

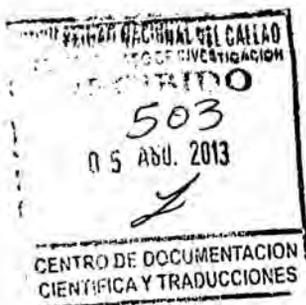


AGO 2013

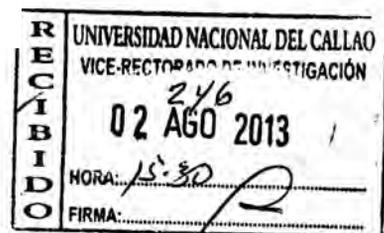
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA - ENERGÍA

**SENSOR DE NIVEL DE LÍQUIDOS CON FIBRA ÓPTICA
MICROCURVADA VARIANDO EL ÍNDICE DE
REFRACCIÓN MODULADO EN INTENSIDAD DE LUZ.**



(Período 2011-2013)



NELSON ALBERTO DIAZ LEIVA

RESOLUCIÓN Rectoral N° 780 -2011-R

(01-09-2011 - 30-06-2013)

LIMA - PERÚ

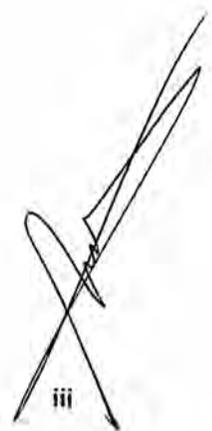
2013



INDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
II. MARCO TEÓRICO	4
2.1. ANTECEDENTES RELACIONADOS CON LA INVESTIGACIÓN	4
2.2. BASES TEORICAS	16
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	41
III. MATERIALES Y METODOS	43
3.1. SOBRE LA POBLACIÓN Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN	43
3.2. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE LA RECOLECCIÓN DE DATOS	44
IV. RESULTADOS	58
4.1. DEL PROCESO EXPERIMENTAL DE TOMA DE DATOS	58
4.1.1. DEL REGISTRO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES	60
4.2. DEL PROCESO DE TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES	66
4.3. TASAS DE CAMBIO DE INTENSIDAD DE LUZ POR NIVEL DE LÍQUIDO PARA CADA LÍQUIDO	75
V. CONCLUSIONES	79
VI. DISCUSIONES	80
VII. BIBLIOGRAFÍA	81
APENDICE A: MATRIZ DE CONSISTENCIA	84
APENDICE B	85
APENDICE C	90
ANEXO A	91
ANEXO B	93
ANEXO C. PLANOS DE SOPORTE OPTOMECANICO	94

ANEXO D.....	97
ANEXO E: CATALOGO DE ESPECIFICACIONES DEL SENSOR DE LUZ.....	98



iii

RESUMEN

En este trabajo se expone el estudio de las relaciones causales de la intensidad de la luz con el nivel de líquidos variando el índice de refracción de una fibra óptica microcurvada, así como la presentación de soportes opto mecánicos previamente diseñados y construidos; necesarios para determinar las relaciones a estudiar basado en la teoría de acoplamiento de modos en una nueva variante, que es con respecto a la variación del índice de refracción del recubrimiento manteniendo constante la amplitud y frecuencia espacial de los microcurvados en una fibra óptica.

Relacionando la intensidad de luz modificando el nivel de cinco diferentes líquidos se pudo establecer que la fibra óptica microcurvada variando el índice de refracción del recubrimiento si puede ser utilizado como un sensor de nivel de líquidos tipo transmisor, extrínseco y de amplitud modulada, con un rango de variación de nivel líquidos dados en milímetros.

Adicionalmente se encontró que la variación de intensidad de luz se relaciona directamente con el nivel de líquidos medidos en milímetros para cada uno de los líquidos utilizados que fueron Agua, líquido rehidratante (Sporade), alcohol, Chicha de Jora y Chicha morada, líquidos a los que se le determinó su índice de refracción.

Se presenta un fenómeno de resonancia óptica en relación al aumento de la sensibilidad del dispositivo conforme el índice de refracción del recubrimiento constituido por el líquido que rodea la fibra se acerca al índice de refracción del núcleo de la fibra óptica.

Palabras clave: Fibra óptica microcurvada, acoplamiento de modos, índice de refracción, frecuencia espacial, intensidad de luz.



1

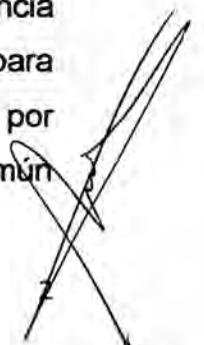
I. INTRODUCCIÓN

Trabajos con fibra óptica utilizados como sensores microcurvados tradicionales son bien conocidos y se han encontrado una amplia variedad de aplicaciones. Un sensor microcurvado genérico está compuesto por una fibra óptica sensante, la cual es introducida entre un par de planos deformadores la que es de alguna manera obligada a curvarse en un patrón regular con una periodicidad espacial de curvado denotada con la letra Λ (N. Lagakos, 1987), estos sensores pueden ser usados para medir presión, desplazamiento, temperatura, ondas acústicas y campos magnéticos, esencialmente cualquier medida que pueda ser hecha produciendo un cambio en la amplitud, la frecuencia espacial o como se plantea en este trabajo en la variación del índice de refracción del recubrimiento de la fibra óptica microcurvada. Los sensores microcurvados producen un acoplamiento de energía entre varios modos guiados (energía luminosa que se trasmite a través de la fibra) y desde modos guiados a modos radiados (energía que sale fuera de la fibra) esto último produce pérdidas en la transmisión de la potencia óptica registrada en variaciones de intensidad de luz.

La naturaleza resonante de este efecto causa la pérdida de intensidad de luz que es altamente dependiente de la frecuencia espacial de los curvados, de la amplitud de los curvados y en este trabajo planteamos que también depende de la variación relativa de índices de refracción entre el núcleo y el recubrimiento.

El espaciamiento de las corrugaciones esta acoplada a la frecuencia del máximo modo de acoplamiento de los modos guiados a radiados.

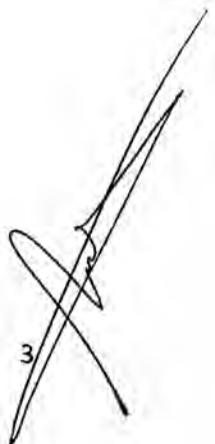
La presión sobre los planos inducen el curvado en la fibra (Taylor, 1984) en consecuencia se produce el acoplamiento de modos y la pérdida de potencia óptica. Adicional a esto la fibra debe ser jalada en los extremos del sensor para acomodar los curvados, generando una cantidad significativa de desgaste por fricción. Esto limita el número de curvados a uno o dos curvados por lo común



en el caso de fibra optica de vidrio, pero no se tiene restriccion en el caso de una fibra óptica plástica que se utilizó en el presente trabajo.

La sensibilidad depende directamente del número de curvas. La amplitud de la curva además; no puede ser grande ya que rompería la fibra en el caso de fibra óptica de vidrio y produciría deformaciones permanentes en una fibra óptica de plástico.

En éste trabajo se presenta los elementos optomecánicos previamente diseñados y construidos para obtener los datos experimentales que nos permita determinar la relación entre la variación del nivel de líquidos y la variación de la intensidad, como consecuencia de variar el índice de refracción de recubrimiento de la fibra a través de la variacion de nivel de los líquidos utilizados, manteniendo constante la amplitud y la frecuencia espacial del microcurvado en una fibra optica plástica.



II. MARCO TEÓRICO

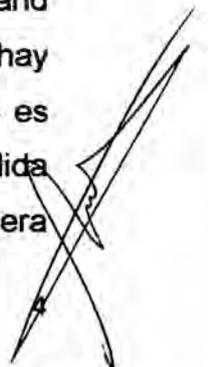
2.1. ANTECEDENTES RELACIONADOS CON LA INVESTIGACIÓN

A. Antecedentes de sensores microcurvados

a) **(Kuang, 2009)** En su trabajo de investigación titulado “Plastic Optical Fibre Sensors for Structural Health Monitoring: A Review of Recent Progress” manifiesta que en general se han reportado dos clases de sensado basados en intensidad y son agrupados basados en si la fibra óptica es un sensor extrínseco o intrínseco. En un sensor intrínseco, la modulación de la señal óptica es un resultado directo del cambio físico en la fibra óptica en respuesta a alguna medida (por ejemplo un cambio de la señal debido a micro o macro curvado de la fibra). Por otro lado, en una fibra óptica extrínseca, la modulación de la señal toma lugar fuera de la fibra (por ejemplo un cambio de señal debido a un cambio de distancia de la brecha que hay entre dos extremos de una fibra óptica pulidos).”

La clasificación así establecida por los sensores de fibra óptica, nos permite identificar un tercer tipo de sensor híbrido es decir que el sensado se produzca por una combinación de ambos, es decir que el resultado de la modulación de la señal óptica al mismo tiempo que es el resultado de un cambio directo físico de la fibra (cambio de índice de refracción del recubrimiento) también es fuera del núcleo de esta como se expondrá en el presente trabajo.

b) **(B.Gholamzadeh, 2008)** en su trabajo de investigación “Fiber Optic Sensors World Academy of Science, Engineering and Technology” Afirma que; cuando se curva una fibra hay pérdidas debido a este curvado. El curvado así localizado es denominado micro curvado. Así, la intensidad de luz a la salida es proporcional a la cantidad de microcurvados. De manera

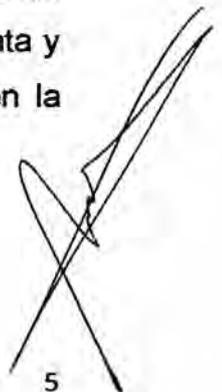


que, para detectar los cambios en la intensidad de luz a la salida, la cantidad de microcurvados pueden ser medidos de manera que se puede usar como un sensor de fibra óptica.

Además de la medida de desplazamiento, varios otros parámetros tales como tensión, presión fuerza y posición pueden ser mecánicamente acopladas al desplazamiento de este dispositivo microcurvado tal que estos parámetros pueden ser medidos por el mismo arreglo de sensor de fibra. Las ventajas principales de la fibra microcurvada es la sensibilidad, el bajo precio y cuando es usada en combinación con las técnicas de reflectometría óptica en el dominio de tiempo puede ser usada para cubrir una amplia área. La desventaja principal de usar la fibra sensible microcurvada es su exactitud, que por lo general es bastante baja”.

Las pérdidas de intensidad luminosa en una fibra óptica, en la que se inducen microcurvaturas se debe al acoplamiento de modos (transferencia de energía luminosa) de modos guiados en el núcleo y recubrimiento a modos radiados fuera de la fibra óptica, ya que los rayos ópticos en la fibra óptica como consecuencia de los microcurvados pierden la condición de reflexión total interna, y salen fuera de la fibra (modos radiados), provocando una disminución de la señal óptica en el detector que modula estas variaciones relacionándolas con los parámetros a ser medidos.

La teoría de acoplamiento de modos en fibra óptica microcurvada explica que existe una longitud de onda adecuada a la cual la sensibilidad de la fibra óptica aumenta y que no solo influye la cantidad de curvados sino también la amplitud de los curvados.



c) (Fegadolli, 2008), en su trabajo "Plastic Optical Fiber Microbend Sensors" establece que el principio de operación de los sensores de fibra óptica microcurvada se basa en el cambio de las características de propagación de la fibra inducida por tensión, vía el efecto foto elástico.

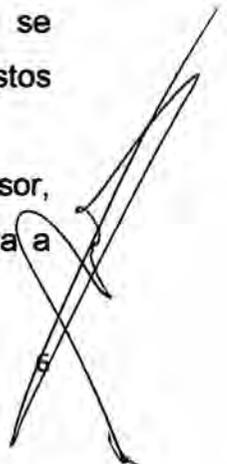
Tal cambio se realiza por el acoplamiento entre modos ópticos guiados y modos ópticos radiados, así el funcionamiento del sensor depende del radio de curvatura creado por la microcurvatura.

Tal clase de sensores puede ser implementada usando fibra óptica de plástico, puesto que ellos tienen el potencial para realizar sensores de fibra óptica económicos. Para desarrollar un modelo para este tipo de sensores se puede utilizar las conocidas ecuaciones de onda acopladas que da la dependencia de la potencia óptica en la fibra óptica con el radio de curvatura.

El trabajo de construir sensores microcurvados con fibra óptica plástica permite utilizar los mismos modelos matemáticos de la teoría de acoplamiento de modos, desarrollados para la fibra óptica de vidrio, con la ventaja de reducir enormemente el costo de la construcción y el riesgo de fracturarse fácilmente con la generación de las microcurvaturas en ella.

La fibra óptica plástica además de tener mayor resistencia a las deformaciones mecánicas continuas por su mayor tamaño del núcleo permite transmitir una mayor cantidad de intensidad de luz y facilita la detección de la luz a la salida de ella, aunque la atenuación es grande comparada con la fibra de vidrio, se compensa con el hecho de que para la construcción de estos sensores se utiliza longitudes pequeñas.

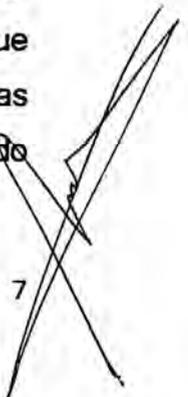
d) (LEE, 2005), en su trabajo, "A microbent fiber optic pH sensor, Optics Communications" menciona que cuando la luz pasa a



través de una porción microcurvada de fibra óptica, la potencia de luz que se propaga se acoplaría entre los modos de orden m -ésimo y n -ésimo si se tiene una frecuencia espacial Λ de perturbación que se relaciona con los modos de propagación β_m y β_n que son las constantes de propagación de los modos de orden m y n , respectivamente. Así la luz que se propaga en la porción curvada de la fibra como solo modos guiados (núcleo de la fibra), consigue acoplarse entre los modos no guiados de más alto orden la cual comprende el recubrimiento y los modos de radiación”.

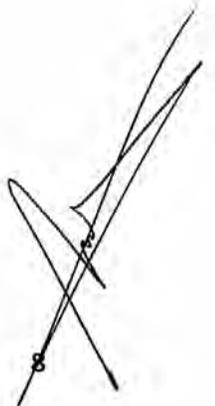
La pérdida de Intensidad de luz en una fibra óptica obedece a un proceso de resonancia óptica (máxima disipación de energía) debido a una longitud de curvado Λ característica en la fibra óptica, que relaciona los modos guiados en el núcleo de más alto orden con los modos radiados, que son los que disipan la energía óptica, los modos establecidos β_m y β_n representan las componentes axiales (en la dirección del eje de la fibra óptica) del vector de onda, que su diferencia está relacionada íntimamente con los índices de refracción del núcleo y recubrimiento de la fibra los que nos hace también poder relacionar este fenómeno de resonancia óptica con la variación de índices de refracción en la fibra óptica que constituiría una forma más de realizar el sensado y ampliar el rango de mediciones.

- e) **(Lau, 2003)** en su trabajo “Fibre-optic sensors and smart composites for concrete applications Magazine of Concrete Research” establece que el sensado basado en la modulación de intensidad es debido a las pérdidas de intensidad de luz que son asociados con curvados o microcurvados de fibras ópticas a lo largo de cualquier porción de su longitud más conocido como sensor microcurvado de tensión.



Un sensor microcurvado de fibra óptica con un diafragma elástico y encapsulado sirve para medir deformaciones en estructuras. Los sensores que son adecuados para este fenómeno son denominados sensores de tipo intensidad o amplitud. La ventaja de estos sensores de intensidad es la simplicidad en la construcción y compatible con la tecnología de la fibra multimodo. Los sensores de fase cubren un amplio rango de fenómenos ópticos para propósitos de sensado. Los sensores microcurvados pueden ser utilizados en la infraestructura civil para medir desplazamientos, tensiones y vibraciones con una apropiada calibración. Es también de particular interés el desarrollo de sensores microcurvados de fibra óptica para aplicaciones de sensado distribuido a lo largo de la longitud de un puente en construcción o en la estructura de un edificio, para detectar modos de vibración y frecuencia bajo condiciones de fuerte viento.

Los sensores de fibra óptica microcurvados son utilizados generalmente en situaciones en las cuales se tienen estructuras que van a ser afectadas por pequeños desplazamientos, las cuales se inducen a través de deformadores mecánicos que inducen microcurvaturas en las fibras con un diseño específico para el sensado, trayendo consigo una pérdida en la intensidad de la luz que es proporcional a la deformación que se produce en la fibra óptica, estos sensores son conocidos como sensores modulados por intensidad y son relativamente fáciles de construir y económicos.

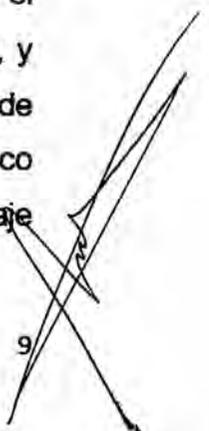


B. Antecedentes de sensores de nivel de líquidos

a) **(Lopez J. A., 2010)** en su trabajo de investigación "Novel Multimode Interference Liquid Level Sensors" muestran un Nuevo sensor de nivel de líquido con fibra óptica basado en interferencia multimodo (MMI). El (MMI) sensor de nivel de líquidos son fáciles de fabricar por el que resulta un sensor rentable.

Usando este principio se construyeron dos clases de sensores de nivel MMI, incluso cuando ellos funcionan basados en el efecto MMI realizan la operación de multiplexado, las capacidades de sensado son algo diferentes. Eligiendo la correcta fibra óptica multimodo (MMF) podemos también realizar la operación continua y discreta con un rango fácilmente ajustable. Esta clase de sensado es muy prometedor no solo para el sensado de nivel de fluidos sino también para aplicaciones de sensado de índice de refracción puesto que pueden fácilmente discriminar el índice de refracción de los líquidos.

b) **(Froni, 2006)** en su trabajo de investigación "Low-cost Level and Pressure Plastic Optical Fiber Sensor" nos presentan un diseño de un sensor de nivel de líquidos en que la luz que es enviada a la fibra óptica plástico (POF) de prueba es dirigida a un divisor de haz de POF para interactuar con el líquido y receptionar nuevamente la señal. Se utilizó una fibra óptica de plástico estándar para conectar un extremo del divisor de haz a un led de luz verde y el otro extremo a un fotodiodo respectivamente. Posee un control electrónico para el led, el cual es controlado por un circuito de polarización simple DC, y el fotodiodo, el cual está conectado a un amplificador de transimpedancia sumado a un diferencial. El circuito electrónico ha sido apropiadamente diseñado tal que la salida de voltaje



del amplificador transimpedancia es igual a la referencia de voltaje cuando el POF de prueba está inmerso en el líquido. Por el contrario si el sensor de prueba está en el aire y la luz se mantiene reflejándose de regreso en la punta, la salida de voltaje del amplificador de transimpedancia se incrementa y uno de los amplificadores diferenciales se satura en alto.

La salida de voltaje del sensor es por lo tanto procesada por un interruptor de Schmitt, de esta manera resulta en una señal digital.

c) (Vargas, 2004) en su trabajo “A Plastic Fiber – Optic Liquid Level Sensor”, Desarrollan un sistema para medida de nivel de líquidos en tanques múltiples usando tecnología de fibra óptica. En la industria de servicios de campos petroleros o cualquier sector que requiera la medida de nivel de líquidos en atmosferas inflamables puede beneficiarse de esta tecnología intrínsecamente segura.

Tres diferentes modelos considerando varios efectos han sido derivados y probados en dos prototipos. El primer modelo usa emisores puntuales y divergencia, el segundo modelo usa emisores finitos con aproximación paraxial, y el tercer modelo usa una distribución de rayos de potencia constante usando en cada uno de los rayos de los emisores la ley de Snell, para tener en cuenta las aberraciones ópticas. Un método de Monte Carlo se uso para ajustar los datos experimentales y obtener el modelo de parámetros.

El modelo más simple demuestra ser lo suficientemente exacto para una correlación propia entre los datos experimentales y la curva ajustada en un rango de 2m.

d) (Lopez F., 2002) en su trabajo de investigación “Diseño y construcción de un sensor de nivel utilizando fibras ópticas”

expone que el sensor de nivel es de tipo transmisivo, extrínseco y de amplitud modulada digitalmente; utiliza el principio de flotación para determinar el nivel de un líquido en un contenedor.

Este sensor puede realizar mediciones independientemente de las características físicas o químicas del fluido en el contenedor, tales como la viscosidad, densidad, transparencia, etc.

El procesamiento de la señal lumínica entregada por las fibras ópticas se realiza con el microcontrolador COP8SGR, el cual interpreta la señal recibida y muestra el nivel del líquido del contenedor por medio del exhibidor de cristal líquido AND491.

Debido a la naturaleza digital del sensor y a la utilización de las fibras ópticas, es posible que éste opere en ambientes donde existe una alta interferencia electromagnética, lo que lo hace atractivo para muchas aplicaciones industriales.

e) **(Svirid, 2000)** en su trabajo “A prototype Fiber-Optic Discrete Level –Sensor for liquid Propane – Butane” nos dice que el prototipo de sensor de fibra óptica de nivel de líquidos multipuntos descrito en su trabajo mide el nivel de líquidos de propano y butano en tanques industriales de almacenamiento. Se tiene varias ventajas importantes sobre los tipos de sensores existentes de nivel de líquidos, como simplicidad, reducido costo e incremento de tiempo de vida.

Estas ventajas resultan en varias innovaciones, un transductor refractométrico mejorado, una topología multiplexada simple pero efectiva, y un algoritmo operacional rápido de rastreo de nivel. Esto es complementado por la elección racional de varios componentes (e.g. fibras ópticas multimodo, led de rayo angosto y alto poder)

El dispositivo particular descrito en su trabajo emplea 60 transductores individuales ubicados de manera equidistante

con un rango de 60cm sobre el sensor de prueba. Así los elementos nuevos y soluciones en su trabajo pueden encontrar aplicaciones en una variedad de sensores de fibra óptica de nivel de fluidos empleando arreglos mucho más grandes de puntos de transductores.

C. Antecedentes de sensores de fibras ópticas modulados en intensidad de luz

a) **(Sze, 2008)**, en su trabajo de investigación, "Remote flood monitoring system based on plastic optical fibres and wireless motes", manifiestan que en relación al desarrollo de un sistema de monitoreo remoto de flujo basado en sensores de fibra óptica plástica (POF) y una mota de red inalámbrica. La red inalámbrica está comprendida de unas motas unidades MICA2DOTTM, que fue usada como plataforma a un monitor y el registro de la señal desde el sensor POF y transmitir esta información a una estación base inalámbrica. Un prototipo del sensor integrado inalámbrico de POF se construyó interpretando en lo posible para emplear la unidad remota autónoma con un monitoreo múltiple de puntos necesarios.

Una simulación de monitoreo de torrente fue realizado en una cubeta de ondas donde cuatro de estas motas de sensores de fibra óptica inalámbricas fueron usadas para detectar el crecimiento de nivel de agua en el recipiente de 24m x10mx0.9m. La novedad de este trabajo está en la acertada integración de la plataforma inalámbrica a un sensor de nivel de líquidos basado en POF y la subsiguiente demostración del prototipo del sistema para los propósitos de aplicaciones de monitoreo de torrentes.

El principio de sensado del sensor POF desarrollado es bien conocido y está basado en la pérdida de reflexión total

interna de la señal óptica conforme el sensor de prueba entra en contacto con el líquido. Comparado con sensores basados en fibra óptica reportados previamente en la literatura, el perfil de la sonda usada en este estudio difiere en términos de su simplicidad en diseño, mientras exhibe una excelente razón de pérdida en la intensidad de la señal sin la necesidad de aditamentos adicionales para las pruebas tales como prismas ópticos. Las pruebas realizadas mostraron que detecta el nivel de líquidos sin fallas cuando el líquido sube o baja de un nivel predeterminado. La sensibilidad del sensor de fibra óptica fue evaluado simulando diferentes razones a los cuales los líquidos se elevan por sumersión de la punta del sensor en el líquido y viceversa a varios rangos de velocidad desde 1mm/min a 500mm/min.

b) **(Xu, 2008)** en su trabajo de investigación "High Sensitive Temperature Sensor Using a Liquid-core Optical Fiber with Small Refractive Index Difference Between Core and Cladding Materials" presentan una nueva clase de sensor de temperatura basado en el principio de intensidad modulada. Una fibra óptica hueca se llena con una mezcla de tolueno y cloroformo para formar la fibra óptica con núcleo liquido LCOF. Esta clase de sensor tiene una alta sensibilidad en medidas de temperaturas exactas y un rango operacional variable, incluyendo la temperatura ambiente, simplemente cambiando la concentración de los dos componentes. Prácticamente, esto también tiene una ventaja de simplicidad y precio bajo.

El sensor de fibra esta hecho de fibra de silicona con núcleo hueco protegido con un recubrimiento de polimida. La fibra puede ser comercialmente obtenida con un diámetro de núcleo interno de 250 μm . Para conseguir una capacidad de confinamiento apretada, el diámetro del núcleo hueco es reducido desde 250 μm a 50 μm . Usando un sistema de jeringuilla de alta presión, el recubrimiento de la fibra hueca es

llenada con una mezcla líquida, cuyo índice de refracción es un poco más alto que el recubrimiento de silicón

c) (Golnavi, 2008) en su trabajo "Potentials of Plastic Optical Fibers for Sensor Technology" nos dicen que las fibras ópticas, en particular, fibras de vidrio, son mayormente usadas en el campo de las comunicaciones ópticas, así en años recientes nuevos sensores ópticos basados en las fibras ópticas se han reportado en la literatura y producidos comercialmente. Características extrínsecas e intrínsecas de las fibras se han implementado en el desarrollo de tales dispositivos de sensado. Fibras ópticas de vidrio (GOF) debido a la baja atenuación son más adecuadas para propósitos de las comunicaciones ópticas mientras fibras ópticas plásticas son más ventajosas para propósitos de uniones y algunas operaciones de sensado. Considerando este punto diferente (OPF) sensores de fibras ópticas se han desarrollado para mostrar potenciales aplicaciones de POFs en tecnología de sensores. Nuevos dispositivos simples con un mínimo costo son introducidos en este estudio. Se obtienen resultados para el sensado por reflexión de la luz, sensado por pérdida de luz, sensado de nivel, y medida de distancia. Los sistemas presentados son mayormente compactos, así, estos dispositivos con buenos resultados muestran que en principio, estas ideas pueden ser implementadas en diseños de dispositivos en pequeñas escalas. Esto parece ser un gran potencial para aplicar estas ideas para desarrollar nuevos dispositivos adecuados para aplicaciones compactas e integradas.

d) (Monzon, 2007), en su trabajo "Fibras ópticas Microestructuradas estrechadas para fabricar sensores" nos dice que la idea de utilizar la luz como un medio para medir algún tipo de parámetro o perturbación no es nueva, se ha

utilizado desde hace bastante tiempo y con mucho éxito. En la actualidad muchos de los instrumentos metrológicos más exactos se basan en mediciones ópticas. Al incorporar las fibras ópticas en un sistema de medición lo que se logra es hacer medidas más seguras, en espacios reducidos de difícil acceso, construir sistemas compactos y portátiles. En un sensor de fibra óptica la perturbación externa produce cambios en al menos uno de los cuatro parámetros de la luz: intensidad, longitud de onda, fase y polarización. Los cambios son analizados para determinar la magnitud de la perturbación. Es posible perturbar la luz al actuar directamente sobre la fibra óptica, pero también es común que la fibra se utilice únicamente para llevar y traer la luz de la zona de influencia de la perturbación. En trabajos realizados se tiene dos esquemas sencillos de un sensor de fibra óptica. El primero donde la fibra óptica tiene la función de llevar la luz de la fuente a la zona de interacción con la perturbación. Mientras en la segunda forma la fibra óptica sirve para coleccionar la luz que lleva codificada la información de la perturbación hacia un instrumento de medición. Si aplicamos una presión sobre la fibra óptica se producen micro-deformaciones en su estructura, que inducen pérdidas de luz en la fibra óptica. Conforme la presión aumenta más luz se escapa de la fibra óptica. En el otro extremo la intensidad de la luz que mide el detector está directamente relacionada con la presión que se ejerce sobre la fibra óptica. Estos dos esquemas tan sencillos tienen muchas limitaciones, por lo que se ha buscado técnicas alternativas para producir sensores que además de sencillos sean eficientes y sobre todo sensibles.

e) **(Libo, 2004)** en su trabajo de investigación “ 2-D Fiber – optic sensing Probe” manifiestan que en general, los sensores reflectivos de fibra óptica consisten de una fibra óptica como

fuente de luz y otra fibra como receptora de luz. La fibra como fuentes de luz ilumina la superficie reflejante, las fibras reflectoras reciben la luz reflejada. Midiendo la intensidad de luz de la salida de las fibras receptoras uno puede determinar el desplazamiento 1-D entre la fibra y el objetivo reflejante.

Para este tipo de sensor, las variaciones de intensidad de la fuente de luz puede indicar directamente la inestabilidad de la salida del sensor. Para el sensado bidimensional (2-D) cambiando el objetivo reflexivo, una sonda sensible de fibra óptica se ha diseñado y probado.

La sonda sensible no solo es capaz de sensar variaciones en 2-D del objetivo reflejante, pero puede vencer las desventajas tales como la señal inestable a la salida causadas por las fluctuaciones de la fuente de luz y los cambios de reflectividad de la superficie del objetivo y las pérdidas de intensidad en las líneas de fibra. En la sonda sensible trabajada, se usaron cinco fibras como fuente de luz y receptores de luz reflejada. La luz es transportada a la superficie reflejante por la fibra del centro tal que la luz incide sobre la superficie reflejante. La luz reflejada de la superficie reflejante es recibida por las cuatro fibras arregladas alrededor de la fibra de iluminación. Las cuatro fibras receptoras tienen la misma distancia de separación entre la fibra fuente y las fibras vecinas.

2.2. BASES TEORICAS

A. LA INTENSIDAD DE LA LUZ

a) Naturaleza de la luz

Antes de iniciarse el siglo XIX (Raymond A. Serway, 2005), la luz era considerada como un conjunto de partículas que eran emitidas por un objeto observado o emanaban de los ojos del observador. Newton, principal arquitecto de la teoría de las partículas, afirmaba que estas eran emitidas por una fuente luminosa y que estimulaban el sentido

de la vista al entrar en los ojos del observador. Con esta idea pudo explicar la reflexión y la refracción.

