

# **INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIERREZ**

---

---

**CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA, A. C.  
DEPARTAMENTO DE HOLOGRAFIA.**

## **REPORTE DE RESIDENCIA PROFESIONAL.**

**PROYECTO:**

**“POLARÍMETRO DE ELEMENTOS ROTATORIOS”.**

**PRESENTA:**

**ROBLERO HERNANDEZ ALEJANDRO**

**ASESOR INTERNO:**

**INGENIERO ALVARO HERNANDEZ SOL**

**ASESOR EXTERNO:**

**DR. GEMINIANO MARTINEZ PONCE**

**TUXTLA GUTIERREZ, CHIAPAS, DICIEMBRE DEL 2009.**

---

---

# INDICE

## CAPITULO 1

1.1 Introducción.....	5
1.2 Justificación.....	6
1.3 Objetivos.....	7
1.3.1 Generales.....	7
1.3.2 Específicos.....	7
1.4 Caracterización del área.....	8
1.4.1 Antecedentes.....	8
1.4.2 Consolidación.....	9
1.4.3 Logros.....	10
1.4.4 Misión y visión.....	10
1.4.5 Organigrama general.....	12
1.4.6 Dirección de investigación.....	12
1.5 Limitaciones.....	17

## CAPITULO 2

2.1 Fundamento teórico.....	19
2.1.1 Polarización.....	19
2.1.2 Representación de estados de polarización.....	22
2.1.3 Elementos ópticos.....	27
2.1.4 Polarímetro.....	29
2.1.5 Método de una placa de $\lambda/4$ giratoria.....	36

## **CAPITULO 3**

<b>3.1 Selección de materiales. ....</b>	<b>41</b>
<b>3.2 Diseño de sistema. ....</b>	<b>45</b>
<b>3.3 Diseño de la electrónica. ....</b>	<b>48</b>
<b>3.4 Integración de la etapa de modulación y detección. ....</b>	<b>52</b>

## **CAPITULO 4**

<b>4.1 Interfaz. ....</b>	<b>55</b>
<b>4.2 Panel Frontal. ....</b>	<b>57</b>
<b>4.3 Panel posterior de la interfaz grafica. ....</b>	<b>62</b>

## **CAPITULO 5**

<b>5.1 Resultados. ....</b>	<b>70</b>
<b>5.2 Conclusiones. ....</b>	<b>78</b>
<b>5.3 Mejoras. ....</b>	<b>79</b>
<b>Referencias. ....</b>	<b>81</b>

# CAPITULO 1

## 1.1 Introducción

De acuerdo al modelo de Maxwell de la luz como una onda electromagnética ver figura 1.1, hay un campo eléctrico oscilante y un campo magnético oscilante a la misma frecuencia pero orientado de manera perpendicular al campo eléctrico.

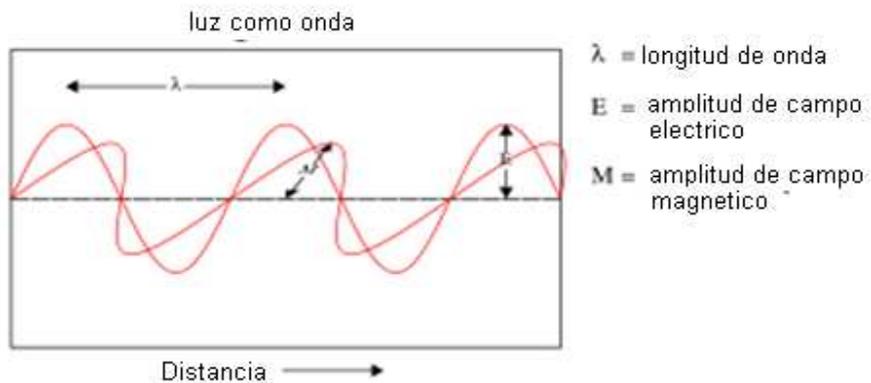


Figura 1.1 – las componentes de campo eléctrico y campo magnético de acuerdo al concepto propuesto por Maxwell

Es posible combinar componentes ortogonales de luz linealmente polarizada para producir otras formas de luz polarizada. En el caso especial en el que los componentes tienen fases idénticas, se produce luz linealmente polarizada a varias orientaciones.

La luz se polariza de diversas formas. Se polariza cuando se refleja, con un cierto ángulo, en superficies brillantes y pulidas no metálicas, como el agua, el vidrio o la madera barnizada. También se polariza cuando la luz se dispersa por las diminutas partículas de gas y polvo de la atmósfera. Y también cuando atraviesa ciertos tipos de cristales translúcidos. El polarímetro es un instrumento mediante el cual podemos determinar el valor de la desviación de la luz polarizada por un estere isómero ópticamente activo

## 1.2 Justificación

La necesidad de conocer el estado de polarización de la luz antes y después de haber atravesado otro medio (o muestra) ha resultado en el diseño y propuestas de distintos mecanismos para lograrlo. Con el paso de los años, se ha optado por automatizar estas técnicas de tal modo que permitiesen a los investigadores analizar el cambio en el estado de polarización de la luz al pasar por una muestra.

La utilidad de este sistema es claro: la luz, al atravesar determinada muestra, sufre una alteración en su estado de polarización, lo cual sirve como un indicador de lo que está ocurriendo en la muestra y cómo se está comportando a lo largo del tiempo de medición.

Sin embargo, el conocer el cambio en la polarización de la luz en un momento en particular no resulta suficiente. Existen muestras que sufren cambios estructurales a través del tiempo y por tanto, el cambio en el estado de polarización también cambia con el tiempo. Por esto, se optó por automatizar estos sistemas a fin de lograr un registro en tiempo real de estos cambios y poder interpretar lo que está sucediendo dentro de la muestra.

Los sistemas de medición más conocidos son aquellos que miden los parámetros de Stokes para posteriormente analizar los datos y obtener el grado de polarización, orientación y elipticidad de la luz incidente. Y, a partir de los mismos, inferir las propiedades ópticas del material.

Existen distintos diseños para lograr la medición del vector de Stokes, todos con sus propias ventajas y desventajas. Por razones de velocidad de procesamiento y adquisición de datos, se ha optado por utilizar en este proyecto sistemas basados en placas retardadoras y polarizadores lineales.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 *General*

- Desarrollar un instrumento para la medición del estado de polarización en un haz de luz monocromático.

### 1.3.2 *Específicos*

- Estudio de la teoría de la luz polarizada y su propagación a través de diferentes medios.
- Simulación numérica de algunos sistemas basados en elementos rotatorios.
- Diseño de la electrónica asociada al elemento rotatorio y a la etapa de detección.
- Simulación del sistema polarimétrico usando señales con ruido y análisis del efecto en la determinación del estado de polarización.
- Análisis estadístico del desempeño del instrumento para determinar la sensibilidad.
- Análisis estadístico para determinar la precisión y exactitud del instrumento de medición.

## **1.4 Caracterización del área**

### **1.4.1 Antecedentes**

Acorde con el objetivo que el CONACYT estableció desde sus inicios, de fomentar una cultura competitiva basada en el desarrollo científico y tecnológico, enmarcando sus acciones en las políticas y objetivos del Plan Indicativo de Ciencia y Tecnología 1976-1982, el Consejo tuteló la fundación del Centro de Investigaciones en Óptica, Asociación Civil, (CIO), en la ciudad de León Gto. Dicho proceso de creación tuvo su inicio legal el 18 de Abril de 1980, en un acto protocolario en el que se levantó el acta constitutiva de la nueva institución, donde aparecen como firmantes quienes en la época eran autoridad en niveles de gobierno y dependencias oficiales: el Dr. Edmundo Flores, Director General del CONACYT, el Dr. Guillermo Soberón Acevedo, Rector de la UNAM, el Lic. Enrique Velasco Ibarra, Gobernador Constitucional del Estado de Guanajuato y el Lic. Harold Gabriel Appetl, Presidente del Ayuntamiento Constitucional de la Ciudad de León Gto.

Así, en abril de 1980 el CIO se funda en León e inicia labores en un piso rentado de un edificio del primer cuadro de la ciudad con un investigador y 3 técnicos (el propio Dr. Malacara, el entonces M.C. Arquímedes Morales Romero y los Ingenieros José Castro Villicaña y Carlos Javier Martínez Castro, comisionados todos por la UNAM), desarrollando investigación en el área de la instrumentación óptica, fundamentalmente en el área de telescopios astronómicos y superficies ópticas. Se dieron también los primeros pasos para hacer crecer el número de su personal y las áreas de trabajo (que era una de las más urgentes necesidades para crecer y consolidarse, pues había sido ésta también una de las condiciones impuestas por el Consejo y la Universidad Nacional para apoyar el traslado del proyecto a Guanajuato) y lo que es más importante, se inició la divulgación de temas científicos y de la óptica en las instituciones educativas de nivel medio y superior que existían en esa época, impartiendo cursos en diferentes carreras y

dirigiendo tesis con temáticas científicas, tanto en instituciones de la ciudad como en la región central del país.

#### **1.4.2 Consolidación**

En el mes de septiembre de 1980 en la primera reunión de Órgano de Gobierno del CIO se entrega el nombramiento del Director General al mismo Dr. Daniel Malacara Hernández, cargo que desempeña hasta a 1989. En un primer momento se enfocaron los esfuerzos para incorporar investigadores jóvenes provenientes de universidades nacionales y se crearon las condiciones para que los mismos salieran a realizar doctorado en instituciones del extranjero, para reintegrarse después y fortalecer la planta científica. En 1983 el CIO se traslada al primer edificio de sus instalaciones definitivas en un terreno donado por el municipio y con un edificio inicial construido por el gobierno del estado. En esta época se crearon también los primeros programas académicos propios: la maestría en ciencias en óptica (1984) y el doctorado en ciencias en óptica (1987), apoyadas por la Universidad de Guanajuato, que expidió los títulos profesionales de quienes ingresaron a estudiar entre 1984 y 1999. Esa parte de la historia del CIO se enmarcó en el Plan Indicativo de Ciencia y Tecnología 1976-1982 establecido por el gobierno federal e instrumentado por el CONACYT, plan que hacía énfasis en la búsqueda del desarrollo científico, la autonomía cultural y la autodeterminación tecnológica señalando como líneas prioritarias la consolidación de las acciones de investigación, la creación de infraestructura y la formación de recursos humanos. En su momento, el Plan Nacional de Desarrollo Tecnológico y Científico 1984-1988 estableció además de los objetivos previos, los primeros pasos para fomentar la vinculación con el entorno productivo nacional.

Es en este marco que en noviembre de 2002 el Dr. Fernando Mendoza Santoyo asume el reto de incrementar la productividad del CIO y llevarla hasta niveles internacionales de calidad en todas sus áreas, pues este reconocimiento mundial ya se tiene para su labor científica de vanguardia, sustentada por una parte en la cantidad de productos de investigación que se generan (artículos,

publicaciones, congresos, etc.) así como en la calidad de los mismos (impacto y reconocimiento internacional, entre otros elementos). Dentro de las acciones de colaboración internacional ha iniciado un proyecto con la Universidad de Arizona para crear un centro binacional de óptica. En el plano académico ha establecido el compromiso para obtener el nivel de Competencia Internacional, la más alta categoría del "Padrón de Posgrados" del CONACYT, considerando como parte medular de esta estrategia el fortalecer los mecanismos de promoción y captación de alumnos, la modificación curricular de los programas propios, con el objetivo de satisfacer en tiempo y forma los criterios de productividad y eficiencia terminal propia de los programas de alta calidad, así como hacer acopio de información operativa del desempeño laboral en ámbitos científicos y académicos de sus egresados, a través de programas y acciones para el seguimiento formal de los mismos. En estos procesos de evaluación el Centro ha obtenido permanentemente resultados altamente positivos, siendo notorio que durante la actual administración se han incrementado sustantivamente la cantidad y la calidad de los logros alcanzados y con ellos la calificación que ha merecido el trabajo de la institución y de sus integrantes.

### **1.4.3 Logros**

Actualmente el Centro de Investigaciones en Óptica A.C. se define como Centro Público de Investigación, con la misión de llevar a cabo investigación básica y aplicada en Óptica, la formación de recursos humanos de alto nivel en el mismo campo del conocimiento, así como al fomento de la cultura científica en la sociedad, con la misión además de ser un Centro de Investigación de excelencia, con liderazgo nacional y reconocimiento internacional creciente en el campo de la óptica, ocupando un lugar central en el desarrollo de la ciencia y la tecnología en nuestro país.

