haz polarizado orientado a 45° , de tal manera que cada mitad del rayo polarizado se dirige a los dos detectores. Una desventaja de este dispositivo es que la frecuencia de la señal de pulsación en los dos detectores depende de la dirección de reflejo y de las variaciones debido a la estructura de la superficie, por lo que un defecto visible ocasionaría una medición incorrecta.

Como vimos anteriormente podemos medir la velocidad de paso de un sólido reflejante, en tanto se halle en el plano perpendicular al haz del emisor. Por ello es aplicable a las medidas de tipo transitorio en máquinas giratorias (arranque, detención, cambio de velocidad), medidas de aceleración, así como para el mando y control de velocidad de traslación (en máquinas automáticas, robots, etc.).

¹ Drain L. E. p. 221

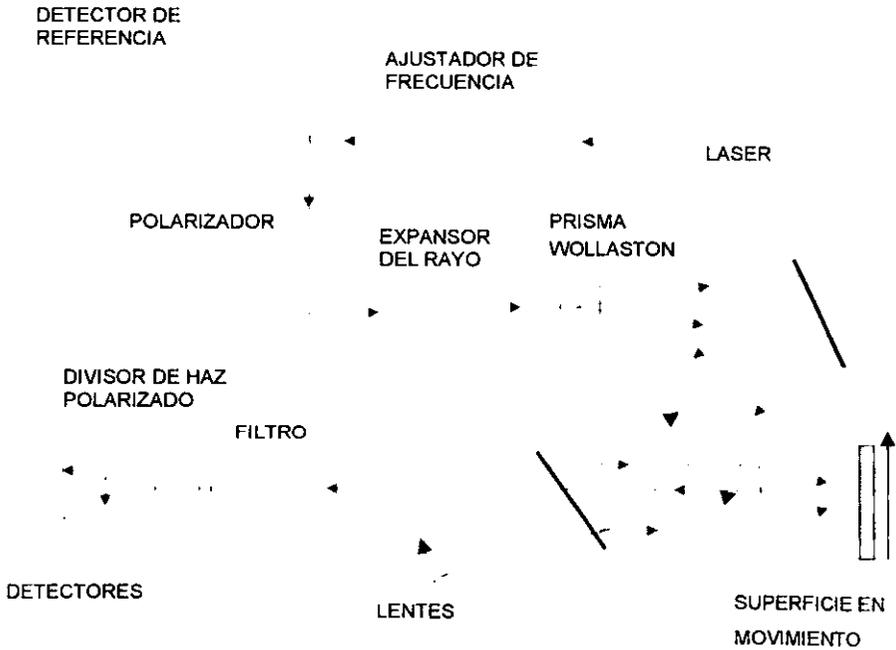


Figura 5.6. interferómetro que utiliza el efecto Laser Doppler para la medición de la velocidad de superficies en movimiento.

5.3.-CONSIDERACIONES EN LA PRECISIÓN EN LOS INTERFEROMETROS.¹

Como todas las mediciones de la metrología dimensional, la precisión global de un interferómetro a láser se determina por la suma de todas las variables que influyen en la medida, que van desde los errores ocasionados por el ser humano, otros por las condiciones del medio ambiente y la instalación del equipo en si mismo. Todos estos errores pueden ser agrupados en fijos y proporcionales. Los proporcionales se especifican en partes por millón (ppm) y son el resultado de los errores de medición, es decir se producen en la distancia medida por el interferómetro. Los fijos son valores establecidos y son el resultado de la medición y no de la distancia medida. Se establecen en unidades de longitud como nanómetros y micrómetros. La siguiente relación muestra todos los errores que se presentan.

Intrínsecos:

1. Precisión de la longitud de onda del láser
2. Resolución de la medición
3. No linealidad de la óptica

Del medio ambiente:

4. Compensación atmosférica
5. Cambios de las medidas del material por la temperatura
6. Deriva de los equipos ópticos por la temperatura

Instalación:

7. Error en la precisión del camino óptico
8. Error coseno
9. Error Abbé

¹ SPIE, proceedings, V. 816, 1987.

Si observamos esta lista la mayoría de los errores dependen de los efectos del medio ambiente y la instalación del interferómetro. Por eso de ningún modo se debe dejar de ser cuidadoso en la instalación y manejo de un interferómetro a láser ya que esto es muy importante para obtener mediciones de gran precisión.

5.3.1.- PRECISIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA DEL LÁSER.

La precisión de las mediciones interferométricas se basan fundamentalmente en la precisión de la longitud de onda del láser que se emplea. Como un interferómetro genera franjas de interferencia que se relacionan con el desplazamiento, cada franja generada es equivalente a una fracción de la longitud de onda del láser.

En todos los interferómetros, el láser que se utilice, debe tener alguna clase de frecuencia propia con objeto de mantener la precisión y la facilidad de repetir la longitud de onda, esta se especifica en partes por millón de la frecuencia del láser. Por lo que la variación de esta precisión se traduce en forma directamente proporcionalmente al error, de acuerdo con la distancia medida. La fuente láser debe mantener durante su tiempo de vida una precisión de +/- 1 ppm de acuerdo con el standard y de +/- 02 ppm con calibración opcional.

5.3.2. RESOLUCION DE LA MEDICION.

Esta se debe principalmente a la incertidumbre que se presente en el conteo electrónico de las franjas. La resolución básica en un interferómetro es de $\lambda/4$ (cuando se utiliza un retroreflector cubico) y puede extenderse electrónicamente más allá de $\lambda/4$.

En el interferómetro hay dos resoluciones de las mediciones, dependiendo del tipo de óptica utilizada. Con el empleo de retroreflectores cúbicos, su valor es de +/- 10 nanómetros y con el empleo de espejos planos es de +/- 5 nanómetros.

5.3.3. ERROR DE LA NO LINEALIDAD DE LA ÓPTICA.

Este error se presenta debido al efecto de no estar perfectamente separados los dos componentes de polarización (verticales y horizontales) en el interferómetro. Esta no linealidad se presenta como resultado de la filtración óptica de un componente en otro. Este error es periódico, con un período de una longitud de onda del camino óptico o 360 grados de desfase entre las frecuencias de referencia y de medición. Este deslizamiento óptico afecta los sistemas interferométricos, sea que trabajen con frecuencia sencilla o doble.

El deslizamiento afecta los componentes ópticos por dos razones: la primera, la luz que sale de un láser no es perfectamente polarizada, si no es ligeramente esférica. Segundo los interferómetros mismos no separan perfectamente los componentes ópticos.

En la Figura 5.7 se muestra el error por la no linealidad de la óptica contra el cambio en el camino óptico para el caso de peores condiciones, cuando se usa un interferómetro lineal. El error de fase pico a pico es de 5.4 grados que corresponden a +/-4.8 nanómetros de la distancia medida o +/-2.4 nanómetros de la mitad de la distancia recorrida por la luz láser del retroreflector al interferómetro.

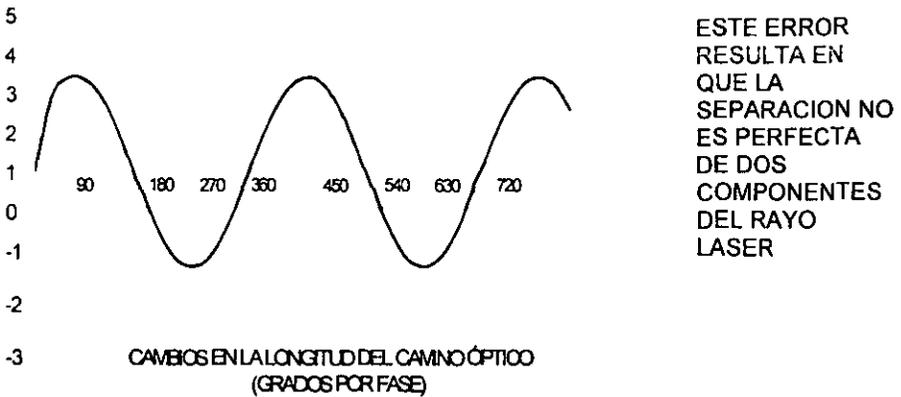


Fig. 5.7. Error por no linealidad

5.3.4 ERROR POR COMPENSACION ATMOSFÉRICA.

Este error es el de más importancia dentro de todos los errores ya que depende de las condiciones ambientales y del tipo de corrección o compensación utilizado. Es común especificar la longitud de onda de un láser en el vacío, como λ_v , esta longitud de onda es constante, pero en condiciones ambientales depende del índice de refracción ocasionado por estas. Puesto que la mayoría de los interferómetros operan en condiciones ambientales, es necesario corregir la diferencia entre λ_v y la longitud de onda en el aire λ_a . Este índice de refracción, n , del aire es la relación de λ_v y λ_a por lo que:

$$n = \lambda_v / \lambda_a \quad (16)$$

Los cambios en la temperatura, presión, humedad y contaminantes del aire ocasionan cambios en el índice de refracción, lo que hace necesario tenerlos en cuenta para las mediciones interferométricas. Si no se consideran las correcciones necesarias, la precisión de las mediciones puede ser incierta. Por ejemplo, considerando una composición homogénea del aire, un error de una parte por millón resulta de las siguientes condiciones:

por cada grado centígrado en el cambio de la temperatura del aire.

por cada 2.5 milímetros de mercurio en la presión del aire

por cada 8% en humedad relativa del aire

La corrección de longitud de onda o número de compensación (WCN) es el inverso del índice de refracción, por lo que:

$$\text{WCN} = \lambda_a / \lambda_v \quad (17)$$

Este número: es el de longitudes de onda que, desplaza el espejo móvil del interferómetro, el actual desplazamiento puede ser determinado por la siguiente expresión:

$$\text{Actual desplazamiento} = (\text{longitudes de onda contadas por el movimiento}) \times \text{WCN} \times \lambda_v \quad (18)$$

Esta compensación de la longitud de onda puede ser derivada del índice de refracción utilizando un refractómetro o por datos empíricos.

La magnitud del error por compensación atmosférica depende del tipo de medio ambiente, así como de los cambios que en este se dan durante la medición interferométrica por lo que la precisión del método depende de la compensación usada. Este error se especifica en partes por millón y es proporcional.

Existen interferómetros que utilizan sensores para medir la temperatura, presión y humedad del aire y calculan la compensación con una precisión de +/-1.4 ppm.

5.3.5.ERROR POR CAMBIOS DE LA MEDIDA DEL MATERIAL VS LA TEMPERATURA.

Todos los materiales sufren una expansión o contracción por los cambios de temperatura, por esto todas las mediciones precisas se refieren a la temperatura standard de 20 grados centígrados. Sin embargo la relación entre esta temperatura y el objeto a medir (durante el tiempo que dura la medición), así como el coeficiente de expansión térmica, del material debe ser conocida.

La corrección en la medida del objeto puede ser calculado utilizando:

$$L1 = L2(1 - \alpha\Delta t) \quad (19)$$

donde:

α = coeficiente lineal de expansión térmica

$\Delta t = T - 20 \text{ C}$

L1 = Longitud a 20 C

L2 = Longitud a la temperatura T

La magnitud de este error potencial es función de la temperatura del material con respecto a la temperatura standard. Generalmente se publican los coeficientes de expansión térmica con una precisión de +/- 10%. Se recomienda contar con sensores que midan con precisión de hasta 0.1 °C. Este error es también proporcional y se especifica en partes por millón.

5.3.6 ERROR POR LA DERIVA TÉRMICA DE LOS EQUIPOS ÓPTICOS

Algunos componentes ópticos en un interferómetro a láser, contribuyen a la incertidumbre en la medición por el cambio de la temperatura del ambiente en que esta se desarrolla, ya que provoca un cambio en la longitud del camino óptico, y este cambio modifica la distancia medida.

Este cambio en la longitud del camino óptico es causado por los dos componentes del rayo láser (polarización horizontal y vertical), porque no pasan en igual cantidad a través de divisor haz. Como se muestra en la Figura 5.8. En un interferómetro con espejo plano, el componente horizontal del rayo f_h viaja a través de más vidrio que el componente vertical f_v . El componente f_h pasa doble vez en varias ocasiones en el divisor del haz, así como f_v , pero f_h realiza dos veces su paso a través de la lámina de retardo de $\frac{1}{4}$ de onda, cuyo objetivo es retardar la polarización $\frac{1}{4}$ de onda con respecto a la otra polarización.