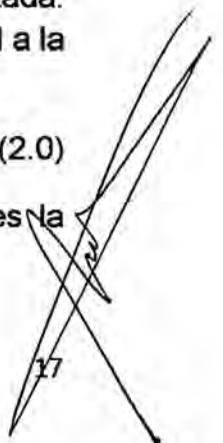
La mayoría de los científicos aceptaron esta teoría. Durante su vida, sin embargo, Newton se propuso otra idea que sostenía que la luz podría ser una clase de movimiento ondulatorio. En 1678, el físico y astrónomo holandés Christian Huygens demostró que una teoría de ondas de luz podría también explicar la reflexión y refracción.

En 1801, Thomas Young (1773-1829) dio la primera demostración clara de la naturaleza ondulatoria de la luz. Demostró que, bajo condiciones apropiadas, los rayos de luz se interfieren unos con otros. Este comportamiento no podría ser explicado en aquel tiempo por una teoría de partículas porque no había forma concebible en que dos o más partículas pudieran unirse y cancelarse entre si. Perfeccionamientos adicionales durante el siglo XIX condujeron a la aceptación general de la teoría ondulatoria, resultado mas importante de la obra de Maxwell, quien en 1873 afirmo que la luz era una forma de ondas electromagnéticas de alta frecuencia, teoría que fue confirmada experimentalmente por Hertz en 1887 al producir y detectar ondas electromagnéticas.

Aun cuando el modelo ondulatorio y la teoría clásica de la electricidad y magnetismo podían explicar la mayoría de las propiedades de la luz, no podían hacer lo mismo con los experimentos subsiguientes. El más notable de estos es el efecto foto eléctrica, también descubierta por Hertz: cuando incide luz sobre una superficie metálica, a veces se expulsan electrones de la superficie. Como ejemplo de las dificultades que surgieron, algunos experimentos demostraron que la energía cinética de un electrón expulsado es independiente de la intensidad de la luz. Este hallazgo contradijo la teoría ondulatoria, que sostenía que un rayo de luz más intenso debería transferir más energía al electrón. Einstein propuso una explicación del efecto fotoeléctrico en 1905 en una teoría que utilizo el concepto de cuantización creado por Max Planck (1858-1947) en 1900. El modelo de cuantización supone que la energía de una onda luminosa está presente en partículas llamadas fotones; por lo tanto, se dice que la energía esta cuantizada. Según la teoría de Einstein, la energía de un fotón es proporcional a la frecuencia de la onda electromagnética:

$$E=hf \quad (2.0)$$

Donde la constante de proporcionalidad $h = 6.68 \times 10^{-34}$ J.s es la constante de Planck.



En vista de estos perfeccionamientos, se debe considerar que la luz posee doble naturaleza: ***en algunos casos exhibe características de una onda y en otras de una partícula.***

b) Intensidad de la luz laser

La intensidad de luz láser será el elemento modulador del presente trabajo de investigación por las características inherentes a él y que es necesaria la utilización de este tipo de luz ya que la teoría de acoplamiento de modos en una fibra óptica microcurvada deduce sus ecuaciones considerando la luz láser.

La palabra láser es la sigla de la expresión light amplification by stimulated emission of radiation que significa amplificación de luz por emisión estimulada de radiación. Esta misma palabra se utiliza para dar nombre al dispositivo que realiza este proceso y para calificar la luz emitida por aquél.

Para producir este tipo de luz se debe estimular o bien con energía eléctrica o con energía óptica a una substancia que puede ser sólida o gas para que emita radiación lumínica y amplificar esta luz en un solo sentido (de ahí se deriva su nombre).

La luz láser es caracterizada por las siguientes propiedades (Svelto, 1998):

- a. Monocromaticidad: Las ondas producidas oscilan todas a una misma frecuencia.
- b. Coherencia: Todas las ondas producidas oscilan en fase
- c. Direccionalidad: Todas las ondas van dirigidas o se propagan en una misma dirección.
- d. Brillo: Alta concentración de energía en una región de superficie pequeña.

Todo este conjunto de características harían pensar que el láser requiere una gran cantidad de energía, no obstante probablemente necesita menor cantidad de energía que muchas de las luces convencionales. Es por ser tan concentrada y tan pura por lo que la luz del láser es tan intensa, no por la cantidad de energía.

B. LA FIBRA ÓPTICA

a) Historia de la fibra óptica

El concepto de comunicaciones ópticas es un concepto muy antiguo en la historia (Newport Corporation, 1986). El envío de mensajes con luz es ciertamente tan viejo como las primeras señales de fuego o humo, y han continuado, en la historia mas reciente en el uso de senaiales con lamparas para comunicación entre barcos en el mar. Asi la primera patente para un sistema de comunicaciones ópticas fue archivado en 1880. En aquel tiempo, Alexander Graham Bell patento el fotofono y demostro una comunicación con un rayo de luz a una distancia de 200m. El fotofono mostrado en la figura 1.1 usó una celda fotosensitiva de seleniun para detectar las variaciones de intensidad del rayo de luz.

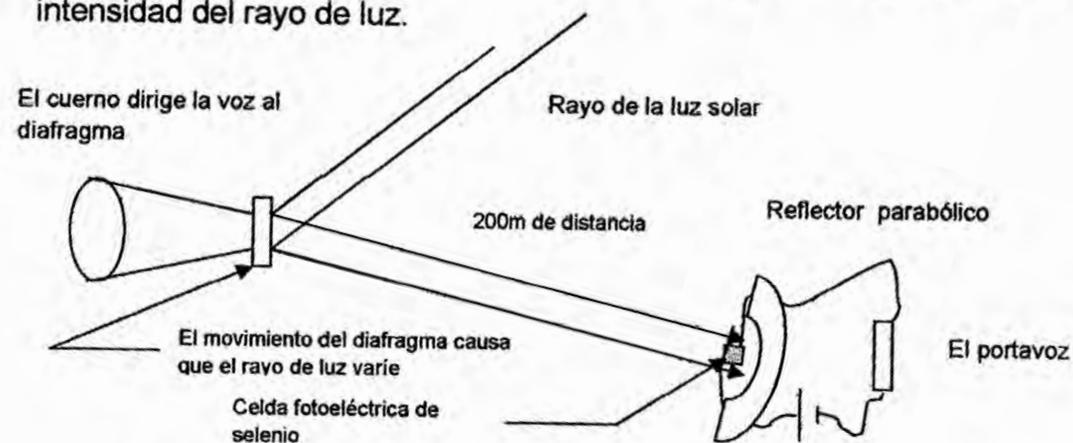


Fig. 2.1 Diagrama esquemático del fotófono de Alexander Graham Bell.
Fuente: (Newport Corporation, 1986)

El todos estos metodos aquí mencionados el envío de informacion dependen de la atmosfera como su medio del trasmision, y cualquiera que ha manejado alguna vez en un día nublado sabe que eso es inestable.

Una guia de onda fabricado de un material no conductor el cual trasmite luz (un dieléctrico), tal como vidrio o plástico suministraría un medio de trasmisión mucho mas estable ya que no esta sujeta a variaciones de la atmósfera.

El guiado de luz por un medio dieléctrico tampoco es una nueva idea. En 1870, Jhon Tyndall mostró que la luz podía ser guiada dentro de un chorro de agua, este efecto es usado actualmente en la construcción de piletas iluminadas con luces de diferentes colores como el existente en la avenida la Marina, Lima.

El experimento de Tyndall está ilustrado en la figura 2.2



Fig. 2.2 El experimento de Tyndall mostrando que un chorro de agua guiaría un rayo de luz. Fuente: (Newport Corporation, 1986)

Por el año de 1910, Hondros y Debye desarrollaron una teoría de guía de ondas de dieléctricos.

El adelanto repentino en ciencia de los materiales, lo cual a hecho a la fibra óptica en guías de onda el principal contendor como medio de elección de transmisión para la corriente eléctrica y futuro sistema de comunicaciones fue marcado por dos eventos. El primero fue la demostración del primer laser operando en 1960. La segunda fue un cálculo, en 1966, por un par de científicos, Charles Kao y George A. Hockham, especularon que la guía de onda de fibra óptica podría competir con el existente cable coaxial usado para comunicaciones, si las fibras podrían hacer que se transmitiera el 1% de la luz en una distancia de 1 Km. Es importante notar que en aquel tiempo la energía luminosa solo podía ser transmitida en un valor menor al 1% de la energía inicial después de solo 20 metros en la mejor fibra que existía

y que sin expertos en materiales fue una predicción record que requería alta calidad de transmisión para poder ser realizada.

Muchos grupos de investigación empezaron activamente a perseguir esta posibilidad. Así en 1970 el grupo de investigación de la Corning Glass utilizó vidrio con alto contenido de silicio para fibras y fue el primero en reportar una transmisión mayor que el 1% en una distancia de 1Km. Este grupo más tarde incrementó la transmisión a más del 40% sobre un Km. Hoy día la transmisión se está realizando en el rango de 95 –96% en un Km. Para comparar, si el agua del océano tuviera una transmisión óptica del 79% a través de cada Km de profundidad uno podría ver un botón en el océano más profundo del mundo a simple vista. El progreso de fibras de alta transmisión es trazado en la figura 2.3.

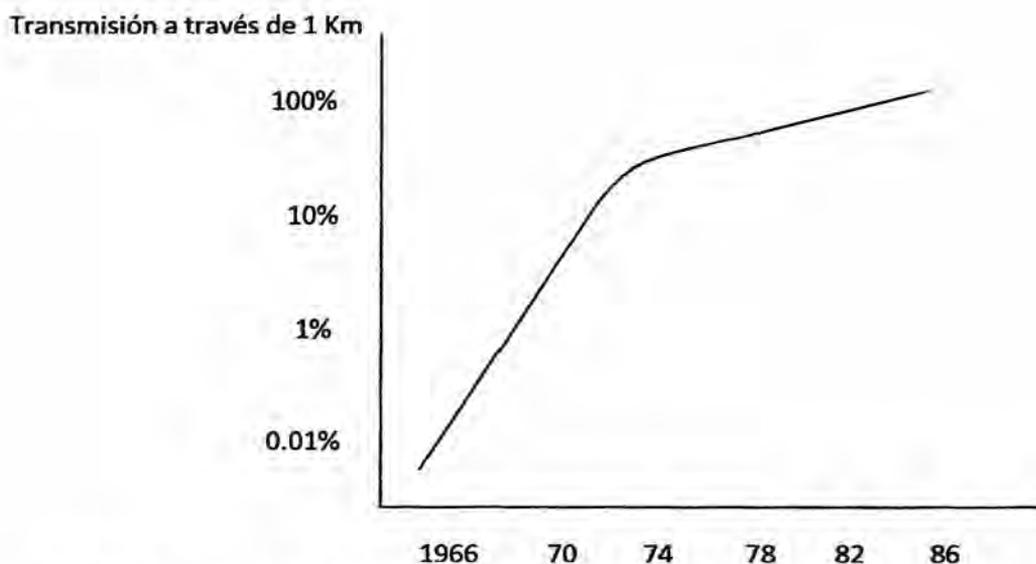


Fig. 2.3. Progresos de transmisión en fibra óptica. Los dos últimos puntos de dato representan resultados cerca del límite teórico al 85% y $1,55\mu\text{m}$
Fuente: Cherin, A. H. (1983). *An Introduction to optical fibers*. New York: McGraw - Hill, Inc.

El logro de bajas pérdidas en la transmisión con la ventaja adicional de portar mayor capacidad de inmunidad ante interferencia electromagnética, pequeño tamaño y peso, ha creado una nueva tecnología óptica.

Los principales atractivos en la transmisión de señales y en la fabricación de sensores de fibra óptica radican en los siguientes aspectos:

- a) Bajas pérdidas y gran ancho de banda
- b) Dimensiones y radio de curvatura pequeño
- c) No conductor, no radiactivo y no inductivo
- d) Peso ligero
- e) Suministra o provee un natural aumento de capacidad.

El tamaño pequeño, radio de curvatura pequeño (unos pocos centímetros), y peso ligero de las fibras ópticas y cables son muy importantes donde el espacio es pequeño, tal como en la aviación, en barcos y en ductos apiñados bajo las calles de la ciudad.

b) Fundamentos de la fibra óptica

Las fibras ópticas (Cherín, 1983) son guías de onda cilíndricas en las cuales la luz convenientemente inyectadas en una extremidad, queda confinada en el curso de su propagación. La propagación de la luz en la fibra se basa en el fenómeno de las reflexiones totales sucesivas que sufren las ondas con el medio que las rodea. Esto implica que el material que constituye la guía de luz tenga un índice de refracción superior al medio que lo rodea.

Bajo su forma mas simple, la estructura de una fibra se puede observar en la figura 2.4 Esta constituida por un núcleo cilíndrico formado de un material transparente de índice de refracción n_1 , rodeada de una cubierta concentrica de indice $n_2 < n_1$. El campo

electromagnético es ahora prácticamente nulo sobre la superficie externa de la cubierta, lo que evita toda pérdida de luz en este nivel. El conjunto de la fibra está protegido por una cubierta de plástico.

- **Propagación de la luz en la fibra**

Para que exista guiado de luz (Senior, 2009), es necesario también que el ángulo i sea superior al ángulo límite de la reflexión total interna, esto impone una condición de inyección de la luz en la fibra. Se definen a y b como los radios del núcleo y la cubierta. Para inyectar la luz en la fibra se concentra, previamente, el haz sobre la cara de entrada de la fibra. Este es ahora convergente y se refracta al pasar del aire al medio de índice n_1 , y que para que se propague es necesario que el ángulo i sea tal que:

$$\text{Sen}(i) < (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

Si θ es el ángulo de aceptación de la fibra, se define la apertura numérica (A.N) (Lomer, 1996) como el seno de este ángulo, es decir:

$$A.N. = n_0 \text{ Sen}(\theta) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.2)$$

Puesto que la apertura numérica A.N es a menudo usado con una fibra en el aire donde $n_0 = 1$.

La apertura numérica puede ser escrita en términos de la diferencia de índice de refracción relativa Δ entre el núcleo y el recubrimiento la cual es definida como:



$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 n_1^2} \quad (2.3)$$

$$\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \text{para} \quad \Delta \ll 1$$

Entonces combinando las ecuaciones (2.2) con (2.3) se obtiene:

$$A.N. = n_1 (2\Delta)^{1/2} \quad (2.4)$$

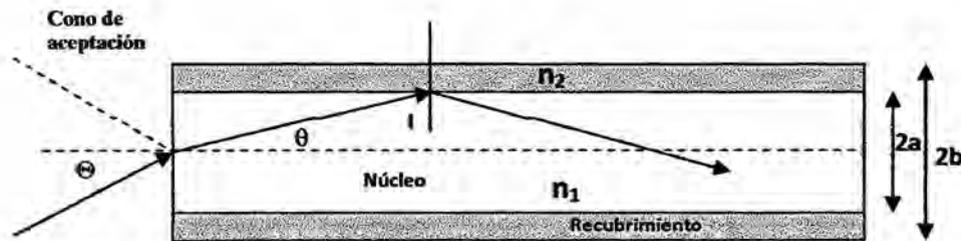


Figura 2.4. Geometría de la fibra óptica.

Fuente: Lomer M. 1996. Curso Internacional sobre telecomunicaciones con fibras ópticas. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima.

Todos los rayos que penetran en la fibra en un ángulo de incidencia inferior al ángulo i , se pueden propagar en la fibra. Se observa, así mismo, que existen muchos haces de inclinación diferentes que se podrán propagar, los rayos que se propagan con diferentes trayectorias constituyen lo que se llaman modo de propagación en la fibra.

El diámetro en el núcleo de la fibra ($2a$) es el que determina la cantidad de modos que se pueden propagar en una fibra. Si $2a$ no es tan grande, i.e. que pueden ser de 2 a 5 veces la longitud de onda, estamos en presencia de la fibras monomodos (figura 2.5).

Existen dos tipos de fibras, sean estos multimodos o monomodos. Estas se caracterizan por el tipo de perfil que tiene el índice de refracción de la fibra. Cuando los índices n_1 y n_2

son homogéneos, el tipo de fibra es a salto de índice, pero cuando el índice varía radialmente $n(r)$, tenemos la fibra a gradiente de índice. Estas son mostradas en la figura 2.5.

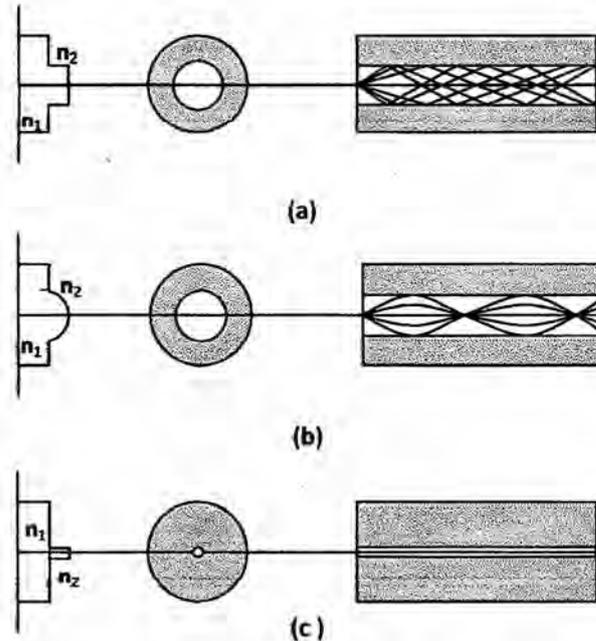


Fig. 2.5. Tipos de Fibra óptica: a) Fibra a salto de índice, b) Fibra a gradiente de índice y c) Fibra monomodo.

Fuente: Lomer M. 1996. Curso Internacional sobre telecomunicaciones con fibras ópticas. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima

Las fibras multimodo pueden transmitir varios modos, que se traducen en la representación geométrica por el hecho de que existen varios trayectos posibles para los haces luminosos. Este tipo de propagación (multimodal) tiene su inconveniente por que provoca la dispersión intermodal y en larga distancia, el ancho temporal de las impulsiones transmitidas aumenta.

• Receptor óptico

El proceso de conversión de fotones a electrones libres (portadores) es esencial para el sistema óptico. Esta conversión se realiza por medio de fotodetectores que pueden clasificarse como (Chin-Lin, 1996):



- Elementos fotoemisivos.
- Elementos fotoconductivos
- Elementos fotovoltaicos

A los elementos fotoemisivos se les conoce también como elementos de efecto fotoeléctrico externo, mientras que los dos restantes se les llama elementos de efecto fotoeléctrico interno.

Los detectores fotoemisivos pueden ser los fotodiodos de vacío y los tubos fotomultiplicadores. El componente principal para este tipo de detectores es el material fotosensitivo en el cátodo.

En este tipo de detectores cuando el cátodo se ilumina por radiación externa, se desprenden electrones del material sensitivo que viajan por el tubo de vacío donde los electrones se aceleran y colectan por el ánodo, formándose una trayectoria eléctrica completa que fluye hacia un circuito externo. Dado que este tipo de elementos tienen un costo elevado, son poco robustos y además requieren de fuentes de alimentación de alto voltaje (150 – 2000V), generalmente.

Los detectores fotoconductivos son dispositivos de un solo tipo de material semiconductor; en este tipo de detectores, la conductividad del semiconductor varía linealmente con la incidencia de luz, la cual se traduce en variaciones de corriente o de voltaje para un circuito eléctrico externo. Estos detectores tienen la desventaja de trabajar en un intervalo de longitudes de onda que van de $3\mu\text{m}$ a $100\mu\text{m}$ por lo que su utilización es muy limitada.

La característica principal de los detectores fotovoltaicos es la presencia de una unión de material semiconductor. La unión puede ser una homounión, una heterounión, una unión

semiconductor y metal (como la barrera Schottky), una unión de contacto puntual o una estructura PIN.

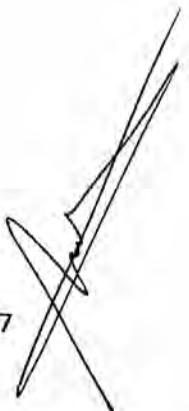
Existen básicamente dos tipos de semiconductores fotodetectores empleados en los receptores ópticos de este tipo; el primero es comúnmente referido como fotodetector PIN, éste genera menos de un de electrón-hueco por fotón absorbido.

El segundo se refiere como fotodetector de avalancha debido al proceso de ionización de impacto, este proceso produce una ganancia interna, ya que genera más de un par electrón-hueco por fotón absorbido; a esta ganancia se le conoce como ganancia de avalancha.

En algunas aplicaciones, donde se requiere alta sensibilidad, es ventajoso trabajar con los receptores con fotodetectores de avalancha; sin embargo, el proceso de ganancia es estadístico, en donde cada par electrón-hueco primario genera un número aleatorio M de pares electrón-hueco secundarios, con un valor medio N . Por lo aleatorio del proceso de multiplicación de ionización de impacto se introduce ruido, que puede en algunas circunstancias ser un factor dominante en la sensibilidad del receptor. Por los argumentos anteriores, se trabajó con el diodo PIN que está disponible en los laboratorios de Física de la Universidad Nacional del Callao y tiene las siguientes ventajas (M.A. Rebolledo y A. Blesa, 2004).

- 1.- Mayor rango espectral de fotodetección, alta sensibilidad a la longitud de onda de operación (630 nm), laser de Helio Neón.
- 2.- Mayor sensibilidad y eficiencia.
- 3.- Mayor velocidad de respuesta al estímulo óptico.

- **Acoplamiento de modos en una fibra óptica microcurvada.**



Curvados microscópicos del eje del núcleo de la fibra, conocido como microcurvados, pueden ser generados por cualquier etapa durante el proceso de manufactura, en el proceso de instalación del cable o durante el servicio. Así también debido a efectos ambientales, particularmente variaciones de temperatura que causan expansiones o contracciones diferenciales.

Los microcurvados introducen leves imperfecciones en la superficie, los cuales causan acoplamiento de modos entre modos adyacentes las cuales generan una pérdida radiativa que depende de la cantidad de deformación aplicada a la fibra, la longitud de la fibra y la distribución exacta de potencia entre los modos diferentes.

(Marcuse, 1973) demostró teóricamente que la pérdida de luz en la fibra depende de la inducción de acoplamiento de modos guiados en la fibra a modos radiados. Cuando la fibra es distorsionada de manera tal que la distorsión tiene un número de onda igual a la diferencia de número de ondas entre los modos guiados y los modos radiados, ocurre una pérdida de potencia transmitida muy fuerte.

Cuando la fibra es curvada en una serie periódica de pequeño radio de curvatura, la energía es eficientemente acoplada desde el m-ésimo al n-ésimo modo (y viceversa) cuando la frecuencia espacial Λ de la perturbación satisface la condición de que :

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\beta_m - \beta_n}$$

donde cada modo tiene una constante de propagación $\beta = n_1 k \cos \theta_m$ con θ_m representando el ángulo del modo que es equivalente al ángulo que hace el rayo con el eje de la fibra ver figura 2.6. Si el núcleo es de índice n_1 y el recubrimiento de índice n_2 , cada modo guiado tiene una constante de propagación discreta entre $n_1 k$ y $n_2 k$.

La energía acoplada en un modo de radiación, para $\beta < n_2 k$, es energía que sale fuera del núcleo. No hay modos con $\beta < n_1 k$, y hay



un continuo de modos de radiación para $\beta > n_2 k$. Además existen muchos modos degenerados, los modos son por lo tanto categorizados de acuerdo al número cuántico principal m . Cada m etiqueta un grupo de modos con constante de propagación cercanamente idénticos. El número total M

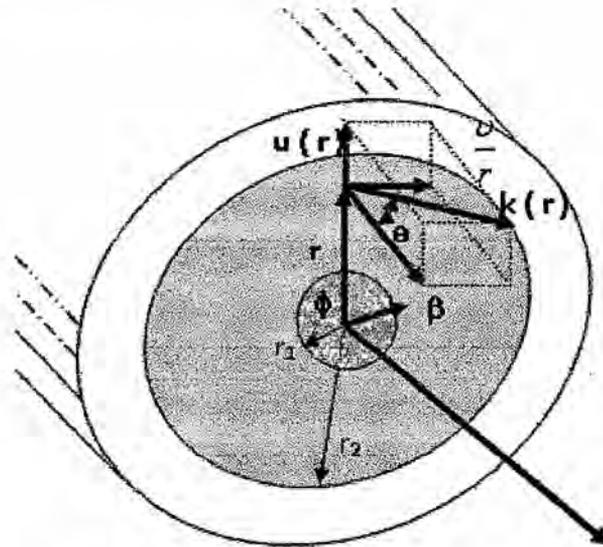


Figura 2.6. Diagrama de vector de onda en una fibra óptica y sus componentes polares en la región de propagación de una fibra óptica multimodo, r_1 es el radio del núcleo, r_2 es el radio del recubrimiento.

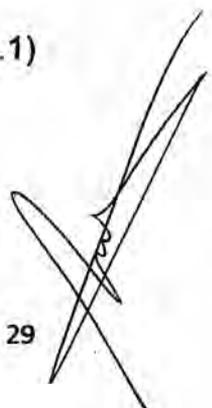
Fuente: Allen H. Cherin. An Introduction to optical fibers. Bell Laboratories Atlanta, Georgia.

de tales grupos modales no es el mismo que el número total de modos guiados.

Usando la aproximación *WKB*, se encontró (Fields, 1980) una simple expresión para $\delta\beta$ en función del m – esimo grupo modal dado por la ecuación:

$$\delta\beta_m = \beta_{m+1} - \beta_m = \frac{2}{a} \left(\frac{g\Delta}{g+2} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{m}{M} \right]^{\frac{(g-2)}{(g+2)}} \quad (2.1)$$

Con $M^2 = N$ que representa el número de modos guiados y esta dado por:



$$N = \left[\frac{g}{g + 2} \right] (n_1 k a)^2 \Delta$$

$m(\beta)$ es el número de grupo modal o etiqueta del modo.

La distancia en el espacio β entre modos guiados adyacentes en una fibra de índice escalon con $g \rightarrow \infty$ esta dado por:

$$\beta_{m+1} - \beta_m = \frac{2\sqrt{\Delta}}{a} \frac{m}{M} \quad (2.2)$$

En el caso de una fibra de índice graduado $g = 2$ (parabólico), el espaciamiento entre grupos modales en el espacio β es constante:

$$\beta_{m+1} - \beta_m = \frac{2\sqrt{\Delta}}{a} \quad (2.3)$$

donde a representa el radio del núcleo y Δ describe la diferencia de índices entre el núcleo y el recubrimiento de la fibra en la manera usual como:

$$\Delta = \frac{[n^2(0) - n^2(r)]}{2 n^2(0)} \quad (2.4)$$

donde $n(0)$ y $n(r)$ son los índices de refracción a las distancias 0 y r del eje de la fibra respectivamente.

Así en una fibra de índice graduado, los modos están igualmente espaciados en el espacio β (Anderson, 1995). Esto significa que una frecuencia espacial fija de los microcurvados harían una transferencia de potencia en todo lugar entre todos los pares de modos adyacentes. Para el caso, de índice escalón, por lo tanto el espaciamiento de los modos es dependiente del índice del modo. Un particular Λ acoplaría la luz entre un par específico de modos. En la figura 2.7 se muestra como estan espaciados los modos.

Para cada tipo de fibra cada línea vertical indica la posición de β_m como una función de m .

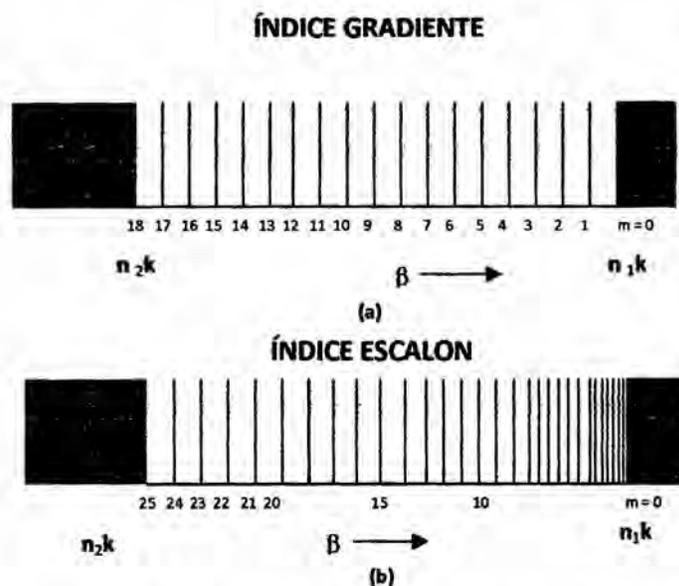


Fig.2.7. Separación entre modos consecutivos para una fibra de índice a) Parabólico b) escalón
Fuente: B. L. Anderson and J. A. Brosig Optical Engineering Vol. 34, N^o 1, (1995), 208 – 213

El número total de grupos modales M puede ser determinado como muchos modos introducidos en el espacio β permitido ($n_1k < \beta < n_2k$), y el número de grupos modales M está relacionado con el número total de modos N por:

$$N = M^2 \quad (\text{índice escalón o gradiente}) \quad (2.5)$$

Para el caso de índice escalón, en teoría, la energía se transferiría a todas partes en solo un par específico de modos. Así la figura (2.7a) muestra que en el caso de índice escalón dentro de alguna región del espacio β están virtualmente igual espaciados.

En la práctica por lo tanto, el acoplamiento de modos es inducido entre los modos en una vecindad del espacio β , y esta región sería algo más amplio en el régimen de modos de más alto orden que entre los modos de más bajo orden, cuyo espaciamiento varía más rápidamente.

Conforme el número de modos en una fibra de índice escalón se hace más grande el espaciamiento de modos para los modos de más alto orden varía mucho más lentamente de modo a modo que para una fibra escalón admitiendo un pequeño número de modos. Para una fibra de índice escalón de muchos modos, los modos de más alto orden están espaciados virtualmente a idénticos intervalos. Esto implica que para una fibra multimodo razonable (N en miles), la diferencia en la sensibilidad de un sensor microcurvado entre fibras de índice escalón y gradiente sería ligera. De manera que, una fibra de índice gradiente tendría ultimadamente un rango dinámico más amplio, debido a la accesibilidad de la potencia de los modos de más bajo orden, los cuales pueden ser acoplados con los modos de más alto orden por la misma frecuencia de curvado espacial que causa las pérdidas.