### **1.4.4 Misión y visión.**

#### *Misión:*

El Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., es un centro público

de investigación dedicado a la investigación básica y aplicada, la formación de recursos humanos de alto nivel en el campo de la óptica, así como al fomento de la cultura científica en la sociedad.

*Visión:*

Ser un centro de investigación de excelencia, con liderazgo nacional y reconocimiento internacional creciente en el campo de la óptica, ocupando un lugar central en el desarrollo de la ciencia y la tecnología de nuestro país.

*Objetivos estratégicos*

Son la primera instancia institucional que orienta y da sentido a todas y cada una de las actividades sustantivas y de apoyo en el Centro, así como, a las tareas cotidianas que desarrollan todos y cada uno de sus colaboradores.

En este sentido los objetivos estratégicos del CIO son:

1. Contribuir al conocimiento científico internacional, a través de la investigación teórica y experimental en óptica y disciplinas afines.
2. Fortalecer la capacidad científica y tecnológica humana del país con nivel internacional, a través de programas de estudio de especialización y posgrado.
3. Contribuir al crecimiento tecnológico del país, a través del desarrollo y/o la transferencia de tecnología.
4. Contribuir al desarrollo de una cultura científica en la sociedad mexicana, a través de la divulgación y difusión del conocimiento científico universal.

*Estrategias Clave*

1. Promover acciones para recibir fondos de diversas fuentes para financiamiento de sus actividades.

- Mantener un alto nivel académico, que se refleje en el éxito y el reconocimiento de nuestra institución. La capacitación y la motivación serán siempre perseguidas y la administración será transparente, eficaz y servicial laborando con los lineamientos claros de sus autoridades. La equidad, el respeto a las personas y a su trabajo, la capacidad creativa y la libertad con responsabilidad, son valores que se reconocerán y se promoverán continuamente.

#### **1.4.5 Organigrama general**

El organigrama actual del centro de investigaciones en óptica, con sus diferentes departamentos se muestran en la figura 1.2.



Figura 1.2. Organigrama CIO.

#### **1.4.6 Dirección de Investigación**

Esta Dirección coordina los esfuerzos de los investigadores de las distintas áreas que se trabajan en el Centro de investigaciones en óptica (metrología, fotónica, fibras ópticas y holografía); nuestro objetivo es brindar el apoyo administrativo que facilite e impulse la producción científica.

Actualmente los investigadores desarrollan proyectos con sensores, dispositivos y láseres de fibra óptica, Espectroscopia diferencial por Reflectancia ( RDS/RAS), Pruebas ópticas no destructivas, visión computacional e Inteligencia artificial, Interferometría, Procesamiento Digital y Análisis de Imágenes Médicas, Física infrarroja y Desarrollo de materiales fotosensibles; entre otros.

### Organigrama

En el área de dirección de investigación se tiene un organigrama el cual se muestra en la figura 1.3. en el cual se muestra las partes y los encargados de cada área.



Figura 1.3.- organigrama dirección de investigación.

### 1.4.7 Departamentos

#### Metrología Óptica

El objetivo del Departamento de Metrología Óptica es el cálculo de diversas cantidades físicas (temperatura, velocidad, presión, distancia, desplazamiento, esfuerzo, etc.) de objetos y/o regiones de observación. El reconocimiento de patrones también es importante. Esto último incluye el cálculo de forma, textura,

color, dimensiones, etc., de objetos. Para llevar a cabo este objetivo, se usan arreglos ópticos que incluyen dispositivos optoelectrónicos, fuentes de luz y software. Generalmente, se capturan imágenes del objeto bajo estudio y éstas a su vez son procesadas para recuperar en forma cuantitativa la información de interés.

Los campos en los que se lleva a cabo la investigación en el departamento son pruebas no destructivas, inspección de procesos, control y automatización, perfilometría, reconocimiento de patrones, análisis de deformación, análisis aerodinámico, detección de fractura, calibración, visión por computadora, análisis de vibraciones, etc. Estos campos implican el uso combinado de técnicas experimentales y numéricas.

### *Holografía*

La Formación de Imágenes sin el uso de lentes por medio de la llamada Holografía, ésta basada en los fenómenos de interferencia y difracción. Los principios básicos de la holografía y de la difracción están bien establecidos, y tienen un gran número de aplicaciones.

Uno de los intereses principales del grupo es el desarrollo de nuevos materiales que permiten registrar las franjas holográficas debidas a variaciones de intensidad provenientes de un patrón de interferencia entre dos o más haces o la modulación de fase debida a un patrón en el que se modifique la polarización de manera periódica. En el primer caso es posible utilizar emulsiones fotográficas especiales que tengan la resolución necesaria (en holografía se requiere registrar de 1000 a 5000 líneas por milímetro). En el caso del registro de patrones periódicos de polarización es necesario encontrar materiales sensibles al campo eléctrico incidente que presenten características anisotrópicas al irradiarse con luz polarizada.

Estos trabajos tienen aplicaciones en la fabricación de elementos difractivos los que pueden realizar funciones lentes y espejos simultáneamente

o modificar la polarización de los haces incidentes.

Algunos trabajos de holografía tanto para el grabado de información como para el estudio del comportamiento de los materiales holográficos se pueden ver en la figura 1.4.

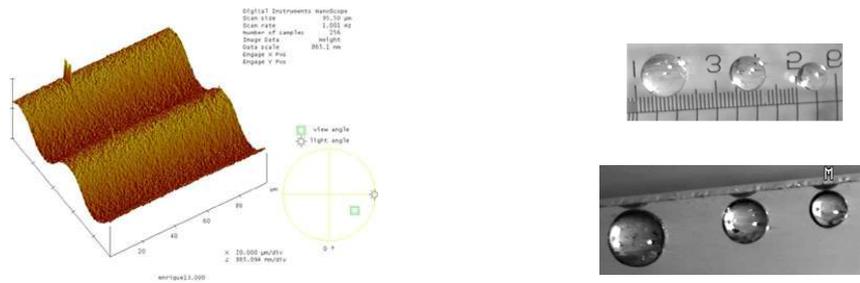


Figura 1.4.- trabajos de holografía

### Fotónica

El Departamento de Fotónica realiza investigación teórica y experimental sobre las propiedades ópticas de la materia y su interacción con la luz. Los resultados del trabajo del Departamento de Fotónica generan nuevos avances científicos y tecnológicos con potenciales aplicaciones a mediano y largo plazo en dispositivos práctico/tecnológicos en las áreas de opto-electrónica, ciencia e ingeniería de materiales, láseres, dispositivos fotónicos, etc. Este Departamento enfoca y aplica su investigación fundamental a cuatro áreas principales:

- a) Propiedades Ópticas de Superficies,
- b) Física e ingeniería de láseres,
- c) Espectroscopia Óptica y
- d) Materiales Ópticos Avanzados.

En la figura 1.5 podemos observar el área de trabajo de los laboratorios de fotónica.

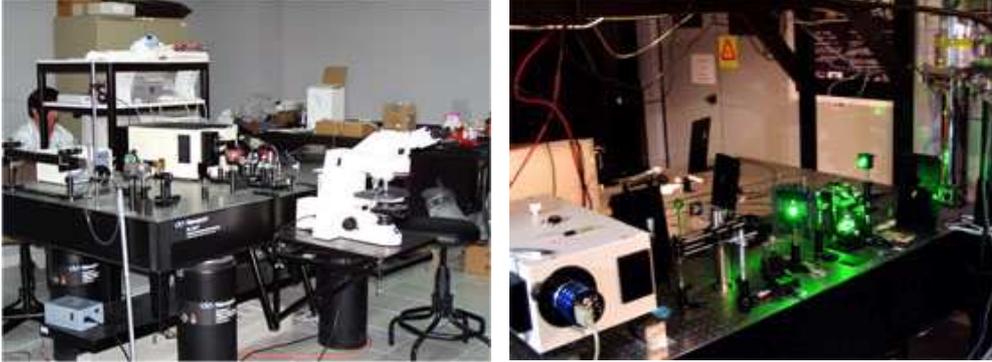


Figura 1.5.- Laboratorio de Fotonica.

### *Fibras ópticas*

El estudio de las fibras ópticas es un área moderna de la ciencia óptica que ha recibido mucha atención durante los últimos 25 años debido a las numerosas aplicaciones técnicas de las fibras ópticas. El Departamento de Fibras Ópticas realiza investigación en las áreas más importantes de las fibras ópticas.

El objetivo del Departamento es: diseñar y fabricar fibras de cristal fotonico , estudiar las propiedades ópticas espectrales y no lineales de las fibras de cristal fotonico y de las fibras dopadas con tierras raras, así como diseñar y estudiar varios tipos de láseres de fibra, sensores de fibra y dispositivos basados en fibras. Los trabajos de investigación realizados por los científicos del Departamento son apoyados por varias fundaciones del gobierno local y federal, por la Comunidad Europea y por empresas privadas. Los mejores resultados están cubiertos por patentes mexicanas, americanas y europeas.

La mayoría de los artículos basados en los resultados teóricos y experimentales obtenidos en el Departamento se publican en las revistas internacionales más importantes en los campos de física y óptica. El Departamento tiene colaboración con diversas universidades e institutos de investigación mexicanos y extranjeros, tales como la Universidad Nacional Autónoma de México (Ciudad de México), el Instituto de Ciencias Fotónicas (Barcelona), la Universidad de Valencia (Valencia), el "A.M. Prokhorov General Physics Institute" (Moscú), el "Imperial College" (Londres), y otros similares.

## 1.5 Limitaciones

En este trabajo se ha demostrado que en la medición estado de la polarización por método de la rotación de una placa de cuarto de onda, con algunas limitaciones por la utilización de engranes prefabricados y no los propuestos en el diseño de esta manera se fue imposible determinar la constante experimental incertidumbres sobre los elementos de la vector de Stokes medido en los parámetros de la polarización derivados de ella, teniendo también en cuenta el hecho de que los datos medidos pueden tener diferentes errores, dados por la incertidumbre provocada por el constante giro de la placa. Las técnicas de análisis puede ser ampliado para incluir también la determinación y la sustracción de los posibles errores sistemáticos en la medición de las posiciones angulares. Además de que las mediciones son en un 75 % fiables dado que la modulación de la señal es constante en cada estado de polarización, además la adquisición de datos y el procesamiento de ellos es también fiable.

Otros factores como la fluctuación del voltaje y las propiedades de linealidad de los elementos ópticos generan cierto margen de error en la medición con un 0.001% que puede ser despreciable y considerado mientras se trabaja con la señal obtenida.

Para la medición el polarímetro automático, sobre la base de rotación de una placa retardadora de un cuarto de onda, que es robusto frente a las imperfecciones de sus componentes. El rendimiento es óptimo cuando se mide la modulación de la placa retardadora. La precisión y exactitud de este polarímetro se demostró por múltiples mediciones, que tienen su fuente de errores sistemáticos aleatorios por la imperfección en la parte mecánica que concierne a los engranes que se utilizaron.

## CAPITULO 2

## 2.1 Fundamento teórico

### 2.1.1 Polarización

El concepto de “estado de polarización” es inherente a la naturaleza vectorial de las ondas electromagnéticas. Se determina a partir del comportamiento estadístico de la radiación emitida por las fuentes de iluminación.