Cuando existe un cambio en la temperatura, el tamaño de el elemento óptico cambia y también el índice de refracción, como vimos anteriormente y ambos cambios contribuyen al error en la medición. Este tipo de interferómetros tiene un típico error de deriva de 0.5 micrómetros por grado centígrado, este es solo función de la temperatura y no de la distancia medida.

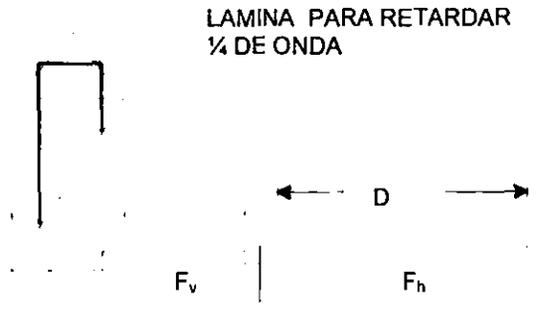


Figura 5.8. Interferómetro convencional de espejos planos.

5.3.7. ERROR EN LA PRECISIÓN DEL CAMINO ÓPTICO.

Este error se define como la diferencia de la longitud del camino óptico de referencia y la medición de los componentes del rayo láser, cuando la posición del espejo móvil se toma como punto cero. La desigualdad de los componentes del rayo puede producir diferencias en el camino óptico que no será compensado adecuadamente, durante el cambio de las condiciones ambientales.

En la figura 5.9 vemos los diferentes caminos ópticos en el caso de un interferómetro convencional. El camino óptico es designado por D . En esta figura el componente de referencia es f_v , y el componente de medición es f_h . El componente f_h recorre más camino que el componente f_v , en una cantidad igual a la distancia D . Si ahora movemos el espejo móvil una distancia L , esta nueva posición lo mantenemos ahí. Ya que el interferómetro únicamente cuenta el número de franjas que se desplazó el espejo móvil, el sistema no corrige la posición inicial de D y el resultado es un aparente desvío en la posición cero de la máquina. Esta desviación es el error por la falta de precisión del camino óptico y ocurre cuando hay un cambio en las condiciones ambientales durante la medición.

El error por precisión del camino óptico se representa como:

$$\text{error por precisión} = \text{Distancia del camino óptico} \times \Delta WCN \quad (20)$$

donde:

$$\Delta WCN = \text{cambio del número de compensación por longitud de onda durante el tiempo que tarda la medida.} \quad (21)$$

Este error se puede minimizar en la mayoría de las aplicaciones reduciendo la distancia D , como se muestra en la figura, donde el interferómetro se localiza en el punto cero de la máquina. Si esto no es posible, es necesario que la corrección por la distancia D se aplique al software por un controlador. La correcta información se representa por:

5. APLICACIONES DEL LASER EN METROLOGIA

Posición = ((franja acumuladas + franjas por el camino óptico) $\times \lambda_w \times$ WCN1) - Camino óptico de la distancia medida. (22)

El número de franjas acumuladas es la lectura que nos da el software del controlador. Las franjas por el camino óptico es la distancia compensada (usando el numero inicial de compensación) y WCN1 es el numero de compensación al final de la medición.

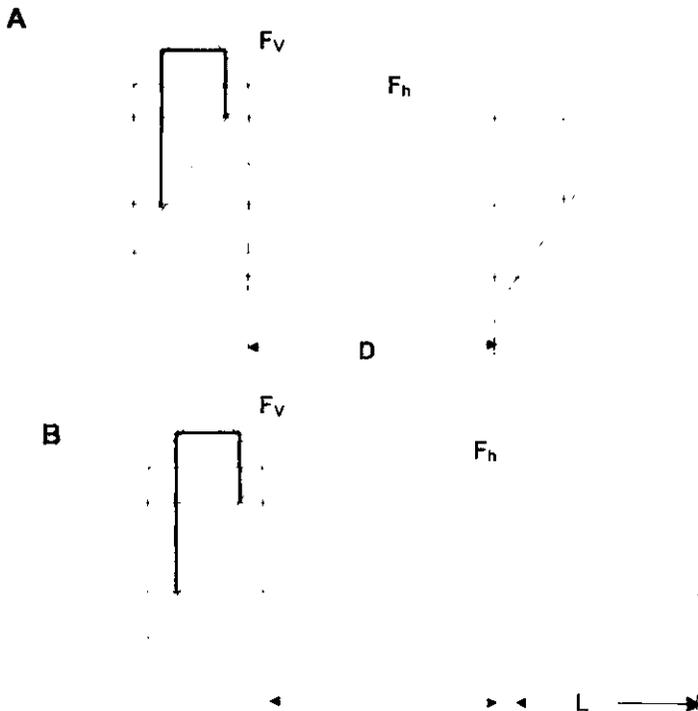


Figura 5.9. Error por la precisión del camino óptico

Aún con esta corrección habrá un error debido a la facilidad de repetir, en la determinación del número de compensación. En este caso el error esta dado por:

Error = Camino óptico de la distancia medida x numero de compensación (23)

que se repite.

Este error puede ser ignorado en mediciones cuya tolerancia sea de +/- 0.5 mm. Ambos valores, el error y la compensación están especificados en ppm, el error medido resultante es una función del error del camino óptico y de la distancia medida por el interferómetro.

Si se utiliza un rastreador de longitud de onda y el software de corrección este error es típicamente menor a +/-14 ppm x la distancia del camino óptico.

5.3.8 ERROR COSENO.

La falta de alineación del eje de medida respecto al eje mecánico resulta en un error de medición. Este recibe el nombre de error coseno porque su magnitud es proporcional al coseno del ángulo de desviación entre ambos ejes.

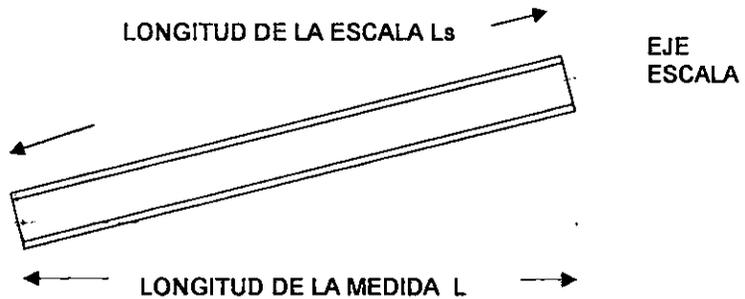
La figura 5.10 ilustra el error coseno usando una regla como escala, con el ángulo de θ entre la línea del rayo láser y el eje de medición. La longitud L esta dada por la escala, por lo que:

$$L = L_s \cos \theta \quad (24)$$

El error coseno es un término proporcional y es función directa de la distancia medida por el interferómetro. Por lo tanto el error coseno puede ser representado, en partes por millón como:

$$\text{Error coseno en ppm} = (1 - \cos \theta) \times 10^6 \quad (25)$$

Y puede ser eliminado haciendo que el rayo láser sea paralelo al eje del movimiento. Cuidando la alineación del rayo láser y la óptica del interferómetro se puede minimizar la posibilidad de este error.



$$L = L_s \cos \theta, \Delta L/L = +\theta^2/2 \quad (26)$$

Figura 5.10. Error coseno

5.3.9 ERROR ABBE

“En términos simples ocurre cuando el punto de medición de interés se desplaza de la posición actual por la desviación angular de la escala de medición. El error Abbé indica una medición más corta ó más larga dependiendo de esta desviación angular. Este puede ser representado en términos fijos por:

$$\text{error Abbé} = \text{desviación de la distancia (Ao)} \times \tan \theta \quad (27)$$

En la figura 5.11a, el eje de medición coincide con el centro de alineación del tornillo sinfin; se muestra el desplazamiento (Abbé) error E debido a la desviación angular del espejo móvil. En la figura 5.11b se observa el caso para el cual el error Abbé no existe. Una regla general de calcular aproximadamente este error es que por cada arco segundo de desviación angular, el error introducido es aproximadamente 0.1 micrómetros por cada 20 milímetros de desviación.

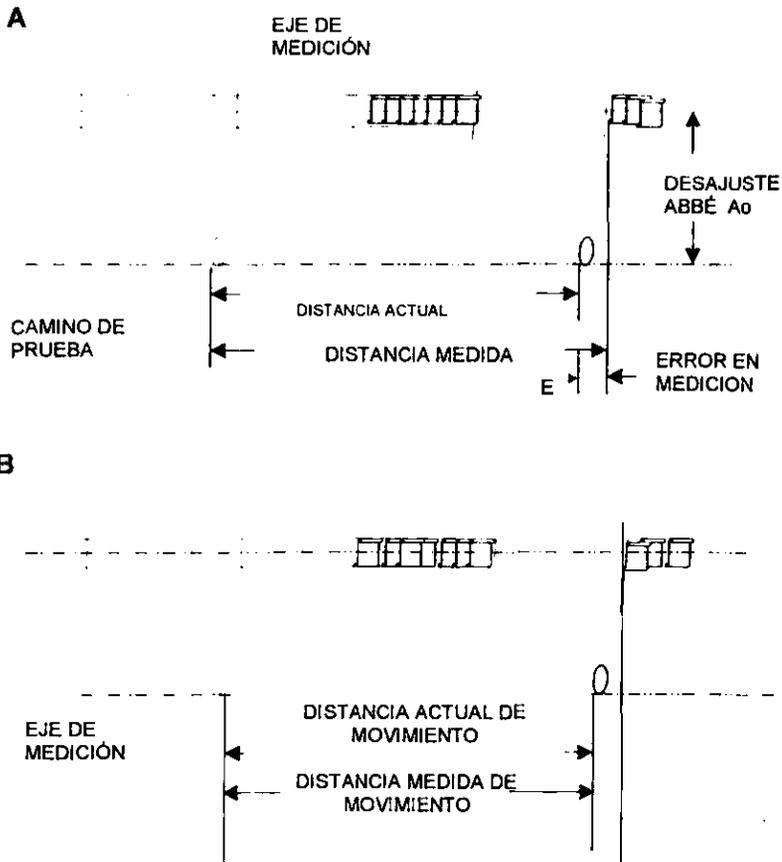


Figura 5.11. Error Abbe

5.3.10. DETERMINACION DE LA PRECISIÓN.

La precisión de un interferómetro se determina por la suma de todos los componentes que han sido descritos. Estos términos se suman directamente para cada caso particular. Lo más adecuado en precisión es calcularla tomando el vector individual de cada componente.

PRECISIÓN DEL SISTEMA

=

Temios
proporcionales
(ejem: partes
por millon)

precisión del la longitud de onda del láser

+

Compensación atmosférica

+

cambios por temperatura

+

coseno error

+

error por diferencia de camino óptico

+

resolución en la medición

+

óptica no lineal

+

desviación de los equipos ópticos por la temperatura.

+

Abbé error

Temios
fijos
(ejem:
nanometros,
micrometros,etc.)

5.4. INTERFEROMETRIA HOLOGRAFICA.¹

La interferometria y la holografía son dos técnicas que tienen puntos de semejanza, ya que la única diferencia entre ellos es que la holografía registra los frentes de onda, en tanto que la interferometría los analiza para apreciar las deformaciones mediante sistemas interferométricos a partir de hologramas.

Si realizamos un holograma de cualquier objeto, una vez registrado en una placa fotográfica, y ya revelada la colocamos exactamente en su posición original, reconstruimos el montaje inicial adoptado para la obtención del holograma, iluminando la imagen holográfica y haciendo interferir la luz difundida por el haz de referencia, si el montaje no ha experimentado alteración de ninguna clase, se observa la imagen reconstruida a través del holograma, sin apreciar ninguna modificación, pero si el objeto ha sufrido alguna deformación por muy ligera que esta sea, se originan franjas de interferencia, y entonces se utiliza la técnica de interferometría holográfica a base de exposición simple.

Se alcanzan mejores resultados actuando de otra forma: sobre la misma placa se impresionan dos hologramas tomados con una diferencia de tiempo sobre la misma placa, una vez revelada solo aparecerán franjas de interferencia en el caso de que el objeto analizado haya experimentado algún cambio, bien sea en su forma o posición.

¹ SPIE Proceedings, v816, 1987 p 71

5.4.1. HOLOGRAFIA EN LAS MAQUINAS HERRAMIENTAS.

La reducción de vibraciones es una de las más importantes tareas para el diseño y mantenimiento de la estructura de las maquinas herramientas. Mientras se incrementa la demanda de mayores velocidades de corte y profundidad con el fin de reducir el tiempo de maquinado, es importante el estudio de las vibraciones a las que esta sujeta la estructura o bancada, es aquí donde la interferometria holografica es empleada como uno de los métodos más efectivos para identificar las vibraciones características de maquinaria.