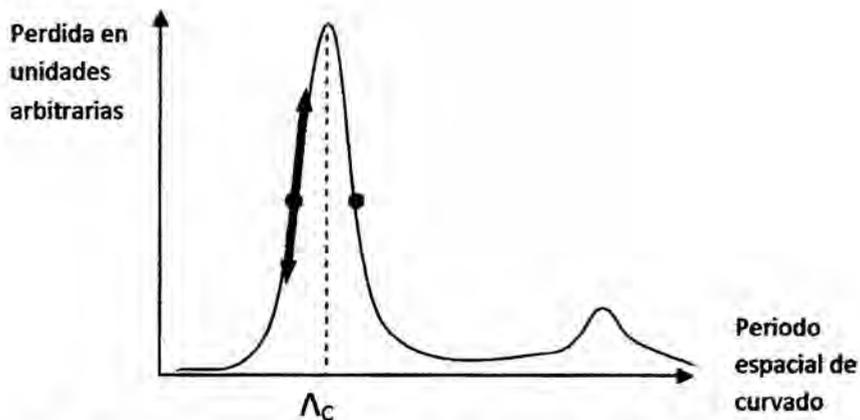


Fig. 2.8 Curva genérica de pérdidas en un sensor de fibra óptica microcurvada en función de la longitud de deformación. Fuente: (Anderson, 1995)

La figura 2.8 muestra una curva genérica de pérdidas para un sensor microcurvado. En sensores microcurvados convencionales, uno elige la periodicidad de los microcurvados que corresponden al pico de la curva de pérdidas. Conforme la amplitud de los curvados se incrementa, la altura de los picos se incrementa proporcionalmente.

La teoría de acoplamiento de modos a través de una fibra óptica microcurvada discutido con anterioridad; establece que se produce un fenómeno de resonancia óptica para una frecuencia de curvado específica dada por la siguiente relación:

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\beta_m - \beta_n} \quad (2.6)$$

Donde Λ representa la longitud de la periodicidad espacial de curvado en la fibra óptica conforme lo mostramos en la figura 2.9

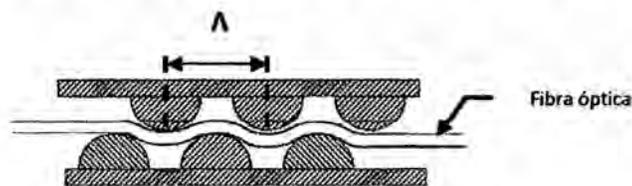


Figura 2.9. Una fibra óptica microcurvada con una longitud de curvado Λ . Fuente: Elaboración del autor.

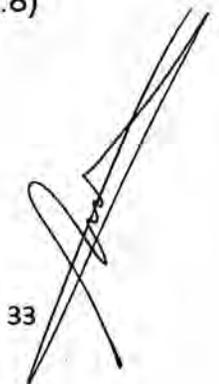
$\beta_m - \beta_n$ representa la diferencia entre modos de propagación en la fibra que se van a acoplar (transmitir energía) etiquetados con los números m y n y que están relacionados según la ecuación:

$$\beta_m - \beta_n = \frac{2\sqrt{\Delta} m}{a M} \quad (2.7)$$

Con M que representa el número de grupos modales, que en el caso de una fibra óptica plástica que tiene el número de modos guiados en millones se puede establecer que $m = M$, por lo que la ecuación para frecuencia de curvado quedaría como:

$$\Lambda = \frac{\pi a}{\sqrt{\Delta}} \quad (2.8)$$

Colocando la definición de la diferencia relativa de índices tenemos que:



$$\Lambda = \frac{\pi a \sqrt{n_1}}{\sqrt{n_1 - n_2}} \quad (2.9)$$

Esta ecuación nos indica la dependencia de Λ con el índice de refracción del recubrimiento es decir:

$$\Lambda = f(n_2) \quad (2.10)$$

La figura 2.10 muestra la gráfica de la ecuación (2.9), donde vemos que cualquier cambio de n_2 produce un cambio en Λ por lo que las condiciones de acoplamiento de modos cambia, este efecto sería similar al efecto de cambiar la frecuencia espacial Λ por cada tramo de la fibra en que avanza el líquido; es decir obtenemos variaciones de intensidad de luz tanto si nos acercamos o nos alejamos de n_1 , si n_2 tiende o se aproxima a n_1 tenemos una singularidad matemática que se convierte en un fenómeno de resonancia óptica (máxima dispersión de energía luminosa) para una frecuencia espacial y amplitud fija de la fibra óptica microcurvada.

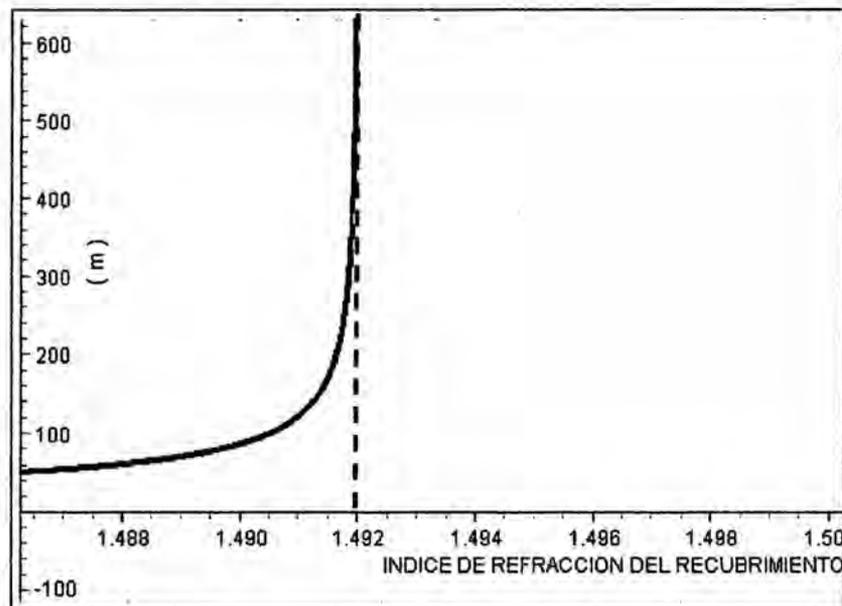


Figura 2.10. Variaciones en la frecuencia espacial como consecuencia de acercar el valor del índice de refracción del recubrimiento al índice de refracción del núcleo. Fuente: Elaboración del autor

De manera que podemos plantear que también podemos obtener el fenómeno de resonancia óptica manteniendo constante la longitud del curvado Λ y la amplitud de los curvados al variar la diferencia entre los índices de refracción del recubrimiento y el núcleo de la fibra óptica microcurvada según lo establecido en la ecuación 2.10.

Para el desarrollo de este trabajo de investigación utilizamos una fibra óptica plástica de índice escalón con radio de núcleo de 0,49mm e índice de refracción de 1,492 y radio de recubrimiento de 0.505 con índice de refracción de 1,402.

Esta fibra cuenta con un número total de modos guiados dados por la ecuación (2.1)

$$N = \left[\frac{g}{g + 2} \right] (n_1 k a)^2 \Delta$$

con $g = \infty$ tenemos:

$$N = (n_1 k a)^2 \Delta$$

Vemos que necesitamos calcular la diferencia relativa de índice de refracción considerando como recubrimiento el aire cuyo índice de refracción es 1.00

$$\Delta = \frac{[n^2(0) - n^2(r)]}{2 n^2(0)} = \frac{(1,492)^2 - (1,00)^2}{2(1,492)^2}$$

$$\Delta = 0.275$$

Entonces el número de modos es:

$$N = \left[\frac{1,492 (2 \pi) 0,49 \times 10^{-3}}{630 \times 10^{-9}} \right]^2 \times 0,058$$

$$N = 3083203 \text{ modos guiados.}$$

Por lo tanto el número de grupos modales es:

$$M = \sqrt{N} = \sqrt{3083203}$$

$$M = 1756 \text{ grupos modales}$$

la frecuencia espacial que de máximo acoplamiento de modos:

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\beta_{m+1} - \beta_m} = \frac{2\pi a}{2\sqrt{\Delta}} \left(\frac{M}{m} \right)$$

Planteamos en base a que tenemos un fenómeno de resonancia óptica donde las ondas electromagnéticas son de naturaleza armónica como una superposición de modos (ondas) guiados a radiados, que la frecuencia espacial también obedecería a la siguiente relación periódica.

$$\Lambda = \left(\frac{2\pi}{\beta_{m+1} - \beta_m} \right) n = \frac{2\pi a}{2\sqrt{\Delta}} \left(\frac{M}{m} \right) n$$

Con $n = 1, 2, 3, \dots$

Hacemos en este caso $m = M$, y al reemplazar datos tenemos:

$$\Lambda = \left(\frac{\pi \times 0,9 \times 10^{-3}}{\sqrt{0,275}} \right) n = (2,94 \times 10^{-3}) n \quad (m)$$

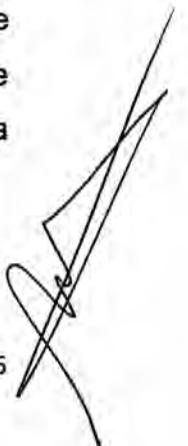
$$\Lambda \cong 3n \quad (mm)$$

Para nuestro trabajo de investigación por razones de factibilidad en la construcción del deformador mecánico que genera las microcurvaturas elegimos $n=4$ por lo que la frecuencia espacial a la cual trabajaremos es de:

$$\Lambda \cong 12 \quad (mm)$$

- **Análisis de diseño de los parámetros del sensor**

La elaboración del dispositivo a construir para determinar la intensidad de la luz y su relación con las variaciones del nivel de líquidos y el índice de refracción del recubrimiento de una fibra óptica microcurvada tomamos en consideración lo desarrollado (Anderson, 1995), ellos caracterizaron su sensor utilizando la función del coeficiente de pérdidas α en una fibra microcurvada de índice parabólico que está directamente relacionada con el espectro de potencia (Fields, 1980) de la distribución espacial $f(z)$ de la fibra a través de la siguiente relación:



$$\alpha = \frac{5.8\Delta}{2a^4} \left[\frac{1}{L} \left(\left| \int_0^L f(z) e^{-i\Lambda_c z} dz \right|^2 \right) \right] \quad (2.11)$$

Donde L es la longitud sobre toda la región deformada, a es el radio del núcleo de la fibra, Λ_c es la frecuencia espacial crítica para la fibra particular, y Δ describe la diferencia de índices entre el núcleo de la fibra y el recubrimiento de la manera usual.

Usando la ecuación (2.11), se investigó los efectos de la amplitud, frecuencia espacial, forma del curvado y número de curvados en las pérdidas de un sensor. Se hizo esto para una fibra arbitraria de índice graduado cuya longitud de onda crítica Λ_c es 2,22mm. Por ejemplo la figura 2.11 muestra los efectos de un cambio en la amplitud de los curvados en las pérdidas totales para una deformación perfectamente sinusoidal de cuatro ciclos completos.

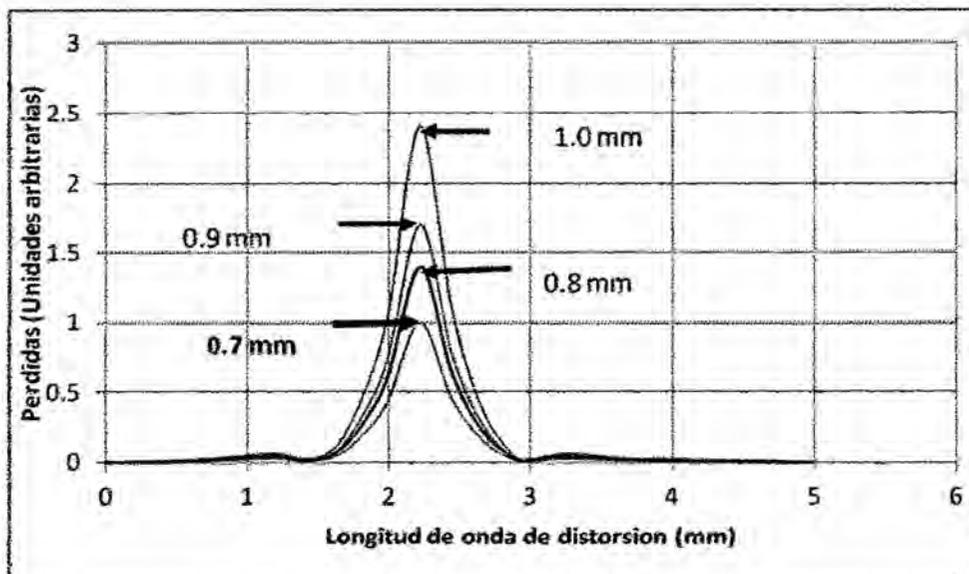


Figura 2.11. Efecto de la Amplitud del curvado en las pérdidas de potencia a través de un sensor microcurvado.

Fuente: B. L. Anderson and J. A. Brosig, Optical Engineering Vol. 34, N^o 1, (1995), 208 – 213.

Para un caso ideal en la cual la fibra esta curvada en forma de la función seno una longitud infinita a una frecuencia espacial fija, el espectro de frecuencia de $f(z)$ es una función delta, y la energía se acoplaría solo para modos con un exacto espaciamiento modal $\beta_{m+1} - \beta_m$. En la práctica, por lo tanto la forma del actual curvado no es generalmente una senoide exacta. En los sensores microcurvados del tipo amplitud, por ejemplo, la deformación usualmente consiste de pequeñas curvas alrededor de los puntos del deformador separados por líneas rectas.

Ya que la fibra esta curvada en el sensor microcurvado en la versión de variación de frecuencia, $f(z)$ puede ser arbitrario. Para evaluar el impacto de la forma de la curva, la ecuación 2.11 es graficada en la figura 2.12 para un $f(z) = \text{sen}(z)$ (el mejor caso esperado) y una triangular (aproximación de la deformación de los sensores tipo amplitud), en este caso para un sensor de cuatro ciclos completos. La sensibilidad es de cerca de 43% más grande para el caso seno. Los sensores actuales tipo amplitud tendrían una deformación con forma entre una senoide y triangulo.

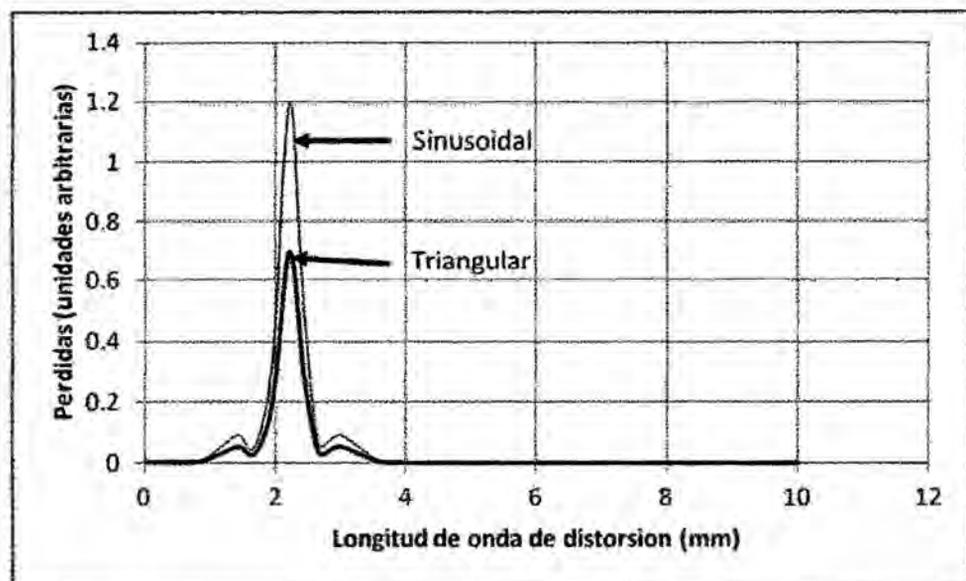
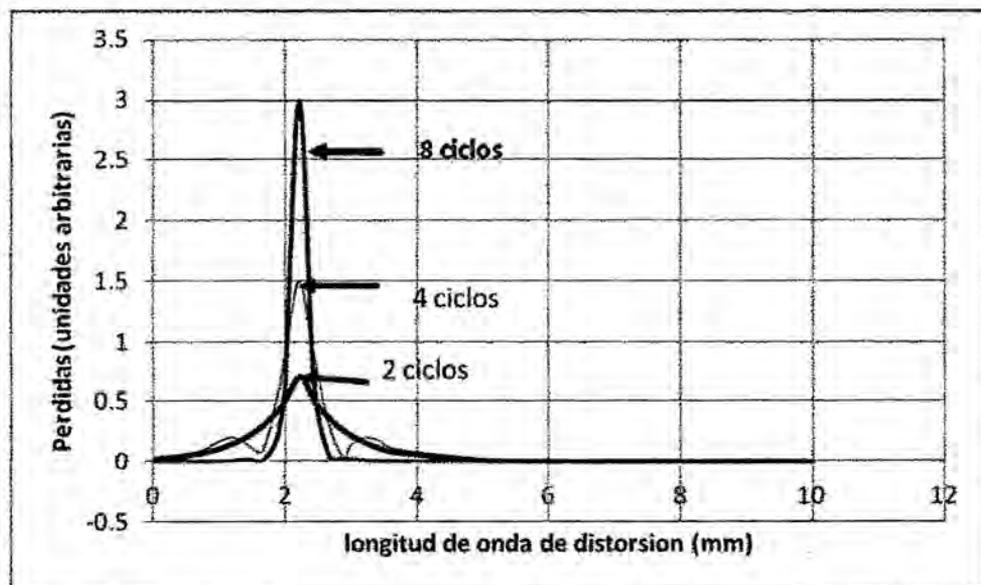


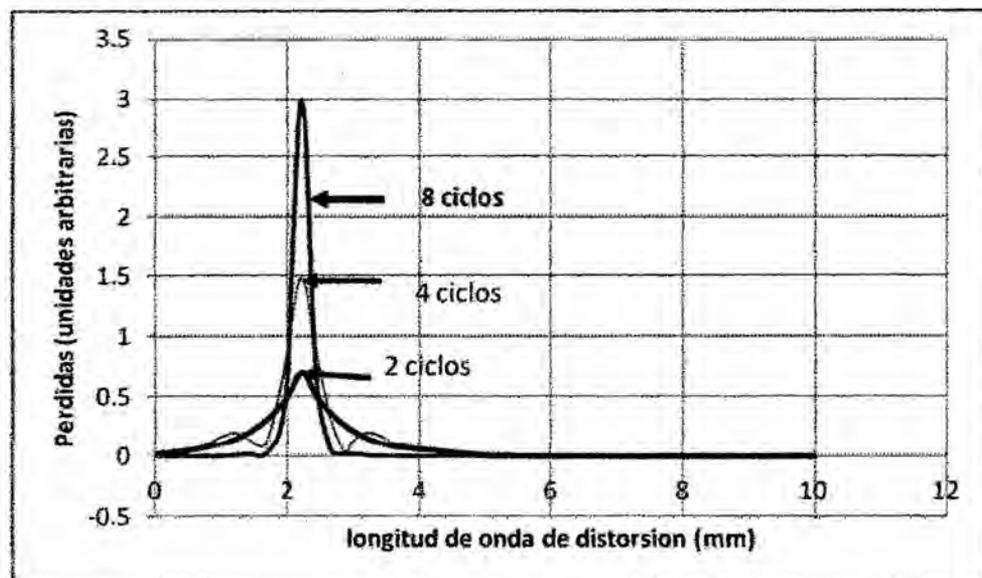
Figura 2.12. Efecto de la forma de la deformación sobre la sensibilidad del sensor.

Fuente: B. L. Anderson and J. A. Brosig, Optical Engineering Vol. 34, N^o 1, (1995), 208 – 213.

El número total de curvados también tiene efecto en las pérdidas del sensor. La figura 2.13a muestra las curvas de pérdida para ambos casos sinusoidal y triangular como una función del número de curvados. Debido a que los sensores tipo variación de Amplitud (AV) están limitados a un pequeño número de curvados debido a la fricción y abrasión, los sensores tipo variación de frecuencia (FV) tienen dos ventajas distintivas relacionado justo con el número de curvados.



(a)

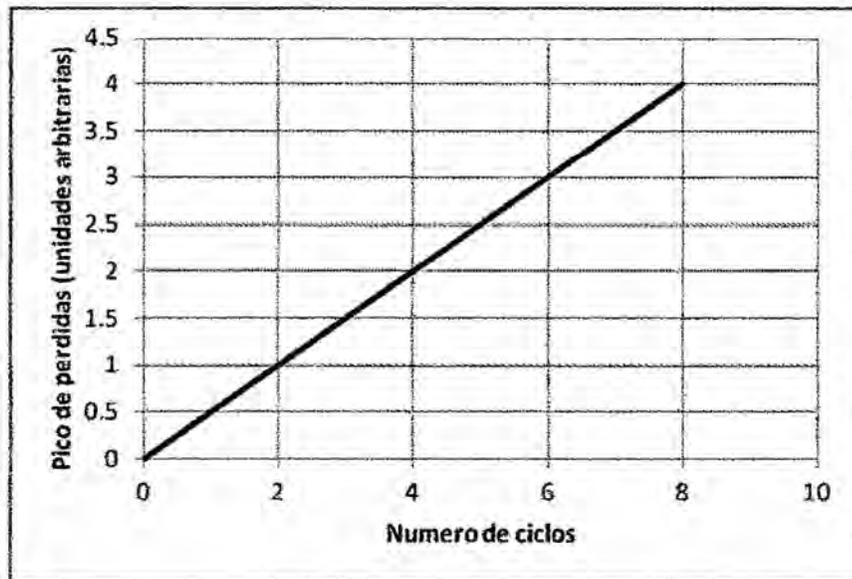


(b)

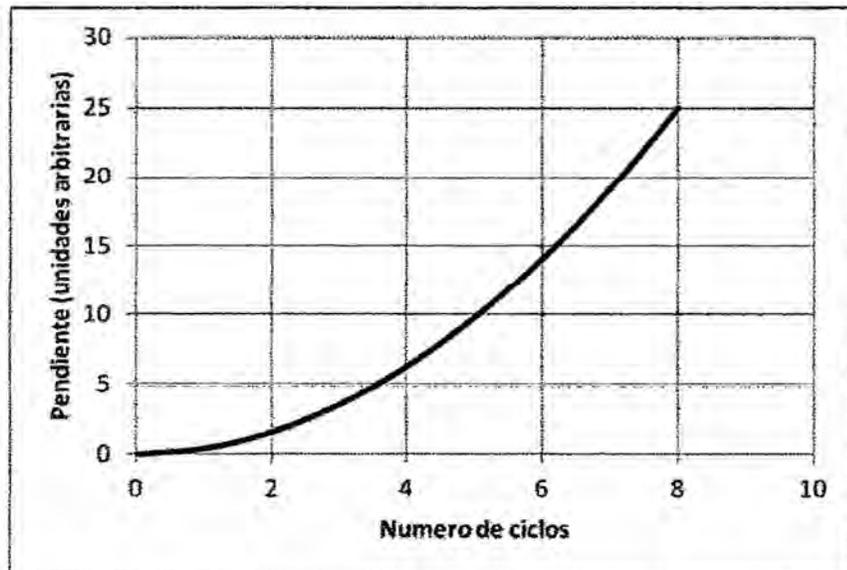
Figura 2.13. Efecto del número de curvados sobre la sensibilidad del sensor (a) deformación sinusoidal (b) Deformación triangular.

Fuente: B. L. Anderson and J. A. Brosig, *Optical Engineering* Vol. 34, N^o 1, (1995), 208 – 213.

El primero es que mientras el pico de la curva de pérdida (el punto de trabajo usado en los sensores tipo amplitud) varia linealmente con el número de curvados, como se muestra en la figura 2.14, la Pendiente (Usada en los sensores tipo frecuencia) varia cuadráticamente como se muestra en la figura 2.14b. Conforme el número de curvados se incrementa, la altura de los picos se incrementa y simultáneamente se hace más angosto.



(a)



(b)

Figura 2.14. Sensibilidad de los dos tipos de sensores como una función del número de curvados (sensores AV) (a) valores pico de las pérdidas (b) curva de las pendientes de pérdida cerca del punto de operación (sensores FV).

Fuente: B. L. Anderson and J. A. Brosig, Optical Engineering Vol. 34, N^o 1, (1995), 208 – 213.

De manera que, incrementando el número de curvados da las mayores ventajas para el sensor FV. La segunda ventaja es que la fibra esta ya curvada, se flexiona durante la compresión del sensor, pero no se frota contra la estructura. En este caso, no hay inconveniente en incrementar el número de curvados (excepto por el tamaño total). La sensibilidad puede en principio ser extremadamente alta. Además, la vida media y confiabilidad sería mucho más grande que el sensor microcurvado convencional.

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

1. Apertura numérica (A.N.)

Indicación, que expresa matemáticamente el cono sólido de luz que una fibra óptica puede aceptar para el correcto guiado de luz.

2. Intensidad.

Cantidad de energía por unidad de área y unidad de tiempo que transmite una onda electromagnética.

3. Laser.

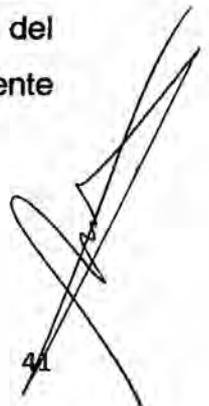
Dispositivo para la generación de haces de luz coherente y la radiación generada por él. Su nombre se deriva de las palabras Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (amplificación de la luz por medio de emisión estimulada de radiaciones).

4. Modo.

Distribución transversal de la energía a lo largo de una fibra óptica.

5. Fibra óptica.

Es un medio de transmisión empleado habitualmente en redes de datos; un hilo muy fino de material transparente, vidrio o materiales plásticos, por el que se envían pulsos de luz que representan los datos a transmitir. El haz de luz queda completamente confinado y se propaga por el interior de la fibra con un ángulo de reflexión por encima del ángulo límite de reflexión total, en función de la ley de Snell. La fuente de luz puede ser láser o un LED.



6. Fibra multimodo.

Es aquella en la que los haces de luz pueden circular por más de un modo o camino. Esto supone que no llegan todos a la vez. Una fibra multimodo puede tener más de mil modos de propagación de luz. Las fibras multimodo se usan comúnmente en aplicaciones de corta distancia, menores a 1 km; es simple de diseñar y económico.

7. Microcurvado.

Deformaciones periódicas en una fibra óptica, que produce pérdidas de intensidad de luz.

8. Nivel de líquido.

Altura alcanzada por un líquido respecto de una recta horizontal considerada como referencia, o nivel cero.

9. Acoplamiento de Modos.

Transferencia de energía luminosa de un modo de menor orden a un modo de mayor orden.

10. Modulación.

Cambio de amplitud o de frecuencia de una señal portadora.

11. Sensibilidad.

Cualidad de un instrumento o dispositivo para mostrar su rapidez de respuesta (en el tiempo y/o magnitud) a un estímulo específico.

12. El índice de refracción.

Es una medida que determina la reducción de la velocidad de la luz al propagarse por un medio homogéneo. De forma más precisa, el índice de refracción es el cambio de la fase por unidad de longitud, esto es, el número de onda en el medio (k) será n veces más grande que el número de onda en el vacío (k_0).

13. Extrínseco.

Que viene de afuera, que se realiza de forma externa.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 SOBRE LA POBLACIÓN Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN

Para extrapolar a poblaciones *infinitas* (tamaño *grande*, indefinido...) utilizamos la siguiente fórmula para obtener el tamaño de la muestra (7):

$$N = \frac{z^2 pq}{e^2}$$

Donde; z = Valor de z correspondiente al *nivel de confianza*;

Con $z = 2,57$ el nivel de confianza es del 99% que también lo expresamos como una significancia de $\alpha = 0,01$ (nos equivocáramos una vez de cada 100), pero como aumenta el numerador aumenta el cociente que es el número de datos N .

pq = Varianza de la población

Como la varianza de la población la desconocemos, ponemos la varianza mayor posible porque a mayor varianza hará falta una muestra mayor.

Recordamos el significado de los símbolos:

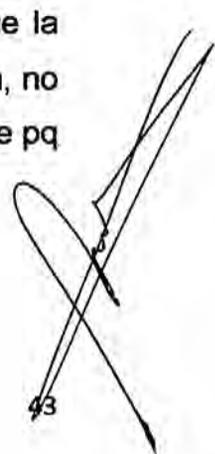
p = proporción de datos registrados en una categoría (*sí es, mayores a la media, unos en la codificación usual, etc.*)

q = proporción de datos registrados en la otra categoría (*no es, mayores a la media, ceros en la codificación usual*).

La varianza mayor (la mayor diversidad de datos registrados) se da cuando $p = q = 0,50$ (la mitad de los datos es mayor a la media *sí* y la otra mitad no es mayor a la media) por lo que en la fórmula pq es siempre igual a $(0,50)(0,50) = 0,25$ (es una constante).

El suponer que $p = q$ quiere decir que para escoger la muestra nos ponemos en la hipótesis de que en la población hay la máxima diversidad posible: un 50% va a ser mayor que la media y otro 50% no va a ser mayor que la media, de esta manera, y por lo que respecta a la varianza de la población, no corremos riesgos de quedarnos cortos en el número de datos. Este valor de pq ($= 0,25$) es válido (válido para calcular el tamaño de la muestra).

e = Error muestral



Lo representamos con la letra e (no es el único símbolo que se utiliza) que significa error o desviación posible cuando extrapolamos los resultados. Es el margen de error que aceptamos.

Para nuestro experimento vamos a considerar un nivel de confianza de 99% ($\alpha = 0,01$) y un error muestral de 4,061% o $e = 0,04061$, por lo que el tamaño de la muestra o número de datos que debemos registrar será de:

$$N = \frac{(2,57)^2 (0,25)}{(0,04061)^2} = 1001$$

Población.

Número de datos experimentales potencialmente registrables (muy grande, indefinido).

Muestra.

La muestra estará constituida por 1001 datos experimentales de intensidad de luz para cada nivel de líquido de cada uno de los cinco líquidos considerados.

3.2. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE LA RECOLECCIÓN DE DATOS

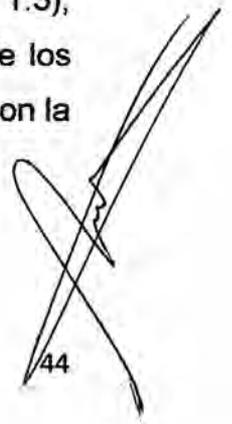
A. Técnicas

Para realizar el experimento se hizo el procedimiento siguiente:

- **Preparación de la fibra óptica.**

- a) Soporte de los extremos de la fibra óptica**

Cada uno de los extremos de la fibra se colocó dentro de un soporte plastificado, el cual nos facilitó el pulido de las superficies transversales libres de los extremos de la fibra con lija N^o 1000. El soporte fue fabricado de un tubo cilíndrico hueco plástico de 3 cm de longitud, 3mm de diámetro exterior y 2mm de diámetro interior (repuesto de lapicero) lleno de un gel de pegamento de secado al frío Soldimix (ver figura 1.3), conforme muestra el siguiente diagrama este soporte de los extremos de la fibra facilitaron la alineación de la fibra con la fuente de luz y el detector de luz.