#### 2.1.1.1 Concepto

Existen evidencias experimentales de que la luz puede tratarse como una onda electromagnética transversal. En rigor, una onda luminosa puede ser vista como una superposición de varias ondas. Pero sin pérdida de generalidad, podemos considerarla como una superposición de dos ondas luminosas armónicas, perpendiculares, de igual vector de propagación y frecuencia (monocromáticas). Recordemos que en este tipo de ondas, la función  $E(\vec{r}, t)$  varía sinusoidalmente con el tiempo en una dirección perpendicular a la dirección de propagación (aquí según el eje z):

$$E_x(z, t) = E_{0x} e^{i\phi} \quad \text{EC.1}$$

Donde:

$$\phi = k * z - \omega t \quad \text{EC.2}$$

Así los vectores constitutivos del campo eléctrico se pueden escribir:

$$\vec{E}_x(z, t) = E_{0x} e^{i(kz - \omega t)} \hat{i} \quad \text{EC.3}$$

Y

$$\vec{E}_y(z, t) = E_{0y} e^{i(kz - \omega t + \Delta\phi)} \hat{j} \quad \text{EC.4}$$

Entonces la onda resultante es:

$$\vec{E}(z, t) = \left[ \hat{i} E_{0x} e^{i\phi_x} + \hat{j} E_{0y} e^{i\phi_y} \right] \quad \text{EC.5}$$

Donde  $\phi_x$  y  $\phi_y$  son las fases respectivas de cada onda. Lo que también se puede expresar como.

$$\vec{E}(z, t) = E_{0x} \left[ \hat{i} + j \frac{E_{0y}}{E_{0x}} e^{i\Delta\phi} \right] e^{i(\vec{k} \cdot \vec{z} - \omega t)} \quad \text{EC.6}$$

La superposición de ondas se puede observar en la figura 2.1 en las componentes de  $E_{0y}$  y  $E_{0x}$ .

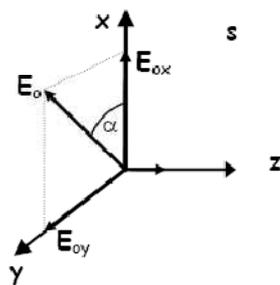


Figura.2.1 superposición de dos ondas.

Se puede considerar que  $E_{0y}$  y  $E_{0x}$  son las componentes de  $\vec{E}$ , desfasadas en  $\Delta\phi$ . Se dice que la onda  $\vec{E}$  está polarizada si:  $\phi_y - \phi_x \equiv \Delta\phi = \text{cte.}$  en el tiempo.

### **Polarización Lineal**

Si las dos ondas están en fase (diferencia de fases  $\Delta\phi = n\pi$ ,  $n = 0, +/-2, +/-4,$ ), la resultante será una onda definida por un vector de dirección fija y de amplitud oscilante (Figura .2.2a). La onda se dice linealmente polarizada. La orientación de la dirección de polarización en el plano (x,y) depende del coeficiente  $E_{0y} / E_{0x} \equiv \text{Tg}(\alpha)$  (Figura. 2.2 b). Se debe notar que si  $\Delta\phi = n\pi$ , con  $n = (\pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots)$ ; la nueva onda también está linealmente polarizada pero toma una dirección de polarización simétrica a la anterior relativa al eje  $i$ . Se dice que las ondas están en oposición de fase (Figura.2. 2c).

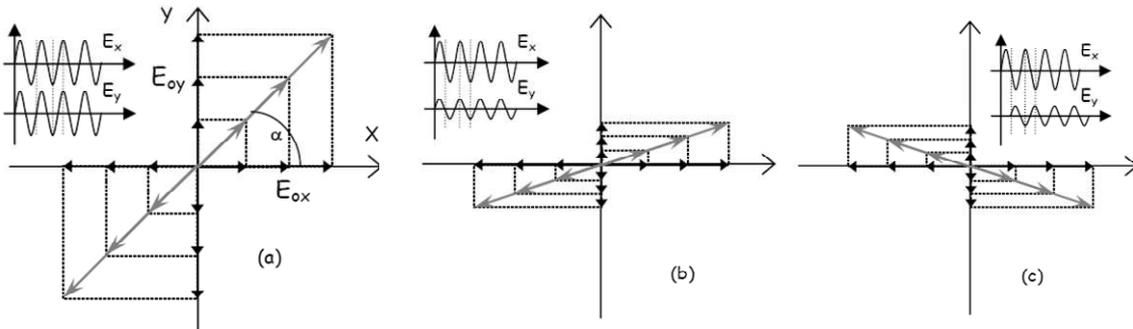


Fig. 2.2 polarizaciones lineales (a)  $E_x$  y  $E_y$  en fase con  $E_x = E_y$  (b)  $E_x$  y  $E_y$  en fase con  $E_x \neq E_y$  (c) en oposición de fase con  $E_x \neq E_y$

### **Polarización elíptica**

Sin embargo, si la fase entre  $E_y$  y  $E_x$   $\Delta\phi \neq n\pi$  el vector resultante tendrá un comportamiento particular: su dirección cambia con el tiempo, girando en un plano perpendicular a la dirección de propagación. La polarización de la onda en este caso es elíptica (Figura.2.3a).

Se distingue la polarización derecha (horaria) y la polarización izquierda (antihoraria) según el sentido de rotación del campo electro-magnético.

### **Polarización Circular**

En particular, si la diferencia de fase es de  $\Delta\phi = \pi/2 + n\pi$  ( $n = 0, +/-1, +/-2,$ ) y  $E_{0y} = E_{0x}$ , la polarización es llamada circular y el vector  $\vec{E}$  tendrá una amplitud constante (Figura. 2.3b). Aquí también, se distingue la polarización circular derecha y la polarización circular izquierda según el sentido de rotación del campo electro-magnético.

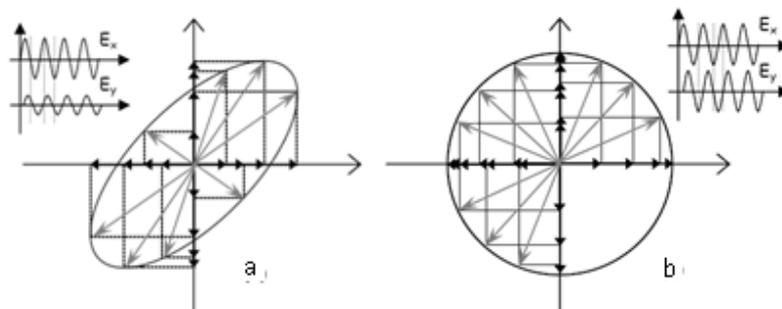


Fig. 2.3 (a) polarización elíptica (b) polarización circular

## 2.1.2 Representación de estados de polarización

### Esfera de Poincare.

1892, H. Poincaré propuso la tripleta:

- $I$  Intensidad de la onda
- $\psi$  Angulo de inclinación de la elipse
- $\eta$  Angulo de elipticidad

$$I = A_x^2 + A_y^2$$

$$\psi = (\hat{e}_x, \hat{e}_y)$$

$$\tan \eta = \pm \frac{b}{a}$$

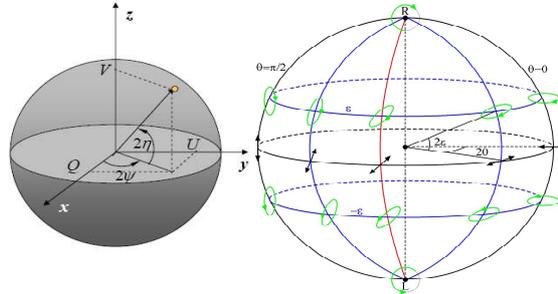


Figura 2.4 Representación e interpretación de la esfera de Poincaré.

Cada punto (Q, U, V) sobre la esfera representa un estado de polarización de una onda de intensidad I dada por:

$$I^2 = Q^2 + U^2 + V^2 \quad \text{EC. 7}$$

Donde las coordenadas cartesianas del punto (Q, U, V) sobre la esfera de azimut  $2\psi$  y latitud  $2\eta$  son:

Donde:

$$\begin{cases} Q = I \cos(2\eta) \cos(2\psi) \\ U = I \cos(2\eta) \sin(2\psi) \\ V = I \sin(2\eta) \end{cases}$$

EC.8

$$\sin(2\eta) = \frac{2A_x A_y \sin \varphi}{I}$$

Algunas de las propiedades de la esfera de Poincaré son:

1. Los polos “norte” (N) y “sur” (O) representan los estados de polarización circular derecha e izquierda, respectivamente.
2. Cada punto del sobre el ecuador de la esfera representa un estado de polarización lineal diferente.
3. Por encima del ecuador todas las polarizaciones son de giro a la derecha, mientras que por debajo del ecuador son de giro izquierdo.
4. Los contornos de igual orientación (acimut) constituyen una familia de semicírculos dibujados a través de los polos norte y sur (líneas de longitud).
5. Los contornos de igual elipticidad se representan por una familia de círculos coaxiales (latitudes) cuyo eje común es el eje polar.

En la figura 2.5 se observan casos particulares donde se considera normalizada:

$$I^2 = 1$$

Caso	Elipticidad	Vector de Poincaré	Estado
$2\eta = 0$	$e = 0$	$\begin{bmatrix} \cos(2\psi) \\ \cos(2\psi) \\ 0 \end{bmatrix}$	Polarización lineal a un ángulo $\psi$
$2\eta = \pm \frac{\pi}{2}$	$e = \pm 1$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix}$	Polarización circular (+) derecha (-) izquierda
$0 < 2\eta < \frac{\pi}{2}$ $-\frac{\pi}{2} < 2\eta < 0$	$0 < e < 1$ $-1 < e < 0$	$\begin{bmatrix} \cos(2\eta)\cos(2\psi) \\ \cos(2\eta)\text{sen}(2\psi) \\ \text{sen}(2\psi) \end{bmatrix}$	Polarización elíptica (+) derecha (-) izquierda

Figura 2.5.- valores para casos especiales en la esfera de Poincare.

En un sistema cartesiano de coordenadas  $S_1, S_2, S_3$  centrado en  $C$ , con los ejes  $S_1, S_2$  paralelos a los ejes real e imaginario del plano y el eje  $S_3$  dirigido del polo sur al polo norte. Las coordenadas polares  $(r, \theta, \Phi)$  del punto  $Ps$  sobre la esfera están dadas por  $(1/2, \pi/2 - 2\varepsilon, 2\theta)$ . Si se denota el radio de la esfera de Poincaré por  $S_0$ , la serie de valores  $(S_0, S_1, S_2, S_3)$  están dados por:

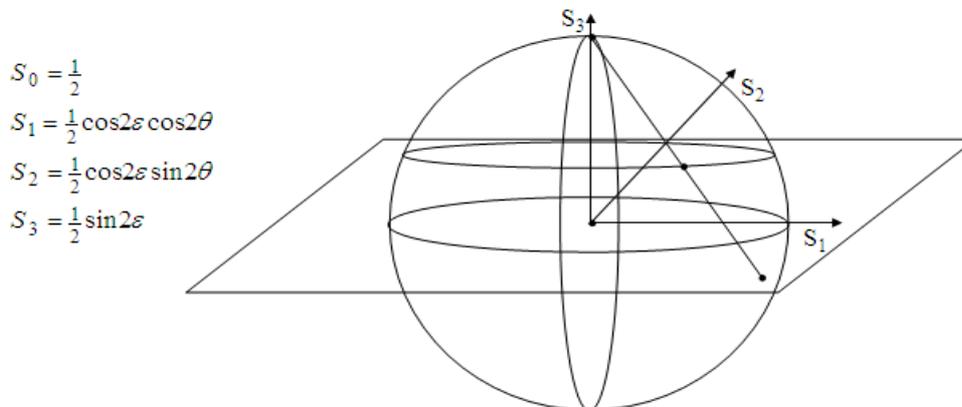


Figura 2.6. Vector de Stokes representados en la esfera de Poincare.

### Parámetros de Stokes.

En 1852 G. G. Stokes introduce los parámetros (I, Q, U, V) para caracterizar el estado de polarización de una onda.

$$\begin{aligned} Q &= I \cos(2\eta) \cos(2\psi) = A_x^2 - A_y^2 \\ U &= I \cos(2\eta) \operatorname{sen}(2\psi) = 2A_x A_y \cos \varphi \\ V &= I \operatorname{sen}(2\eta) = 2A_x A_y \operatorname{sen} \varphi \end{aligned}$$

EC.9.

Los parámetros se aplican igualmente a la luz polarizada, parcialmente polarizada y no polarizada. Proporciona el método más sencillo de superponer dos haces incoherentes.

Los cuatro parámetros de Stokes, que constituyen el vector de Stokes, se definen mediante

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}$$

EC.10

- S0 es la intensidad total de la luz,
- S1 es la preferencia de la onda a la polarización lineal vertical (negativo), horizontal (positivo) o a ninguna de las dos (cero).
- S2 es la preferencia de la onda a tener una polarización lineal con acimut dirigido a +p/4 (positivo) o -p/4 (negativo). Por último,
- S3 nos indica la preferencia de la onda a ser polarizada circularmente con giro a la derecha (positivo) o a la izquierda (negativo).