Un láser de onda continua en interferometria holográfica ofrece grandes beneficios por sobre otros, ya que nos muestra las amplitudes de vibraciones y las franjas de interferencia, para una mejor interpretación de los modos de vibración permitiendo además el tiempo real en las mediciones. Es necesario sin embargo, contar con un lugar de aislamiento de las vibraciones no deseadas, donde se colocarán los sistemas ópticos y el objeto de prueba, limitando las medidas de los objetos a ser probados en alrededor de 1.5 m en diámetro.

Una manera de resolver este problema es realizarlo en una caverna donde el material sea parecido al granito, ya que ha demostrado ser superior su aislamiento de las vibraciones que otras estructuras construidas para tal fin.

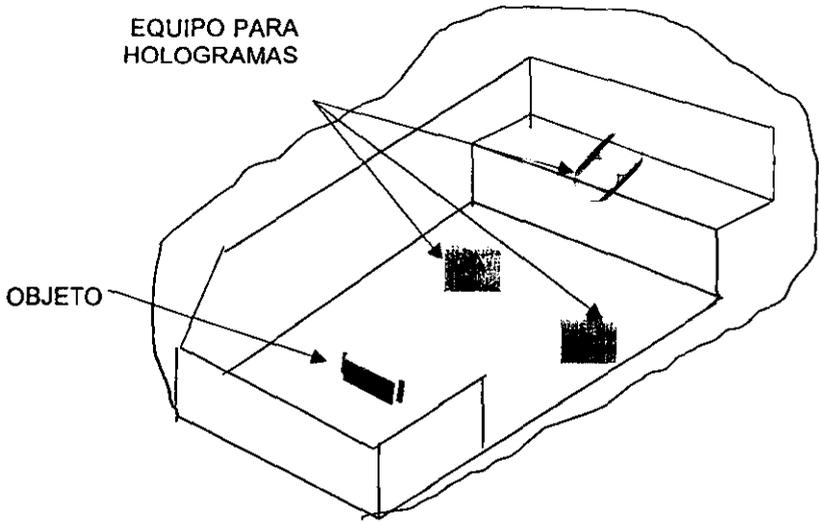


Figura 5.12. Laboratorio en caverna para medición de vibraciones

5. APLICACIONES DEL LASER EN METROLOGÍA

En los Estados Unidos existe un laboratorio para realizar estas pruebas, el cual fue construido en una caverna localizada en una cantera de piedra, con paredes de hasta 300 m de espesor. El laboratorio tiene 8 m de ancho, 13m de longitud y 3.5m de altura, ofreciendo suficiente espacio para medir vibraciones, como por ejemplo, las vibraciones de las carrocerías de un automóvil, como se muestra en la figura 5.12. La amplitud de vibración del piso es del orden de 0.1 a 0.7 Hz, y se presenta únicamente en la dirección horizontal.

El arreglo experimental del elemento de prueba, de los sistemas ópticos se muestra en la figura 5.13. El arreglo esta compuesto principalmente del sistema óptico para el haz objeto, y los sistemas ópticos del rayo de referencia y los elementos para su correcto posicionamiento y un Interferómetro de Michelson, con el cual se monitorean las vibraciones y turbulencia del aire que se suman principalmente por el método de tiempo promedio

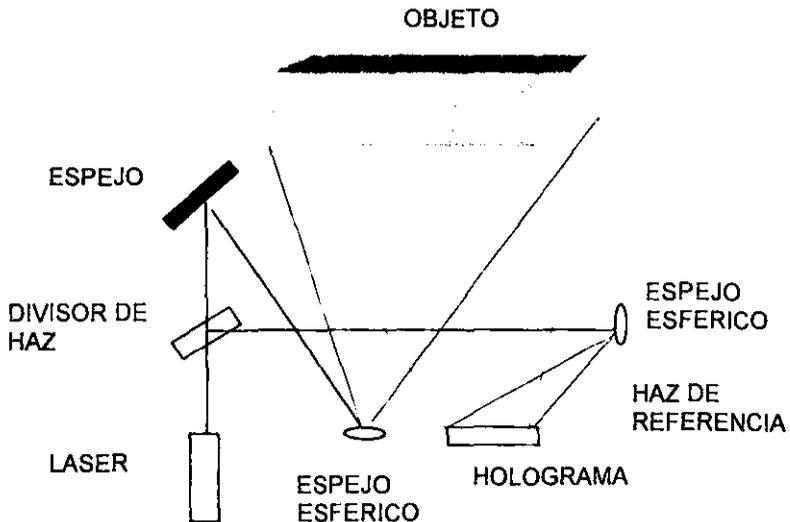


Figura 5.13. Disposición de los equipos en la medición de vibraciones

La fuente láser que se utiliza es un láser de iones de Argón con una potencia de salida de 4W, y los modos de vibración del objeto de prueba son fotografiados. En la figura 5.14 se muestra el interferograma de la base de un microscopio.



Figura 5.14. Interferograma de la base de un microscopio.

5.4.2. MEDICION DE LA PROPAGACION DE LAS ONDAS TRANSVERSALES EN UNA ESTRUCTURA.

En el diseño y verificación del funcionamiento de cualquier estructura, es necesario comprender la dinámica del comportamiento de la misma respecto a las vibraciones. Existen muchos métodos de medición, pero explicaremos el de holografía por pulsos por así convenir a nuestro interés.

Con este método podemos medir la propagación de las ondas transversales en la estructura ocasionadas por el impacto de un martillo. Un sistema de disparo electrónico como se muestra en la figura 5.15, se utiliza para emitir el pulso de láser en el momento deseado. La secuencia de los eventos son los siguientes: 1) Un electroimán sujeta al martillo y al soltarlo dará un golpe sobre el motor, 2) el martillo intercepta el rayo de luz emitido por un láser helio neón.

Esta interrupción ocasiona que la fotocelda genere una señal. Esta señal hace funcionar un circuito de tiempo que difiere el tiempo requerido para el disparo de inicio de operación del láser rubí. 3) El martillo continua su movimiento hasta hacer contacto con el tubo de acero sobre el espécimen; el momento en que el martillo hace contacto con el tubo se determina se genera una fuerza que hace vibrar al espécimen 4). El momento de emisión para el doble pulso del láser para la exposición del holograma, se ajusta por el intervalo entre el momento del disparo del doble pulso y el tiempo de retardo del paso.

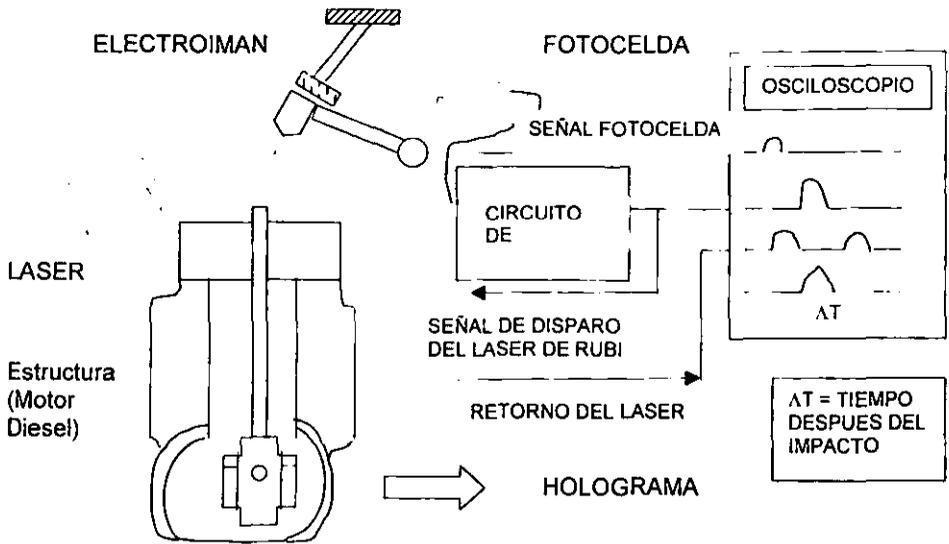


Figura 5.15. Sistema de disparo automático.¹

¹ El motor diesel únicamente se toma como ejemplo para fin de comprender el sistema

5.5. MEDIDAS DE DISTANCIAS.¹

Los instrumentos de medida de grandes distancias, normalmente denominados telémetros, tienen gran importancia en la inspección geodésica, meteorología, viajes espaciales, etc. La introducción de láseres en estos instrumentos ha mejorado enormemente su rendimiento. Se aplican dos principios fundamentales:

1. *Instrumentos de tiempo transcurrido* que miden, por medio de contadores electrónicos de alta resolución, el tiempo que necesita un pulso corto para realizar un viaje de ida y vuelta del láser al objetivo. La distancia desconocida se determina sencillamente a partir de:

$$D = ct/2$$

donde se supone que la velocidad de la luz en el medio es c . En caso diferente del espacio en condiciones ambientales normales, debe introducirse una corrección para n diferente de 1 (a partir de valores medidos de temperatura y presión del aire) para medidas de alta precisión. (n difiere de la unidad en aproximadamente 3×10^{-4}) de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$n-1 = 77.6 (1 + 7.52 \times 10^{-3} \times \lambda^{-2} \times (P/T) \times 10^{-6})$$

con P en milibares, T en Kelvin y λ en micrómetros, para aire seco.

Evidentemente, cuanto más cortos sean los pulsos más alta es la resolución, si bien también se aumentan la anchura de banda y las necesidades de potencia del sistema. Este "eco" técnico se denomina en ocasiones Lidar (Light radar, radar luminoso), sobre todo en el contexto de medidas atmosféricas (nubes, contaminantes, turbulencias, etc.). Para distancias por encima de los 150 Km., se han obtenido precisiones de 10^{-5} a 10^{-6} ppm. (partes por millón).

¹ Chaimowicz, 199 p. 304

Si nos damos cuenta de que una precisión de 10^{-6} corresponde a un error de un milímetro en un kilómetro, apreciaremos la importancia de disponer de un localizador de alcance de láser en un instrumento.

Los localizadores de alcance de láser para distancias medias (por ejemplo, de 1 a 3 Km aproximadamente) en trabajos con los denominados objetivos "cooperativos", es decir, ajustados a retroreflectores, pueden utilizar láseres de semiconductores y ser por consiguiente ligeros y pequeños. Los utilizados para seguimiento automático de objetivos móviles, por otra parte deben ajustarse a complejos servomecanismos y son más potentes, más pesados y voluminosos.

Por último, los dispositivos empleados para trabajos de submarinos a satélites necesitarán potentes láseres de kriptón y xenón y serán aún más voluminosos aunque más ligeros que otros láseres, para otras tareas, que usan láser de CO_2 .

5.6. VERIFICACION DE PLANICIDAD.

La verificación de la planicidad, o condición de ser plana una superficie, se realiza comparándola con un plano de referencia. El plano que se toma como referencia, puede ser un patrón de planicidad ó un plano imaginario determinado por tres puntos.

5.6.1. VERIFICACION DE PLANICIDAD DE SUPERFICIES.¹

Los métodos de verificación por comparación de un patrón plano utilizan como tal un vidrio óptico de caras planas y paralelas. Se emplea este método preferentemente para la comprobación de superficies planas no muy extensas. Este método solo es aplicable a superficies planas tales como: caras de referencias de bloques patrón, superficies

¹ Roberto Galicia Sánchez, 1999 p 54

planas de calibres y de palpadores de medición, platinas de aparatos de medición, etcétera.

Consiste en utilizar las franjas de interferencia obtenidas por medio de una luz monocromática (como la de un láser helio neón), que incide normalmente sobre una lámina delgada de aire que existe entre la superficie a controlar y un plano óptico (disco de vidrio de planicidad certificada), recordar el interferómetro de Fizeau.

Los planos ópticos o cristales plano paralelos proporcionan un medio fácil y rápido de comprobar la planicidad de las superficies que son muy precisas. Para comprobar dichas superficies, se coloca el plano perfectamente limpio sobre la pieza, y se dirige la luz láser sobre la pieza; si se observa la superficie de la pieza a través del plano óptico, aparecerán las franjas de interferencia.

En efecto, las franjas de interferencia corresponden a líneas de nivel de la superficie controlada y las diferencias de nivel entre dos franjas es una longitud determinada, esta longitud se obtiene de acuerdo a longitud de onda del láser utilizado. Por ejemplo si se utiliza una longitud de onda de 0.6 micrómetros, la diferencia de nivel entre los puntos correspondientes a dos franjas de interferencia inmediata será de 0.3 micrómetros.