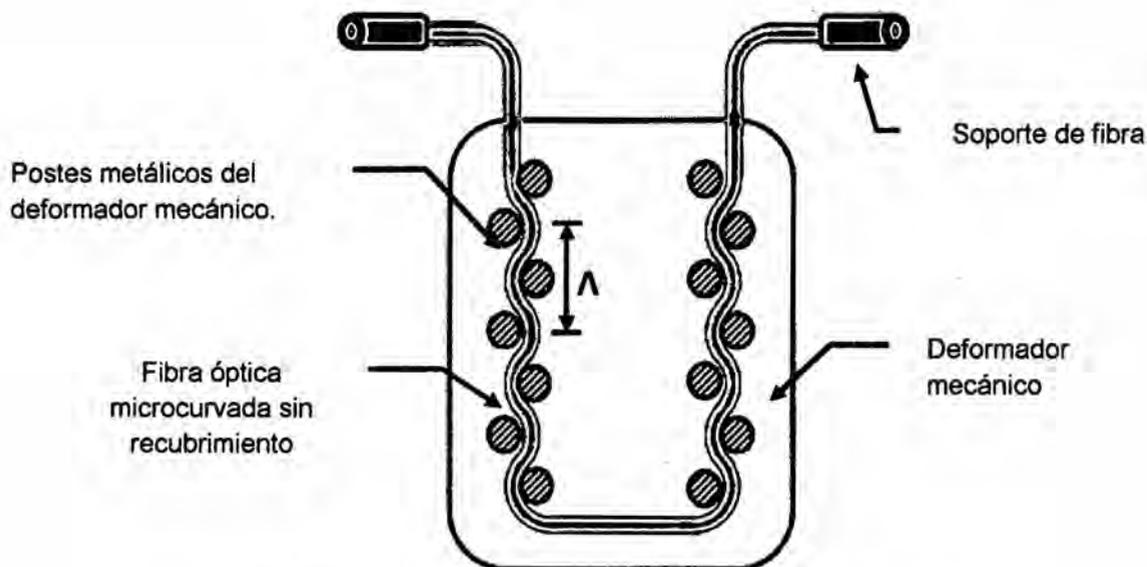


Figura. 3.1. Fijación de los extremos y empotrado de la fibra óptica en el deformador mecánico.

Fuente: Elaboración del autor

b) Pulido de los extremos de la fibra

Una vez que ha secado el gel por un lapso de 24 horas se procede a pulir las superficies circulares transversales libres de los extremos fijos de la fibra con lijas de diferente tamaño de grano. Se tendrá cuidado de mantener la superficie pulida perpendicular al eje de la fibra. Se inicio con lija de agua N^o 600 y se termino con lija microfina para pulir marca 3M N^o 1000. Las superficies circulares transversales libres fueron chequeadas verificando una buena transmision de luz de un extremo a otro debido a una superficie bien pulida.

c) Retiro del recubrimiento de la fibra optica

De una longitud total de 0.80m de fibra optica retiramos 0.20 m de la parte central la chaqueta de plástico luego, se fricciona iniformemente con lija N^o 1000 la superficie exterior cilíndrica de la fibra óptica hasta retirar completamente el recubrimiento de la fibra y tener el núcleo expuesto al medio ambiente que en adelante constituirá el recubrimiento.

d) Empotrado de la fibra en el deformador mecánico

Luego de retirar el recubrimiento de la fibra se introduce esta entre los postes metálicos del deformador mecánico, formando una U, teniendo cuidado de generar las microcurvaturas senoidales permanentes con amplitud y frecuencia espacial Λ fija, conforme se muestra en la figura 1.3.

- **Alineación laser – fibra óptica microcurvada – detector-Interface – Computadora.**

Para ello se fijan con pernos los soportes para los recipientes en los que se hicieron circular cinco líquidos, estos recipientes están interconectados con unas mangueras plásticas que son el alimentador R_1 , receptor R_2 y sumidero R_3 del líquido todos ellos a la mesa anti vibratoria, así como los soportes para el laser de He – Ne L y el Sensor de luz que hace la función de detector D previamente alineados y conectados con la interface I y la

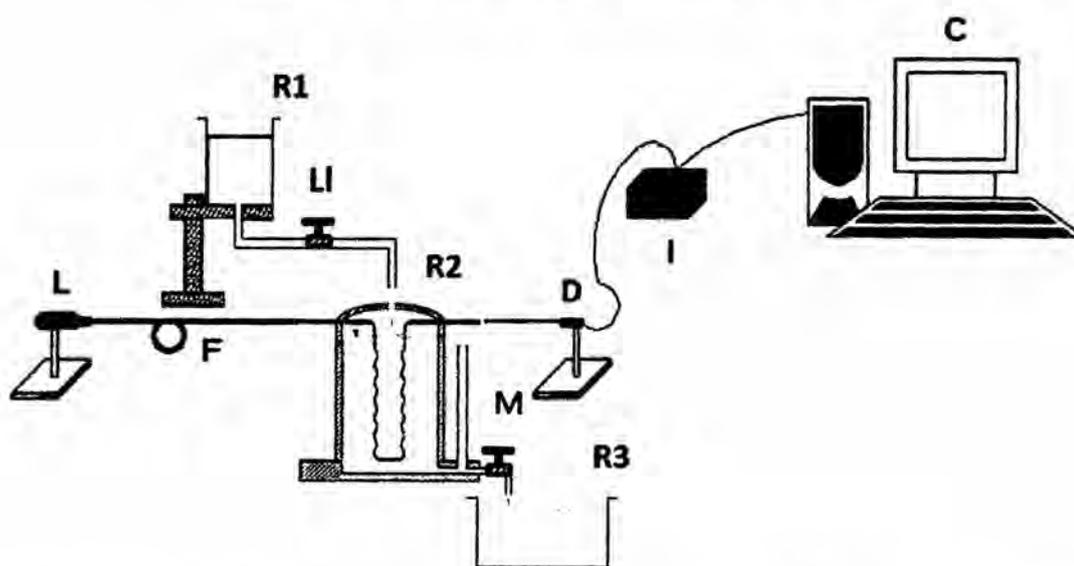


Figura. 3.2 Diagrama esquemático del arreglo experimental: L: Láser He-Ne , F: Fibra óptica, R1: Recipiente fuente de líquidos, R2: Recipiente de control, R3: Recipiente sumidero, M: Medidor de Nivel de líquidos, LI: Llave de paso, D: Foto diodo detector, I : Interfase C: Computadora. Fuente: Elaboracion del autor.

computadora C que tiene instalado el software Data Studio conforme se muestra en el esquema de la disposición experimental de la figura 3.2.

- **Calibración del detector**

Se trabajó con el sensor de luz Pasco Modelo CI -6504A ; se seleccionó en primer lugar la ganancia x100 en el interruptor sobre la caja del sensor para el nivel de luz que deberá medirse, con una frecuencia de toma de datos de 50Hz. La selección de la ganancia correcta es aquella para la cual el nivel de intensidad en el display varía apropiadamente para medir los cambios de intensidad de luz relativa en el experimento.

- **Obtención de datos experimentales**

Se midió los cambios de intensidad de luz registrado por el sensor de luz en la PC, producidas por el desplazamiento vertical ascendente y descendente del líquido a lo largo de la fibra óptica microcurvada en las siguientes condiciones experimentales:

1. Todas las medidas se tomaron con la fibra óptica de 0,8 m de longitud, de los cuales 0,20m de la parte central de la longitud de la fibra óptica será empotrada en forma de U al deformador mecánico que genera microcurvaturas permanentes en forma senoidal con una amplitud constante de microcurvados de 1,5mm y con siete periodos de curvado por cada fila en el deformador mecánico.
2. La primera variable que se tuvo en cuenta en este experimento es el nivel de líquidos que tendrá como referencia cero la superficie libre de líquido en la parte alta del llenado conforme se muestra en la figura 1.5 para ir incrementando el nivel de líquido cada 0,004m en función de la intensidad de luz, en el proceso de llenado con los cinco diferentes líquidos del recipiente, tomando datos a una frecuencia de 50Hz y durante un tiempo de 20 segundos para cada nivel de líquido

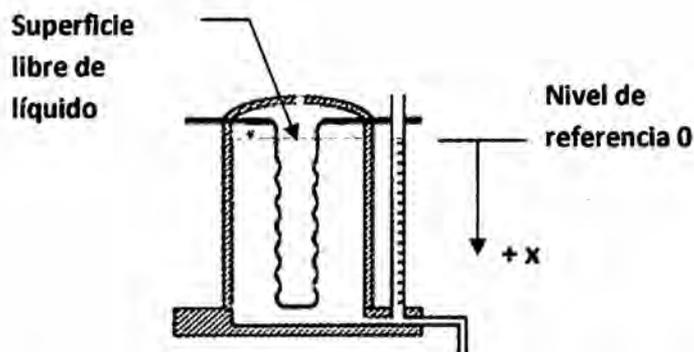


Figura 3.3. Nivel de referencia de líquido para la toma de datos experimentales.

Fuente: Elaboración del autor

3. obteniendo por lo tanto 1001 datos por nivel de líquido evaluado.
4. La segunda variable que se va a tener en cuenta en este experimento es el índice de refracción del líquido, se realizó las pruebas experimentales mencionadas en el ítem 2 para cinco líquidos de viscosidad pequeña para evitar que el líquido quede adherido a la fibra, estos líquidos tendrán diferente índice de refracción y registraremos la razón de cambio de la intensidad de luz por milímetro de variación de nivel de líquido versus el índice de refracción de cada uno de los cinco líquidos usados.
5. Finalmente se hará el tratamiento estadístico (Devore, 2008) realizando los ajustes de regresión lineal y analizando el tipo de relación si es débil, moderada o fuerte con el coeficiente de correlación de Pearson r , resultados que serán obtenidos gracias al software Data Studio.

Dados n pares de observaciones $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ se define r como:

Una firma manuscrita en tinta negra, que parece ser una combinación de líneas y curvas fluidas, ubicada en la parte inferior derecha de la página.

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1.1)$$

Donde

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (1.2)$$

Con \bar{x} y \bar{y} los valores medios

Las propiedades más importantes de r son las siguientes:

- El valor de r no depende de cuál de las dos variables estudiadas es x y cual es y .
- El valor de r es independiente de las unidades en las cuales x y y estén medidas.
- El valor de r está comprendido entre $-1 \leq r \leq 1$

Un coeficiente de correlación se dice que es significativo si se puede afirmar, con una cierta probabilidad, que es diferente de cero. Más estrictamente, en términos estadísticos, preguntarse por la significación de un cierto coeficiente de correlación no es otra cosa que preguntarse por la probabilidad de que tal coeficiente proceda de una población cuyo valor sea de cero. A este respecto, como siempre, tendremos dos hipótesis posibles:

H_0 : $r = 0$ Entonces el coeficiente de correlación obtenido procede de una población cuya correlación es cero ($\rho = 0$).

H_1 : $r \neq 0$ Entonces el coeficiente de correlación obtenido procede de una población cuyo coeficiente de correlación es distinto de cero ($\rho \neq 0$).

Desde el supuesto de la Hipótesis nula se demuestra que la distribución muestral de correlaciones procedentes de una población caracterizada por una

correlación igual a cero ($\rho = 0$) sigue una ley de t - Student con N-2 grados de libertad, de media del valor poblacional y desviación tipo:

$$S_r = \sqrt{\frac{1 - r^2}{N - 2}} \quad (1.3)$$

En consecuencia, dado un cierto coeficiente de correlación r obtenido en una determinada muestra se trata de comprobar si dicho coeficiente es posible que se encuentre dentro de la distribución muestral especificada por la Hipótesis nula. A efectos prácticos, se calcula el número de desviaciones tipo en que se encuentra el coeficiente obtenido del centro de la distribución, según la formula conocida:

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1 - r^2}{N - 2}}} \quad (1.4)$$

y se compara el valor obtenido con el existente en las tablas para un cierto nivel de significación α y N-2 grados de libertad $t_{(\alpha, N-2)}$, que como se sabe, marca el límite (baja probabilidad de ocurrencia, según la Hipótesis nula) de pertenencia de un cierto coeficiente r a la distribución muestra de correlaciones procedentes de una población con $\rho = 0$. De esta forma si:

$t > t_{(\alpha, N-2)}$ Se rechaza la Hipótesis nula. La correlación obtenida no procede de una población cuyo valor $\rho = 0$. Por tanto las variables están relacionadas.

Si $t \leq t_{(\alpha, N-2)}$ Se acepta la Hipótesis nula. La correlación obtenida procede de una población cuyo valor $\rho = 0$. Por tanto ambas variables no están relacionadas.

Cuando el coeficiente de Pearson se eleva al cuadrado r^2 , se obtiene el coeficiente de determinación y el resultado indica la **varianza de factores comunes**. Esto es, el porcentaje de la variación de una variable debido a la variación de la otra variable (o cuánto explica o determina una variable la variación de la otra)

B. Instrumentos

Para la obtención de datos experimentales previamente se diseñó y construyó los siguientes equipos optomecánicos:

a) Mesa Anti vibratoria:

Constituida por una plancha cuadrada de hierro de lado 1 metro, espesor 0,01 m, con un revestimiento de Zinc (Zincado) para protegerla de la corrosión, sobre su superficie se perforaron agujeros separados cada 0,03 m con rosca milimétrica M5, colocada sobre soporte de microporoso (una variedad de Caucho) que constituye un aislante vibratorio; en una mesa de plataforma de madera y estructura de hierro (ver figura 3.4).

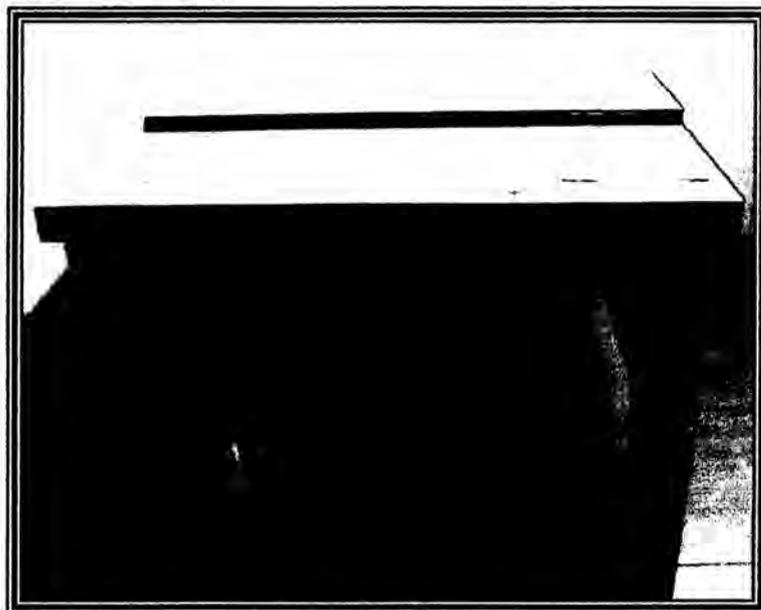


Figura 3.4. Mesa antivibratoria base de los soportes optomecánicos para el desarrollo del trabajo de investigación. Fuente: Laboratorio de Física FIME - UNAC

51

b) Emisor de luz.

Se utilizará un láser de He – Ne con una potencia de 100mW, que emite en la frecuencia de 630 a 680 nm, disponible en los laboratorios de Óptica de la Universidad Nacional del Callao

c) Soporte mecánico de emisor de luz.

Soporte mecánico de acero y fierro diseñado por el autor (ver figura 1.7), que está constituido por un poste vertical con una base circular, en el poste tiene un accesorio horizontal constituida por una plataforma acanalada donde encaja el laser que se fija a ella a traves de un tornillo de sujecion, este accesorio permite variar la altura del laser y facilita la alineación con el extremo libre de la fibra óptica.

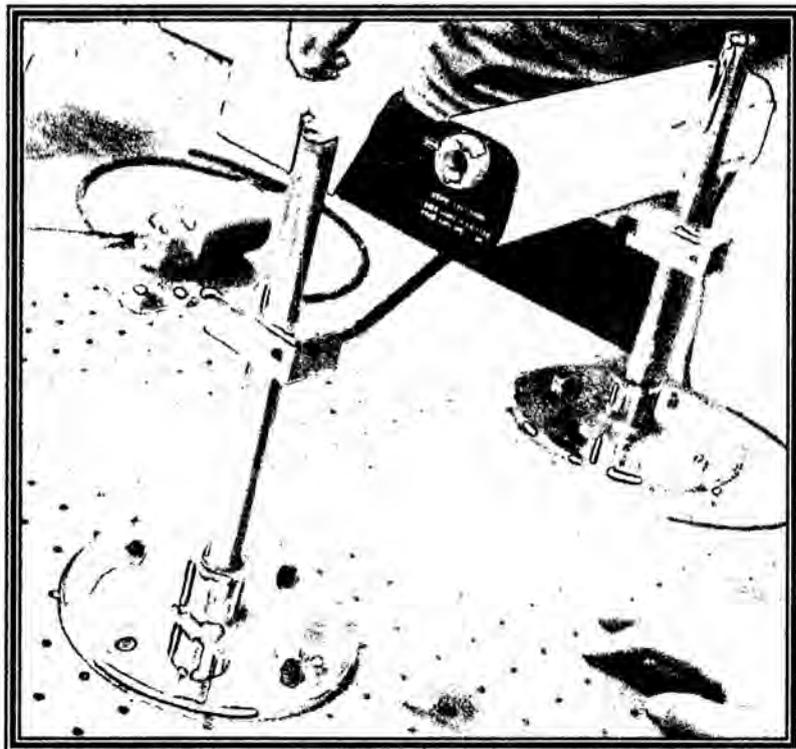


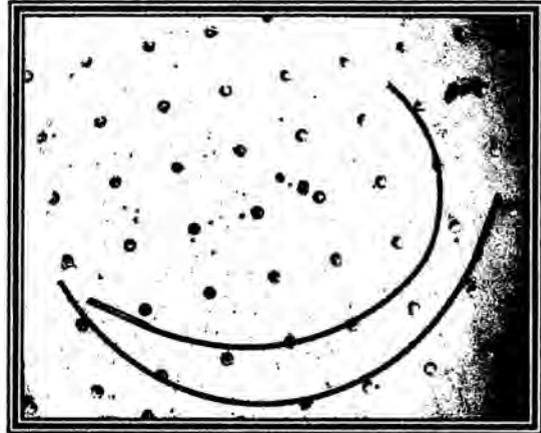
Figura 3.5. Sistema de alineación Laser – fibra óptica.
Fuente: Laboratorio de Física FIME - UNAC

d) Fibra óptica plástica.

Es una fibra óptica multimodo plástica de índice escalón de 0,80 m de longitud, con radio de núcleo de 0,49mm e índice de

refracción de 1,492, el radio de recubrimiento es de 0,505mm con un índice de refracción de 1,402 (ver figura 1.8).

Figura 3.6. Fibra óptica Multimodo plástica, con parte central mostrando su núcleo expuesto al medio ambiente. Fuente: Laboratorio de Física FIME - UNAC



e) Deformador mecánico.

Dispositivo mecánico, diseñado y construido por el autor. consta de una base de mica transparente de 0,10 m de largo por 0,05 m de ancho y 0,005 m de espesor, sobre esta plancha de mica se insertaron dos columnas de 15 postes metálicos en cada lado separados una distancia de 0,006 m una de otra y 0,03 m de separación entre columna y columna (ver figura 1.9).

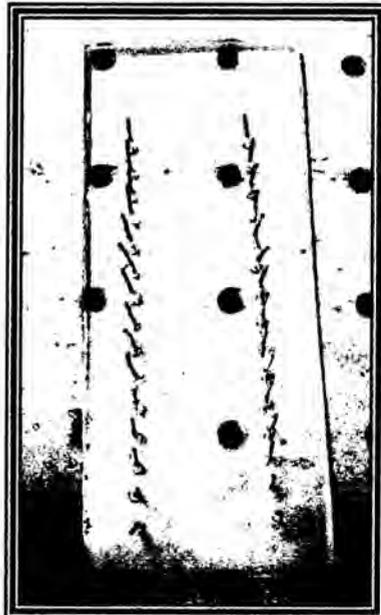


Figura 3.7. Sistema deformador mecánico, mostramos las dos columnas de 15 postes metálico que sirven como horma para deformar la fibra óptica. Fuente: Laboratorio de Física FIME - UNAC

f) Recipiente de control de líquidos.

Dispositivo diseñado por el autor de forma cilíndrica de material de aluminio con una altura de 0,10 m, diámetro interno de 0,05 m

con una conexión interna para el marcador de nivel de líquidos graduado cada 0,002 m, tiene además conexiones de entrada y salida de líquidos con sus respectivas llaves de paso.

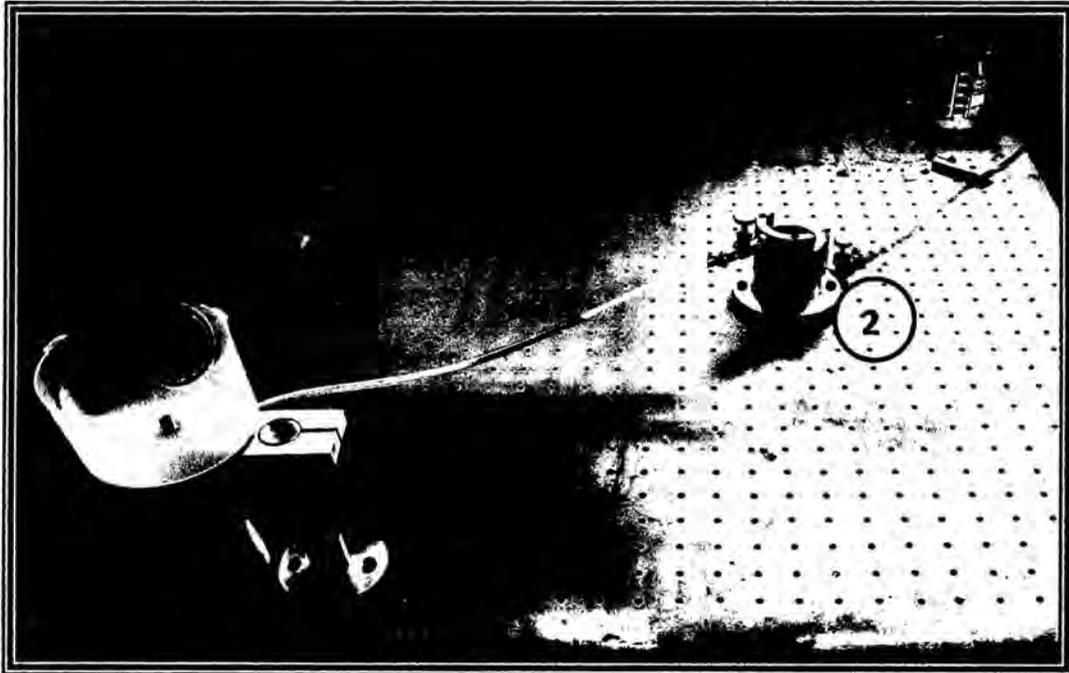


Figura 3.8. Sistema hidráulico para la medición de Nivel de Líquidos con fibra óptica Microcurvada donde mostramos los recipientes utilizados: 1 Recipiente Fuente de Líquidos, 2. Recipiente de control de líquidos.

Fuente: Laboratorio de Física UNAC

g) Recipiente fuente de líquidos.

De forma cilíndrica de plástico de 0,10 m de diámetro y 0,08 m de altura, ubicada sobre un poste cilíndrico con un aditamento horizontal para regular la altura del recipiente previamente fijada a la mesa antivibratoria a través de pernos de sujeción, con una salida a través de una manguera para conectar con el recipiente sistema de estudio a través de una llave de paso, la altura del recipiente fue de 0,19m del plano de la mesa a la base del recipiente para todas las pruebas experimentales realizados con los cinco líquidos. (Ver figura 3.8)

h) Elemento sensor.

Se utilizará un sensor de luz de alta sensibilidad Pasco CI – 6504A, es un fotodiodo Si PIN ¹, disponible en los laboratorios de Óptica de la Universidad Nacional del Callao (Pasco, 2012) que trabaja con una ganancia de x100 . (ver figura 3.9)

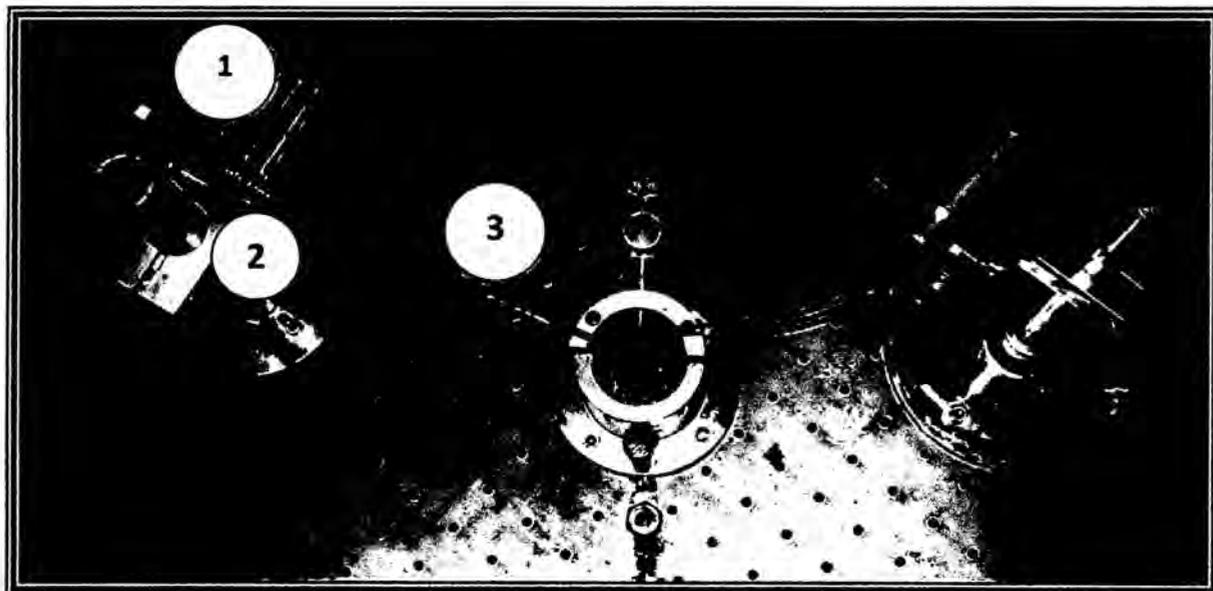


Figura 3.9. Sistema de alineación Fibra óptica – Sensor de Luz. 1 Sensor de Luz. 2 Conector BNC adaptado. 3. Fibra óptica. Fuente :Laboratorio de Física FIME - UNAC

i) Interfase computarizado.

Pasco serie Science Workshop 300, 500, o 700 para Macintosh o Windows, dispositivo encargado de transmitir la información registrada por los sensores a la computadora disponible en los laboratorios de Óptica de la Universidad Nacional del Callao.

j) Computadora Personal.

Maquina computadora Pentium IV, con Windows instalado y software Data Studio instalado, disponible en los laboratorios de Óptica de la Universidad Nacional del Callao (ver figura 3.10).

¹ Catalogo disponible en <http://www.capphysics.ca/PhysLab/Phys114115/exp13%20-%20spectroscopy/docs/LightSensor.pdf>, ver Anexo.



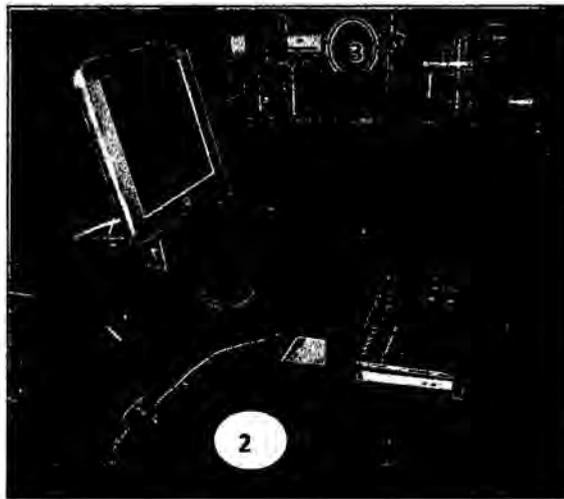


Figura 3.10. Disposición general de los instrumentos 1. Interface, 2 Computadora 3. Bases y soportes optomecánicos.

Fuente: Laboratorio de Física UNAC

C. Materiales

Para la determinación de la variación de intensidad de luz frente al nivel de líquidos se tomó como nivel de referencia cero el espejo de líquido del recipiente sistema de estudio, a partir de allí y hacia abajo la variación de nivel de Líquidos medidos cada 0.004 metros, tomando 1001 datos por cada nivel, al colocar el espejo de líquido en el nivel deseado se esperó por un lapso de 60 segundos antes de empezar a registrar los datos de intensidad de luz a fin de asegurar el equilibrio de la superficie de líquido para no causar fluctuaciones en la toma de los datos, realizándose en dos procesos sucesivos de ascenso y descenso del nivel de líquido para cada uno de los cinco líquidos considerados; las sustancias líquidas consideradas se muestran en la siguiente tabla con sus índices de refracción determinados experimentalmente con sus errores respectivos.

Los líquidos utilizados fueron agua destilada, Bebida rehidratante Sporade, Alcohol Puro 96^o, Chicha de Jora y Chicha Morada.

Tabla 3.1. Líquidos utilizados en el trabajo de investigación con sus respectivos índices de refracción.