Para luz parcialmente polarizada.

$$S_0^2 > S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad \text{EC.11}$$

El grado de polarización se define como:

$$\varphi = \frac{(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)^{\frac{1}{2}}}{S_0} \quad 0 \leq \varphi \leq 1 \quad \text{EC.12}$$

El ángulo de orientación y la elipticidad pueden extraerse de los parámetros de Stokes.

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{S_2}{S_1} \right) \quad \text{EC.13}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left[ \frac{S_3}{(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad \text{EC.14}$$

La representación de la elipse de polarización se observa en la figura 2.7

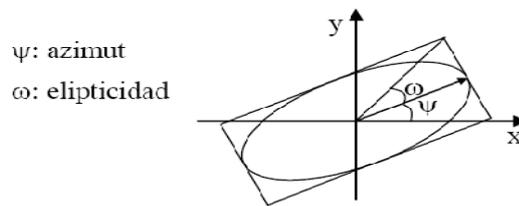


Figura 2.7. Elipse de polarización. Donde  $\theta = \psi$  es el Angulo de orientación y  $\omega = \varepsilon = \eta$  representan la elipticidad.

Vectores de Stokes algunos casos se pueden observar en la figura 2.8.

$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	No polarizado	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	Polarización lineal horizontal	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	Polarización lineal vertical
$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	Polarización lineal a 45°	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$	Polarización lineal a -45°	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	Polarización circular derecha
$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	Polarización circular izquierda	Los valores de Q, U, V comprendidos en [-1,1]. Q preferencia por polarización horizontal. U preferencia por polarización a +45°. V preferencia por polarización circular.			

Figura 2.8 casos especiales del Vector de Stokes.

### Matrices de Muller

Calculo de Muller (1930-1940) .Emplea los vectores de Stokes para representar el haz incidente y matrices 4x4 para los polarizadores o retardadores. Origen de las matrices de Muller

Las matrices de Muller tienen una fundamentación fenomenológica, es decir, provienen del experimento. Se basan en la relación lineal entre los haces

incidentes y emergentes. El experimento muestra que en todas las circunstancias normales cada propiedad del haz emergente depende de las primeras potencias de las propiedades del haz incidente. Entonces, se puede escribir un conjunto de cuatro ecuaciones lineales que relacione las propiedades de los haces. En cada ecuación intervienen cuatro constantes. Debido a la relación lineal, se obtienen las mismas 16 constantes independientemente de la forma de polarización del haz incidente. Ver figura 2.9.

$$\begin{bmatrix} ABDE \\ FGHI \\ JKLM \\ NOPQ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ Q_1 \\ U_1 \\ V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_2 \\ Q_2 \\ U_2 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

polarizador
Haz incidente
Haz emergente

Figura 2.9. Representación de la matriz de Muller.

1.- efecto de un polarizador figura 2.10.

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 0 & -0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ -2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Polarizador ideal con eje de transmisión a  $-45^\circ$ 
Haz incidente parcialmente polarizado elípticamente derecho
Haz emergente 100% polarizado linealmente a  $45^\circ$

Figura 2.10.- efecto de la matriz de Muller de un polarizador.

2.- efecto de un retardador de un medio de onda figura 2.11.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6 \\ -1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix}$$

Placa lineal de cuarto de onda (retardador de  $90^\circ$ ) con eje rápido a  $45^\circ$ 
Haz incidente parcialmente polarizado elípticamente derecho
Haz emergente parcialmente polarizado preferencia polarización circular

Efecto del retardador: intercambiar posición y cambiar signo.

Figura 2.10.- efecto de la matriz de Muller de retardador de  $\frac{1}{2}$  de onda.

Matrices de Muller de elementos ópticos mayormente conocidos figura 2.11.

Polarizador lineal horizontal	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
Polarizador lineal vertical	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
Polarizador lineal a +45	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
Lámina de cuarto de onda eje rápido vertical	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$

Figura 2.11.- matrices de Muller.

### 2.1.3 Los elementos ópticos

Se puede considerar entre los materiales de interés en óptica, tres tipos de materiales transparentes:

- ❖ Los materiales de índice de refracción y coeficiente de absorción isotrópicos como el vidrio.

- ❖ Los materiales que tienen índices de refracción anisótropos. La velocidad con que se propaga la Luz en estos materiales depende de la orientación del campo electro-magnético relativa a las direcciones preferenciales del material. Se nota una dirección de polarización rápida y una dirección de polarización lenta del material. Estos son los materiales birrefringentes. Para algunos de ellos, el índice de refracción depende de la tensión mecánica.

- ❖ Los materiales que presentan esta característica son llamados fotoelásticos. Los materiales que presentan coeficiente de absorción anisótropo. Estos materiales absorben selectivamente la componente de la onda

electromagnética en una orientación específica. Estos materiales se llaman polarizadores.

Es posible alterar, definir o seleccionar el tipo de polarización de la luz con elementos de óptica constituidos de materiales especiales: materiales polarizadores y materiales birrefringentes.

### **Placas de $\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{4}$ de onda.**

Las láminas de  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{1}{4}$  de onda corresponden a láminas de material birrefringente. La luz polarizada en una dirección específica se propaga dentro de la lámina a una velocidad diferente que la luz polarizada perpendicularmente a esta dirección. Las láminas  $\lambda/2$  y  $\lambda/4$  tienen un espesor muy controlado introduciendo entre los ejes rápidos y lentos de polarización un retraso o desfase de  $\pi$  y  $\pi/2$  respectivamente entre cada componente. Así, una lámina de  $\lambda/4$  transforma una onda linealmente polarizada a 45 grados de sus ejes principales en una onda circularmente polarizada. Este tipo de lámina es de gran utilidad en algunas aplicaciones prácticas como polariscopios circulares. En la figura 2.12 podemos observar el efecto de una placa de  $\lambda/4$  con luz linealmente polarizada.

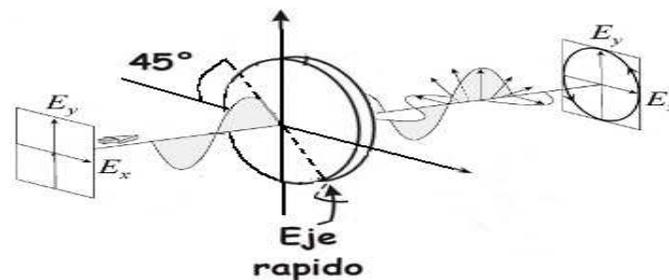


Figura 2.12.- placa de  $\lambda/4$ .

### **El polarizador:**

Los polarizadores son hechos de un tipo de material que absorbe la luz polarizada en una dirección específica: el eje de extinción. La luz saliendo del material será entonces linealmente polarizada en la dirección perpendicular al eje de extinción, llamado eje de transmisión (Figura. 2.13). Una particularidad

importante de los polarizadores es que cuando se disponen a lo largo de un eje óptico dos polarizadores con ejes cruzados, se produce una absorción total de la luz incidente. Esta configuración se llama configuración de extinción.

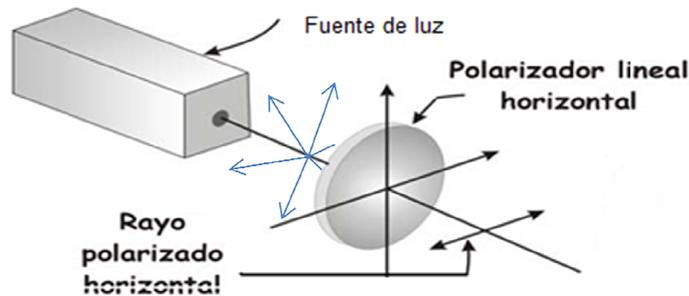


Figura 2.13.- polarizador lineal.

#### 2.1.4 Polarímetro

El fenómeno de la polarización de la luz era conocido desde los trabajos de Christian Huygens (1629-1695) pero fue estudiado a fondo por Jean Baptiste Biot (1774-1862) a principios del siglo XIX. Tras estudiar el fenómeno sobre un cristal de cuarzo, Biot encontró la existencia de sustancias que giraban el plano de polarización de la luz hacia la derecha (dextrógiras) y otras que lo hacían hacia la izquierda (levógiras). Los primeros polarímetros fueron diseñados en los años cuarenta del siglo pasado, gracias al uso de los prismas ideados en 1828 por William Nicol (1768-1851), El desarrollo comercial del polarímetro tuvo lugar en Alemania y Francia, debido a su valor en el análisis del azúcar, lo que llevó a desarrollar un tipo especial de polarímetros, especialmente adaptados para estos análisis, que se denominaron sacarímetros.

El principio del polarímetro es muy simple, como puede comprobarse a través de la figura adjunta. La luz introducida es polarizada en un plano determinado mediante el polarizador (A) y luego se hace pasar a través de la disolución de la sustancia que se pretende analizar. A continuación, esta luz pasa por un nuevo polarizador (C) que deberá estar colocado en la posición adecuada para permitir el paso de la luz hasta el objetivo (F), para lo cual se dispone de un sistema que permite girarlo alrededor de un eje. Gracias a la lente (D), podemos

leer en el círculo (EE) el ángulo que es necesario girar el segundo polarizador para obtener un máximo de intensidad luminosa. Si medimos este ángulo cuando el recipiente está vacío y cuando el recipiente está lleno con una sustancia óptimamente activa, la diferencia entre ambos valores nos permite calcular el poder rotatorio de la disolución.

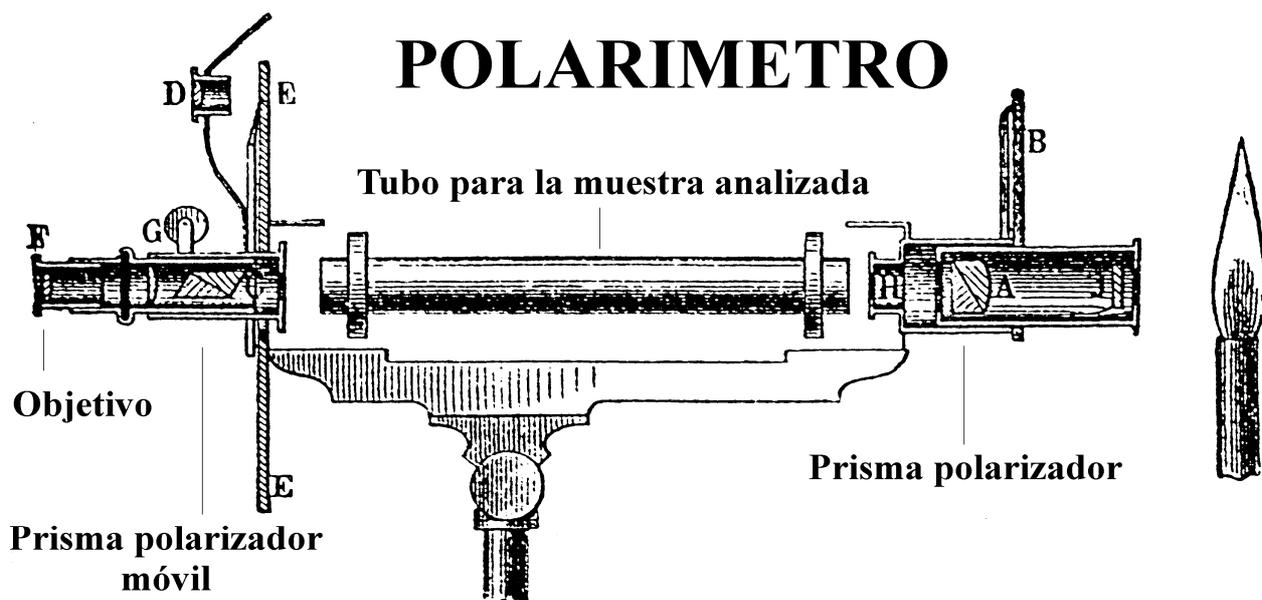


Figura 2.14 polarímetro.