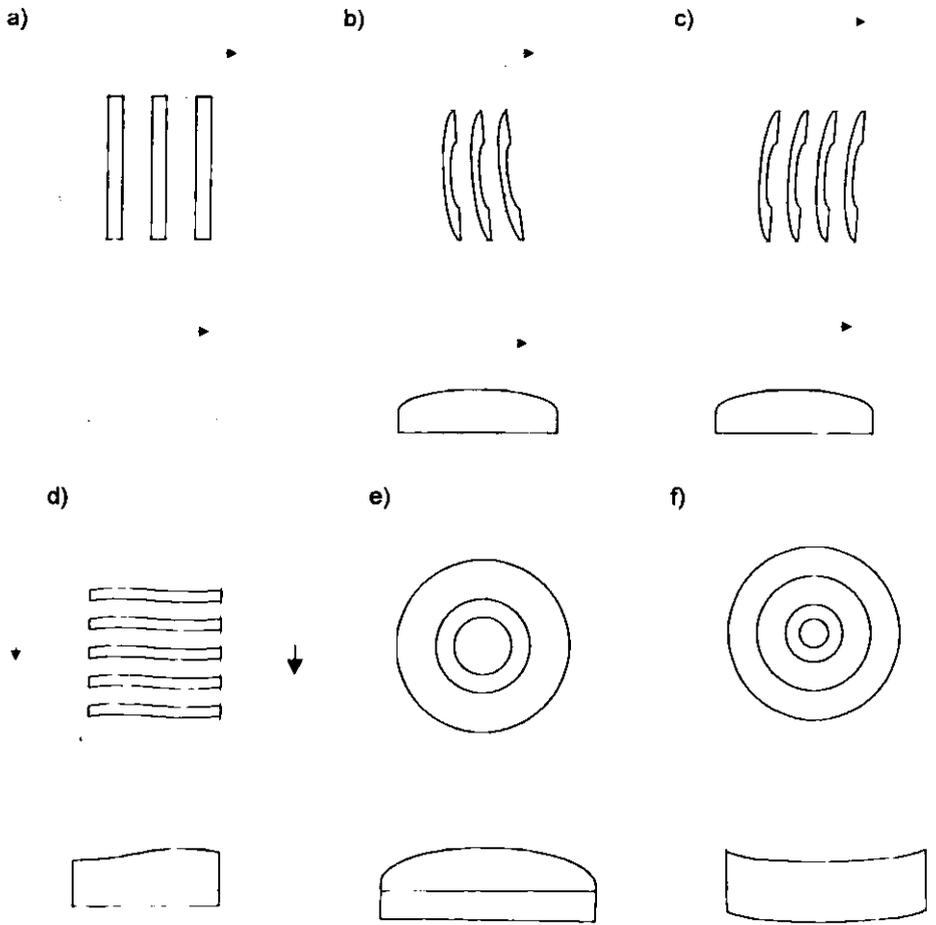


Figura 5J6 Verificación de planicidad por medio de un vidrio óptico con luz láser.

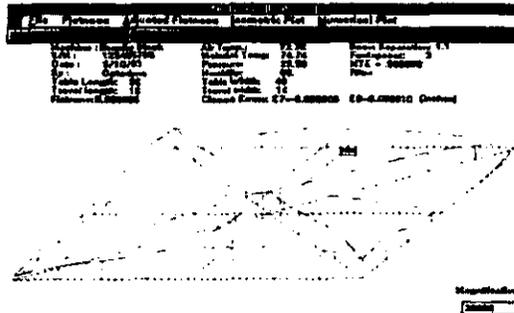
- a) Pieza perfectamente plana, produce franjas rectas uniformes y paralelas.
- b) Pieza ligeramente convexa, produce franjas curvas
- c) Pieza con convexidad más severa.
- d) Superficie ondulada
- e) Pieza convexa
- f) Pieza cóncava

Los métodos de verificación que utilizan un plano ideal de referencia son preferentemente utilizados para la comprobación de superficies de dimensiones grandes y cuando se requiere determinar cuantitativamente las diferencias entre las superficies que se comprueban y un plano geométrico. En general este procedimiento consiste en determinar las diferencias de las distancias de los tres puntos que componen el plano imaginario, con ayuda de un rayo láser aprovechando su divergencia (de hasta un miliradián). Consideremos un equipo láser montado en una mesa independiente de la superficie a determinar su planicidad, dicha mesa esta perfectamente nivelada en el plano horizontal, y permite la rotación del láser en ese mismo plano. Ahora dirigimos el haz láser a un primer punto donde se coloca un fotodetector, que se encuentra sobre la superficie a determinar y montado en una columna que permita ajustar su altura, mediante un control micrométrico. En el punto donde el fotodetector indique la lectura máxima de intensidad de corriente, tendremos nuestro primer punto de referencia; el mismo procedimiento se realiza para los dos siguientes puntos, el perímetro de este triángulo contiene, los puntos que se miden de igual manera, tomando como referencia el plano anteriormente determinado.

5. APLICACIONES DEL LASER EN METROLOGIA

Actualmente existen equipos dotados con microprocesadores que determinan estas diferencias de alturas por medio de dispositivos electrónicos que proporcionan un gráfico de las diferencias de nivel del plano de la superficie a medir respecto al plano de referencia.

Las variaciones en la temperatura del material de la superficie a determinar su planicidad, así como de la temperatura y presión barométrica del medio ambiente son automáticamente compensadas por el "software", utilizando los datos proporcionados por unos sensores. Los puntos de medición son determinados por el operador y los datos obtenidos pueden ser impresos en forma tabular o en una gráfica. Con este sistema es posible determinar la planicidad en mesas de hasta 10 metros de longitud con una resolución de 2.5 micrómetros.



El gráfico que se muestra en la figura, es proporcionado por el Sistema Láser de Calibración modelo MCV-2002 de Optodyne Inc., establecida en Compton, California en los Estados Unidos. En este caso se trata de la superficie de una mesa de granito de .92 x 1.21 metros, donde el punto de mayor altura es de 1.6 micrómetros con respecto al plano de referencia que aparece marcado con líneas punteadas.

5.7. LÁSERES PARA ALINEAMIENTO.¹

Una de las operaciones fundamentales en ingeniería es la obtención de un alineamiento preciso. Un láser TEM₀₀ y un detector de cuadrante como se muestra en la figura 5.18 forman una excelente combinación para revelar alineamientos erróneos. En efecto el perfil de haz gaussiano de este láser originará un desequilibrio en las entradas de los circuitos analógicos a no ser que los cuatro cuadrantes reciban radiación de la misma magnitud, es decir, a menos que el haz sea exactamente central. Los circuitos analógicos se diseñan de manera que produzcan salidas I_x e I_y proporcionales a los respectivos alineamientos erróneos. Un haz colimado de láser utiliza un espejo de alta calidad bien asegurado a la pieza que se quiere alinear, para devolver a su origen con mucha precisión el haz de luz incidente bien colimado. A no ser que el espejo sea perfectamente perpendicular al haz incidente esto no ocurre. De esta forma puede verificarse la perpendicularidad, el paralelismo y la planicidad de los diversos componentes de la estructura.

La alta estabilidad de apuntamiento es un riguroso requisito para el dispositivo de láser y cuadrante: el uso de un expansor de haz lo perfecciona en virtud del mismo mecanismo que reduce la divergencia de un láser. Sin embargo puede aún necesitarse un período de calentamiento del instrumento. Los buenos instrumentos obtienen precisiones alrededor de los 10 e incluso 1 μ rad de error de alineamiento. Las aplicaciones de esta técnica se han introducido a las máquinas herramientas para el alineamiento de los cabezales, bancadas, guías de carros, etc. Fuertemente relacionadas con las medidas de ángulos, esta técnica se emplea en la determinación del ángulo de corte en las fresadoras para la realización de chaflanes o biselados.

¹ Chaimowicz JCA, 1990 p. 302

De hecho este es el principio de funcionamiento del detector de posición y sensibilidad (PSD).¹

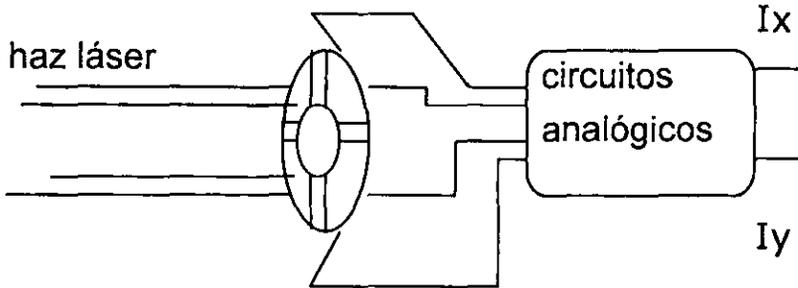


Figura 5.17. Detector de cuadrante para alineación.

El cuadrante del detector es un disco de silicio uniformemente distribuido, que tiene dos ranuras de $10\mu\text{m}$. de ancho colocadas horizontal y verticalmente en los diámetros del disco. Con esta disposición tenemos 4 detectores de igual sensibilidad en toda la superficie del disco. Un haz de luz láser que apunte al centro del detector, genera iguales corrientes, por el efecto fotoeléctrico en los cuatro sectores. Pero si el haz láser se mueve del centro del detector, la corrientes de los cuatro sectores cambian. En la figura 5.19 observamos la geometría de los cuatro sectores, que se representa por A, B, C y D.

¹ Datos obtenidos del catalogo de MELLES GRIOT s. 1995

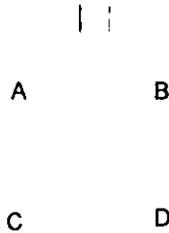


Figura 5.18 . Geometría del (PSDs)

La ecuación usada para describir el desplazamiento de las corrientes I_x e I_y , causadas por el haz del láser son las siguientes:

$$I_x = (B+D)-(A+C)/A+B+C+D \quad (28)$$

$$I_x = (B+D)-(A+C)/A+B+C+D \quad (29)$$

Donde A, B, C, y D son las corrientes generadas por cada uno de los cuatro sectores. Consideremos por ejemplo: que el haz apunta entre los sectores A Y B, por lo que C y D no generan ninguna corriente. En consecuencia las ecuaciones 1 y 2 se reducen a:

$$I_x = B-A/A+B \quad (30)$$

$$I_x = B-A/A+B \quad (31)$$

5.8. CALIBRACION DE MAQUINARIA POR LASER.

En este apartado demostraremos la utilidad del láser como un instrumento de medida de la metrología óptica aplicado a las máquinas herramientas de control numérico utilizando las técnicas de medición que se mencionaron anteriormente dentro de este capítulo. Con esta tecnología se pueden medir: la alineación, planitud, rectitud, paralelismo, perpendicularidad y precisión de los husillos. Así como un estudio detallado de la estructura de toda la maquina con el fin de prevenir fracturas o fatigas en ellas. La detección prematura de problemas de fatiga permite evitar roturas catastróficas. La calibración por láser es una garantía en la precisión y repetibilidad de las máquinas herramientas.¹

Para realizar una determinación de la precisión de una máquina herramienta, por ejemplo en una maquina de medición de coordenadas, se requiere desmontar las piezas a medir y trasladarlas a ella, pero con el sistema de medida a láser se pueden conseguir precisiones con muy pocos grados de incertidumbre, en varias piezas de la máquina sin necesidad de trasladarlas aun en ambientes tan hostiles para el trabajo del láser, como es el ambiente de un taller de máquinas herramientas.

El sistema de medida por láser detecta y corrige con rapidez los errores críticos de geometría y posicionamiento, de máquinas herramientas de control numérico (CN), permitiendo compensar las desviaciones que se presentan por el desgaste natural de las condiciones de trabajo. Una calibración regular mediante láser permite mejorar y mantener la precisión CN, optimizando la compensación de errores con datos tan precisos como la longitud de onda del rayo láser.

¹ Los normas de verificación que se mencionan son generales, ya que cada tipo de máquina herramienta requiere de normas particulares de verificación.

5. APLICACIONES DEL LASER EN METROLOGIA

Antes de comenzar las diversas verificaciones es necesario colocar cuidadosamente la máquina herramienta a nivel con un error permitido de entre ± 0.04 y 0.06 mm sobre $1,000$ mm.¹ Si la máquina no está bien nivelada nunca se podrá obtener la precisión marcada en sus especificaciones.