N	LÍQUIDO	DEFINICIÓN	MARCA	ÍNDICE DE REFRACCIÓN	ERROR (%)
1	AGUA PURA ESPECIAL PARA BATERIAS	Sustancia Líquida inodora e incolora destilada (Mark J. Hammer, 2004) para eliminar impurezas y sales disueltas	DINOSOL	1,31700	3,02
2	BEBIDA REHIDRATANTE (SPORADE)	Bebida isotónica (Google, 2008), rehidratante, que contiene electrolitos	AJE	1,31849	2,51
3	ALCOHOL PURO 96°	Líquido incoloro de olor fuerte que arde fácilmente (Google, 2012). Se obtiene de la destilación de productos de fermentación de sustancias azucaradas o feculentas, como las uvas, la remolacha o la patata. Se encuentra en muchas bebidas, como el vino o la cerveza, y se utiliza mucho en la industria. de cada 100 ml de ese alcohol 96 es de alcohol y los 4 de agua, y así por cada 100 ml 96 van a ser de alcohol,	ALCOMED S.A.C	1,33089	4,23
4	CHICHA DE JORA	Bebida de color dorado oriunda del Perú (Wikipedia, 2012), difundida en la mayoría del territorio a excepción de la selva. Su preparación se compone principalmente del "maíz de jora"	S/M	1,49989	4,86
5	CHICHA MORADA	Es una bebida originaria de la región andina del Perú pero cuyo consumo actualmente se encuentra extendido a nivel nacional (Google, 2012). El insumo principal de la bebida es el maíz culli o ckolli, que es una variedad peruana de maíz morado que se cultiva ampliamente en la cordillera de los Andes	CIFRUT	1,51647	5,22

Fuente: Elaboración de autor

IV. RESULTADOS

El desarrollo del presente trabajo de Investigación de la intensidad de luz y su relación con las variaciones del nivel de líquidos y el índice de refracción del recubrimiento de una fibra óptica microcurvada, se ha seguido el siguiente procedimiento:

4.1. DEL PROCESO EXPERIMENTAL DE TOMA DE DATOS.

El registro de los datos experimentales del trabajo de investigación la intensidad de la luz y su relación con las variaciones del nivel de líquidos y el índice de refracción del recubrimiento de una fibra óptica microcurvada, se realizó en los ambientes del laboratorio de Óptica de la Universidad Nacional del Callao, a una temperatura de 24°C , a presión de una atmosfera, en una habitación debidamente acondicionada con la finalidad de evitar ruido luminoso en el registro de la información óptica a través del sensor de luz , y con la disposición de Materiales equipos e instrumentos conforme se muestra en la figura 4.1.

En la determinación de la variación de intensidad de luz frente al nivel de líquidos se consideró como nivel de referencia cero el espejo de líquido o superficie libre del líquido en el recipiente que es el sistema de estudio, a partir de allí y hacia abajo se consideró la variación de nivel de líquidos medidos cada 0,004 metros, se registró 1001 datos de intensidad de luz para cada nivel, al colocar el espejo de líquido en el nivel deseado se esperó por un lapso de 60 segundos antes de empezar a registrar los datos de intensidad de luz a fin de asegurar el equilibrio de la superficie de líquido para no causar fluctuaciones en la toma de los datos, realizándose esta toma de datos en dos procesos sucesivos de ascenso y descenso con 20 tomas de datos en cada proceso del nivel de líquido para cada uno de los cinco líquidos considerados; las sustancias líquidas consideradas fueron:

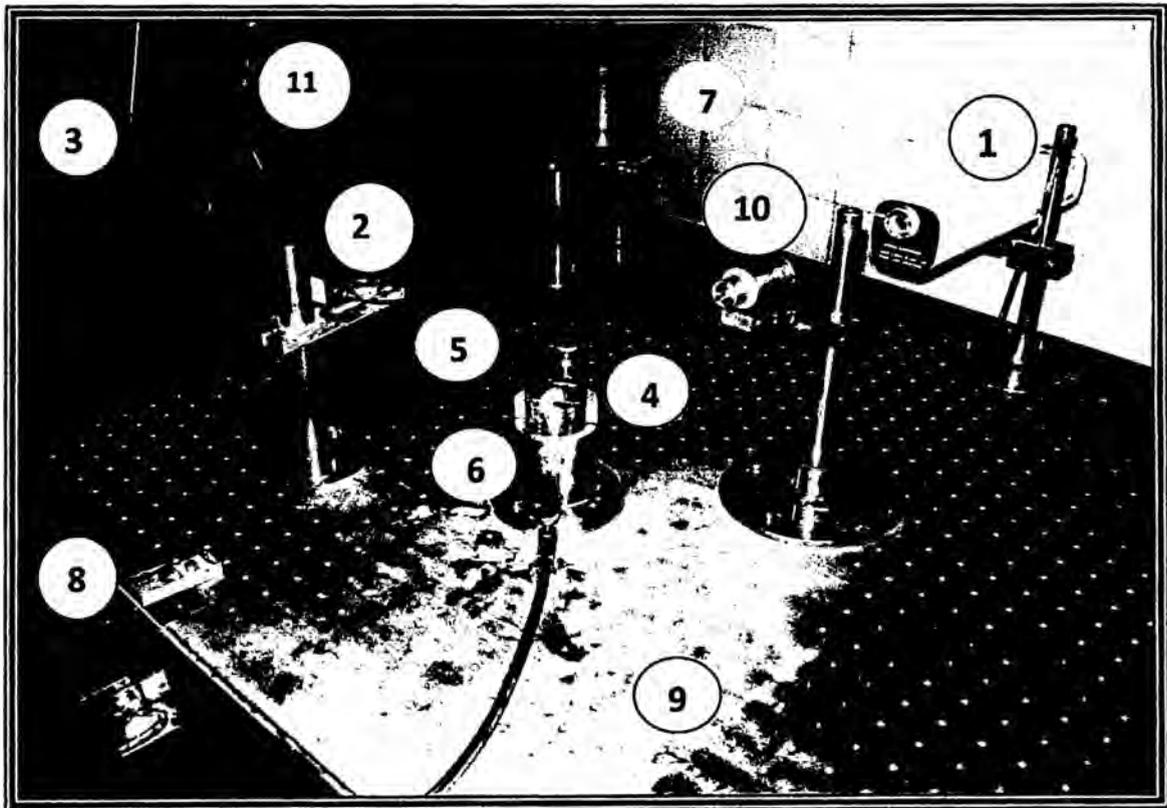


Figura 4.1. Arreglo experimental para toma de datos: 1. Laser de Helio –Neón, 2. Sensor de Intensidad de Luz, 3. Intefase, 4. Deformador Mecánico 5. Fibra óptica, 6. Recipiente Sistema de estudio. 7. Recipiente Fuente. 8. Recipiente sumidero. 9. Mesa Antivibratoria. 10 Soporte del extremos de la Fibra. 11. PC con software Data Studio.
Fuente : Laboratorio de Física FIME - UNAC

- A. Agua
- B. Bebida rehidratante (Sporade)
- C. Alcohol
- D. Chicha de Jora.
- E. Chicha Morada.

Estos líquidos se muestran en la siguiente tabla con sus índices de refracción determinados experimentalmente con sus errores respectivos.

Tabla 4.1. Líquidos utilizados en el trabajo de investigación con sus índices de refracción determinados experimentalmente con su respectivo error.

N	LÍQUIDO	MARCA	ÍNDICE DE REFRACCIÓN	ERROR (%)
1	AGUA PURA ESPECIAL PARA BATERIAS	DINOSOL	1,31700	3,02
2	BEBIDA REHIDRATANTE	AJE	1,31849	2,51
3	ALCOHOL PURO 96^o	ALCOMED	1,33089	4,23
4	CHICHA DE JORA	S/M	1,49989	4,86
5	CHICHA MORADA	CIFRUT	1,51647	5,22

Fuente: Elaboración del autor

4.1.1. DEL REGISTRO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

A continuación presentamos las 5 tablas de resultados experimentales donde se muestra los valores de % intensidad de luz láser y sus errores porcentuales respectivos, medidos con el sensor de luz en unidades arbitrarias, a través de la fibra óptica previamente curvada en los procesos ascendente, descendente así como el valor promedio de % de Intensidad frente al nivel de líquido respectivo medido en metros incluyendo su error porcentual.

TABLA DE DATOS N° 4.2

Valores de datos de % de intensidad de luz en los procesos ascendente, descendente y promedio de ambos procesos medidos en unidades arbitrarias, frente a los valores respectivos de nivel de líquido medido en metros (m) para el Agua.

NÚMERO DE DATOS	NIVEL DE LÍQUIDO (m)	% DE INTENSIDAD DE LUZ									
		ASCENSO					DESCENSO				
		VALOR MEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR	ERROR %	VALOR MEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR	ERROR %	PROMEDIO	ERROR %		
1	0	54,94833	0,45897	0,8	44,26353	0,34953	0,8	49,60593	1,2		
2	0,004	53,61554	0,18885	0,4	47,42256	0,15953	0,3	50,51905	0,5		
3	0,008	55,87114	0,2606	0,5	47,88084	0,14286	0,3	51,87599	0,6		
4	0,012	57,2513	0,18966	0,3	47,99789	0,15098	0,3	52,62460	0,5		
5	0,016	58,67087	0,20979	0,4	49,00262	0,14857	0,3	53,83675	0,5		
6	0,02	59,02671	0,25516	0,4	49,79409	0,15024	0,3	54,41040	0,5		
7	0,04	60,41714	0,19443	0,3	50,27198	0,15528	0,3	55,34456	0,4		
8	0,028	61,75604	0,54232	0,3	51,77677	0,14475	0,3	57,08910	0,5		
9	0,032	62,401420	0,21501	0,3	52,30105	0,14866	0,3	57,36522	0,4		
10	0,036	62,42939	0,17739	0,4	53,2892	0,14722	0,3	58,25916	0,5		
11	0,04	63,22911	0,23936	0,3	54,35489	0,15078	0,3	59,51095	0,4		
12	0,044	64,667	0,17262	0,7	54,93987	0,15627	0,3	58,47141	0,8		
13	0,048	62,00295	0,41793	0,4	54,88795	0,15718	0,3	57,94060	0,5		
14	0,052	60,99325	0,23141	0,4	54,81967	0,1449	0,3	58,69224	0,5		
15	0,056	62,56481	0,2343	0,5	55,08014	0,15226	0,3	60,16213	0,6		
16	0,06	65,24412	0,31308	0,4	55,70019	0,14423	0,3	60,31836	0,5		
17	0,064	64,93652	0,24343	0,5	55,72707	0,1561	0,3	61,06210	0,6		
18	0,068	66,39713	0,29959	0,4	55,96712	0,1513	0,3	60,81354	0,5		
19	0,072	65,65996	0,28626	0,5	56,66174	0,15167	0,3	60,79215	0,6		
20	0,076	64,92255	0,30217	0,5	57,54515	0,16608	0,3	61,23385	0,8		

Fuente: Elaboración del autor

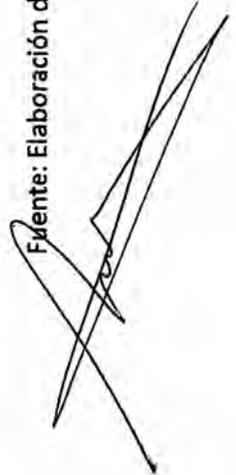


TABLA DE DATOS N° 4.3

Valores de datos de % de intensidad de luz en los procesos ascendente, descendente y promedio de ambos procesos medidos en unidades arbitrarias, frente a los valores respectivos de nivel de líquido medido en metros (m) para Sporade

NÚMERO DE DATOS	NIVEL DE LÍQUIDO (m)	% DE INTENSIDAD DE LUZ									
		ASCENSO					DESCENSO				
		VALOR MEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR	ERROR %	VALOR MEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR	ERROR %	PROMEDIO	ERROR %		
1	0	34,47887	0,15122	0,4	34,07079	0,14867	0,4	34,27483	0,6		
2	0,004	34,71541	0,16553	0,5	35,0258	0,15859	0,5	34,87061	0,7		
3	0,008	37,74011	0,15088	0,4	35,63603	0,14199	0,4	36,68807	0,6		
4	0,012	39,01511	0,15363	0,4	37,24622	0,15915	0,4	38,13067	0,6		
5	0,016	39,15546	0,15245	0,4	38,78465	0,16114	0,4	38,97006	0,6		
6	0,02	40,08741	0,15826	0,4	39,83554	0,15357	0,4	39,96148	0,6		
7	0,04	41,0504	0,22109	0,5	40,9224	0,16558	0,4	40,98640	0,7		
8	0,028	41,77850	0,1685	0,4	41,41856	0,16614	0,4	41,59871	0,6		
9	0,032	42,67379	0,21988	0,5	42,85327	0,15554	0,4	42,76353	0,6		
10	0,036	43,66369	0,30945	0,7	44,98056	0,15893	0,4	44,32213	0,8		
11	0,04	45,85867	0,27411	0,6	42,96433	0,15356	0,4	44,41150	0,7		
12	0,044	46,41993	0,26113	0,6	43,57076	0,16422	0,4	44,99535	0,7		
13	0,048	47,40618	0,19381	0,4	44,59055	0,14972	0,3	45,99837	0,5		
14	0,052	47,72312	0,32641	0,7	44,68167	0,16261	0,4	46,20240	0,8		
15	0,056	48,21127	0,27666	0,6	44,62961	0,16736	0,4	46,42044	0,7		
16	0,06	48,21732	0,2761	0,6	45,57885	0,1468	0,3	46,89809	0,7		
17	0,064	48,88247	0,28336	0,6	45,47449	0,19006	0,4	47,17848	0,7		
18	0,068	51,24452	0,22807	0,4	46,20818	0,14953	0,3	48,72635	0,6		
19	0,072	54,42755	0,30741	0,6	52,59325	0,14704	0,3	53,51040	0,6		
20	0,076	56,74821	0,32559	0,6	52,38995	0,14864	0,3	54,56908	0,7		

Fuente: Elaboración del autor

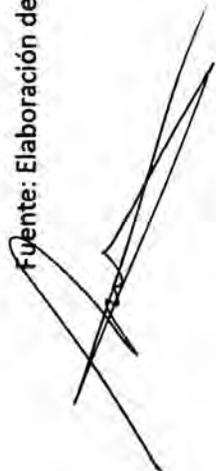


TABLA DE DATOS N° 4.4

Valores de datos de % de intensidad de luz en los procesos ascendente, descendente y promedio de ambos procesos medidos en unidades arbitrarias, frente a los valores respectivos de nivel de líquido medido en metros (m) para el Alcohol.

NÚMERO DE DATOS	NIVEL DE LÍQUIDO (m)	% DE INTENSIDAD DE LUZ									
		ASCENSO					DESCENSO				
		VALOR MEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR	ERROR %	VALOR MEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR	ERROR %	PROMEDIO	ERROR %		
1	0	34,617390	0,15698	0,5	34,91697	0,13246	0,4	34,76718	0,6		
2	0,004	35,252590	0,15567	0,4	35,57442	0,13795	0,4	35,41351	0,6		
3	0,008	37,59575	0,13715	0,4	36,78338	0,19544	0,5	37,18957	0,7		
4	0,012	38,36309	0,13727	0,4	37,64062	0,12271	0,3	38,00186	0,5		
5	0,016	39,98988	0,13814	0,3	39,7720	0,13138	0,3	39,88094	0,5		
6	0,020	40,28154	0,15973	0,4	40,30115	0,25026	0,6	40,29135	0,8		
7	0,040	41,00414	0,14690	0,4	41,1545	0,14297	0,3	41,07932	0,6		
8	0,028	42,31658	0,14411	0,3	42,10893	0,18429	0,4	42,21276	0,7		
9	0,032	42,51172	0,13586	0,3	44,8099	0,15109	0,3	43,66081	0,6		
10	0,036	44,05422	0,15087	0,3	47,10636	0,17568	0,4	45,58029	0,7		
11	0,040	44,17850	0,14433	0,3	48,59945	0,19239	0,4	46,38898	0,7		
12	0,044	45,13754	0,12430	0,3	49,67727	0,14342	0,3	47,40741	0,5		
13	0,048	45,85647	0,13326	0,3	51,71605	0,15101	0,3	48,78626	0,6		
14	0,052	45,84063	0,14093	0,3	52,13336	0,35727	0,7	48,98700	1,1		
15	0,056	46,43161	0,15114	0,3	53,31817	0,19982	0,4	49,87489	0,7		
16	0,060	46,92260	0,14910	0,3	53,78593	0,14778	0,3	50,35427	0,6		
17	0,064	47,21080	0,15462	0,3	53,93272	0,15789	0,3	50,57176	0,6		
18	0,068	47,87499	0,15288	0,3	57,57458	0,26372	0,5	52,72479	0,9		
19	0,072	49,14245	0,16341	0,3	57,06412	0,31022	0,5	53,10329	1,0		
20	0,076	49,6016	0,15615	0,3	58,30712	0,16762	0,3	53,95436	0,6		

Fuente: Elaboración del autor

TABLA DE DATOS N° 4.5

Valores de datos de % de intensidad de luz en los procesos ascendente, descendente y promedio de ambos procesos medidos en unidades arbitrarias, frente a los valores respectivos de nivel de líquido medido en metros (m) para la Chicha de Jora.

NÚMERO DE DATOS	NIVEL DE LÍQUIDO (m)	% DE INTENSIDAD DE LUZ									
		ASCENSO					DESCENSO				
		VALOR MEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR	ERROR %	VALOR MEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR	ERROR %	PROMEDIO	ERROR %		
1	0	42,73219	0,16056	0,4	45,52257	0,14803	0,3	44,12738	0,5		
2	0,004	44,07478	0,15368	0,3	45,88019	0,22904	0,5	44,97749	0,6		
3	0,008	45,75134	0,15754	0,3	48,56047	0,14584	0,3	47,15591	0,5		
4	0,012	46,47360	0,22043	0,5	48,73641	0,17825	0,4	47,60501	0,6		
5	0,016	47,48850	0,18625	0,4	50,85232	0,17154	0,3	49,17041	0,5		
6	0,02	47,76101	0,15179	0,3	53,33909	0,15134	0,3	50,55005	0,4		
7	0,04	48,98112	0,19831	0,4	53,97469	0,16031	0,3	51,47791	0,5		
8	0,028	50,26652	0,18106	0,4	55,12700	0,17735	0,3	52,69676	0,5		
9	0,032	51,48483	0,18412	0,4	55,96074	0,19109	0,3	53,72279	0,5		
10	0,036	52,74137	0,29106	0,6	57,09775	0,17418	0,3	54,91956	0,6		
11	0,04	52,81728	0,21370	0,4	59,16819	0,17748	0,3	55,99274	0,5		
12	0,044	52,97889	0,27266	0,5	58,91902	0,19422	0,3	55,94896	0,6		
13	0,048	54,33529	0,27745	0,5	60,42554	0,16347	0,3	57,38042	0,6		
14	0,052	55,11987	0,25434	0,5	60,04818	0,15872	0,3	57,58403	0,5		
15	0,056	54,40558	0,25048	0,5	62,41958	0,17986	0,3	58,41258	0,5		
16	0,06	54,60946	0,27896	0,5	61,61550	0,18616	0,3	58,11248	0,6		
17	0,064	54,11070	0,28205	0,5	61,29423	0,1498	0,2	57,70247	0,6		
18	0,068	54,24228	0,28481	0,5	63,93388	0,18699	0,3	59,08808	0,6		
19	0,072	53,23532	0,25711	0,5	64,86985	0,1507	0,2	59,05259	0,5		
20	0,076	52,33070	0,27950	0,5	65,92276	0,14463	0,2	59,12673	0,5		

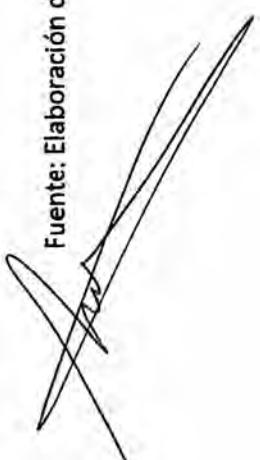
Fuente: Elaboración del autor

TABLA DE DATOS N° 4.6

Valores de datos de % de intensidad de luz en los procesos ascendente, descendente y promedio de ambos procesos medidos en unidades arbitrarias, frente a los valores respectivos de nivel de líquido medido en metros (m) para la Chicha Morada.

NÚMERO DE DATOS	NIVEL DE LÍQUIDO (m)	% DE INTENSIDAD DE LUZ									
		ASCENSO					DESCENSO				
		VALOR MEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR	ERROR %	VALOR MEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR	ERROR %	PROMEDIO	ERROR %		
1	0	4,58468	0,13002	2,8	8,34064	0,11625	1,4	6,46266	2,7		
2	0,004	4,75323	0,12008	2,5	8,30992	0,12231	1,5	6,53158	2,6		
3	0,008	4,78922	0,12011	2,5	7,97528	0,12434	1,6	6,38225	2,7		
4	0,012	4,98666	0,12378	2,5	7,7666	0,12282	1,6	6,37663	2,7		
5	0,016	5,26082	0,11755	2,2	7,69294	0,1206	1,6	6,47688	2,6		
6	0,02	5,27866	0,12248	2,3	7,63199	0,12084	1,6	6,45533	2,7		
7	0,04	5,57761	0,12419	2,2	7,77145	0,12084	1,6	6,67453	2,6		
8	0,028	5,688090	0,11807	2,1	7,82058	0,11971	1,5	6,75434	2,5		
9	0,032	5,85870	0,12247	2,1	7,81881	0,14467	1,9	6,83876	2,8		
10	0,036	6,22771	0,12799	2,1	7,97022	0,12058	1,5	7,09897	2,5		
11	0,04	6,44825	0,12595	2,0	8,02464	0,12357	1,5	7,23645	2,4		
12	0,044	6,7648	0,11894	1,8	8,13461	0,12545	1,5	7,44971	2,3		
13	0,048	7,22073	0,12176	1,7	8,1898	0,11297	1,4	7,70527	1,2		
14	0,052	7,42347	0,11979	1,6	8,16578	0,12891	1,6	7,79463	2,3		
15	0,056	7,47275	0,12483	1,7	8,13733	0,12061	1,5	7,80504	2,2		
16	0,06	7,96411	0,11699	1,5	8,23047	0,1226	1,5	8,09729	2,1		
17	0,064	8,01339	0,12439	1,6	8,51638	0,13182	1,5	8,26489	2,2		
18	0,068	8,16929	0,12311	1,5	8,93204	0,12046	1,3	8,55067	2,0		
19	0,072	8,44986	0,14164	1,7	9,286	0,12098	1,3	8,86793	2,1		
20	0,076	10,40221	0,12393	1,2	8,99058	0,12198	1,4	9,69640	1,8		

Fuente: Elaboración del autor



4.2. DEL PROCESO DE TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.

Ahora los valores tabulados de % de intensidad promedio versus nivel de líquido lo graficamos con ayuda del software Data Studio, este software nos ayuda con la gráfica y nos arroja automáticamente los valores del ajuste lineal a que sometemos nuestros datos, así como los valores de la pendiente, el intercepto con sus respectivos errores y el coeficiente de correlación de Pearson lo que presentamos a continuación para los diferentes líquidos.

a) LÍQUIDO: AGUA

Empezamos con el Agua, cuya grafica obtenida de los datos de la tabla 4.2, lo presentamos a continuación en la figura 4.2.

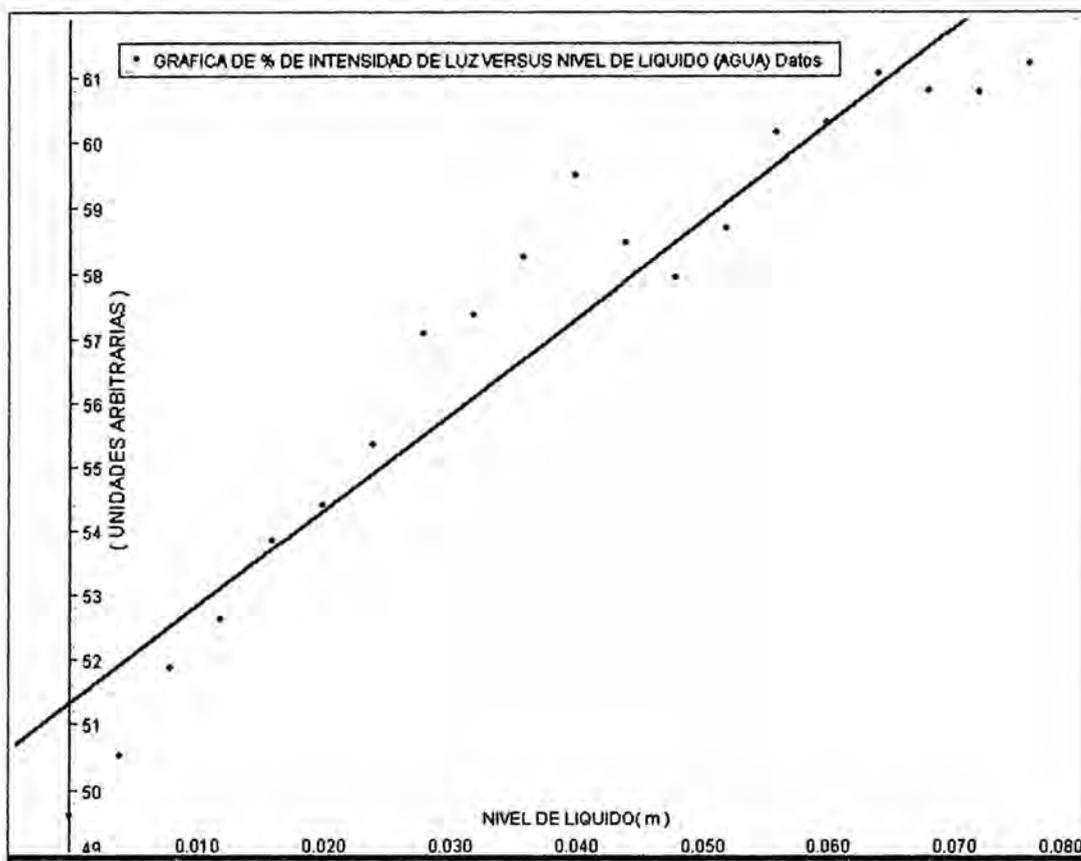


Figura 4.2. Grafica de % de intensidad de luz versus nivel de líquido (Agua) donde la línea continua en azul representa el mejor ajuste de datos con Data Studio y los puntos son los datos experimentales. Fuente: Elaboración del autor.

El ajuste lineal obtenido con el software Data Studio nos arroja los siguientes valores:

La pendiente $m = 149,37008$

El intercepto $b = 51,32034$

Tal que la ecuación de ajuste es de la forma:

$$y = 149,37008x + 51,32034$$

El coeficiente de Pearson $r = 0,95585$

La desviación estándar de la pendiente $ds_m = 10,82413$

La desviación estándar del intercepto $ds_b = 0,48116$

El coeficiente de correlación de Pearson "r" se dice que es significativo si se puede afirmar, con una cierta probabilidad, que es diferente de cero. Más estrictamente, en términos estadísticos, preguntarse por la significación de un cierto coeficiente de correlación no es otra cosa que preguntarse por la probabilidad de que tal coeficiente proceda de una población cuyo valor sea de cero. A este respecto, como siempre, tendremos dos hipótesis posibles:

$H_0: r = 0 \rightarrow$ El coeficiente de correlación obtenido procede de una población cuya correlación es cero ($\rho = 0$).

$H_1: r \neq 0 \rightarrow$ El coeficiente de correlación obtenido procede de una población cuyo coeficiente de correlación es distinto de cero ($\rho \neq 0$).

Desde el supuesto de la Hipótesis nula se demuestra que la distribución muestral de correlaciones procedentes de una población caracterizada por una correlación igual a cero ($\rho = 0$) sigue una ley de Student con $N-2$ grados de libertad, de media el valor poblacional y desviación tipo:

$$S_r = \sqrt{\frac{1-r^2}{N-2}}$$

En consecuencia, dado un cierto coeficiente de correlación r obtenido en una determinada muestra, se trata de comprobar si dicho coeficiente es posible que se encuentre dentro de la distribución muestral especificada por la Hipótesis nula. A

efectos prácticos, se calcula el número de desviaciones tipo que se encuentra en el coeficiente obtenido del centro de la distribución, según la fórmula conocida:

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{N-2}}}$$

Reemplazando valores tenemos que $t = 13,80$

Buscamos en la tabla de t de Student² para $\alpha = 0,01$ y $20-2 = 18$ grados de libertad.

El valor establecido que encontramos en la tabla es de:

$$t_{(0,01;18)} = 2,878$$

Comparamos el valor t obtenido con el de las tablas (Distribution, 2012) y observamos que:

$$13,80 > 2,878$$

Resultado que nos permite rechazar la Hipótesis nula con un riesgo (máximo) de equivocarnos de 0,01. La correlación obtenida no procede de una población caracterizada por una correlación de cero. Concluimos, pues, que ambas variables la intensidad de luz y el nivel de líquido (Agua) están relacionadas y esta relación es directamente proporcional, es decir un aumento de nivel produce un aumento de intensidad de luz.

b) LÍQUIDO: AGUA REHIDRATANTE (SPORADE)

Graficamos los datos promedios de la tabla 4.3 para el líquido rehidratante (Sporade) y obtenemos la gráfica mostrada en la figura 4.3, donde al realizar el ajuste lineal con ayuda del software Data Studio obtenemos:

El valor de la pendiente de la recta es: $m = 227,68616$

El valor del intercepto de la recta es $b = 34,92179$

La ecuación que representa este ajuste es:

² Tabla disponible en <http://facultyweb.berry.edu/vbissonnette/tables/t.pdf>. Ver Apéndice.

$$y = 227,68616x + 34,92179$$

El coeficiente de correlación de Pearson es: $r = 0,97592$

La desviación estándar de la pendiente de la recta es: $ds_m = 11,99533$

La desviación estándar del intercepto de la recta es: $ds_b = 0,53322$

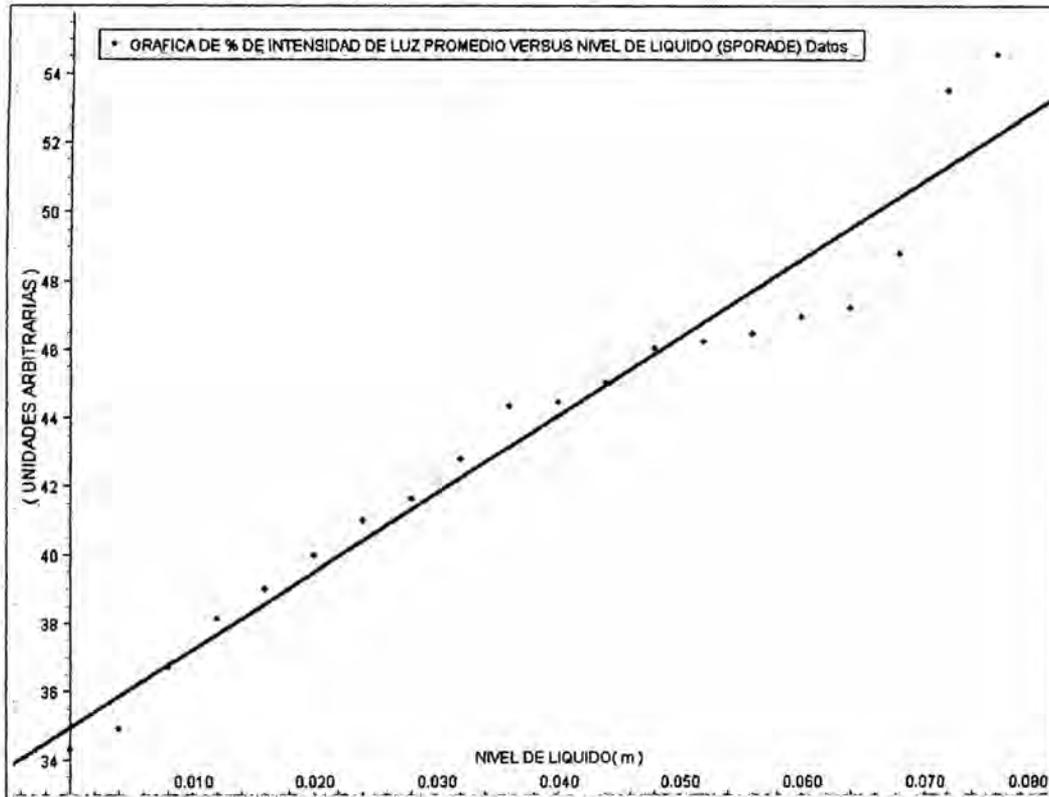


Figura 4.3. Grafica de % de intensidad de luz versus nivel de liquido (Sporade) donde obtenemos de forma automática con el software Data Studio los valores de la Pendiente $m = 227,68616$ y el coeficiente de correlación de Pearson $r = 0,97592$.