El funcionamiento del polarímetro es muy sencillo e ingenioso, como puede comprobarse a través de la figura 2.14. La luz introducida es polarizada en un plano determinado mediante el polarizador (A) y luego se hace pasar a través de la disolución de la sustancia que se pretende analizar. A continuación, esta luz pasa por un nuevo polarizador (C) que deberá estar colocado en la posición adecuada para permitir el paso de la luz hasta el objetivo (F), para lo cual se dispone de un sistema que permite girarlo alrededor de un eje. Gracias a la lente (D), se puede leer en el círculo (EE) el ángulo que es necesario girar el segundo polarizador para obtener un máximo de intensidad luminosa. Si se mide este ángulo cuando el recipiente está vacío y cuando el recipiente está lleno con una sustancia óptimamente activa, la diferencia entre ambos valores permite calcular el poder rotatorio de la disolución. El poder rotatorio de una disolución de una

sustancia depende del espesor de la capa atravesada, la naturaleza de la sustancia analizada, la concentración de la disolución, la longitud de onda de la luz y la temperatura. Si conocemos la rotación ( $[\alpha]_{\lambda}^t$ ) producida por un disolución de 1 g/ml de la sustancia en una columna de líquido de 1 decímetro de longitud para una longitud de onda fija ( $\lambda$ ), podemos determinar la concentración de la muestra analizada a través de la fórmula:

$$[\alpha] = [\alpha]_{\lambda}^t \cdot l \cdot c \quad \text{EC.15}$$

Donde  $[\alpha]_{\lambda}^t$  es el poder rotatorio específico de la sustancia correspondiente para una temperatura y una longitud de onda determinada, que normalmente suele ser la línea D del sodio.  $[\alpha]$  es la rotación producida por una columna de líquido de longitud "l" (dm) y concentración "c" (g/ml).

El polarímetro que se expone utiliza un método más exacto para el cálculo de rotación del plano de rotación de la luz, mediante el uso de tres polarizadores. Se trata de un modelo conocido como "polarímetro de Lippich".

### ***Polarímetros de elementos rotatorios***

Los polarímetros de Stokes que utilizan elementos rotatorios se muestran en las figura 2.15 y 2.15. Todos los elementos que se muestran son retardadores y polarizadores lineales. La medición de los elementos de Stokes que muestra en el recuadro a la derecha, donde los puntos más grandes son los elementos de Stokes que se miden.



Figura 2.15. Polarímetro de elementos rotatorios

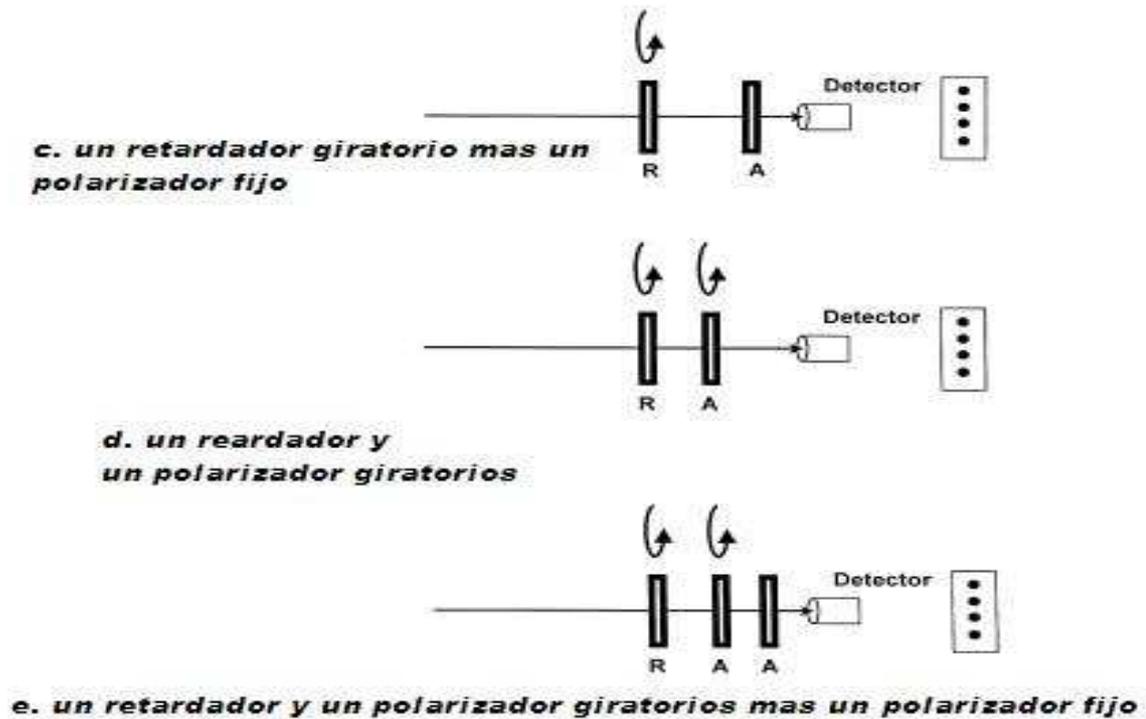


Figura 2.16. Polarímetro de elementos rotatorios

*Polarímetro con polarizador giratorio.*

Como se muestra en la figura 2.15.a, el polarizador en este polarímetro gira y produce una modulación en la señal que recibe el detector, dada por:

$$I = \frac{a_0}{2} + \frac{a_2}{2} \cos 2\theta + \frac{b_2}{2} \sin 2\theta \quad \text{EC.16}$$

Donde  $\theta$  es el ángulo 32circular del polarizador. Los coeficientes  $a_0$ ,  $a_2$  y  $b_2$  son los tres primeros tres elementos del vector de Stokes. Al menos tres mediciones se deben hacer para poder determinar los tres elementos medibles del vector de Stokes.

En la ecuación EC.16 y las posteriores expresiones de la señal modulada son todas derivadas de ecuaciones algebraicas que representan los sistemas polarimétricos. Por ejemplo, para el polarímetro con polarizador giratorio tiene la siguiente ecuación:

$$\begin{pmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\theta & \operatorname{sen} 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \operatorname{sen} 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \operatorname{sen} 2\theta & \operatorname{sen} 2\theta \cos 2\theta & \operatorname{sen}^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad \text{EC.17}$$

Donde el vector de entrada se multiplica con la matriz de Muller de un polarizador ideal lineal giratorio y así obtener el vector de Stokes de salida. Lo que necesita es multiplicar la primera fila de la matriz de Muller con el vector de Stokes entrante, porque medira la señal de salida  $I = S'_0$ . Esto es:

$$I = \frac{S_0}{2} + \frac{S_1}{2} \cos 2\theta + \frac{S_2}{2} \operatorname{sen} 2\theta \quad \text{EC.18}$$

Comparando esta ecuación con la EC.16. Se tiene la siguiente correspondencia.

$$\begin{aligned} S_0 &= a_0 \\ S_1 &= a_2 \\ S_2 &= b_2 \end{aligned} \quad \text{EC.19}$$

Los coeficientes se han propuesto como  $a$ 's y  $b$ 's para representar la modulación de la señal como una serie de Fourier, donde la frecuencia fundamental de la modulación y de sus armónicos son en ángulo  $\theta$  y sus múltiplos. Se seguirá haciendo esto con el polarímetro visto en este tema y el siguiente.

*Polarímetro con polarizador giratorio y fijo.*

Un polarizador fijo frente al detector como se muestra en esta configuración Figura 2.15.b. Significa que el detector solo observa una polarización y cualquier otra polarización fuera de la sensibilidad del detector se vuelve superflua. La señal modulada compuesta de dos frecuencias, se mide y se puede expresar como una serie de Fourier:

$$I = \frac{a_0}{4} + \frac{1}{4} \sum_{n=1}^2 (a_{2n} \cos 2n\theta + b_{2n} \text{sen} 2n\theta) \quad \text{EC.20}$$

Los primeros tres elementos del vector de Stokes son:

$$\begin{aligned} S_0 &= a_0 - a_4 \\ S_1 &= \frac{2}{3}(a_2 - a_0 + 2a_4) \\ S_2 &= 0.4(2b_2 + b_4) \end{aligned} \quad \text{EC.21}$$

*Polarímetro con retardador giratorio más polarizador fijo.*

Esta es la base completa del polarímetro de Stokes y se muestra en la figura 2.16.c. el detector observa solo una polarización y la señal modulada vuelve a ser compuesta de dos frecuencias. La señal se vuelve a expresar como una serie de Fourier:

$$I = \frac{a_0}{2} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^2 (a_{2n} \cos 2n\theta + b_{2n} \text{sen} 2n\theta) \quad \text{EC.22}$$

Donde ahora el ángulo  $\theta$  es el ángulo azimutal del retardador. Si el retardador es de  $\lambda/4$ , el vector de Stokes se da en términos de los coeficientes de Fourier de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} S_0 &= a_0 - a_4 \\ S_1 &= 2a_4 \\ S_2 &= 2b_4 \\ S_3 &= b_2 \end{aligned} \quad \text{EC.23}$$

*Polarímetro con retardador y polarizador giratorios.*

En este polarímetro ambos elementos giran como se muestra en la figura 2.16.d. al girar el polarizador en tres tiempos con respecto al ángulo del retardador y el retardador es de  $\lambda/4$ , la señal detectada se da por:

$$I = \frac{a_0}{2} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^3 (a_{2n} \cos 2n\theta + b_{2n} \text{sen} 2n\theta) \quad \text{EC.24}$$

Sabiendo que  $\theta$  es el ángulo del retardador, el vector de Stokes es:

$$\begin{aligned} S_0 &= a_0 \\ S_1 &= a_2 + a_6 \\ S_2 &= b_6 - b_2 \\ S_3 &= b_4 \end{aligned} \quad \text{EC.25}$$

*Polarímetro con retardador-polarizador giratorios y un polarizador fijo*

Este caso es la combinación de dos casos y se muestra en la figura.2.15.e, produce hasta nueve armónicos en la señal detectada cuando el polarizador se gira en factores de tiempo de  $\frac{5}{2}, \frac{5}{3}$  o  $-\frac{3}{2}$  del ángulo del retardador de maneja que:

$$I = \frac{a_0}{4} + \frac{1}{4} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq 9}}^{10} (a_{2n} \cos.n\theta + b_{2n} \text{sen}.n\theta) \quad \text{EC.26}$$

El vector de Stokes en términos de los coeficientes de Fourier, con un factor de giro de  $\frac{5}{2}$  y el polarizador fijo a  $0^\circ$ , son

$$\begin{aligned} S_0 &= a_0 - a_4 \\ S_1 &= 2a_1 \\ S_2 &= 2b_1 \\ S_3 &= b_3 \end{aligned} \quad \text{EC.27}$$

### 2.1.5 Método de una placa de $\lambda/4$ giratoria.

El método de una placa de  $\lambda/4$  giratoria es el más simple de una serie de técnicas para la medición del vector de Stokes, en la que el estado de polarización desconocido es medido por la radiación modulada en un tiempo. Se va a considerar un haz radiante con un estado de polarización desconocido, pasando a

través de una placa de  $\lambda/4$  giratoria, a continuación pasa a través de un polarizador y por ultimo en un detector. (Figura. 2.17)

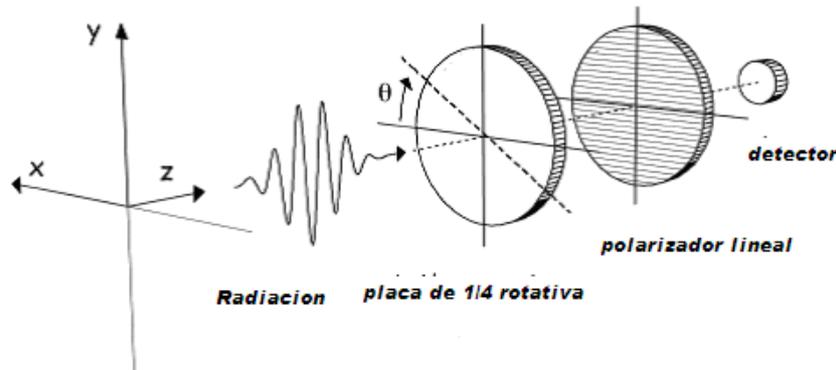


Figura 2.17.- Método de rotación de una placa de  $\lambda/4$  para la medición del vector de Stokes.