Existe en el mercado un dispositivo de alineación a láser que nos proporciona la precisión deseada para nivelar cualquier máquina herramienta. Observando la figura vemos que se trata de un dispositivo sencillo el cuál consta de un láser de baja potencia, montado en un cabezal nivelador giratorio, un fotodetector y de un prisma que permite desviar 90° el rayo láser.

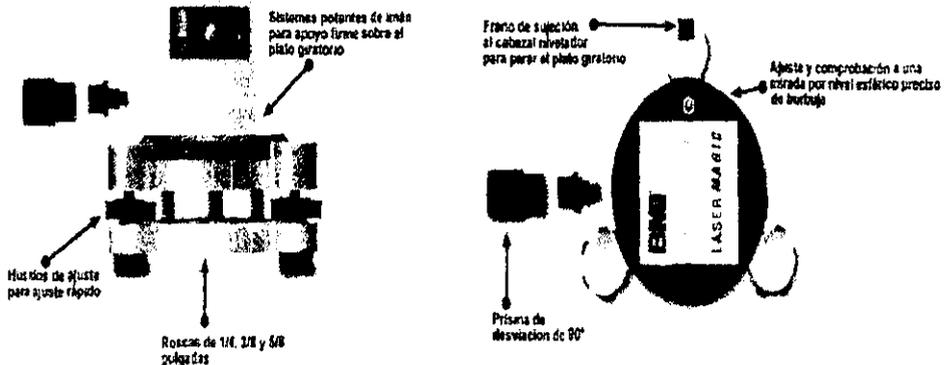
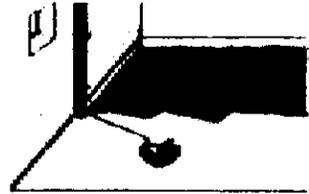


Figura 5.19. Cabezal de un alineador láser

¹ Los datos que se marcan en los errores son únicamente como referencia y no indicativos de la precisión obtenida en las mediciones con láser

Este dispositivo proporciona un rayo láser en forma de punto o línea, horizontal o vertical para establecer la alineación de cualquier objeto e inclusive una máquina herramienta, tal como se muestra en las siguientes figuras.

Un rayo horizontal o por rotación del cabezal permite nivelar varios puntos en el trazado que realiza cuando gira el cabezal



Una línea horizontal visible

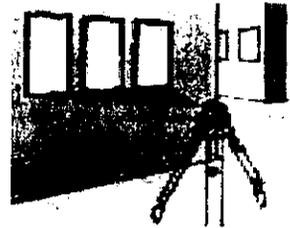
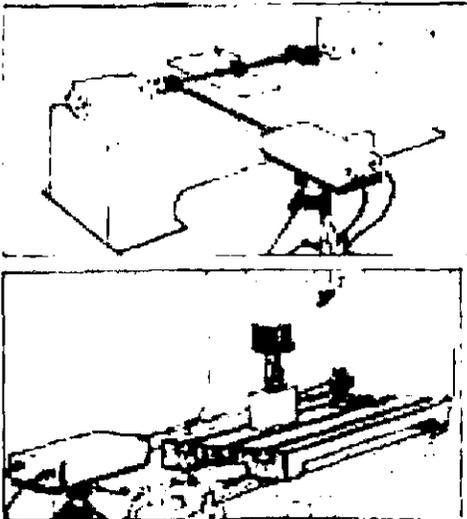


Figura 5.20. Alineación horizontal con un alineador láser.

Una vez verificada la alineación el siguiente paso es determinar los errores en la geometría de las máquinas como son: rectitud de carrera, paralelismo y perpendicularidad de los ejes de giro de las herramientas respecto a la bancada, errores que pueden degradar la prestación de una máquina. La calibración por láser mide de forma completa y eficiente estos importantes errores.

A continuación se observan en las siguientes figura la disposición del dispositivo mencionado para su empleo en la verificación de los errores mencionados anteriormente, de algunos de los componentes de una máquina herramienta en el mismo sitio en que se encuentra instalada la misma.

La tolerancia requerida para estos errores es de ± 0.02 mm sobre 300 mm. Este equipo permite determinar con exactitud aún mayor las desviaciones de rectitud de carrera y paralelismo, por ejemplo de la bancada horizontal de un torno de (CN), con el auxilio del prisma desviador es posible verificar que la perpendicularidad entre el eje de giro de la herramienta y la mesa de sujeción de la pieza a fabricar tenga una precisión igual a la del paralelismo. Como se muestra en la figura, se trata de un dispositivo que se fija firmemente en una superficie exterior a la máquina herramienta, con un sistema de nivelación más preciso que lo que normalmente se emplean para este fin.



**MICRO TECHNO
METROLOGY**
C/ Francesc Guitart, 11
08758 CERVELLÓ -
Barcelona
Tels. 684 08 62 - 684 12
51
Fax 660 39 17

Figura 5.21. Medición de rectitud y perpendicularidad.

A la derecha de la figura se encuentran los datos del fabricante para una consulta de mayor información de este equipo así como de los costos.

Otra característica importante en la medición de las máquinas CN, es la exactitud del paso de los husillos de los carros o mesas de las máquinas herramientas, tienen una importancia fundamental, porque deben de reproducir con exactitud el paso para el cual fueron fabricados (paso es la distancia lineal que avanza un carro cuando el husillo gira 360°) y nominalmente se marca como error permitido $\pm .003$ mm sobre 300 mm, ya que a través de esto se encuentra la precisión global de toda la máquina.

El método tradicional para realizar esta verificación consiste en un utilizar un patrón en una primera medida y después compararlo con una medición directa con un reloj comparador. Si utilizamos la tecnología láser se emplea un interferómetro de Michelson en donde el espejo movable se monta en el cabezal o mesa, a medida que el husillo se desplaza también lo hacen las franjas de interferencia, por lo que contabilizando estas por medio de un microprocesador se puede determinar la distancia que ha avanzado el husillo con una precisión de $\pm 30\mu\text{m}$, de hecho la tendencia actual es la de sustituir todos los controles de desplazamiento de las máquinas herramientas por interferómetros.

En el apéndice se puede consultar las características técnicas de dos medidores de desplazamiento a láser, con los cuales es posible la verificación de la velocidad de rotación de los husillos figura 5.22b, la velocidad de avance de las mesas figura 5.22a, la profundidad de ranuras de lubricación superficiales figura 5.22c.

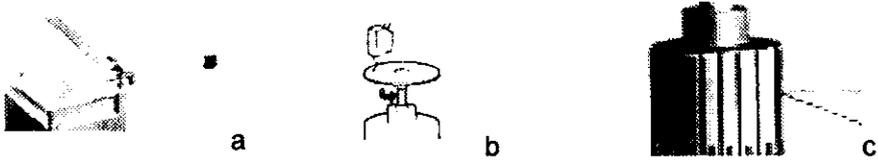


Figura 5.22. Ejemplos de otras mediciones en máquinas herramientas.

La verificación de la rigidez se efectúa dinámicamente, o sea cuando la máquina herramienta está bajo carga. Es evidente que, para los esfuerzos según los cuales es sometida la herramienta durante el arranque de la viruta, se producen fuerzas que producen flexión en las columnas, torsión en los ejes o ambas, por lo que pueden manifestarse vibraciones en toda la estructura de la máquina. Los esfuerzos impuestos en las pruebas deben estar comprendidos entre límites tales que no produzcan deformaciones permanentes. Se debe tener en cuenta que con la misma máquina se efectúan operaciones de desbaste y de acabado, además de que una máquina no debe ser totalmente rígida en toda su estructura, en algunas partes debe existir cierta elasticidad.

La interferometría holográfica por láser es la técnica que indudablemente nos sirve para realizar las pruebas de rigidez en las máquinas herramientas, no se debe confundir esta prueba con la determinación de vibraciones, ya que estas pueden tener otro origen como es el mal funcionamiento de un cojinete desgastado, esta prueba determina las zonas de esfuerzo, o dicho de otro modo las zonas donde se acumulan las tensiones en la estructura de una máquina herramienta.

Existen equipos a láser que permiten la determinación de las vibraciones, pero queda fuera de los objetivos del presente trabajo su estudio.

Finalmente para determinar si una máquina herramienta es precisa se requiere de verificar las piezas que son maquinadas en ella. Esta verificación consiste en determinar que las dimensiones finales tengan las medidas indicadas, con la exactitud correspondiente a la esperada por el tipo de máquina en que se elaboro. Otro punto es la determinación de las medidas de planicidad de las superficies maquinadas.

Respecto a las mediciones de las dimensiones finales de una pieza maquinada verificadas con láser en el apéndice se muestran los datos técnicos de un micrómetro láser, con el cual se puede determinar la precisión de estas dimensiones.

La verificación del paralelismo ya se estudio con la aplicación de un láser para determinar la planicidad de superficies, con ayuda de un vidrio de calidad óptica. O bien por el método de gráficar esta planicidad con un láser y un fotodetector.

La selección del equipo a utilizar en las medidas por láser e interferométricas es un proceso delicado que debe efectuarse con mucho cuidado ya que de esto depende el cubrir todas las necesidades que se tengan para efectuar las mediciones. Una mala selección del equipo que se vaya a utilizar puede acarrear problemas graves, como son el no conseguir las medidas deseadas debido a que la capacidad técnica de dicho equipo no cumpla con los requisitos para efectuarlas. Los equipos que merecen una selección cuidadosa, son el láser, los microprocesadores para el conteo de las franjas, los fotodetectores y en general todos los equipos ópticos y electronicos que se utilizan para montar el láser e interferómetros descritos en los capítulos anteriores.

Hay una serie de criterios que un láser de helio neón debe cumplir si lo queremos utilizar en metrología, indudablemente pueden ser utilizados otros tipos de láseres, pero el costo es lo que hace la diferencia en el momento de la elección. En primer lugar, debe ser de onda continua. En segundo lugar, debe trabajar en el modo TEM₀₀, ya que estos láseres nos darán la distribución transversal de energía más plana.

El siguiente factor a considerar, que no es esencial pero si muy útil, el obtener un láser polarizado linealmente; finalmente el último elemento a considerar es: la potencia de salida. La potencia de un láser helio neón se mide en miliwatts. Esta potencia es muy inferior a la potencia de un foco de 100 watts. No obstante, el brillo de uno de estos láseres es mucho mayor que el del foco, aunque su potencia sea menor. Cuanto mayor sea la potencia de salida del láser, mayor será también el contraste en las franjas de interferencia obtenidas en los interferómetros. A su vez será posible obtener mediciones más precisas en distancia, por ser mayor la cantidad de luz que regrese al fotodetector. EDMUND SCIENTIFIC ofrece un láser que cumple con estos elementos, el cual denomina *Spectra-Physics Model 117A Stabilized Helium-Neon Laser*, con una fuente de poder suplementaria.

6. RASTREADOR LÁSER (LÁSER TRACKER).

En el presente capítulo estudiaremos uno de los más modernos dispositivos de medición que utiliza el rayo láser para determinar las medidas de piezas de trabajo en tres dimensiones; su empleo en la industria de las máquinas herramientas es de gran utilidad. Como su nombre lo sugiere, el rastreador láser determina las coordenadas en tres dimensiones de la posición de un espejo retroreflector de forma esférica, que a partir de ahora llamaremos SMR, (Spherical Mirror Retroreflector) por sus siglas en inglés, algo parecido a la función de un radar que localiza un avión. En lugar de ondas sonoras se envía un rayo láser que es retroreflejado del SMR que se encuentra en contacto con el objeto a medir; si movemos este SMR siguiendo el perfil de la pieza de trabajo, un microprocesador determina la distancia del SMR a la salida del rayo láser punto a punto, además de los ángulos horizontal y vertical que indican la dirección que sigue el rayo. Con estos tres datos es posible determinar con gran precisión el perfil de la pieza de trabajo.

En la figura 6.1 para simplificar, solo usamos dos puntos, el número 1, es inicio de medición y el 2 es el punto donde termina, una vez que el microprocesador determina las coordenadas, tenemos la distancia que el SMR se ha desplazado en cada uno de los tres ejes. Pero el sistema también es capaz de entregarnos una gráfica del desplazamiento del SMR y por lo tanto del perfil de la pieza. El rastreador láser puede medir las dimensiones de piezas de trabajo de hasta 35 metros con una precisión de $25\mu\text{m}$ por cada 5 m. El ángulo vertical puede ser de hasta 120 grados y el horizontal de hasta 270 grados, con una precisión de 0.25 segundos de arco.