Fuente: Elaboración del autor.

Calculamos el número de desviaciones tipo que se encuentra en el coeficiente obtenido del centro de la distribución, según la formula conocida:

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{N-2}}} = \frac{0,97592}{\sqrt{\frac{1-(0,97592)^2}{20-2}}} = 18,98$$

Comparamos el valor t obtenido con el de las tablas:

$$18,98 > 2,878$$

Resultado que nos permite rechazar la Hipótesis nula con un riesgo (máximo) de equivocarnos de 0,01. La correlación obtenida no procede de una población caracterizada por una correlación de cero. Concluimos, pues, que ambas variables la intensidad de luz y el nivel de líquido (Sporade) están relacionadas y esta relación es directamente proporcional, es decir un aumento de nivel de líquido produce un aumento de intensidad de luz.

c) LÍQUIDO: ALCOHOL

Graficamos los datos promedios de la tabla 3.4 para el alcohol y obtenemos la gráfica mostrada en la figura 3.4, donde al realizar el ajuste lineal con ayuda del software Data Studio obtenemos:

El valor de la pendiente de la recta es: $m = 254,59547$

El valor del intercepto de la recta es: $b = 35,28690$

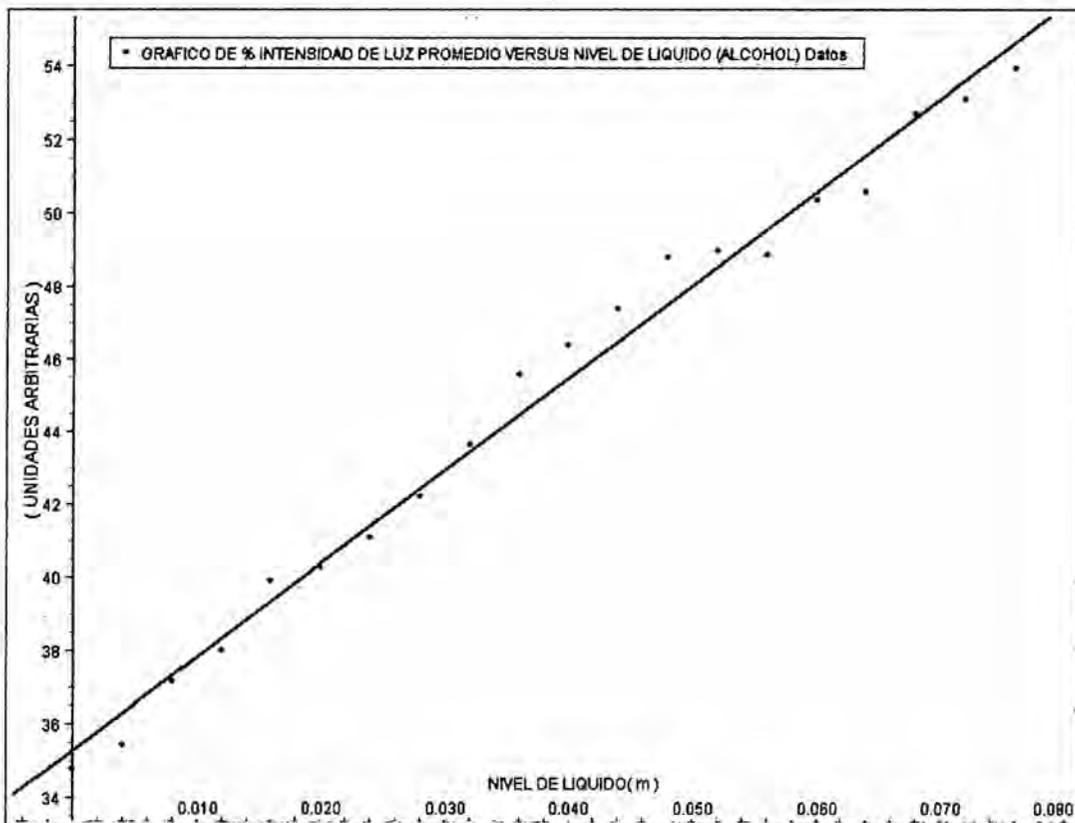


Figura 3.4. Gráfica de % de intensidad de luz versus nivel de líquido (Alcohol) donde la línea sólida representa el mejor ajuste lineal del conjunto de datos.

Fuente: Elaboración del autor.

La ecuación que representa este ajuste es:

$$y = 254,59547x + 35,28690$$

El valor del coeficiente de correlación de Pearson es: $r = 0,99373$

La desviación estándar de la pendiente es: $dsm = 6,75277$

La desviación estándar del intercepto es: $dsb = 0,30018$

Calculamos el número de desviaciones tipo que se encuentra en el coeficiente obtenido del centro de la distribución, según la formula conocida:

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{N-2}}} = \frac{0,99373}{\sqrt{\frac{1-(0,99373)^2}{20-2}}} = 37,71$$

Comparamos el valor t obtenido con el de las tablas y obtenemos que:

$$37,71 > 2,878$$

Resultado que nos permite rechazar la Hipótesis nula con un riesgo (máximo) de equivocarnos de 0,01. La correlación obtenida no procede de una población caracterizada por una correlación de cero. Concluimos, pues, que ambas variables la intensidad de luz y el nivel de líquido (Alcohol) están relacionadas y esta relación es directamente proporcional, es decir un aumento de nivel de líquido produce un aumento de intensidad de luz.

d) LÍQUIDO: CHICHA DE JORA

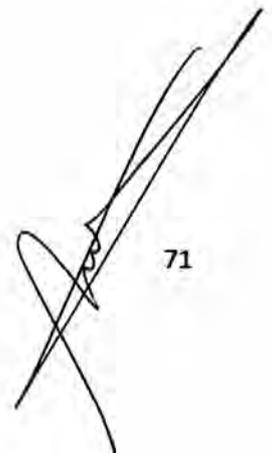
Finalmente graficamos los datos promedios de la tabla 4.5 para la Chicha de Jora y obtenemos la gráfica mostrada en la figura 4.5, donde al realizar el ajuste lineal con ayuda del software Data Studio obtenemos:

La pendiente de la recta ajustada es: $m = 202,54742$

El intercepto de la recta ajustada es: $b = 46,04342$

La ecuación que representa este ajuste es:

$$y = 202,54742x + 46,04342$$



La constante de Pearson es: $r = 0,96443$

La desviación estándar de la pendiente es: $dsm = 0,58168$

La desviación estándar para el intercepto es: $dsb = 0,58168$

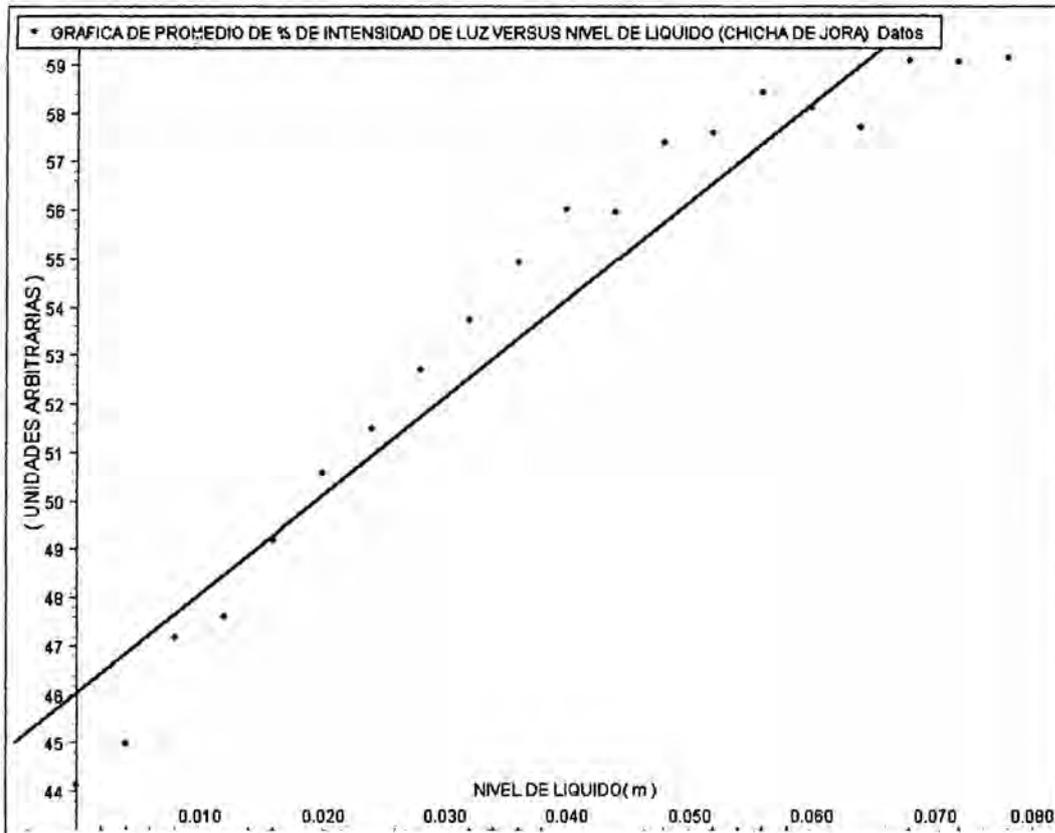


Figura 4.5. Grafica de % de intensidad de luz versus nivel de líquido (Chicha de Jora) donde la línea sólida representa el mejor ajuste lineal de la nube de puntos experimentales.

Fuente: Elaboración del autor.

Calculamos el número de desviaciones tipo que se encuentra en el coeficiente obtenido del centro de la distribución, según la fórmula conocida:

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{N-2}}} = \frac{0,96443}{\sqrt{\frac{1-(0,96443)^2}{20-2}}} = 15,48$$

Comparamos el valor t obtenido con el de las tablas y encontramos que:

$$15,48 > 2,878$$

Resultado que nos permite rechazar la Hipótesis nula con un riesgo (máximo) de equivocarnos de 0,01. La correlación obtenida no procede de una población caracterizada por una correlación de cero. Concluimos, pues, que ambas variables la intensidad de luz y el nivel de líquido (Chicha de Jora) están relacionadas y esta relación es directamente proporcional, es decir un aumento de nivel de líquido produce un aumento de intensidad de luz..

e) LÍQUIDO: CHICHA MORADA

Graficamos los datos promedios de la tabla 3.6 para la chicha morada y obtenemos la gráfica mostrada en la figura 3.6, donde al realizar el ajuste lineal con ayuda del software Data Studio obtenemos:

La pendiente de la recta ajustada es: $m = 38,11471$

El intercepto de la recta ajustada es: $b = 5,92765$

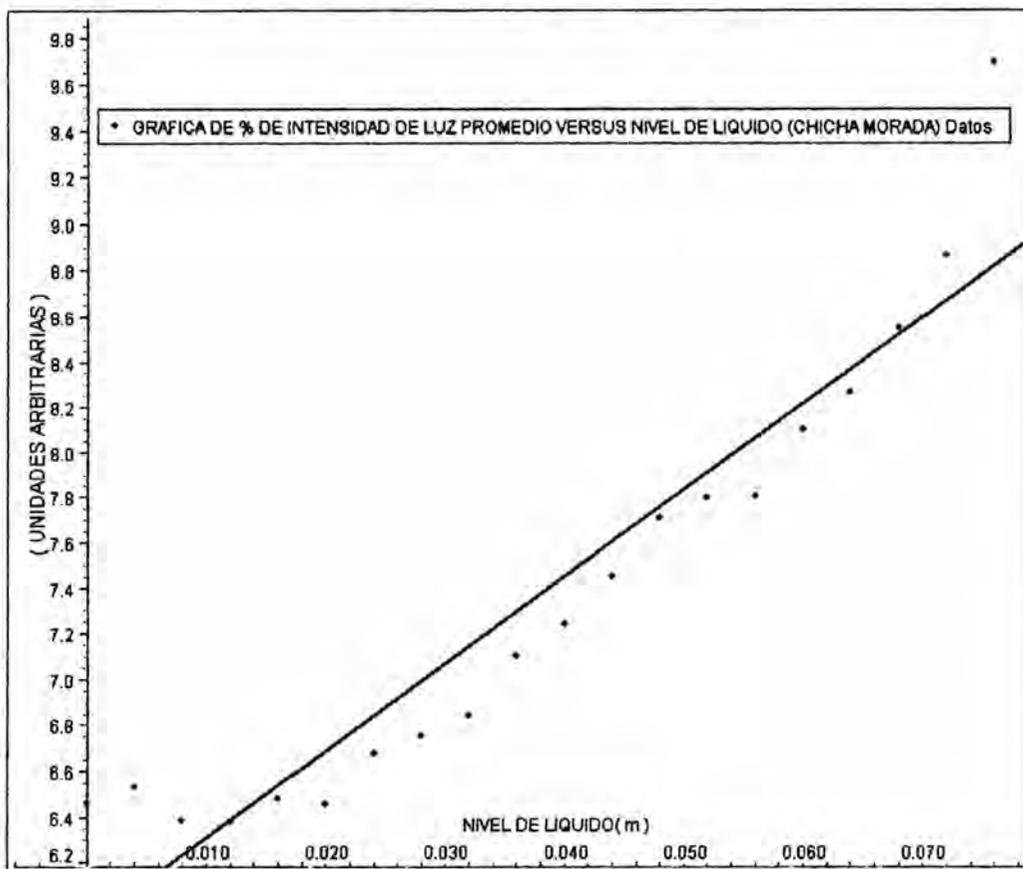


Figura 4.6. Grafica de % de intensidad de luz versus nivel de liquido (Chicha Morada) donde obtenemos de forma automática con el software Data Studio los valores de la Pendiente $m = 38,11471$ y el coeficiente de correlación de Pearson $r = 0,94725$.

Fuente: Elaboración del autor.

La ecuación que representa este ajuste es:

$$y = 38,11471x + 5,92765$$

La constante de Pearson es: $r = 0,94725$

La desviación estándar de la pendiente es: $ds_m = 3,03952$

La desviación estándar del intercepto es $ds_b = 0,13511$

Calculamos el número de desviaciones tipo que se encuentra en el coeficiente obtenido del centro de la distribución, según la fórmula conocida:

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{N-2}}} = \frac{0,94725}{\sqrt{\frac{1-(0,94725)^2}{20-2}}} = 12,54$$

Comparamos el valor t obtenido con el de las tablas: $12,54 > 2,878$

Resultado que nos permite rechazar la Hipótesis nula con un riesgo (máximo) de equivocarnos de 0,01. La correlación obtenida no procede de una población caracterizada por una correlación de cero. Concluimos, pues, que ambas variables la intensidad de luz y el nivel de líquido (Chicha Morada) están relacionados y esta relación es directamente proporcional, es decir un aumento de nivel de líquido produce un aumento de intensidad de luz.

Todos estos resultados lo resumimos en la siguiente tabla.

Tabla 4.7. Resumen de análisis estadístico para cada uno de los cinco líquidos con una significancia de 1%.

LIQUIDO	GRADOS DE LIBERTAD (N-2)	COEFICIENTE DE PEARSON (r)	VARIANZA DE FACTORES COMUNES (r ²)	VALOR DE t CALCULADO	VALOR DE t TABLA	HIPOTESIS NULA
AGUA	18	0,95585	0,91	13,80	2,878	RECHAZADA
BEBIDA REHIDRATANTE (SPORADE)	18	0,97592	0,95	18,98		RECHAZADA
ALCOHOL	18	0,99373	0,99	37,71		RECHAZADA
CHICHA DE JORA	18	0,96443	0,93	15,48		RECHAZADA
CHICHA MORADA	18	0,94725	0,90	12,54		RECHAZADA

Fuente: Elaboración del autor

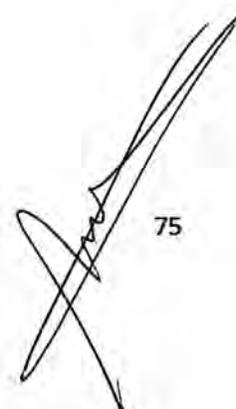
4.3. TASAS DE CAMBIO DE INTENSIDAD DE LUZ POR NIVEL DE LÍQUIDO PARA CADA LÍQUIDO

De las gráficas obtenidas sobre porcentaje de intensidad de luz versus nivel de líquidos; evaluemos ahora como es la variación de la intensidad de luz conforme cambiamos el nivel de líquidos; para cada líquido estudiado caracterizado por la pendiente que es la razón o tasa de cambio, información que resumimos en el siguiente cuadro (tabla 3.8) de las pendientes (tasa de cambio) para cada líquido.

Tabla 4.8. Tasa de cambio de % intensidad de luz promedio por nivel de líquido para cada líquido.

LÍQUIDO	TASA DE CAMBIO DE % INTENSIDAD VERSUS NIVEL DE LIQUIDO (% Intensidad/m)	ERROR %
ALCOHOL	254,60	2,7
AGUA REHIDRATANTE (SPORADE)	227,69	5,3
CHICHA DE JORA	202,55	6,5
AGUA DESTILADA	149,37	7,2
CHICHA MORADA	38,11	7,9

Fuente: Elaboración del autor



75

De los datos mostrados en la tabla 4.8 elaboramos la gráfica, mostrada en la figura 4.7.

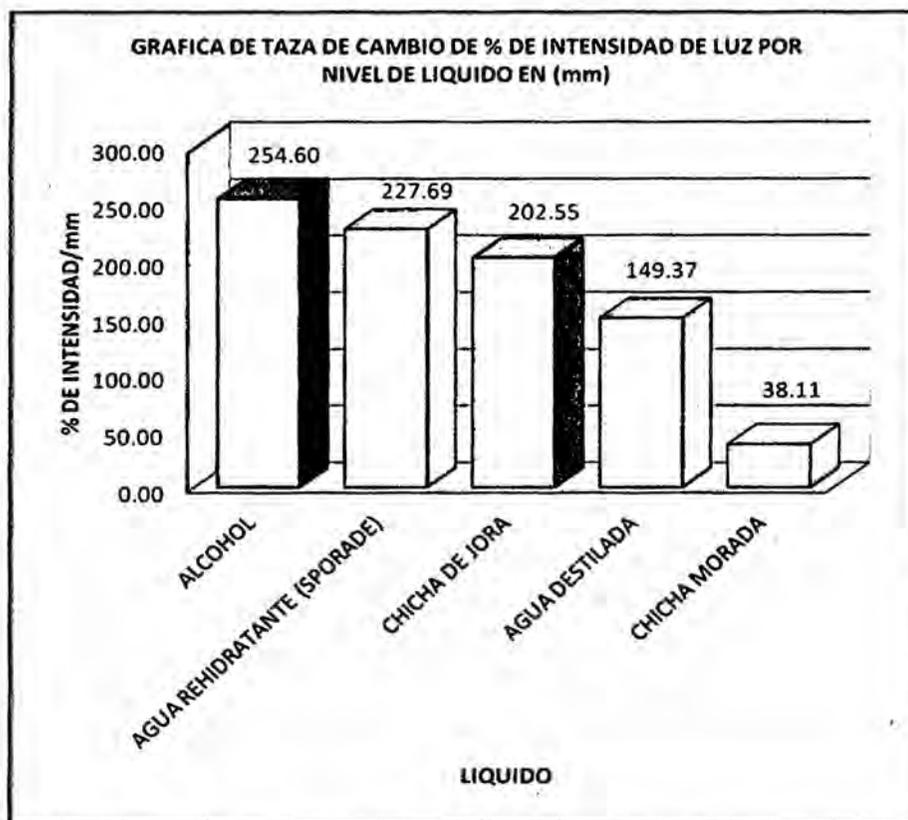


Figura 4.7. Cuadro grafico de razón de cambio de % de intensidad de luz por nivel de líquido para cada líquido ordenados de mayor a menor razón de cambio. Fuente: Elaboración del autor.

De aquí nos damos cuenta que las tasas de cambio de intensidad de luz por milímetro de desnivel cambia con cada líquido lo que nos indica que las condiciones de acoplamiento de modos cambia con la diferencia de índices de refracción del núcleo de la fibra y el índice del medio en este caso aire – líquido.

Finalmente veamos cómo se relacionan los índices de refracción con las tasas de cambio de intensidad de luz por milímetro de nivel de líquido, para lo cual elaboramos la tabla 4.9, que luego vamos a graficar e interpretar lo que ha sucedido con el trabajo experimental, debemos de tener en cuenta y que nos sirva de referencia para la interpretación de los resultados obtenidos el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica microcurvada que tiene un valor de 1,492, entonces

para valores menores y mayores que ese debemos ver el comportamiento de la tasa de cambio de intensidad de luz por milímetro de variación de nivel de líquido.

TABLA 4.9. Valores de Índice de refracción y razón de cambio de intensidad luminosa por milímetro de nivel de líquido para los cinco líquidos.

LIQUIDO	INDICE DE REFRACCION	TASA DE CAMBIO DE INTENSIDAD POR MILIMETRO DE NIVEL (Valores divididos entre 200)
AGUA	1,317	0,747
BEBIDA REHIDRATANTE (SPORADE)	1,31849	1,138
ALCOHOL	1,33089	1,273
CHICHA DE JORA	1,49989	1,013
CHICHA MORADA	1,51647	0,191

Fuente: Elaboración del autor.

Con los datos proporcionados por la tabla 4.9 graficamos el índice de refracción versus las tasa de cambio donde previamente lo hemos dividido por 200 para tener una mejor apreciación de las variaciones, lo que lo vemos en la figura 4.8.

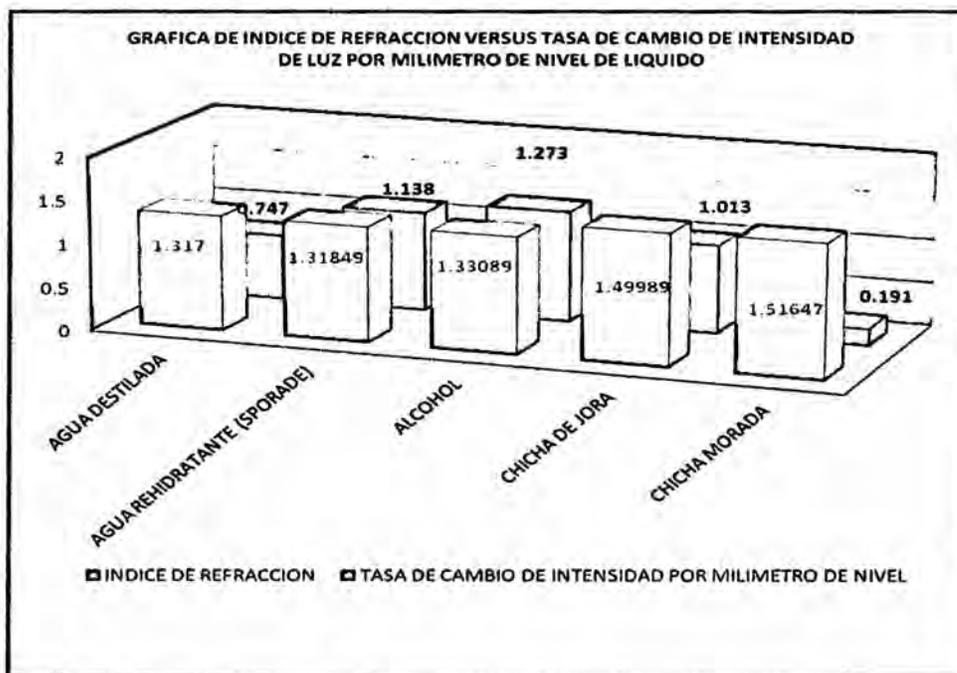


Figura 4.8. Representación de la tasa de cambio de intensidad de luz por milímetro de variación de nivel en relación con el índice de refracción para los cinco líquidos. Fuente: Elaboración del autor.

De la gráfica de la figura 4.8 notamos que para valores menores al índice de refracción del núcleo de la fibra óptica microcurvada, la relación con la tasa de cambio es directamente proporcional es decir un aumento del índice provoca un aumento de la tasa de cambio analizado y para valores del índice de refracción mayores al índice del núcleo de la fibra óptica microcurvada la relación es inversamente proporcional, lo que podemos verlo más claramente en la figura 4.9 donde vemos la naturaleza resonante de este fenómeno en relación a la variación del índice de refracción entre el núcleo y el recubrimiento que en este caso lo constituía cada uno de los índices de refracción de los cinco líquidos estudiados.

Observemos que se forma una campana tipo resonancia de la razón de cambio de intensidad de luz por milímetro versus el índice de refracción de cada líquido, alrededor del valor del índice de refracción del núcleo que es de 1,492 de la fibra óptica microcurvada, debido al cambio de las condiciones de acoplamiento de modos en la fibra óptica y su relación con la variación de índices de refracción entre el núcleo de la fibra y el recubrimiento que en este caso los constituyen cada uno de los cinco líquidos utilizados.



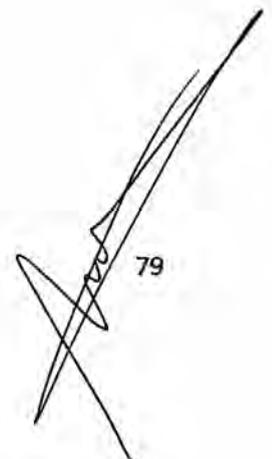
Figura 4.9. Comportamiento resonante de la tasa de cambio de la intensidad de luz por milímetro de nivel de líquido conforme crece el índice de refracción de cada líquido. Fuente: Elaboración del autor.

78

V. CONCLUSIONES

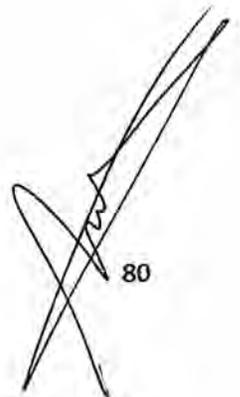
Al finalizar el estudio de investigación hemos llegado a las siguientes conclusiones:

- Se demuestra que las variables intensidad de luz y nivel de líquidos están relacionados directamente con una alta correlación comprendidos entre los valores de 0,99373 para el alcohol y 0,94443; con un máximo riesgo de equivocarnos de 1%.
- Se produce variación de intensidad de luz por el acoplamiento efectivo de modos guiados a modos radiados como consecuencia de la variación del índice de refracción del recubrimiento de la fibra óptica microcurvada.
- Se presenta un fenómeno de resonancia de máxima razón de cambio de intensidad de luz por milímetro de nivel de líquidos (máxima sensibilidad) al acercarse el índice de refracción del recubrimiento (líquido) al índice de refracción del núcleo de la fibra óptica.



VI. DISCUSIONES

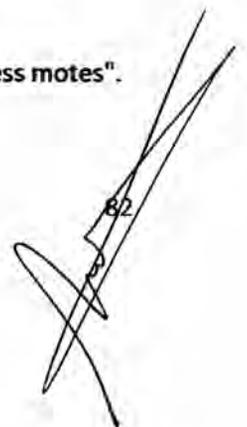
- Se debe mejorar el soporte de la fibra óptica para la alineación con el laser cambiándolo por un posicionador mecánico en tres dimensiones a fin de mejorar el alineamiento e ingreso de la señal óptica en la fibra así como el depósito sistema de estudio, donde se registra los desniveles, debe presentar una mayor caída de nivel de su fondo respecto de la llave de paso de drenaje, para facilitar la salida del fluido y su limpieza.
- Este dispositivo es (recomendable utilizarlo en los procesos industriales como sensor de nivel de líquidos o como elemento de monitoreo en donde las sustancias como consecuencia del proceso experimenten cambios en su índice de refracción.
- Se recomienda este dispositivo construido con la fibra óptica microcurvada por ser un sistema compacto y económico para el registro de niveles de líquidos de baja viscosidad sin importan que sean transparentes o no.



VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Anderson, B. "New approach to microbending fiber optic sensors: varying the spatial frequency". *Optical Engineering* , 34 (1), 208-213. (1995).
2. B.Gholamzadeh. Fiber Optic Sensor. *World Academy of Science, Engineering and Technology* , 42, 297-307. (2008).
3. Baldwin, G. Las tecnologías en el Peru. (M. Asmat, Entrevistador). (13 de Octubre de 2010).
4. Cherin, A. H. *An Introduction to optical fibers*. New York: McGraw - Hill, Inc. (1983).
5. Chin-Lin, C. *Elements of optoelectronics and fiber optics*. Irwin. (1996).
6. Devore, J. *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias* (Séptima Edición ed.). Mexico: Cengage Learning. (2008).
7. Donati, S. *Electro-optical instrumentation sensing and measuring with laser*. New Jersey, United stated of America: Prentice Hall. (2004).
8. Fegadolli, W. "Plastic Optical Fiber Microbent Sensors". *Piers Proceeding* , 842-845. (2-6 de July de 2008).
9. Fields, J. Attenuation of a parabolic-index fiber with periodic bends". *Applied Physics Letters* , 36 (10), 799-801. (1980).
10. Foroni, M. "Low - cost level and Pressure plastic optical fiber sensor". *Proceeding SPIE* , 6189, 1-10. (2006).
11. Golnavi, H. "Potentials of plastic optical fibers for sensor technology". *Advanced Materials Research* , 47-50, 161-164. (2008).
12. *Google*. (30 de Diciembre de 2008). Recuperado el 6 de Marzo de 2012, de AJEGROUP: <http://es.scribd.com/doc/9628699/AJEGROUPSPORADE>.
13. *Google*. (6 de Marzo de 2012). Recuperado el 6 de Marzo de 2012, de Google: http://es.wikipedia.org/wiki/Chicha_morada
14. *Google*, E. n. (s.f.). *Word reference.com*. Recuperado el 6 de Marzo de 2012, de <http://www.wordreference.com/definicion/alcohol>

15. Kuang, K. Plastic Optical Fibre Sensors for Structural Monitoring: A Review of Recent Progress. *Journal of Sensors*, 2009, 1-13. (2009).
16. Lau, K. "Fibre - Optic Sensors and Smart Composites for Concrete Applications". *Magazine of Concrete Research*, 55 (1), 19-34. (2003).
17. LEE, S. "A Microbent Fibre Optic pH Sensor". *Optics Communications*, 205, 253-256. (2005).
18. Libo, Y. "2-D Fiber - optic sensing probe". *Acta fotonica sinica*, 33 (1), 35-39. (2004).
19. Lomer, M. Curso internacional sobre telecomunicaciones con fibras opticas. En P. U.-E.-M. Aplicada (Ed.), (págs. 44-68). Lima. (1996).
20. Lopez, F. Tesis "Diseño y construcción de un sensor de nivel utilizando fibras ópticas". (E. S. Instituto Politécnico Nacional, Ed.) Mexico. (2002).
21. Lopez, J. A. "Novel multimode interference liquid level sensors". *Proceeding of SPIE*, 7839, 1-4. (2010).
22. M.A. Rebolledo y A. Blesa. *Tecnologías fónicas y comunicaciones ópticas*. Zaragoza, España: INO Reproducciones S.A. (2004).
23. Marcuse, D. "losses and impulse response of a parabolic index fiber with random bends". *Bell Syst. Tech. J.*, 52 (8), 1423-1436. (1973).
24. Mark J. Hammer, M. J. *Water and wastewater* (Quinta edición ed.). New Jersey: Prentice Hall. (2004).
25. Monzon, D. "Fibras ópticas microestructuradas estrechadas para fabricar sensores". *Ideas CONSITEG* (24). (2007).
26. Safford, E. L. *Introducción a la fibra óptica y el laser*. Madrid, España: Paraninfo. (1988).
27. Sampietri, R. H. *Metodología de la investigación* (Quinta Edición ed.). Mexico: Mc Graw Hill. (2010).
28. Senior, J. M. *Optical fiber communications principles and practice* (Tercera edición ed.). New York: Prentice Hall. (2009).
29. Svelto, O. *Principles of laser* (Cuarta edición ed.). New York: Plenum Press. (1998).
30. Svirid, V. A. "A Prototype fiber - optic discrete level - sensor for liquid propane - butane". *IEICE Trans Electron*, E83-C (3), 303-308. (2000)
31. Sze, K. "Remote flood monitoring system based on plastic optical fibres and wireless nodes". *Sensors and actuators A: Physical*, 147, 449-455. (2008).



32. Taylor, H. "Bending effects in optical fibers". *IEEE J. Lightwave Technol.* , LT-2 (5), 617-628. (1984).
33. Vargas, S. "A plastic fiber-optic liquid level sensor". *Proceeding of SPIE* , 5502, 148-151. (2004).
34. Wikipedia.. *Google*. Recuperado el 6 de Marzo de 2012, de Google:
http://es.wikipedia.org/wiki/Chicha_de_jora.(6 de Marzo de 2012)
35. Xu, Y. "High sensitive temperature sensor using a liquid - core optical fiber with small refractive index difference between core and cladding materials". *Sensors* , 8, 1872-1878. (2008)

APENDICE A: MATRIZ DE CONSISTENCIA:

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES INDICADORES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGIA
<p>PROBLEMA PRINCIPAL</p> <p>¿Cómo se relaciona la intensidad de la luz con las variaciones del nivel de líquidos y el índice de refracción del recubrimiento de una fibra óptica microcurvada?</p>	<p>GENERAL</p> <p>Determinar la relación de la intensidad de la luz con las variaciones del nivel de líquidos y el índice de refracción del recubrimiento de una fibra óptica microcurvada.</p>	<p>GENERAL</p> <p>La variación del nivel de líquidos y el índice de refracción del recubrimiento de una fibra óptica microcurvada se relaciona directamente con la intensidad de la luz.</p>	<p>VARIABLES INDEPENDIENTES (X):</p> <p>Variación del Nivel de líquidos.</p>	Longitud	metros	<p>TIPO DE INVESTIGACION Aplicada</p> <p>DISEÑO DE ESTUDIO Experimental</p> <p>METODO Deductivo</p>
<p>PROBLEMA ESPECIFICOS</p> <p>¿Cómo se relaciona la intensidad de la luz con las variaciones del nivel de líquidos y el índice de refracción del recubrimiento de una fibra óptica microcurvada?</p>	<p>ESPECÍFICO</p> <p>Obtener la relación de la intensidad de la luz con las variaciones del nivel de líquidos utilizando una fibra óptica microcurvada.</p>	<p>ESPECÍFICA</p> <p>La variación del nivel de líquidos se relaciona directamente con la intensidad de la luz.</p>	<p>Variación de índice de refracción del recubrimiento de una fibra óptica microcurvada.</p>	Adimensional	Índice refracción	<p>TECNICAS DE RECOLECCION DE INFORMACION Registrado de datos</p> <p>INSTRUMENTOS Equipos y materiales opto mecánicos Software de procesamiento de datos</p>
<p>¿Qué relación existe entre la intensidad de la luz y la variación del índice de refracción del recubrimiento de una fibra óptica microcurvada?</p>	<p>Establecer la relación de la intensidad de luz con la variación del índice de refracción del recubrimiento de una fibra óptica microcurvada.</p>	<p>La variación del índice de refracción de una fibra óptica microcurvada se relaciona directamente con la intensidad de la luz.</p>	<p>Variable Dependiente (Y): Intensidad de la luz.</p>	<p>Voltaje o Watts/m²</p>	<p>Microvoltios o % de Intensidad de Luz</p>	<p>FUENTES Bibliografías Web</p>

APENDICE B

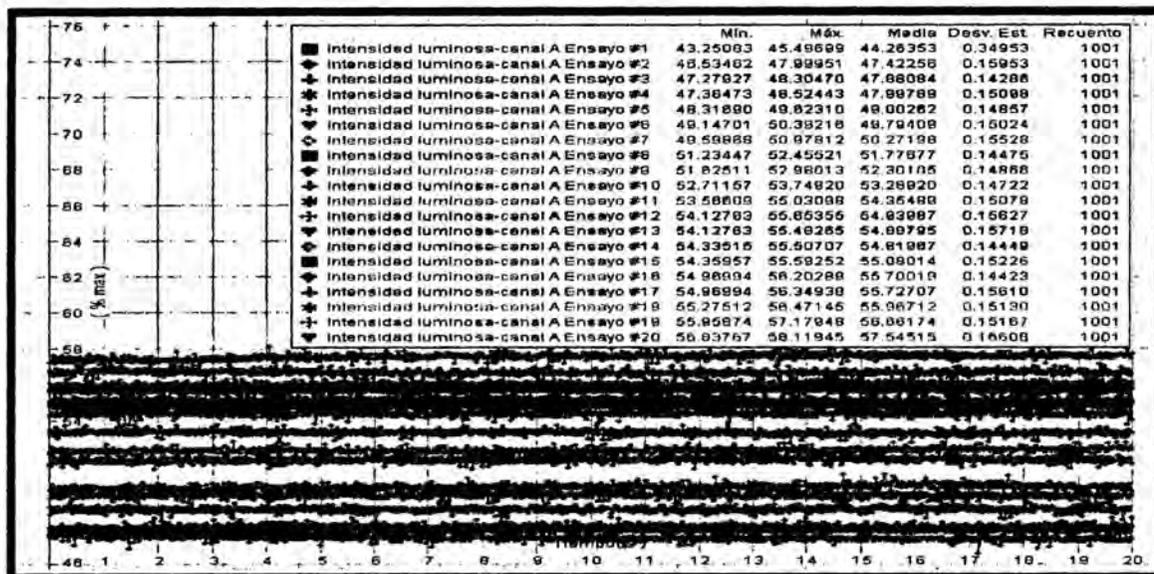
DE LAS GRAFICAS EXPERIMENTALES OBTENIDAS CON EL LASER, SENSOR DE LUZ Y CON EL SOFTWARE DATA STUDIO.

LÍQUIDO: AGUA

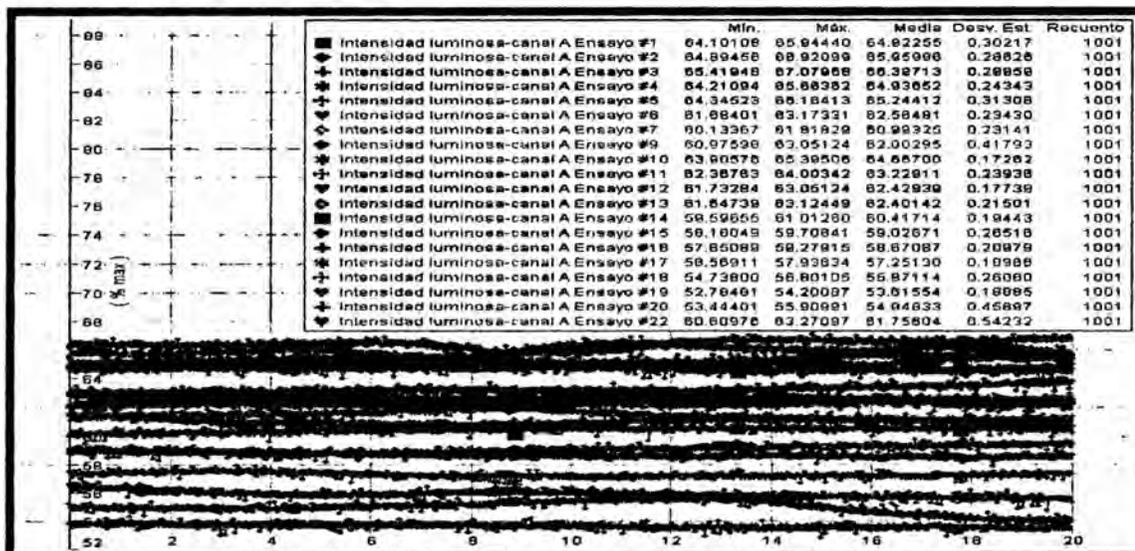
GRÁFICA DE % DE INTENSIDAD VERSUS TIEMPO

La grafica adjunta muestra los valores medios, desviación estándar y numero de datos tomados para el agua en los procesos ascendente y descendente.

PROCESO DESCENDENTE



PROCESO ASCENDENTE



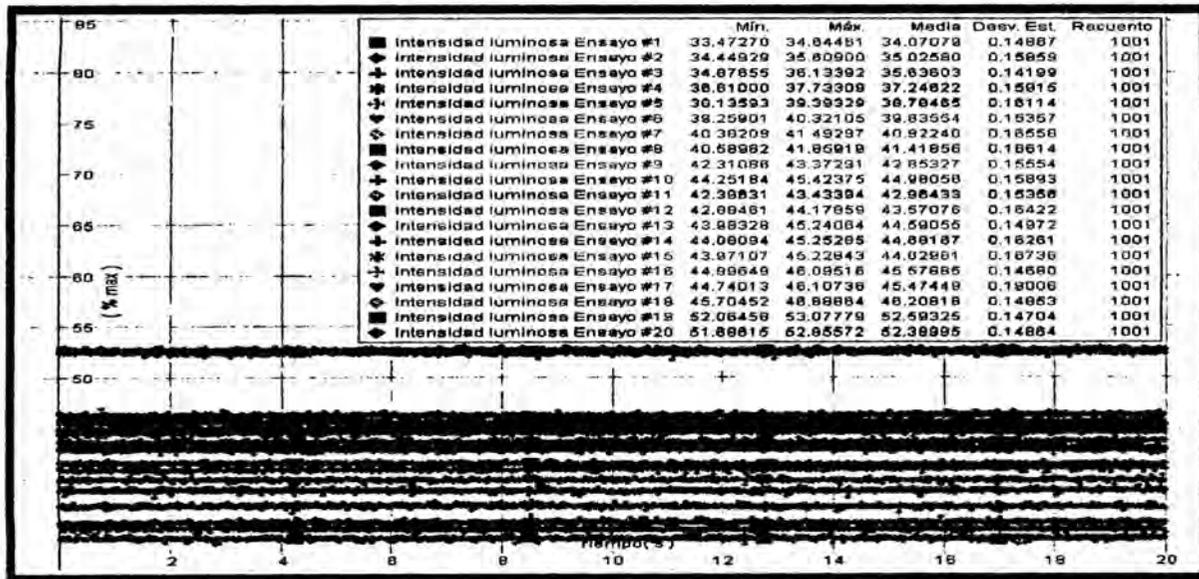
5

LÍQUIDO: SPORADE

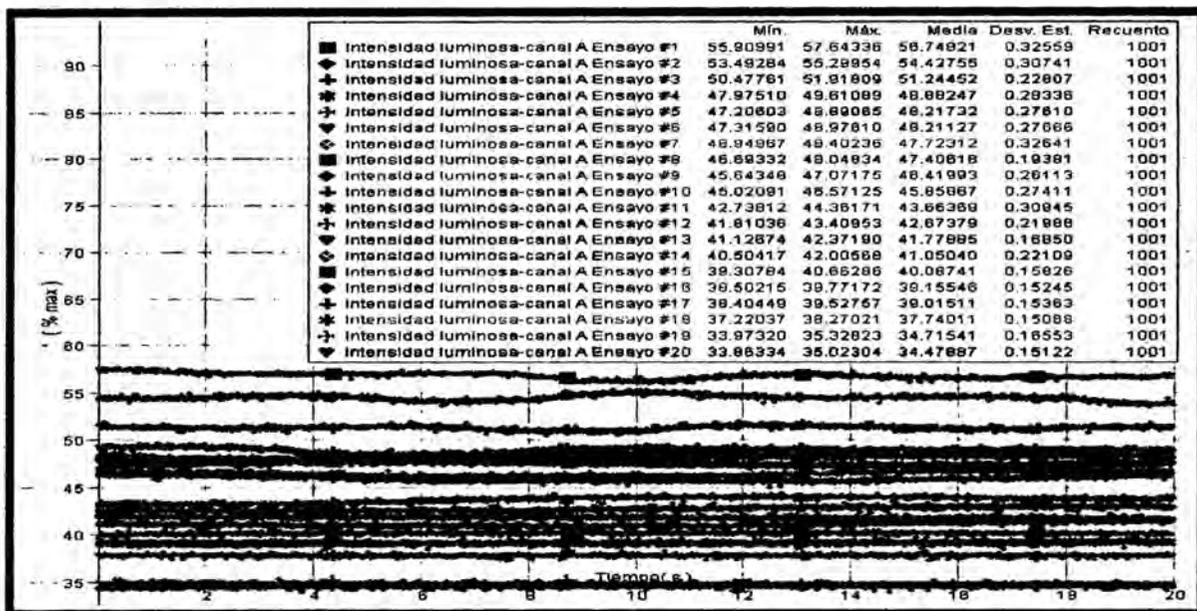
GRAFICA DE % DE INTENSIDAD VERSUS TIEMPO.

La grafica adjunta muestra los valores medios, desviación estándar y numero de datos tomados para el Sporade en los procesos ascendente y descendente.

PROCESO DESCENDENTE



PROCESO ASCENDENTE

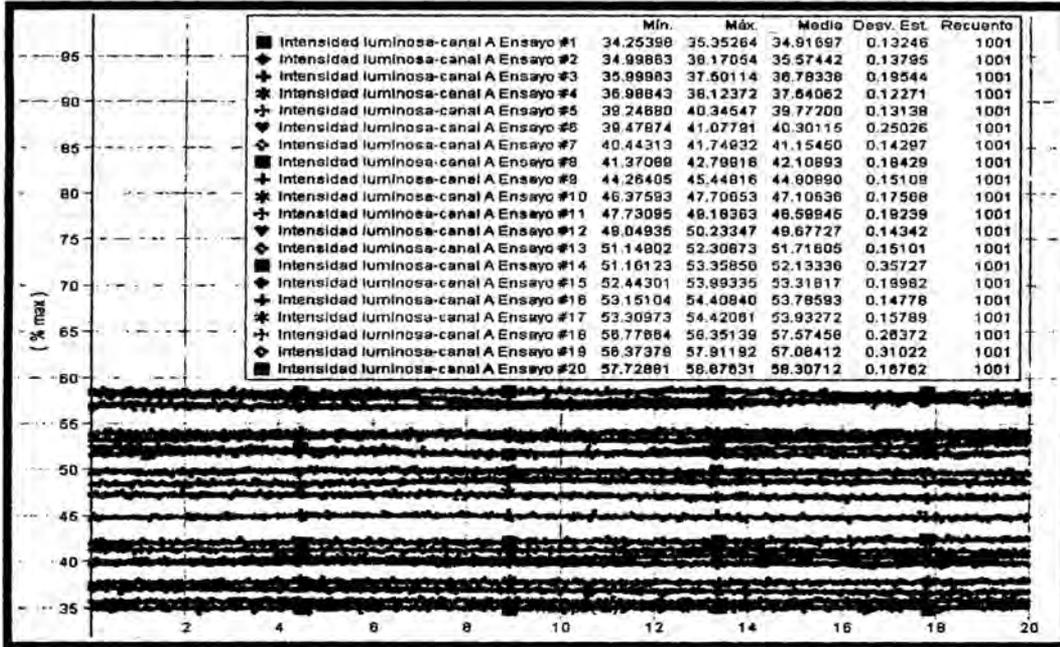


LÍQUIDO: ALCOHOL

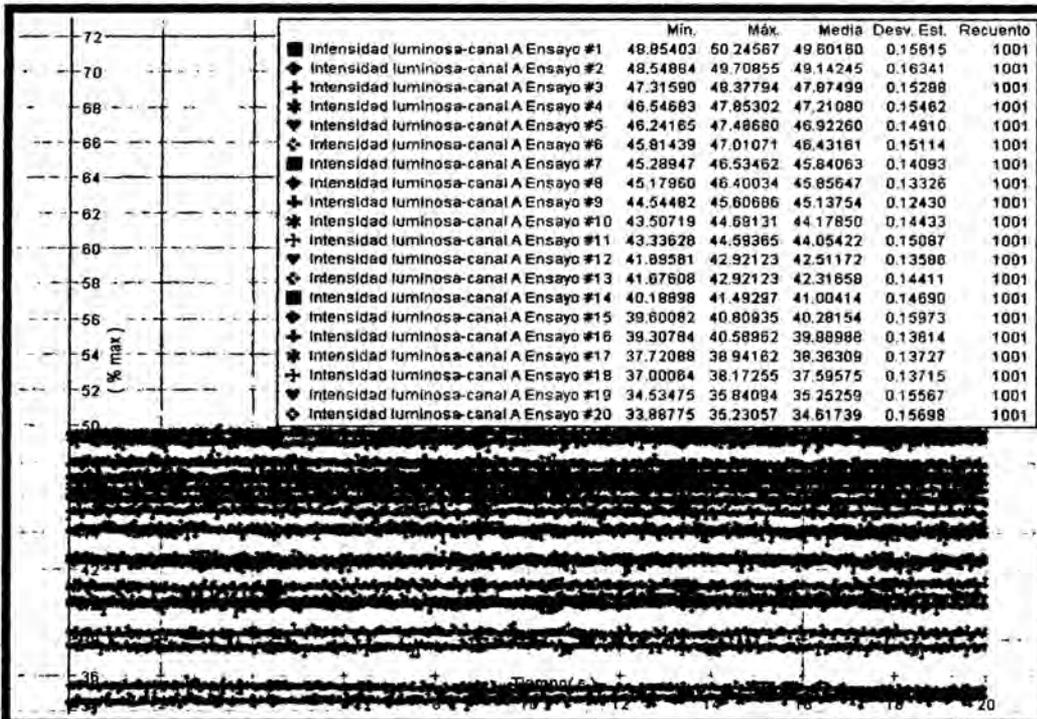
GRAFICA DE % DE INTENSIDAD VERSUS TIEMPO.

La grafica adjunta muestra los valores medios, desviación estándar y numero de datos tomados para el alcohol en los procesos ascendente y descendente.

PROCESO DESCENDENTE



PROCESO ASCENDENTE



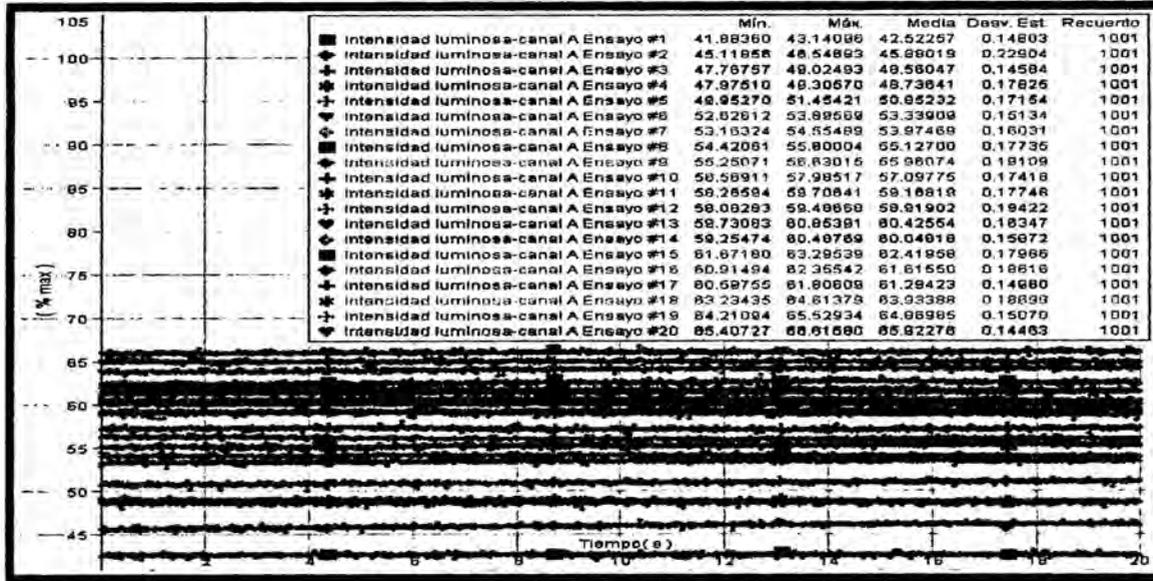
87

LÍQUIDO: CHICHA DE JORA

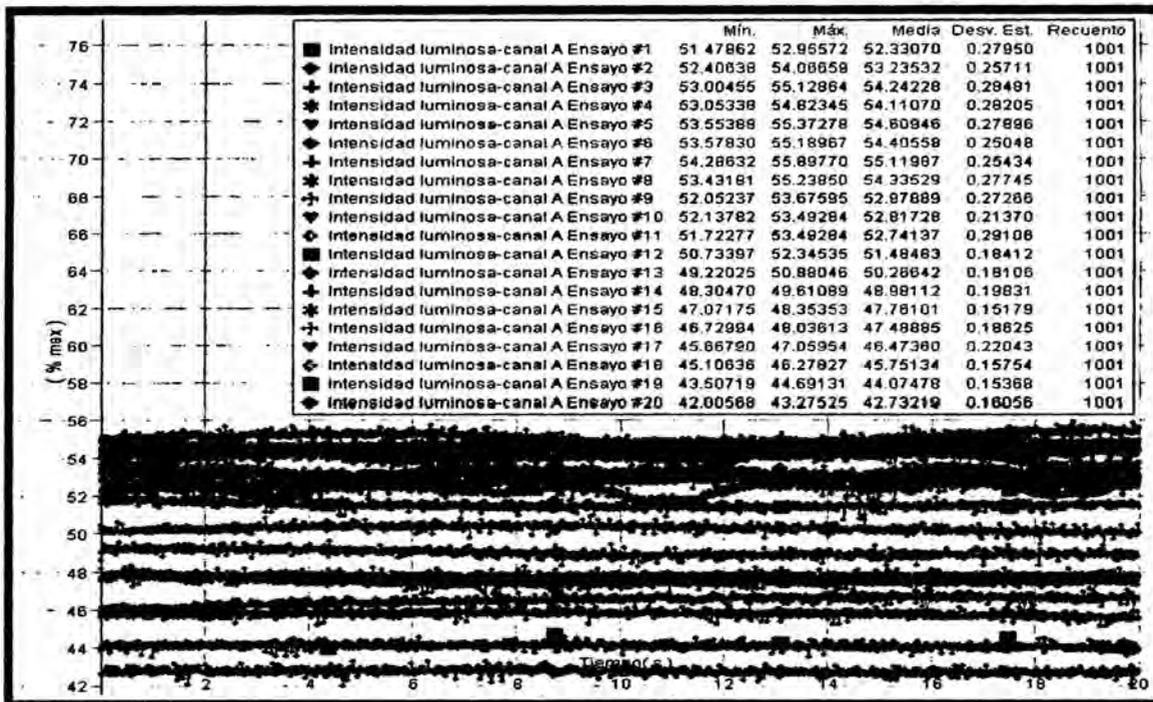
GRAFICA DE % DE INTENSIDAD VERSUS TIEMPO.

La grafica adjunta muestra los valores medios, desviación estándar y numero de datos tomados para la Chicha de Jora en los procesos ascendente y descendente.

PROCESO DESCENDENTE



PROCESO ASCENDENTE

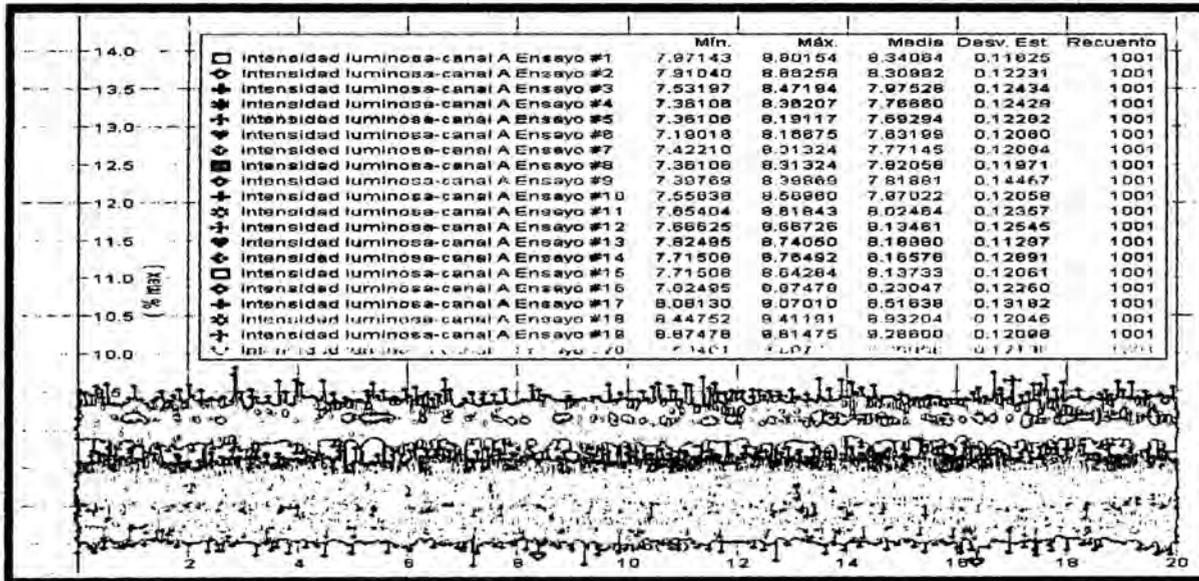


LÍQUIDO: CHICHA MORADA

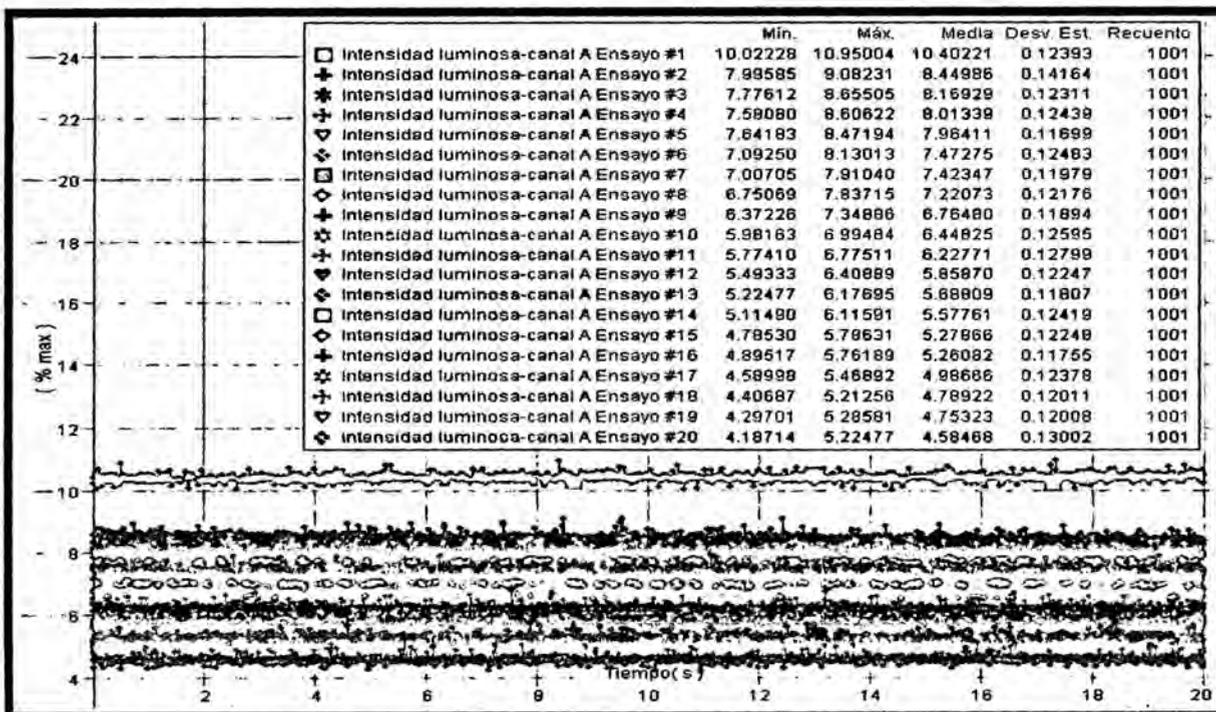
GRAFICA DE % DE INTENSIDAD VERSUS TIEMPO.

La grafica adjunta muestra los valores medios, desviación estándar y numero de datos tomados para la Chicha morada en los procesos ascendente y descendente.

PROCESO DESCENDENTE



PROCESO ASCENDENTE



APENDICE C

DE LA ESTADÍSTICA.

VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN T

Critical Values of the t Distribution

df	2-tailed testing			1-tailed testing		
	$\alpha = .1$	$\alpha = .05$	$\alpha = .01$	$\alpha = .1$	$\alpha = .05$	$\alpha = .01$
5	2.015	2.571	4.032	1.476	2.015	3.365
6	1.943	2.447	3.707	1.440	1.943	3.143
7	1.895	2.365	3.499	1.415	1.895	2.998
8	1.860	2.306	3.355	1.397	1.860	2.896
9	1.833	2.262	3.250	1.383	1.833	2.821
10	1.812	2.228	3.169	1.372	1.812	2.764
11	1.796	2.201	3.106	1.363	1.796	2.718
12	1.782	2.179	3.055	1.356	1.782	2.681
13	1.771	2.160	3.012	1.350	1.771	2.650
14	1.761	2.145	2.977	1.345	1.761	2.624
15	1.753	2.131	2.947	1.341	1.753	2.602
16	1.746	2.120	2.921	1.337	1.746	2.583
17	1.740	2.110	2.898	1.333	1.740	2.567
18	1.734	2.101	2.878	1.330	1.734	2.552
19	1.729	2.093	2.861	1.328	1.729	2.539
20	1.725	2.086	2.845	1.325	1.725	2.528
21	1.721	2.080	2.831	1.323	1.721	2.518
22	1.717	2.074	2.819	1.321	1.717	2.508
23	1.714	2.069	2.807	1.319	1.714	2.500
24	1.711	2.064	2.797	1.318	1.711	2.492
25	1.708	2.060	2.787	1.316	1.708	2.485
26	1.706	2.056	2.779	1.315	1.706	2.479
27	1.703	2.052	2.771	1.314	1.703	2.473
28	1.701	2.048	2.763	1.313	1.701	2.467
29	1.699	2.045	2.756	1.311	1.699	2.462
30	1.697	2.042	2.750	1.310	1.697	2.457
40	1.684	2.021	2.704	1.303	1.684	2.423
50	1.676	2.009	2.678	1.299	1.676	2.403
60	1.671	2.000	2.660	1.296	1.671	2.390
80	1.664	1.990	2.639	1.292	1.664	2.374
100	1.660	1.984	2.626	1.290	1.660	2.364
120	1.658	1.980	2.617	1.289	1.658	2.358
∞	1.645	1.960	2.576	1.282	1.645	2.327

ANEXO A

FOTOGRAFÍAS DEL PROCESO DE TOMA DE DATOS.



Figura A1. El autor con los equipos dispuestos para la toma de datos



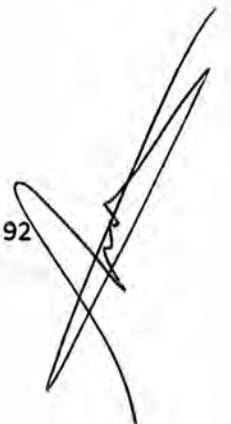
Figura A2. Estudiante de Ingeniería colaborador en la toma de datos



Figura A3. Registro de la información en la PC con ayuda del software Data Studio



Figura A4. Verificación del sistema de alineación para el registro de la información en la PC con ayuda del software Data Studio



ANEXO B

DEL PROCESO DE LA DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE REFRACCIÓN DE CADA UNO DE LOS CINCO LÍQUIDOS

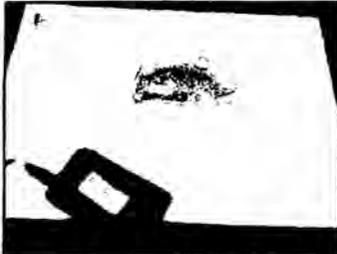


Ilustración B1 Esquema experimental para determinar el índice de refracción de la Chicha de Jora



Ilustración B2 Esquema experimental para determinar el índice de refracción del alcohol.



Ilustración B3 Líquidos utilizados en el trabajo experimental



Ilustración B4 El haz laser a través de la fibra óptica microcurvada.



Ilustración B5 Iluminación alrededor de la fibra óptica microcurvada producida por los modos radiados.



Ilustración B6 la fibra óptica ya incorporada en el deformador mecánico.



Ilustración B7 Conexión del sensor de luz con la fibra óptica

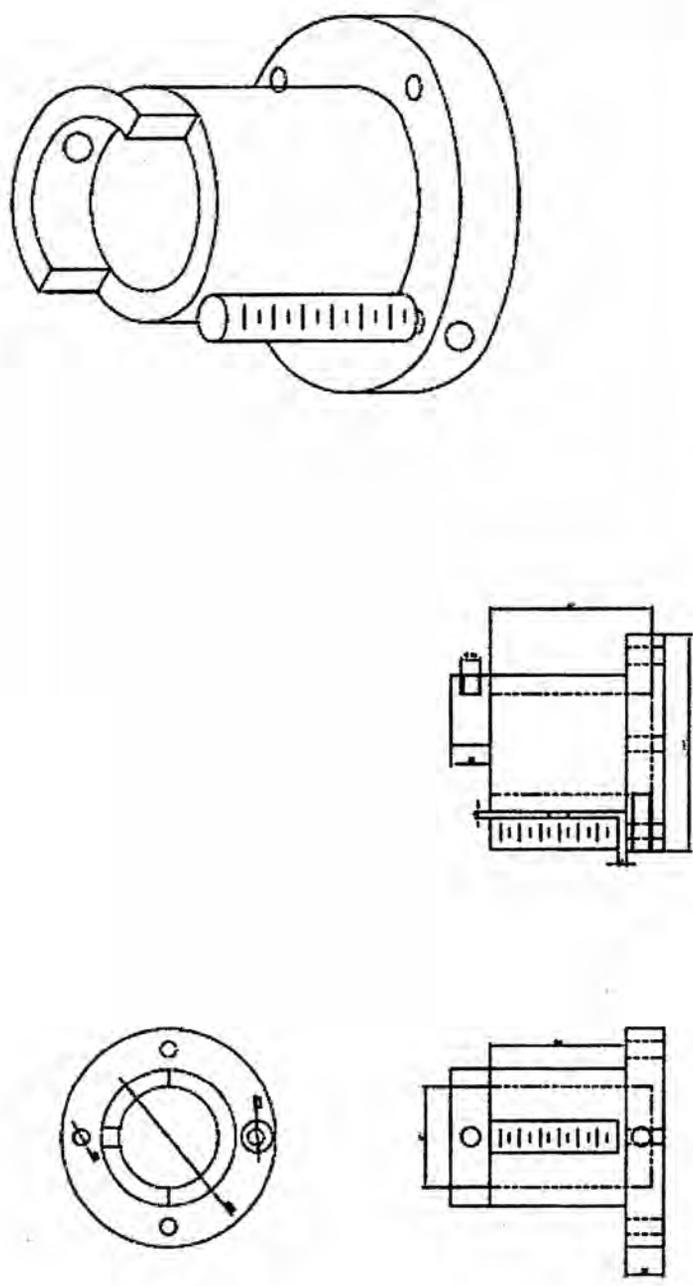


Ilustración B8 Disposición experimental de los equipos y soportes del trabajo experimental.

A large, stylized handwritten signature or scribble in the bottom right corner of the page.

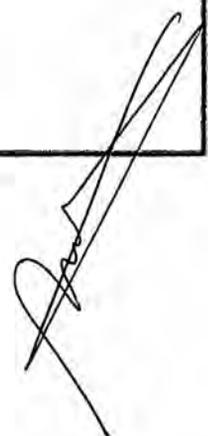
ANEXO C. PLANOS DE SOPORTE OPTOMECANICO

1. PLANO DE RECIPIENTE SISTEMA DE ESTUDIO

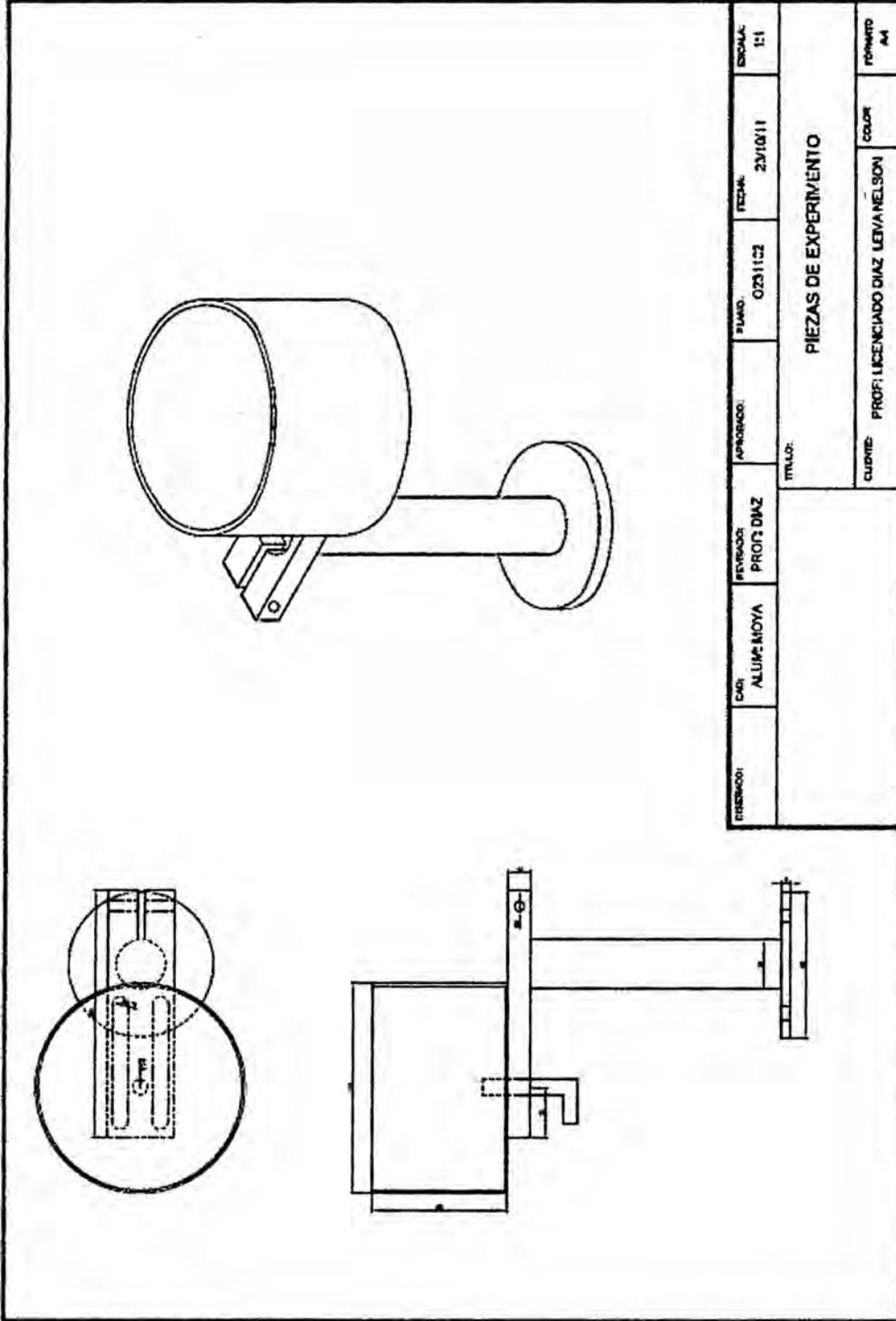


The technical drawing shows four views of a mechanical support system. The top view is a circular flange with a central hole and two smaller holes. The front view shows a vertical cylindrical component with a textured surface. The side view shows the cylindrical component with a horizontal flange. The perspective view shows the entire assembly from an isometric angle.

EXECCION:	ORD:	DISEÑADO:	APROBADO:	PLANO:	FECHA:	ESCALA:
	ALVIZ/MOYA	PROF: DIAZ		0231101	23/12/11	1:1
TITULO						
PIEZAS DE EXPERIMENTO						
CLIENTE					COLOR	FORMATO
PROF: LICENCIADO DIAZ LEIVA NELSON					COLOR	A4

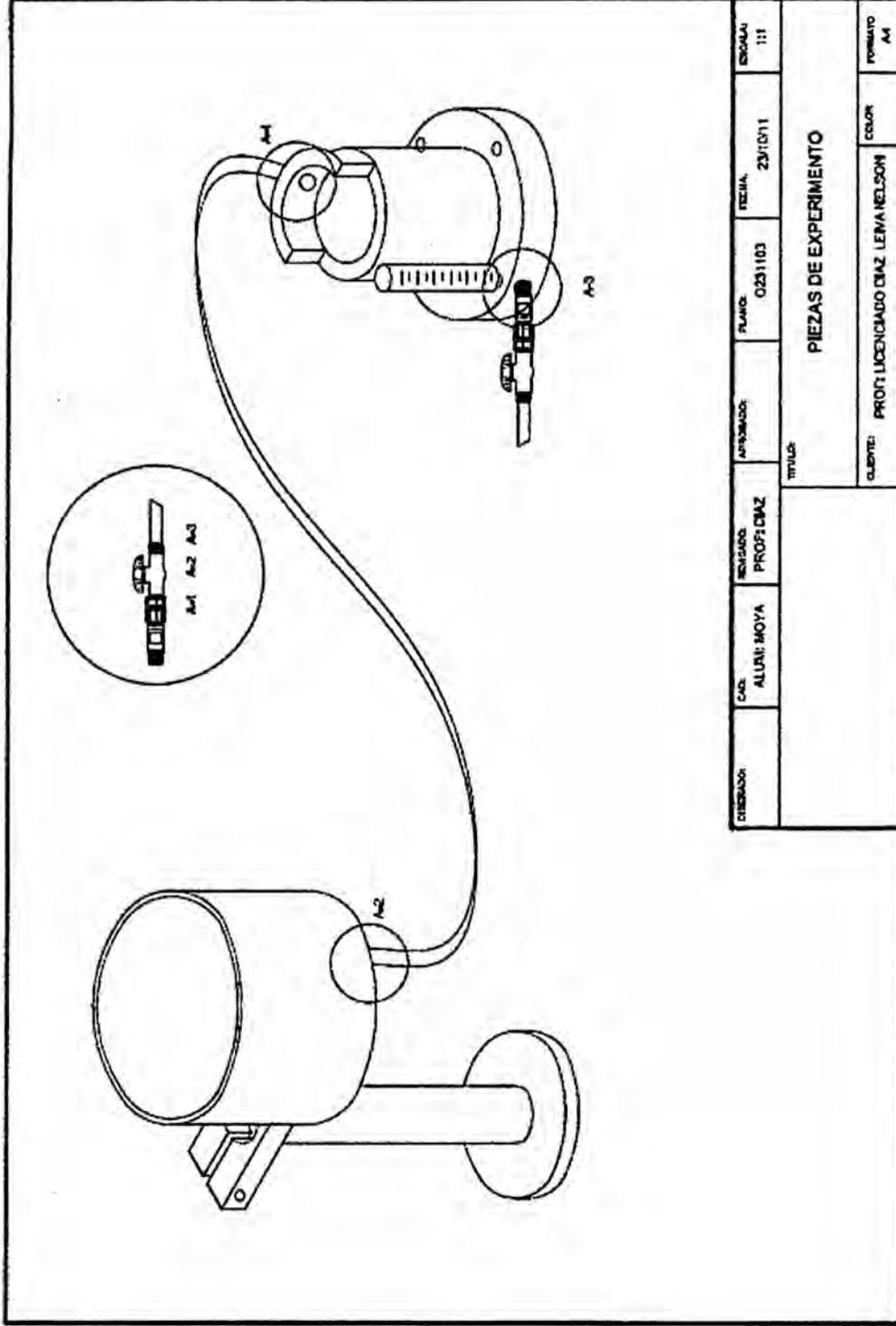


2. PLANO DE RECIPIENTE FUENTE DE LIQUIDOS



RESERVA:	DATE:	FECHA:	APROBADO:	PLANO:	FECHA:	ESCALA:
	ALUMNA NOYA		PROF DIAZ	0231122	23/10/11	1:1
TITULO: PIEZAS DE EXPERIMENTO						
CLIENTE: PROF. LICENCIADO DIAZ LEBLANC						FORMATO: A4

3. PLANO DE SISTEMA HIDRAULICO



CREADOR:	CAD:	REVISOR:	APROBADO:	PLANO:	FECHA:	ESCALA:
	ALVARO MOYA	PROF. DIAZ		0251103	23/10/11	1:1
TITULO:						
PIEZAS DE EXPERIMENTO						
CLIENTE:						FORMATO:
PROF. LICENCIADO DIAZ LEVA NELSON						A4
						COLOR:

ANEXO D

TABLA DE VALORES EXPERIMENTALES PARA LA DETERMINACION DEL INDICE DE REFRACCION DE LOS CINCO LIQUIDOS UTILIZADOS EN EL TRABAJO DE INVESTIGACION.

N	LIQUIDO		AGUA		ALCOHOL		BEBIDA REHIDRATANTE (SPORADE)		CHICHA DE JORA		CHICHA MORADA	
	θi	θr	n	n	θr	n	θr	n	θr	n	θr	n
1	5	4	1,24943	1,24943	4	1,24943	4	1,24943	3	1,66531	3	1,66531
2	10	7	1,42487	1,24771	8	1,24771	8	1,24771	6	1,66125	6	1,66125
3	15	11	1,35643	1,49048	10	1,49048	11	1,35643	10	1,49048	10	1,49048
4	20	15	1,32146	1,32146	15	1,32146	15	1,32146	13	1,52042	13	1,52042
5	25	19	1,29809	1,29809	19	1,29809	19	1,29809	17	1,44548	17	1,44548
6	30	23	1,27965	1,33473	22	1,33473	22	1,33473	20	1,46190	20	1,46190
7	35	26	1,30843	1,35720	25	1,35720	25	1,35720	23	1,46796	23	1,46796
8	40	29	1,32586	1,32586	29	1,32586	29	1,32586	26	1,46631	23	1,64509
9	45	33	1,29830	1,33437	32	1,33437	32	1,33437	29	1,45852	29	1,45852
10	50	36	1,30327	1,33556	35	1,33556	35	1,33556	31	1,48735	31	1,48735
11	55	38	1,33052	1,33052	38	1,33052	38	1,33052	35	1,42815	34	1,46488
12	60	41	1,32004	1,34730	40	1,34730	41	1,32004	36	1,47337	36	1,47337
13	65	44	1,30468	1,32890	43	1,32890	43	1,32890	38	1,47209	38	1,47209
VALOR MEDIO DE INDICE DE REFRACCION			1,31700		1,33089		1,31849		1,49989		1,51647	
DESVIACION ESTANDART			0,03977		0,05631		0,03312		0,07283		0,07914	
ERROR PORCENTUAL			3,02		4,23		2,51		4,86		5,22	

Fuente: Elaboración del autor

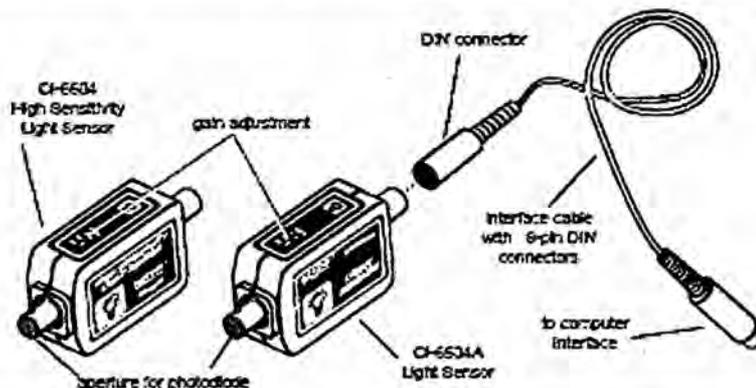


ANEXO E: CATALOGO DE ESPECIFICACIONES DEL SENSOR DE LUZ.

012-06306D

Instruction Sheet
for the PASCO
Model CI-6504A
and CI-6604

LIGHT SENSOR AND HIGH SENSITIVITY LIGHT SENSOR



Introduction

The PASCO CI-6504A Light Sensor and CI-6604 High Sensitivity Light Sensor are designed to be used with a PASCO computer interface to make measurements of relative light intensity.

Through the use of the gain options on the sensor box and within *ScienceWorkshop*[®], the Light Sensor has a working range of up to seven orders of magnitude, allowing application across a wide range of lighting levels.

The CI-6504A is best suited for experiments performed at ambient light levels. At the lower end of the range, interference patterns of monochromatic light after it passes through single or multiple slits can be measured; at the higher end, measurements can be made of relative light intensities of daylight. The range switch settings (1X, 10X, and 100X) on the top of the sensor roughly corresponds to maximum input light levels of 500, 50, and 5 lux.

The CI-6604 can be used where experiments are performed at low light levels. Interference patterns of monochromatic light, after it passes through single or multiple slits, can be measured and spectral lines from a spectrometer may be detected. The range switch settings (1X, 10X, and 100X) on the top of the sensor roughly corresponds to maximum input levels of 5, 0.5, and 0.05 lux. At the highest gain setting (100X on the sensor and 10X in *Science Workshop*) the High Sensitivity Light Sensor has a resolution of about 10 micro lux.

The Light Sensor may be used with or without the fiber optics probe (available separately as PASCO part no. 005-01383). Greater sensitivity is achieved by measuring light directly, without the probe attached.

The sensing element of the CI-6504A and CI-6604 Light Sensors is a stable and electrically quiet Si PIN photodiode. The photodiode is responsive across a wide spectrum ranging from 320 nm through 1100 nm. The response curve for the photodiode is shown in Figure 1.

© 1997 PASCO scientific

PASCO[®]
scientific

10101 Foothill Blvd. • Roseville, CA 95747-7100
Phone (916) 786-3800 • FAX (916) 786-8905 • www.pasco.com

Learn
why it
works, achieve

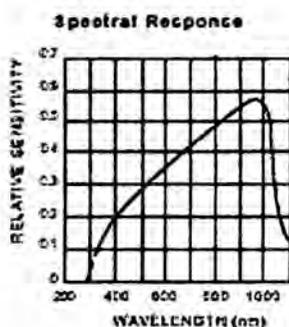


Figure 1. Spectral response curve of the photodiode.

The Light Sensor can be plugged directly into any PASCO computer interface box or can be connected to the interface box using the supplied cable with DIN connectors.

Equipment Included:

- Light Sensor
- 6-foot cable with 8-pin DIN connectors

Additional Equipment Required:

- Any PASCO computer interface (300, 500, or 700 *Science Workshop*® series for Macintosh or Windows or the 6500 series interface for DOS)

► *Note:* The manual has been written with the assumption that the user has a basic familiarity with *Science Workshop* and has access to the *User's Guide for Science Workshop*. Users can gain basic skills with *Science Workshop* by working through the tutorial within *Science Workshop*. Another useful resource is the *Quick Reference Card for Science Workshop*.

Setup Procedure

- Connect the Light Sensor and any analog channel of the interface box with the interface cable (Figure 2A), or insert the DIN plug of the Light Sensor into the jack of any analog channel of the interface box (Figure 2B).

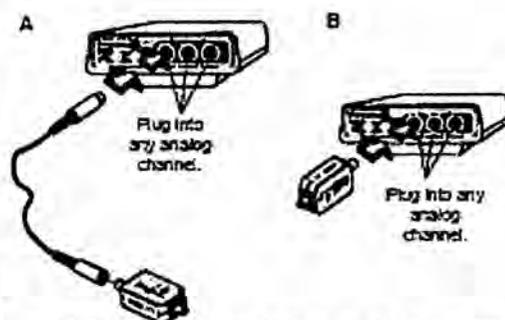


Figure 2. Connecting the Light Sensor and the computer interface.

- If the fiber optics probe (PASCO part no. 003-01383) is to be used, attach it by slipping the connector of the fiber optics probe over the input connector on the Light Sensor (Figure 3). A quarter twist clockwise locks the probe to the Light Sensor. (To disconnect, press the connector towards the sensor box, turn it counterclockwise one-quarter turn, and pull away from the box.)

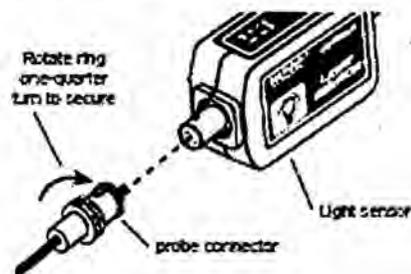


Figure 3. Attaching the fiber optics probe to the Light Sensor.

- Open the Experiment Setup window in *Science Workshop*. Click and drag the analog plug icon to the analog channel icon that matches the analog port you are using for the Light Sensor.



NOTE: Use care when handling the fiber optics probe. The optical fibers inside may be damaged if the cable is bent sharply. Do not coil tighter than a 10 cm (4 in.) diameter circle. Be sure not to damage the input end of the probe; scratches may impair light transmission.

- ④ Select **Light Sensor** from the drop-down menu.
- ⑤ Open a display window, such as the Digits display, by dragging and dropping the appropriate display icon on the Light Sensor icon.
- ⑥ Select the appropriate gain setting on the sensor box for the light levels to be measured (Figure 4). The correct gain setting is the one for which the intensity levels on the display vary appropriately for measuring the relative light intensity changes in your experiment.

Adjust the gain for the light conditions.

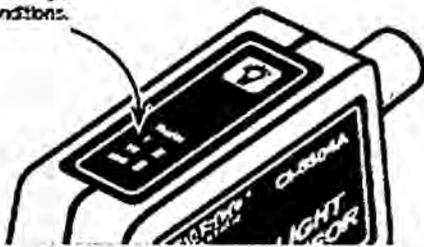


Figure 4. Setting the gain on the Light Sensor

Calibration and Sensitivity Adjustment in Science Workshop

- ① To open the Light Sensor's calibration window, double-click on the Light Sensor icon in the Experiment Setup window.
- ② If the Light Sensor is in analog channel A or B, you can adjust the sensitivity (gain) in *Science Workshop* by selecting the appropriate level from the drop-down menu. If the Light Sensor is producing voltage above 1 V, set the sensitivity to **Low (1x)**. If the Light Sensor is producing voltages between +1 V and 0 V, select **Med (10x)**. With the *Science Workshop 700* interface, set the sensitivity to **High (100x)** if the voltage is very low (between +0.1 V and 0 V). Refer to the *User's Guide for Science Workshop* for more details concerning adjusting the sensitivity setting.

► **Note:** Gain for channel C cannot be adjusted in *Science Workshop*. Use Channels A or B if necessary to adjust gain in *Science Workshop*.

- ③ Use the calibration window in *Science Workshop* to calibrate the Light Sensor. The sensor may be calibrated in relative units such as percent of sensor voltage output. If a standard is used, the Light Sensor output may also be referenced to absolute units such as lux. Refer to the *User's Guide for Science Workshop* for more details concerning calibration.

Mounting on an Experimental Apparatus

- ① Use the 1/4-20 threaded connector located on the bottom of the sensor box to secure the Light Sensor to an experimental apparatus (Figure 5). The alignment hole fits over an alignment pin included on some PASCO apparatuses.

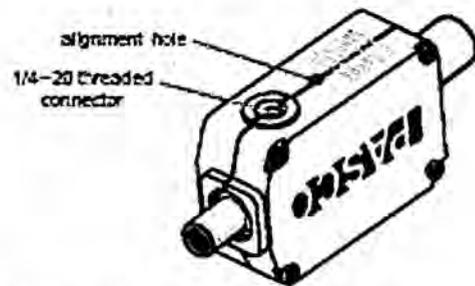
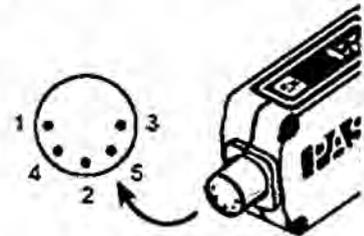


Figure 5. Mounting connector and alignment hole

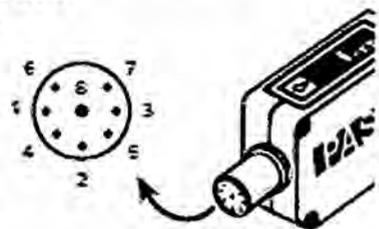
DIN Connector Specifications for CI-6504A

- 1: analog output (+), 0 to 5 V
- 2: analog output (-), signal ground
- 3: (no connection)
- 4: +5 V DC power
- 5: power ground



DIN Connector Specifications for CI-6604

- 1: analog output (+), 0 to 5 V
- 2: analog output (-), signal ground
- 3: (no connection)
- 4: +5 V DC power
- 5: power ground
- 6: +12 VDC power
- 7: -12 VDC power
- 8: (no connection)



Copyright, Warranty, and Equipment Return

Please—Feel free to duplicate this manual subject to the copyright restrictions below.

Copyright Notice

The PASCO scientific 012-06306C instruction sheet is copyrighted and all rights reserved. However, permission is granted to non-profit educational institutions for reproduction of any part of the Light Sensor instruction sheet providing the reproductions are used only for their laboratories and are not sold for profit. Reproduction under any other circumstances, without the written consent of PASCO scientific, is prohibited.

Limited Warranty

PASCO scientific warrants the product to be free from defects in materials and workmanship for a period of one year from the date of shipment to the customer. PASCO will repair or replace, at its option, any part of the product which is deemed to be defective in material or workmanship. The warranty does not cover damage to the product caused by abuse or improper use. Determination of whether a product failure is the result of a manufacturing defect or improper use by the customer shall be made solely by PASCO scientific. Responsibility for the return of equipment for warranty repair belongs to the customer. Equipment must be properly packed to prevent damage and shipped postage or freight prepaid. (Damage caused by improper packing of the equipment for return shipment will not be covered by the warranty.) Shipping costs for returning the equipment after repair will be paid by PASCO scientific.



The exclamation point within an equilateral triangle is intended to alert the user of the presence of important operating and maintenance (servicing) instructions in the literature accompanying the device.

Equipment Return

Should the product have to be returned to PASCO scientific for any reason, notify PASCO scientific by letter, phone, or fax BEFORE returning the product. Upon notification, the return authorization and shipping instructions will be promptly issued.

► **NOTE: NO EQUIPMENT WILL BE ACCEPTED FOR RETURN WITHOUT AN AUTHORIZATION FROM PASCO.**

When returning equipment for repair, pack the units properly. Carriers will not accept responsibility for damage caused by improper packing. To be certain the unit will not be damaged in shipment, observe the following rules:

- ① The packing carton must be strong enough for the item shipped.
- ② Make certain there are at least two inches of packing material between any point on the apparatus and the walls of the carton.
- ③ Make certain that the packing material can not shift in the box or become compressed, allowing the instrument to come in contact with the edge of the packing carton.

Address: PASCO scientific
10101 Foothills Blvd.
P.O. Box 619011
Roseville, CA 95747-7100

Phone: (916) 786-3900
FAX: (916) 786-3292
email: techsupp@pasco.com
web: www.pasco.com

PASCO
scientific