Introduciendo una referencia al sistema cartesiano cuyo eje  $z$  es paralelo a la radiación de la onda del vector  $k$  y el eje  $x$  en paralelo al eje fijo del polarizador lineal dejando ser  $S = (S_0, S_1, S_2, S_3)$  siendo la representación del vector de Stokes del estado de polarización de la radiación referenciada en el sistema dado. Cuando el eje de la placa de  $\lambda/4$  gira un ángulo  $\theta$  con respecto a la referencia en el eje  $x$ , los valores del vector de Stokes de la radiación incidente es:

$$S_D(\theta) = LP \bullet QW(\theta) \bullet S, \quad \text{EC. 28}$$

Donde:

$$LP = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad QW(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta & \text{sen}2\theta \cos 2\theta & -\text{sen}2\theta \\ 0 & \text{sen}2\theta \cos 2\theta & \text{sen}^2 2\theta & \cos 2\theta \\ 0 & \text{sen}2\theta & -\cos 2\theta & 0 \end{bmatrix}$$

EC.29

$LP$  y  $WQ(\theta)$  Son la matriz del polarizador lineal a  $0^\circ$  y la placa de  $\lambda/4$  fija en el ángulo  $\theta$  respectivamente. La intensidad de la radiación en el detector es:

$$\begin{aligned}
I_D(\theta) = (S_D)_0 &= \frac{1}{2}(S_0 + S_1 \cos^2 2\theta + S_2 \text{sen} 2\theta \cos 2\theta - \text{sen} 2\theta) & \text{EC. 30} \\
&= \frac{1}{2}S_0 + \frac{1}{4}S_1 - S_3 \text{sen} 2\theta + \frac{1}{4}S_1 \cos 4\theta + \frac{1}{4}S_2 \text{sen} 4\theta
\end{aligned}$$

Esta expresión puede ser considerada como el truncado de la serie de Fourier con el ángulo  $\theta$  y un periodo de  $2\pi$  :

$$I_D(\theta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_{2n} \cos 2n\theta + b_{2n} \text{sen} 2n\theta) \quad \text{EC. 31}$$

Donde los coeficientes son:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\theta_0}^{\theta_0+2\pi} I_D(\theta) d\theta, \quad a_{2n} = \frac{1}{\pi} \int_{\theta_0}^{\theta_0+2\pi} I_D(\theta) \cos 2n\theta d\theta \quad b_{2n} = \frac{1}{\pi} \int_{\theta_0}^{\theta_0+2\pi} I_D(\theta) \text{sen} 2n\theta d\theta \quad n = 1, 2, \quad \text{EC.32}$$

Y donde  $\theta_0$  es un ángulo inicial arbitrario. Ahora comparando EC.29 y EC.30 encontramos:

$$a_0 = S_0 + \frac{1}{2}S_1 \quad a_2 = 0 \quad b_2 = -\frac{1}{2}S_3 \quad a_4 = \frac{1}{4}S_1 \quad b_4 = \frac{1}{4}S_2 \quad \text{EC.33}$$

Ahora los elementos del vector de Stokes son los siguientes:

$$\begin{aligned}
S_0 &= \frac{2}{\pi} \int_{\theta_0}^{\theta_0+2\pi} I_D(\theta) \left( \frac{1}{2} - \cos 4\theta \right) d\theta & S_1 &= \frac{4}{\pi} \int_{\theta_0}^{\theta_0+2\pi} I_D(\theta) \cos 4\theta d\theta & S_2 &= \frac{4}{\pi} \int_{\theta_0}^{\theta_0+2\pi} I_D(\theta) \text{sen} 4\theta d\theta \\
S_3 &= \frac{2}{\pi} \int_{\theta_0}^{\theta_0+2\pi} I_D(\theta) \text{sen} 2\theta d\theta & & & & \text{EC.34}
\end{aligned}$$

En la aplicación práctica del método, el vector de Stokes es usualmente medido por la rotación de la placa de  $\lambda/4$  con una velocidad angular constante  $\theta = \omega t$  y las mediciones de las componentes de la señal con el detector en las frecuencias  $2\omega$  y  $4\omega$  con un analizador de señal. La manera más adecuada de medir el vector de Stokes en un tiempo-dependiente es produciendo escalas de tiempo de  $\tau \gg 2\pi/\omega$ . Por este motivo es ampliamente utilizable en muchas aplicaciones en tiempo real tales como, elipsómetros y el estudio de la dinámica de crecimiento de películas.

Sin embargo, el método se utiliza para medir estados de polarización estacionarios. En este caso la placa de  $\lambda/4$  esta rotando con una velocidad angular constante, entonces  $N+1$  son posiciones angulares discretas uniformemente espaciadas en una vuelta completa y para cada posición el detector registra la señal. Dejando a  $I_i = I_D(\theta_i)$  que es la obtención de las muestras, se procede utilizando la regla de trapezoide para calcular las integrales en la ecuación y se encuentra que:

$$\begin{aligned}
 S_0 &= \frac{4}{N} \left[ \sum_{i=0}^N I_i \left( \frac{1}{2} - \cos 4\theta_i \right) - \frac{1}{2} (I_0 + I_N) \left( \frac{1}{2} - \cos 4\theta_0 \right) \right] \\
 S_1 &= \frac{8}{N} \left[ \sum_{i=0}^N I_i \cos 4\theta - \frac{1}{2} (I_0 + I_N) \cos 4\theta_0 \right] \\
 S_2 &= \frac{8}{N} \left[ \sum_{i=0}^N I_i \text{sen} 4\theta - \frac{1}{2} (I_0 + I_N) \text{sen} 4\theta_0 \right] \\
 S_3 &= \frac{4}{N} \left[ \sum_{i=0}^N I_i \text{sen} 2\theta - \frac{1}{2} (I_0 + I_N) \text{sen} 2\theta_0 \right]
 \end{aligned} \tag{EC.35}$$

En estas expresiones se toma cuenta que la última medición  $I_N = I_D(\theta_N) = I_D(\theta + 2\pi)$  es una repetición de la medición inicial  $I_0 = I_D(\theta_0)$

En la utilización de este método, se tienen con dos problemas, el primero de ellos es la determinación correcta de los errores de medición en los elementos del vector de Stokes y en los otros parámetros derivados de los mismos. El problema está relacionado con la consistencia física de las mediciones del vector de Stokes  $S$ . De hecho los elementos físicos del vector de Stokes del haz radiado deben cumplir la siguiente condición.

$$P = \frac{(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)}{S_0} \leq 1 \quad \text{EC.36}$$

# CAPITULO 3

### 3.1 Selección de materiales

Para la elaboración y diseño del sistema se disponen de los siguientes componentes que han sido previamente seleccionados por su versatilidad, precio y factibilidad de utilización dentro de una amplia variedad de componentes electrónicos.

Para el giro continuo de la placa  $\lambda/4$  se utilizara un servomotor que cubre las necesidades de velocidad angular, torque y tamaño para el funcionamiento correcto del sistema, además de su sencillo manejo. El servomotor de giro continuo elegido es del fabricante Parallax (#900-00008) con las siguientes especificaciones técnicas ver figura 3.1.

- Voltaje máximo 6 VDC.
- Velocidad de giro 60 rpm.
- Torque 3.45kg-cm.
- Tamaño en milímetros.  
40.5 x 20.0 x 38.0.
- Puerto de ajuste manual.

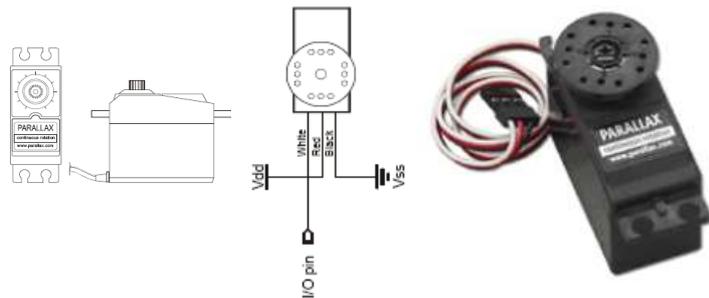


Figura 3.1.- Especificaciones del servomotor Parallax

El servomotor se controla mediante programación PWM (modulación por ancho de pulso). Para implementar el control se usó el microcontrolador PIC16F84A de Microchip Technology Inc. que es uno de los microcontroladores más utilizados en proyectos electrónicos. A pesar de que este micro no posee, muchas de las características de los más avanzados, éstas pueden ser implementadas por software. El micro pertenece a la familia Microchip de Microcontroladores de rango medio de 8 bits con 18 pines como se muestra en la figura 3.2. Este tiene 13 líneas de entrada/salida con tecnología TTL/CMOS, es decir, 5 V para un estado lógico 1 y 0 V para el estado 0. Requiere un oscilador

externo de hasta 20 MHz, además cuenta con un timer y un *watchdog* timer. Ver figura 3.2.

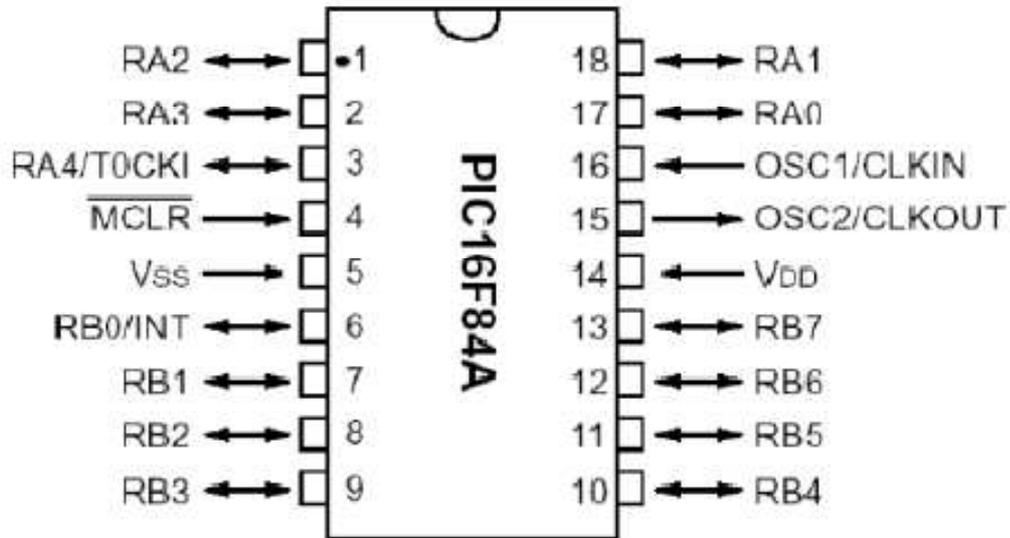


Figura 3.2.- Pines del PIC16F84A

Para la etapa de la adquisición de datos, conversión analógica-digital y envío de los datos a un puerto serial para su posterior análisis por medio de un ordenador, contamos con el microcontrolador Microchip PIC 16F887. Este micro es la evolución del PIC16F877A. Entre las ventajas principales que nos ofrece podemos mencionar: un oscilador interno seleccionable de 8 a 31KHz, hasta 36 pines de entrada/salida usando el oscilador interno, 14 entradas A/D contra 8 del PIC16F877A, 2 comparadores, memoria FLASH para programa: 14KB, memoria RAM para datos: 368 bytes, memoria EEPROM para datos: 256 bytes, modos de direccionamiento directo, indirecto y relativo, hasta 36 pines de entrada/salida, convertidor A/D de 14 canales, 10 bit, 3 timers/counters (8, 16 y 8 bits), 1 Módulo CCP (capture, compare y PWM), Power On Reset, Power Up Timer, Oscillator Start-up Timer, Watchdog Timer, Brown-out detect, modo SLEEP para ahorro de energía. En la Figura. 3.3 se muestra un esquema del micro.