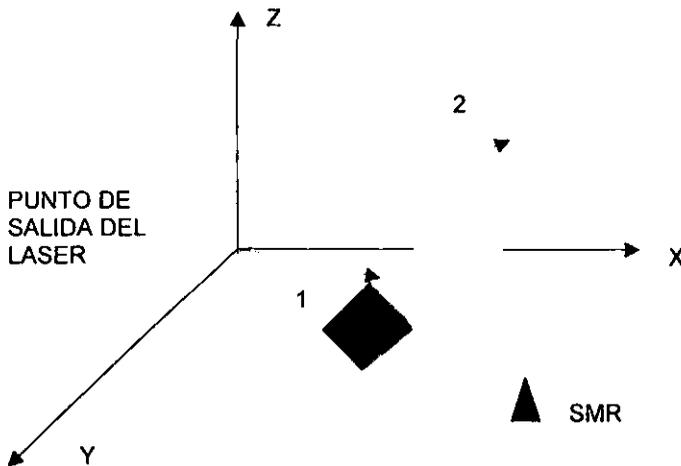


Figura 6.1. Determinación espacial de 2 puntos por el "láser tracker".

El modo de funcionamiento del rastreador láser es fácil de entender; se miden dos ángulos y una distancia. Se rastrea el camino seguido por el rayo láser del SMR a lo largo de la pieza a medir. El rayo se refleja en el SMR y regresa al lugar donde surgió, siguiendo el mismo camino, entrando de nuevo al rastreador en la misma posición que salió. Los SMR retroreflectores varían, pero el más popular es el montaje esférico. Una vez que el rayo láser se encuentra dentro del rastreador, se dirige a un interferómetro que mide la distancia desde la entrada del rastreador al SMR.

En la figura 6.2 se muestra el camino seguido por el rayo de un láser helio neón del retroreflector y su regreso al interior del interferómetro. También se muestran los decodificadores angulares. Estos dispositivos miden angularmente la orientación del rayo rastreado en dos ejes mecánicos: el ángulo con respecto al eje z y el ángulo con respecto al eje y.

Una vez determinadas las medidas de los dos ángulos por los decodificadores y la distancia dada por el interferómetro queda localizado con precisión el centro del SMR con montaje esférico. El microprocesador aplica el ajuste que es igual al radio de este para obtener las coordenadas de la superficie que esta midiendo.

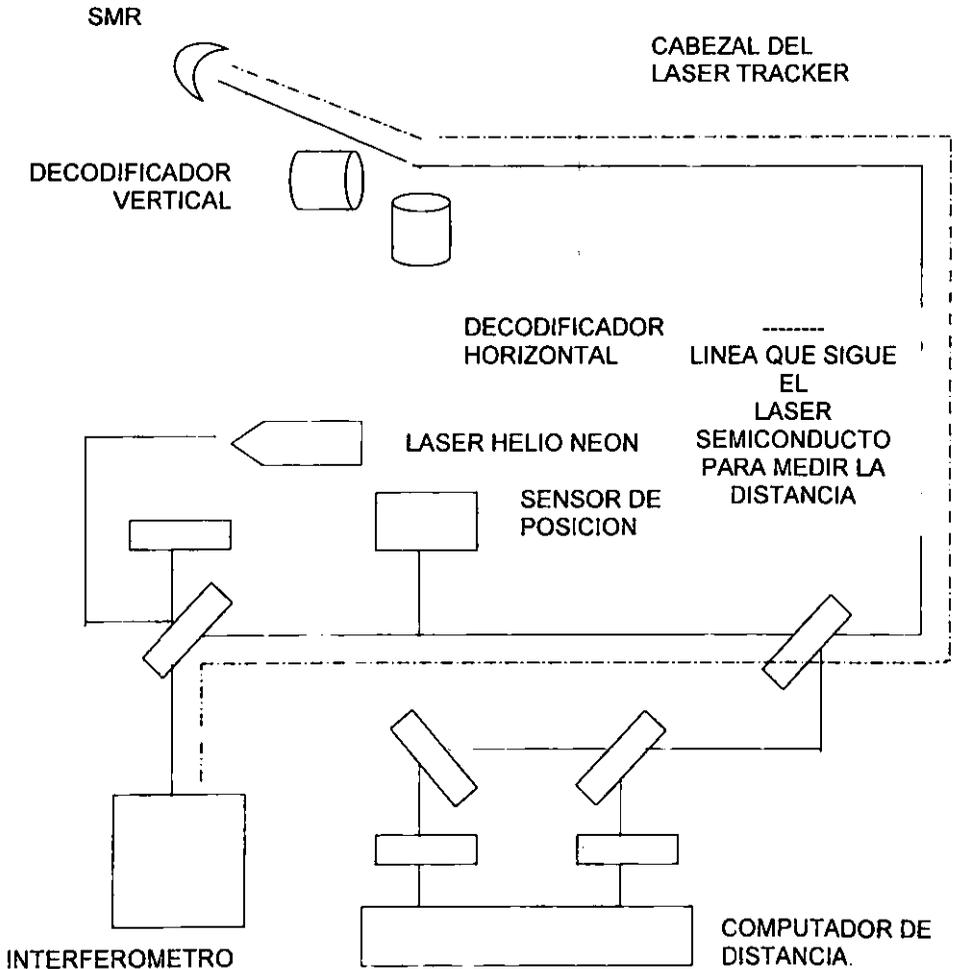


Figura 6.2. Esquema del láser tracker

La distancia que se mide es una de las funciones más importantes del rastreador láser, ya que puede ser incremental o absoluta. La distancia Incremental se hace con un interferómetro y a una frecuencia estabilizada del láser helio neón. El rayo láser se divide en dos rayos. Uno viaja directamente al interferómetro. El otro viaja hacia fuera del rastreador, se refleja en el SMR y regresa por el mismo camino, hacia el interferómetro. Dentro los dos rayos de luz se interfieren, resultando un cambio de ciclos (franjas de interferencia) cada vez que el SMR se acerca o se aleja del rastreador por una distancia igual a media longitud de onda (aproximadamente $0.3\mu\text{m}$). Los circuitos electrónicos cuentan el cambio en el número de ciclos que cambia para determinar la distancia que se movió el SMR.

Normalmente, cuando se mide una pieza, el operador coloca el SMR en donde se va iniciar la medición, y en este punto se ajusta el interferómetro, para que marque la posición cero. El operador mueve el SMR a la segunda posición por medir y así, se continúa con el proceso de manera normal, pero si el rayo láser es obstruido por algún obstáculo, la distancia que se obtiene no será válida, ya que se interrumpirá el cálculo de los números de franjas en el interferómetro, el operador tendrá que volver a colocar el SMR en el punto de inicio, ya determinado y repetir la operación.

La medida absoluta de distancia, elimina estos inconvenientes ocasionados por el interferómetro. Consiste en hacer enviar pulsos de rayo láser de longitud en infrarrojo, producido por un láser de semiconductor, que se refleja directamente en el SMR y al entrar al rastreador se convierte en una señal eléctrica, que permite que sea analizada por los circuitos electrónicos, para determinar el tiempo que tardó en viajar de su salida al SMR y su regreso; multiplicando este valor por la velocidad de la luz en el aire se determina la distancia del rastreador al SMR y por lo tanto a la pieza que se está midiendo.

Otra de las funciones del rastreador es el gobierno y control de la dirección del rayo láser. El rastreador gobierna la dirección que va a seguir el rayo láser a través de prismas que giran con los ejes; esto permite dirigir el rayo láser en una dirección deseada, pero no es posible mantener centrado este rayo, mientras se mueve rápidamente el SMR. Para poder efectuar esto, parte del rayo reflejado es dividido hacia un sensor y detector de posición. Si el láser incide fuera del centro del SMR, se transmite una señal de error al sensor detector de posición, por medio del rayo que se dividió y dirigió hacia él. Esta señal permite controlar los decodificadores que modifican la rotación de los ejes para centrar el rayo láser sobre el SMR. Recuerde el capítulo de alineación.

7. EL LASER Y OTRAS MEDICIONES.

A lo largo del presente trabajo se han tratado básicamente las aplicaciones del láser en su empleo en las mediciones para su utilización en las maquinas herramientas, el láser también es un excelente instrumento de medición en otras ramas de la ciencia, como es: en ecología para la medición de contaminantes, con el se puede determinar con gran exactitud el metro patron, además en química se emplea en la espectroscopía para la determinación de la composición química de sustancias, por falta de espacio se tratara únicamente los dos primeros en este capítulo como corolario de todo lo anteriormente mencionado.

7.1. MEDICION DE CONTAMINANTES.

En el presente capítulo estudiaremos una de las más interesantes aplicaciones del láser en la metrología, que esta íntimamente relacionado con aspectos metereologicos y ecologicos. Para los habitantes de la Cd. de México es muy familiar el nombre de los IMECA's (Índice Metropolitano De La Calidad Del Aire), y el de la red de monitoreo, que nos indican el grado de contaminación, además del tipo de partículas contaminantes que se han detectado en el transcurso del día en las cinco zonas en las que se ha dividido el Valle de México.

Anteriormente, para determinar los contaminantes, se empleaban los globos sondas, con el inconveniente de que las zonas de pruebas quedaban determinadas por las corrientes de aire, difíciles de determinar por la dirección de los vientos. Actualmente se emplea un dispositivo, que tiene como parte fundamental el empleo del rayo láser.

7.1.1. RETRODISPERSION ELASTICA

El término retrodispersión elástica, se utiliza en esta descripción, para referirnos al proceso físico, en el cual la luz con una longitud de onda particular es reflejada por el *aerosol* (partículas sólidas y líquidas en suspensión en la atmósfera). Una parte de la luz incidente es dispersada en todas direcciones por las partículas que componen al *aerosol*. La longitud de onda de la luz dispersada es distinta a la longitud de onda de la luz incidente, situación que se define como el cambio elástico de la dirección de un fotón o partícula por el choque con otra partícula o sistema de partículas. La fracción de la luz dispersada que viaja de regreso al lugar de origen de la fuente láser es conocida como retrodispersión, que también se explica como: la desviación de una radiación o de una emisión de partículas por dispersión en ángulos mayores a 90° respecto a la dirección de propagación primitiva o de emisión.

7.1.2. LIDAR (LIGHT DETECTION AND RANGING)

El término LIDAR es un acrónimo de *light detection and ranging*, y describe la forma en que un rayo láser pulsado, detecta la presencia de sustancias contaminantes en la atmósfera en función de la distancia y de la altura a que estas se encuentran en la atmósfera, desde el origen de la fuente láser.

Una explicación simplificada de los elementos básicos que componen el sistema de detección LIDAR, retrodispersión elástica, se muestra en la siguiente figura 7.1.

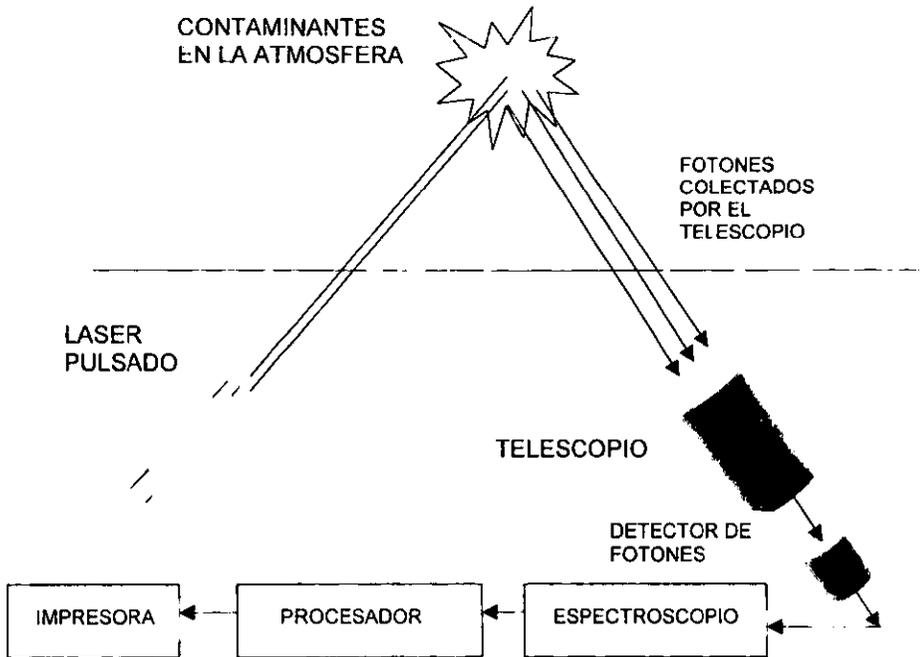


Figura 7.1. Esquema del sistema LIDAR

Se trata básicamente de un láser que genera cortos impulsos (aproximadamente 10^{-8} seg.), de luz, que son lanzados a la atmósfera en determinada dirección. Como el impulso de luz se propaga a través del aire, encuentra en su camino partículas sólidas o líquidas (*aerosol*) y como resultado la luz es dispersada en todas las direcciones.

Una pequeña fracción de esa luz es reflejada hacia la fuente láser y es recogida por medio de un telescopio acoplado a un fotodetector que la analiza para determinar la composición química de los elementos mediante un espectroscopio, que descompone la luz recibida de las partículas en sus colores constituyentes, formando así lo que llamamos espectro, una especie de huella digital para determinar la constitución química del *aerosol*, que es procesada con una computadora.

La señal del fotodetector es proporcional al coeficiente del volumen de la luz retrodispersada por las partículas en suspensión y de la atmósfera que se encuentra en el camino de ida y vuelta. En general, el coeficiente del volumen retrodispersado no solo determina la composición química de las partículas suspendidas, también determina la medida de estas y su forma. El tiempo que tarda en regresar la luz dispersada al fotodetector nos indica la distancia y altura a la que se encuentran las sustancias en suspensión. Ya que conocemos la dirección angular del láser y el telescopio es posible realizar un gráfico en tres dimensiones de la concentración del *aerosol* sobre varios kilómetros de distancia con una resolución de pocos metros. Por ejemplo, si utilizamos únicamente la dirección vertical obtenemos una imagen en dos dimensiones del deslizamiento vertical de la atmósfera que muestra las variaciones de densidad del aerosol en función de la altitud y el intervalo del plano horizontal de la concentración de partículas. Repitiendo la operación en diferentes puntos y hora, obtenemos la evolución espacial del *aerosol* en el transcurso del día, la cual puede ser monitoreada.

Brevemente la descripción del equipo utilizado por el sistema es la siguiente: se emplea un láser Nd:Yag que opera con una longitud de onda de $1.06\mu\text{m}$, a 10 pulsos por segundo con una divergencia de 1 mrad. El rayo láser se coloca en dirección paralela al eje óptico un telescopio de 40.64 cm de diámetro. El movimiento del ensamble de láser y telescopio es controlado por computadora en pasos discretos, para ejecutar los movimientos verticales y horizontales o una combinación de ambos para dirigirlos a la atmósfera. Los fotones láser dispersados que regresan al LIDAR son dirigidos al telescopio, el cual los enfoca a un fotodiodo cuya razón de resistencia en sentido directo a resistencia en sentido inverso es muy elevada. Un filtro de banda de frecuencias es utilizado para bloquear el paso de cualquier luz externa, lo que permite utilizar el sistema de día y de noche. Finalmente una computadora se encarga de registrar los datos de forma gráfica de la densidad de aerosol en el rango de los ángulos y la distancia, en donde se realizaron los impulsos a láser.¹

¹ Un libro específico sobre medición de contaminantes es: Verschuere Karel, 1996 p. 31

7.2. MEDIDA Y DEFINICION DEL METRO PATRON.

Hasta 1961, el metro patrón aceptado internacionalmente era la distancia entre dos marcas practicadas en una pieza estructural de perfil X, de una aleación de platino-iridio, que se conserva en París. Los diferentes laboratorios de normalización, poseen copias de dicho patrón. En comparaciones realizadas de estas copias y el original con ayuda de microscopios de gran calidad en el instrumento comparador se encontró que la diferencia entre cada copia y el original es aproximadamente de 0.25 micrómetros. Cuando apareció el láser y con él las medidas interferométricas precisas, se sugirió que debía de hallarse la relación existente entre las longitudes de onda correspondientes ó la frecuencia de su luz y el metro patrón. En 1892 y 1905 Michelson y Benoit, utilizando una modificación del interferómetro de Michelson hallaron que la razón de la longitud del metro patrón y la longitud de onda roja del cadmio (en el aire a 15° C y 760 mm de mercurio de presión) era igual a 1 553 163.5. Este resultado tiene una precisión de una parte en dos millones. Unos catorce años más tarde, Benoit, Fabry y Perot, utilizando un sistema de "etalones".

Un "etalon" consiste en un par de superficies reflectoras que se insertan entre ambos espejos del láser. El "etalón" forma una cavidad óptica resonante secundaria. Para la mayoría de las longitudes de onda, el "etalón" produce una interferencia destructiva que hace que la cavidad del láser no sea resonante. Sin embargo, para ciertos valores de longitudes de onda, la cavidad es perfectamente transparente. Para sintonizar el "etalón" a unas determinadas longitudes de onda, se varía la separación entre sus superficies reflejantes, que es el método que Fabry-Perot efectuaron en una nueva determinación. El empleo de un método interferométrico de haz múltiple y del rayo láser permitieron aumentar la precisión hasta una parte en cinco millones.

7.2.1. METODO BENOIT, FABRY Y PEROT.

Se utilizan cinco "etalones" Fabry-Perot de longitudes de aproximadamente a 6.25; 12.5; 25.0; 50.0; y 100.0 centímetros. Los separadores que determinan las distancias entre las láminas son barras estructurales de Invar en forma de V.

Se efectúan tres tipos de medidas:

1) una determinación de la longitud del "etalón" más corto en función de la longitud de onda del láser empleado.

2) una comparación de los "etalones"

3) una determinación de la diferencia entre el "etalon" más largo y una copia del metro patrón.

El método se debe realizar de manera rápida y sin perturbación del aparato, para reducir los errores debidos a los cambios de temperatura y de presión atmosférica. En la figura 7.2 puede verse la disposición del aparato. Lw es un emisor de luz blanca y Lcd es un láser de cadmio. Para dirigir la luz según caminos deseados se utilizan diez y seis espejos (señalados con números). Se tienen mecanismos que permitan introducir ó suprimir cualquier espejo sin perturbar el resto del aparato ni ocasionar cambios térmicos. W1 y W2 son prismas en forma de cuñas de pequeño ángulo. T es un anteojo y M1 y M2 son microscopios de poca potencia enfocados sobre W1 y W2.

El espejo 13 se utiliza para dirigir la luz del láser a través del etalon más corto hacia el anteojo de observación T; los espejos 14 y 16 para dirigirla a través de W1 a M1 y los espejos 14 y 15 para dirigirla a M2 a través de W2.

Se efectúan dos experimentos preliminares. En el primero, se mide la longitud del étalon más corto en función de la longitud de onda del láser de cadmio por el método de las fracciones exactas (interferencia de valor $n\lambda$). La longitud así obtenida puede no ser la longitud exacta en el momento del experimento final, ya que pueden haberse producido cambios debidos a diferencias de temperatura entre los días de los experimentos preliminares y finales. Sin embargo, la medida preliminar da la longitud con la tolerancia de una longitud de onda y sólo será necesario volver a medir la fracción durante el experimento final. En el otro experimento preliminar se determinan los ángulos de las cuñas W1 y W2 midiendo la separación de las franjas, utilizando la luz del láser. Las dos medidas preliminares pueden efectuarse con todo el aparato en su sitio, habiendo quitado los demás espejos.

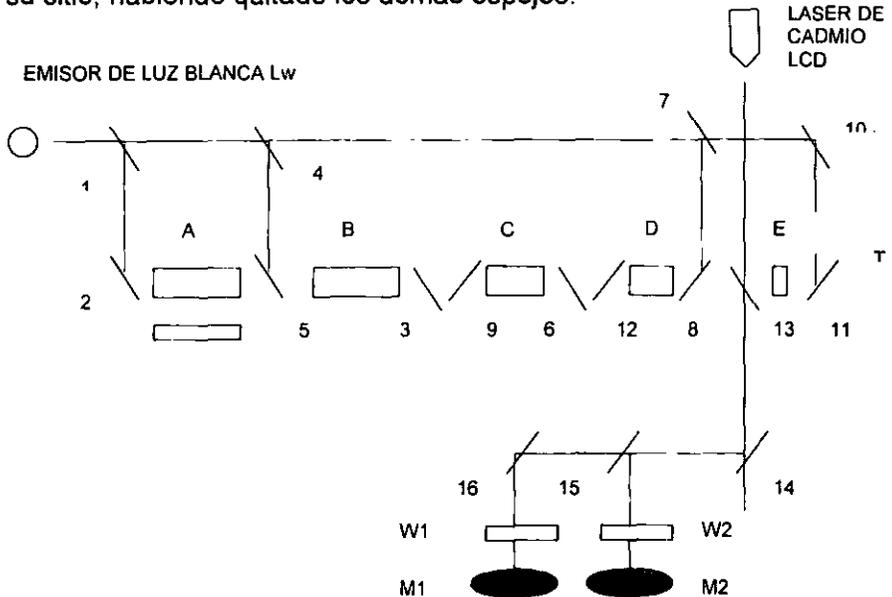


Figura 7.2. Metodo Fabry-Perot para determinar el metro patrón.

En el experimento final se compara cada étalon con su vecino, utilizando una disposición adecuada de espejos. Por ejemplo, puede dirigirse luz blanca a través de A, B y W1, introduciendo los espejos 1,2 y 3. Se observan las franjas de Brewster (con un ángulo de polarización de aproximadamente 56 grados) por medio de M1 y la medida de la posición de la franja central obtenemos la diferencia entre A y 2B. La extensión de este método nos da la diferencia entre A y 16E. Las observaciones de las franjas circulares obtenidas con la luz del láser dan el número de longitudes de onda de la luz del láser correspondiente a la longitud de E con un error de una centésima de longitud de onda, o con una precisión ligeramente inferior. La operación final consiste en comparar la distancia A entre las láminas del étalon y la distancia LO entre dos trazos grabados en una barra de Invar. Esta última longitud se ha comparado previamente con el metro patrón por el método usual de comparación con microscopio, los cuales se sitúan sobre las marcas del patrón y se leen sus indicaciones. Sin alterar nada más, se sustituye el patrón por la barra LO. La suma algebraica de las distancias que hay que mover los microscopios para llevarlos a coincidir con las marcas de LO, nos da la diferencia entre LO y el patrón.¹

¹ R.W. Ditchbur, 1961, p. 135

CONCLUSIONES.

Como hemos visto a lo largo del presente trabajo, efectivamente el láser es un buen instrumento de medición. El lector observó que las medidas que es posible realizar con el láser son del orden de los nanómetros y micrómetros, que en realidad es una precisión mayor a lo requerido en la vida práctica, por ejemplo: en la fabricación de una máquina herramienta se requieren de una precisión de milésimas de milímetros (10^{-6} m.) y si empleamos un láser para medir los componentes obtenemos una precisión de (632nm.), que es aproximadamente la longitud de onda del láser de helio neón.

Con todo lo anteriormente expuesto se concluye que el objetivo del presente trabajo se ha cumplido satisfactoriamente ya que el lector cuenta con una guía para iniciarse en el estudio de las mediciones por láser, el tema para ser tratado con gran detalle es demasiado largo y supera las expectativas del presente trabajo, pero no deja de ser una buena fuente para futuras referencias para toda aquel que se interese en profundizar sus conocimientos en el tema. En el momento de terminar este trabajo se han dado nuevos desarrollos en el tema y todo apunta hacia que en el futuro esta tecnología sea ampliamente utilizada en la metrología dimensional de cualquier máquina herramienta.

NORMAS DE SEGURIDAD CON LASER

Todos los fabricantes de láseres o equipos que los incluyan deben seguir las normas del CDHR (*Center for Device and Radiological Healyh*). En cualquier caso, esta clasificación es útil a la hora de adquirir un láser. Entre las características del láser que nos da el fabricante está incluida la clase a la que pertenece. Esta clasificación se basa en la potencia de salida del láser que puede afectar a seres humanos durante su utilización normal.

Clase I. Potencia de salida por debajo de los niveles que se han establecido como seguros.

Clase II. Estos sistemas no pueden superar una potencia de salida de un miliwatt, deben incluir una luz piloto y disponer de un obturador (dispositivo que impide el viaje del haz láser mas allá de unos poco milímetros de la salida del haz).

Clase IIIa. La potencia de salida está entre 1 y 5 miliwatts. Las normas para estos tipos de láseres serán similares a las de Clase II, con la única diferencia de la etiqueta donde se indica su clase. La mayoría de los láseres de helio neón están en este grupo.