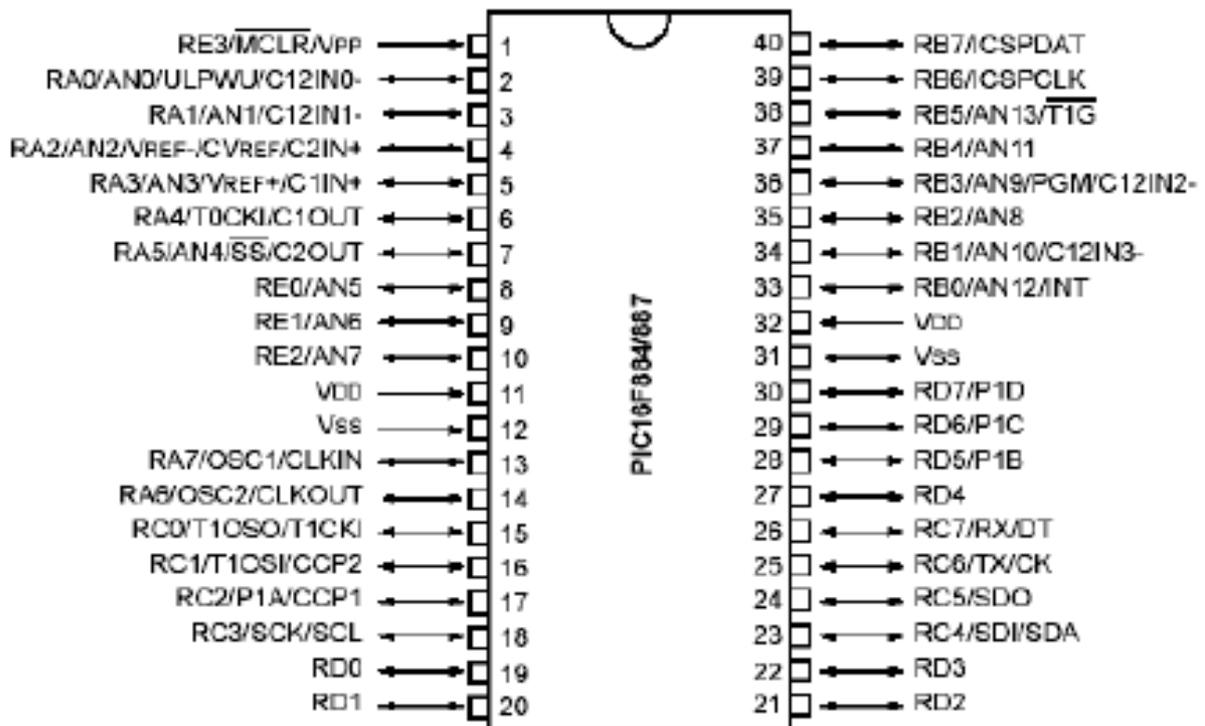


Figura 3.3.- Pines del PIC16F887

Para la etapa de fotodetección se eligió un dispositivo OPT101, que consta de un sensor de luz y un amplificador. Dicho dispositivo funciona de manera tal que el valor del voltaje a la salida varía linealmente con la intensidad de luz que incide sobre él. Experimentalmente se observó que era muy sensible a la luz ambiente, por lo que es necesario aislar totalmente al integrado de toda la luz para poder obtener resultados con la mayor precisión y exactitud. El OPT101 opera como sensor de radiación tipo fotodiodo y cuenta con amplificación interna que genera una diferencia de potencial proporcional a la intensidad de la radiación incidente sobre la superficie de su apertura. La señal de voltaje generada por el sensor, es a su vez, amplificada y acondicionada mediante un circuito electrónico diseñado, para luego digitalizarla mediante el convertor análogo-digital del micro que enviará la señal con una resolución de 8 bits, una sensibilidad de 20 mV y un tiempo de respuesta inferior a 100µs. En la figura 3.4 tenemos el diagrama interno del OPT101 y su encapsulado.

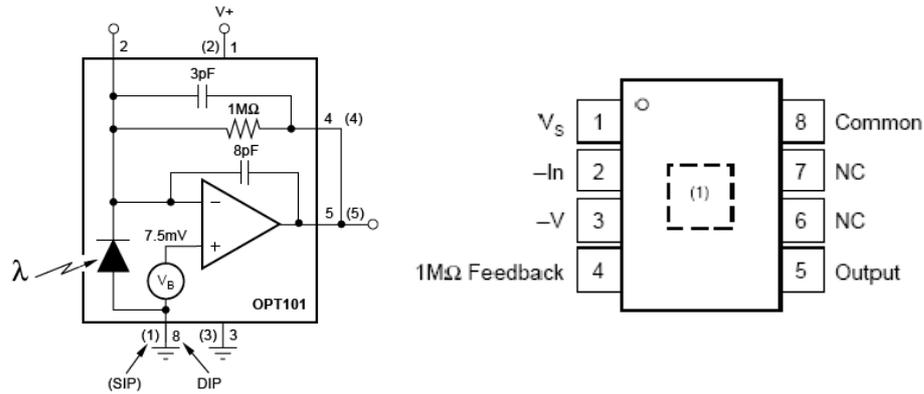


Figura.-3.4 diagrama interno del OPT101 y pines. Nota (1): localización de fotodiodo

Para la comunicación serial entre el PIC16F887 y el ordenador se dispondrá el MAX232 que es un circuito integrado que convierte los niveles de las líneas de un puerto serie RS232 a niveles TTL y viceversa. Lo interesante es que sólo necesita una alimentación de 5V, ya que genera internamente algunas tensiones que son necesarias para el estándar RS232. Otros integrados que manejan las líneas RS232 requieren dos voltajes, +12V y -12V. El MAX232 soluciona la conexión necesaria para lograr comunicación entre el puerto serie de una PC y cualquier otro circuito con funcionamiento con base en señales de nivel TTL/CMOS. El circuito integrado posee dos convertidores de nivel TTL a RS232 y otros dos que, a la inversa, convierten de RS232 a TTL. Estos convertidores son suficientes para manejar las cuatro señales más utilizadas del puerto serie del PC, que son TX, RX, RTS y CTS. TX es la señal de transmisión de datos, RX es la de recepción, y RTS y CTS se utilizan para establecer el protocolo para el envío y recepción de los datos. En la figura 3.5 tenemos su localización de pines.

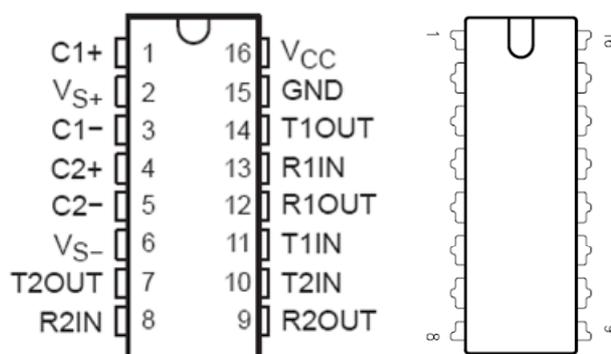


Figura 3.5.- localización de pines del MAX232.

Para la distinción de un giro completo se tiene un switch óptico de ranura el cual con el indicador del cero en la placa retardadora, el programa sabrá donde tomar los datos en principio y final de una vuelta. En este tipo de sensor, ambos elementos (LED y Fototransistor) se encuentran alineados a la misma altura enfrentados a través de la ranura. El fototransistor se encontrará activado siempre que no se introduzca ningún elemento que obture la ranura. Se utiliza el H21A1 debido a sus características de alimentación y su respuesta en condiciones normales, logrando obtener una respuesta de 10 KHz. Ver figura 3.6.

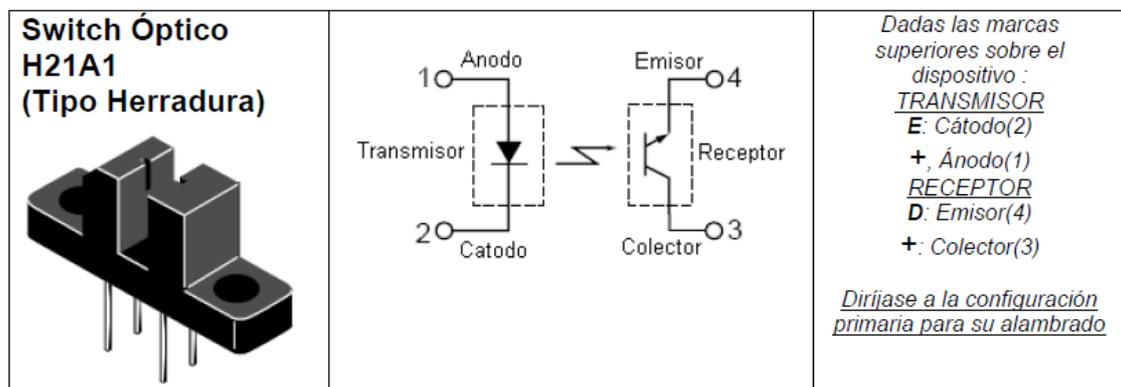


Figura 3.6.- descripción del Switch óptico de ranura H21A1.

### 3.2 Diseño de sistema mecánico.

La velocidad angular inicial del servomotor es de  $2\pi \text{ rads/seg}$ , la cual es insuficiente para el sistema. En el diseño se necesita una velocidad angular de salida de  $70\pi \text{ rads/seg}$  o superior dado que el fotodetector puede sensar los cambios a una velocidad de muestreo de 10KHz Para obtener esta velocidad angular, se diseño el siguiente juego de engranes, Figura 3.7.

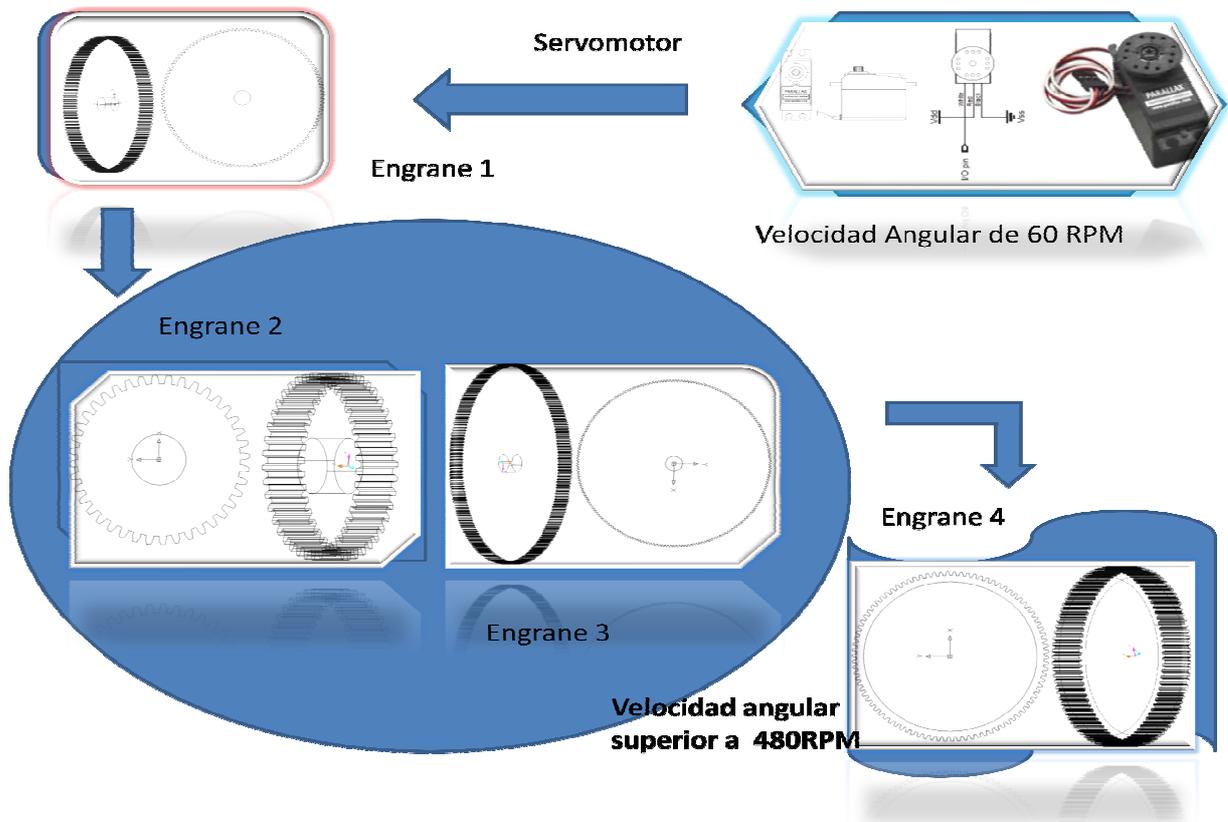


Figura.-3.7 figura del esquema mecánico.