Clase IIIb. Potencia de salida entre 5 y 500 miliwatts. En ningún caso su potencia podrá superar los 500 miliwatts y deberán incluir un piloto luminoso, obturador de salida, conmutador de encendido y apagado, capacidad de conexión y desconexión a distancia y, desde el momento en que se conecta el interruptor hasta que comienza la emisión de luz, deben transcurrir algunos segundos. Pueden producir daños en la piel y la vista.

**DIRECCION GENERAL DE NORMAS
RECOPIACION DE UNIDADES Y SIMBOLOS
DEL SISTEMA INTERNACIONAL (SI)**

UNIDADES FUNDAMENTALES

MAGNITUD	Longitud	Tiempo	Masa	Temperatura	Corriente eléctrica	Intensidad luminosa	Cantidad de sustancia
UNIDAD	metro	segundo	kilogramo	Kelvin	amperes	candela	Mol
SIMBOLO	m	s	kg	K	A	cd	Mol

UNIDADES SUPLEMENTARIAS

MAGNITUD	Ángulo plano	Ángulo sólido
UNIDAD	radián	steradian
SIMBOLO	rad	sr

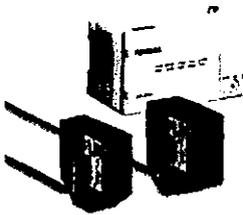
UNIDADES DERIVADAS MAS COMUNES

MAGNITUD	UNIDAD	DEFINICION	SIMB.	MAGNITUD	UNIDAD	DEFINICION	SIMB.
Superficie	metro cuadrado	m m	m ²	Densidad	Kilogramo entre metro cúbico	Kg/m ³	Kg/m ³
Volumen	metro cúbico	m m m	m ³	Energía	Joule	N m	J
Velocidad	metro entre segundo	m/s	m/s	Potencia	Watt	J/s	W
Acceleración	metro entre segundo al cuadrado	m/s ²	m/s ²	Carga eléctrica	coulomb	s A	C
Fuerza	newton	kg m/ s ²	N	Frecuencia	hertz	m ² kg/s ² A ²	Hz
Presión	pascal	Kg/m ²	Pa	Diferencia de potencial	volt	m ² kg/s ³ A ²	V

PREFIJO	peta	exa	tera	giga	mega	kilo	mili	micro	nano	pico	femto	atto
VALOR	10 ¹⁸	10 ¹⁵	10 ¹²	10 ⁹	10 ⁶	10 ³	10 ³	10 ⁻⁶	10 ⁻⁹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹⁵	10 ⁻¹⁸
SIMBOLO	P	E	T	G	M	k	mm	μ	n	p	f	a

Los prefijos *deca*, *hecto*, *deci* y *centi*, no se consideran en el S.I. actual, y su empleo se permite sólo en algunos casos. Por ejemplo, centímetro (cm) y decímetro cúbico (dm³).

BITMAKER: MODELO LK, Sensores de desplazamiento láser CCD.



Medición de alta precisión

Utilizando un nuevo desarrollo en CCD como elemento receptor de luz y un procesador RISC de alta velocidad de 32 bits para el procesamiento de la señal, la serie LK proporciona una medición de alta precisión sin verse afectada por las propiedades superficiales del objeto. El LK-031 dispone de una resolución de 1 µm y una linealidad de ±0,1% del fondo de escala.

Punto de luz láser visible con diámetro de 30 µm

El original sistema óptico de KEYENCE, reduce al mínimo la aberración de la lente para que el LK-031 tenga un diámetro de spot mínimo de 30 µm. Ello, permite medir con precisión el contorno superficial de un objeto.

Insuperable rango máximo de 750 mm

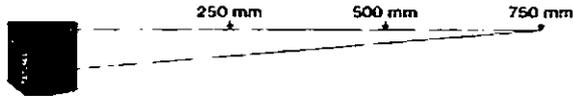
En el modo de largo alcance, el rango de medición de 500 mm ±250 mm es adecuado para la mayoría de aplicaciones.

CARACTERISTICAS

- *Linealidad del ±0,1% del fondo de escala (Todos los modelos)
- *Resolución de 1 µm (LK-031)
- *Punto de luz 30 µm de diámetro (LK-031)
- *Gran distancia de medición de hasta 750 mm (LK-501/503)
- *La medición no se ve afectada por el color, textura superficial o luz externa

Rango de medición

- Alta precisión:
- 30 ±5 mm
- Normal:
- 80 ±15 mm
- Larga distancia
- 350 ±100 mm
- 500 ±250 mm



Medición estable en distintas superficies de objeto

El circuito LFTC con patente pendiente, permite hacer mediciones en objetos multicolores o estampados y objetos con baja reflexión tales como caucho negro, sin necesidad de hacer ajustes adicionales.

Cabezal sensor impermeable con grado de protección nominal IP-67

Principio de medición

El sensor de desplazamiento láser CCD utiliza un sistema de medición por triangulación.

Los sensores de desplazamiento láser convencionales utilizan un PSD (detector sensible de posición) como elemento receptor de luz. En cambio, la serie LK utiliza un CCD como elemento receptor de luz. La luz que se refleja por un objeto pasa por la lente receptora que enfoca la luz en el PSD o CCD.

El PSD utiliza la distribución de la cantidad de luz que llega al elemento receptor para determinar el centro del mismo e identificar como posición del objeto. Sin embargo, la distribución de la cantidad de luz se ve afectada por la condición superficial del objeto, causando variaciones en el valor de la medida. El CCD detecta el valor pico de la cantidad de luz en cada píxel, identificando así la posición del objeto.

Por consiguiente, el CCD proporciona una alta precisión en la medición del desplazamiento sin tener en cuenta la distribución de la cantidad de luz en el elemento receptor.

MICROMETROS LÁSER.

Descripción



Alta velocidad y precisión en un sensor con una interesante relación calidad/precio.

Con un sensor de imagen CCD de 5 000 bits como elemento de recepción de luz, la serie VG ofrece una resolución de 5 µm. La velocidad de muestreo de alta velocidad de 780 c/s permite hacer mediciones de dimensiones, diámetro exterior y forma de objetos que se mueven a gran velocidad. El área de medición de 35 x 300 mm permite que la serie VG mida objetos de distintos tamaños.

Control versátil con cuatro modos de medición.

Con un sensor de imagen CCD que puede confirmar la posición del objeto, la serie VG tiene cuatro modos de medición: Modo normal (medición de diámetro exterior/ancho) EDGE por luz (medición de separación) EDGE oscuridad (control de EDGE y medición de irregularidades) Modo de segmento (medición de posición, dimensión y diámetro interior de objetos de forma compleja).

Display fácilmente visible con LED de dos colores.

El display LED de dos colores permite que los operarios puedan distinguir fácilmente los productos aceptables de los no aceptables, incluso a larga distancia. La función de pantalla de posición de medición integrada permite que la parte que se está midiendo en ese momento pueda confirmarse de un solo vistazo.

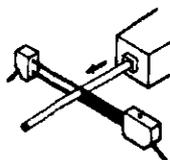
No necesita sensor para la función de sincronismo.

La serie VG empieza a medir cuando el objeto interrumpe una parte especificada de la luz. Sin embargo, la función de sincronismo automática también permite programar el tiempo inicial. Con ello es posible utilizar un solo sensor de la serie VG para medir objetos en movimiento en su posición óptima.

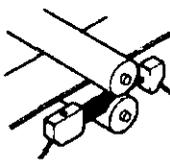
Función TEACHING simplifica la configuración de ajuste de los límites superior e inferior.

Cuando se coloca un objeto con dimensiones de límite superior o inferior dentro del rango de medición, se pueden ajustar fácilmente los límites superior e inferior. Se pueden memorizar hasta ocho juegos de límites superior e inferior y pueden ser conmutados externamente cada vez que cambie los productos en la línea.

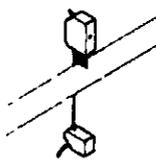
APLICACIONES



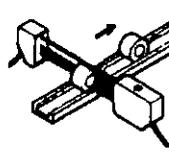
Medición de diámetros exteriores.



Medición de la separación entre rodillos en laminadores.



Medición de espesores en laminas.



Medición de diámetros interiores.

Características

Resolución de 5 µm

Velocidad de muestreo de 780 c/s Display LED de dos colores

Rango de medición

0,5 a 35 mm diámetro

BITMAKER: LB-1000W SENSOR DE DESPLAZAMIENTO DE ALTA PRECISIÓN.

DESCRIPCION.

El sensor tiene una linealidad del 0,25% del fondo de escala.

El emisor y receptor de la serie LB-1000W utilizan una lente de cristal esférico para reducir las aberraciones ópticas. Un circuito de control automático de la potencia del láser y un circuito de control de sensibilidad ajustan automáticamente el nivel de cantidad de luz recibida para mantener una recepción óptima (excepto el LB-1201W)



El haz láser visible simplifica la instalación del sensor.

La serie LB-1000W emplea un láser semiconductor visible con un diámetro de punto de luz pequeño. El haz visible facilita el alineamiento del cabezal sensor con objetos pequeños. (El LB-1201W utiliza un diodo láser infrarrojo)

Tecla de autocero.

Con la tecla AUTOCERO, cualquier valor medio puede establecerse a cero. El ajuste de cero con respecto al objeto patrón puede completarse con la pulsación de un botón y puede ajustarse incluso desde terminales externos.

Circuito ARC.

El sistema de Control Automático de la velocidad de Respuesta permite adaptarse automáticamente a cada condición. Esto es lo que hace el sistema KEYENCE ARC. Cuando se requiere un posicionamiento a alta velocidad, la velocidad de respuesta aumenta. Cuando se requiere una resolución estable, la velocidad de respuesta disminuye. Antes de que el sensor convierta el desplazamiento total del objeto, analiza si la distancia entre el sensor y el objeto ha cambiado y ajusta una óptima velocidad de respuesta. El sistema ARC es ideal para mediciones de diferencia de altura en objetos de alta reflexión y la detección de irregularidades en objetos en movimiento.

Indicador de salida con función de estabilidad.

El indicador de salida cambia a rojo cuando el objeto está fuera del rango de medición. Cuando el objeto entra en el rango de medición, el indicador cambia a amarillo y luego a verde cuando llega aproximadamente al centro de dicho rango. El usuario puede instalar fácilmente el cabezal sensor en la línea de producción, a través del indicador de salida.

Aboites, Vicente, *El láser*, Colección la Ciencia en México, Fondo de Cultura Económica, Mexico 1991.

Bob Bridges, Ph.D., and David A. White, *Laser Trackers a new breed of CMM*, reportaje de "Quality Digest", Febrero de 1998.

Conference Critical Reviews of Optical Science and Technology, *SPIE V. 816*, N.A. Massie Editor, San Diego California E.U., 1987

Daniel Malacara, *Óptica Básica*, Fondo de Cultura Económica, México 1989

Drain L.E., *The Laser Doppler Technique*, J. Wyley 1980.

Dudley H. Towne, *Wave Phenomena*, Dover Publications Inc., New York 1976.

Harris Muñoz y N. Oswaldo, Diseño y construcción de un interferómetro Twyman-Green, Tesis, México 1966.

Hecht J. Teresi, *El rayo Láser*, Salvat Editores, España 1987.

Hecht, Eugene. *Optics*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., segunda edición mayo 1990.

Iovine Jhon, *La holografía una guía fácil para hacer hologramas*, Serie Mc Graw Hill de Divulgacion Científica, España 1992.

JCA Chaimowcz, *Ondas Luminosas*, Editorial Paraninfo, Madrid 1990.

Kock Winston E, *Laser and Holography*, Dover, New York 1981

Malacara Daniel., *Optical Shop Testing*, A. Wiley, Intersciencie Publication, New York 1992

Malacara, Daniel., *Optica Tradicional y Moderna*, Colección la Ciencia desde México, Fondo de Cultura Económica, Mexico 1988.

Metalcutting: Todays Techniques for Engineers and Shop Personnel, By Editor of American Machinist, Mac Graw Hill Publications Company, New York 1979.

Ostrovski Yuri Isaevich, *Interferometry by Holografhy*, Springer-Verlag, Berlin,1980.

Roberto Galicia Sánchez, *Metrología dimensional geométrica*, AGT Editor, México 1999.

Rw. Ditchbur, *Light*, Dover Publications Inc., New York 1961.

Tur, Terrasa Juan, *Tecnología y práctica del láser*, Marcombo Boixareu, Barcelona 1987.

Verschueren Karel, *Material Envirometal Data Sheet*, 1v, NewYork, 1996