El juego de engranes se puede representar con la siguiente ecuación matemática donde involucra las velocidades angulares inicial  $W_1$  y final  $W_4$  además del número de dientes de los engranes  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  y  $N_4$ .

$$\frac{W_4}{W_1} = \frac{N_1 \cdot N_3}{N_2 \cdot N_4} \quad \text{EC.27}$$

Donde  $E_1$  es el engrane que estará sujeto a él servomotor para inducir al juego de engrane la velocidad de  $2\pi \text{ rad's/seg}$  y con ella lograr obtener la velocidad angular deseada en la salida. Los datos de dicho engrane son ver figura 3.8.

- Numero de dientes = 120.
- Angulo de presión = 14.5.
- Perfil de involuta normal.
- Paso diametral =19.6.
- Radio = 3.1 centímetros.

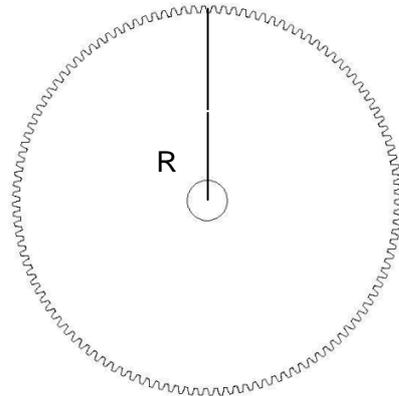


Figura.- 3.8 Engrane E1

E2 es el segundo engrane y está encargado de aumentar la velocidad del engrane inicial y proporcionarla al engrane E3. Los datos para este engrane son los siguientes ver figura 3.9.

- Numero de dientes = 40.
- Angulo de presión = 14.5.
- Perfil de involuta normal.
- Paso diametral =19.6.
- Radio = 1.1 centímetros.

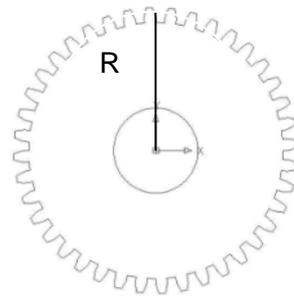


Figura.- 3.9 Engrane E2

E3, el tercer engrane de este juego, recibe la velocidad angular de E2, que es la misma en estos dos engranes por estar unidos en su centro. Éste último aumentará la velocidad de E4 que es el engrane de salida y al cual está sujeta nuestra placa  $\lambda/4$ . Los datos de este engrane son ver figura 3.10.

- Numero de dientes = 210.
- Angulo de presión = 14.5.
- Perfil de involuta normal.
- Paso diametral =29.4.
- Radio = 3.6 centímetros.

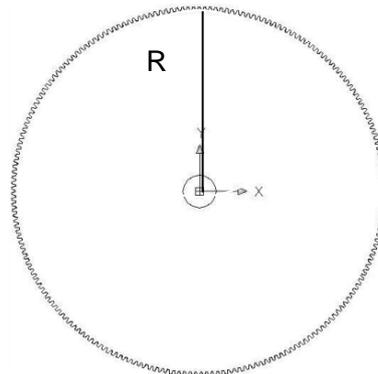


Figura.-3.10 Engrane E3

E4 es el cuarto y último engrane del juego, y al cual esta sujeta la placa  $\lambda/4$  . A este engrane se le trasmite la velocidad angular de  $70\pi rad's/seg$  y permite modular la intensidad del haz de luz. Los datos son ver figura 3.11.

- Numero de dientes = 90.
- Angulo de presión = 14.5.
- Perfil de involuta normal.
- Paso diametral =29.4.
- Radio = 1.5 centímetros.

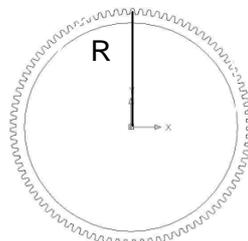


Figura.-3.11 Engrane E4

### 3.3 Diseño de la parte electrónica

Teniendo en cuenta los requerimientos del sistema y los componentes seleccionados, se diseño la electrónica, la cual se puede observar su funcionamiento en el siguiente esquema a bloques ver figura 3.12.

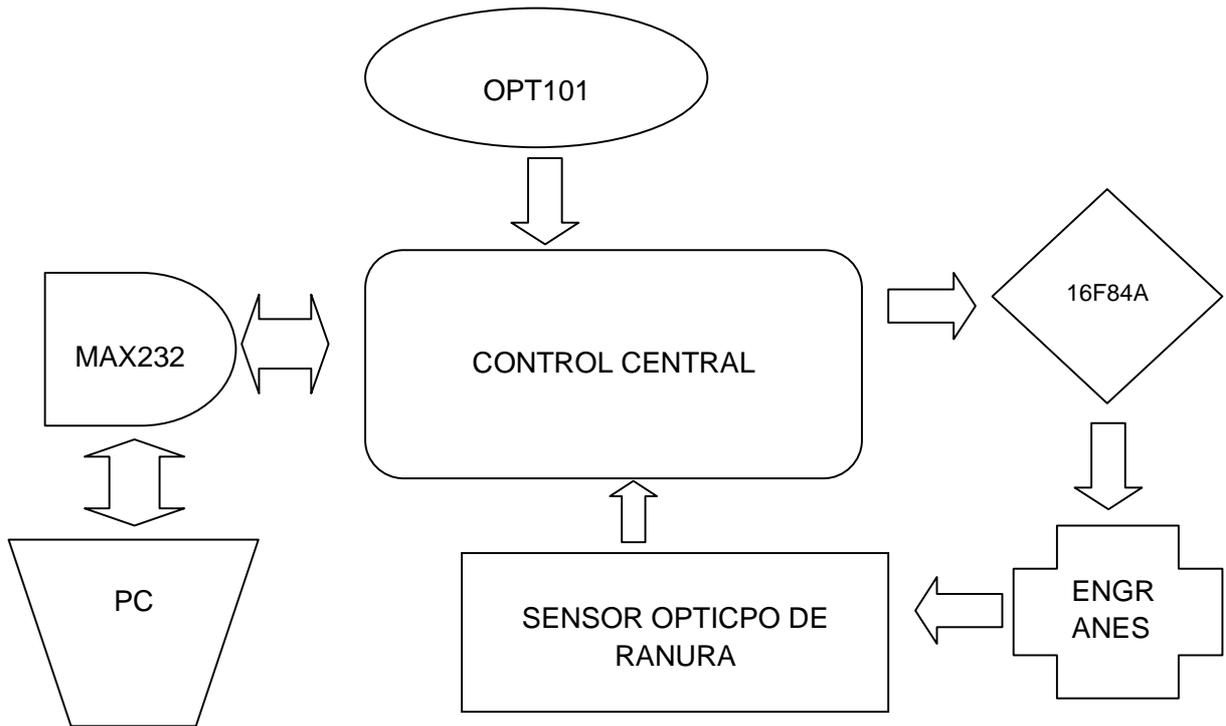


Figura 3.12. Diagrama a bloques de la parte electrónica.

Como se muestra en la Figura. 3.13, donde se observan las conexiones entre los microcontroladores, el fotodetector, el max232 al puerto serial y el servomotor.

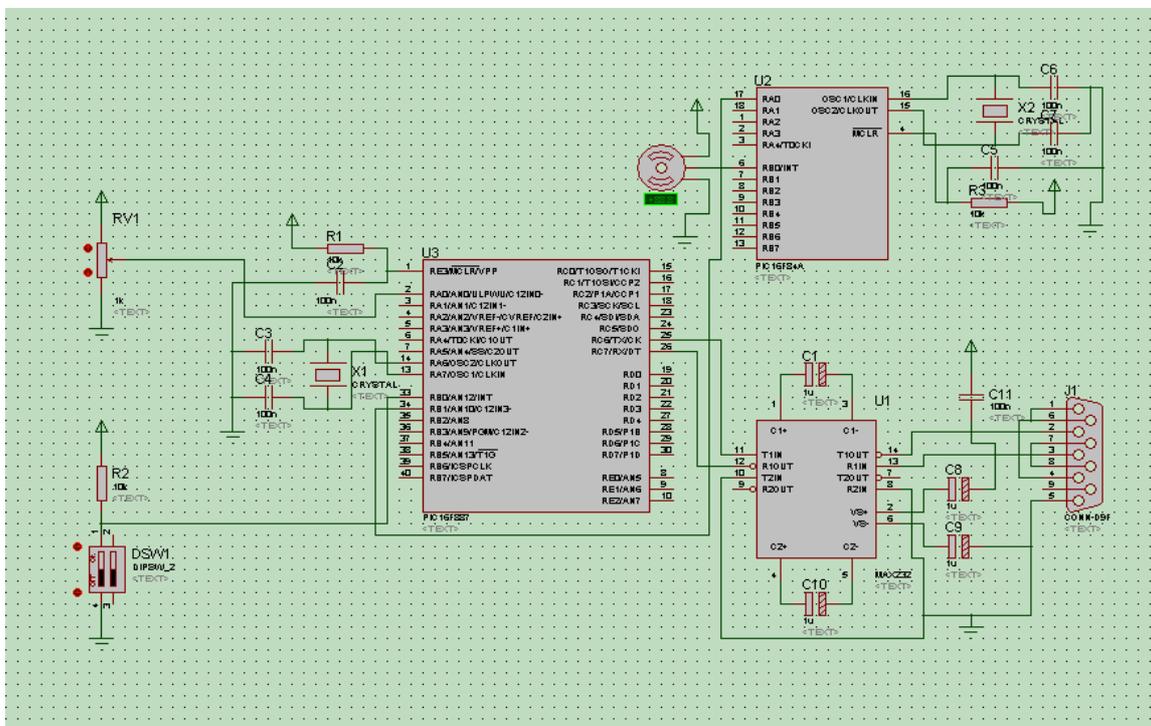


Figura.-3.13. Sistema completo.

Se debe apuntar que en la simulación no se tiene la librería del fotodetector, pero este se comporta al variar el nivel de voltaje dependiendo de la intensidad que hasta llegue de una manera lineal y se toma en cuenta para la simulación como un potenciómetro lineal.

El OPT101 denotado con el potenciómetro registrara el cambio de intensidad de la luz al pasar a través de la placa  $\lambda/4$  la cual esta rotando a la velocidad entregada por el juego de engranes de  $70\pi \text{ rad's/seg}$  o superior dependiendo de la amplitud de el PWM.

El puerto utilizado para que el microcontrolador se comunique con un ordenador es el puerto serie RS232, el cual permite la comunicación con otros dispositivos y es compatible con el estándar RS232 o EIA232 Standard. Esta norma establece el conector DB-9 (con 9 pines), machos y hembras. Para propósitos de este proyecto se utilizó el DB-9 para realizar la comunicación serial entre el microcomputador y el ordenador. La norma RS232 establece los siguientes niveles de voltaje:

- Los datos se transmiten con lógica negativa, es decir, un voltaje positivo en la conexión representa un "0" y un voltaje negativo representa un "1".
- Para garantizar que se tiene un "0" lógico una línea debe mantener un voltaje entre +3 y +15 [V].
- Para garantizar un "1" lógico la línea debe de estar entre -3 y -15 [V].
- Los voltajes usados son +12 para el "0" y -12 para el "1".
- Cuando un puerto serie no está transmitiendo mantiene el terminal de Transmisión a "1" lógico a -12 V, normalmente.
- La región de transición es la banda muerta comprendida entre los valores de +3 V y -3 V aquí los niveles lógicos no están definidos.

El micro central es el encargado de obtener la señal analógica del fotodetector, que después es convertida a una señal digital (discretizada) para poder ser enviada mediante el protocolo USART, para poder ser convertida mediante el max232 y ser enviada al ordenador para su análisis, además de que este tiene el

control sobre el micro de la etapa mecánica que será el encargado de generar el PWM para el control de el servomotor.

Con esto, el micro central, se convierte en el control principal, convertidor y el encargado de enviar dichos datos a través del USART al ordenador.

La conversión de valores TTL a valores que el puerto del ordenador pueda leer, se llevara a cabo por el MAX232 configurado de tal manera que pueda recibir del micro y enviar al ordenador, de forma que también reciba del ordenador y haga la conversión inversa para que el micro principal reciba las instrucciones desde el ordenador.

El diagrama a bloques del sistema electrónico total quedo como se muestra en la siguiente figura 3.14.

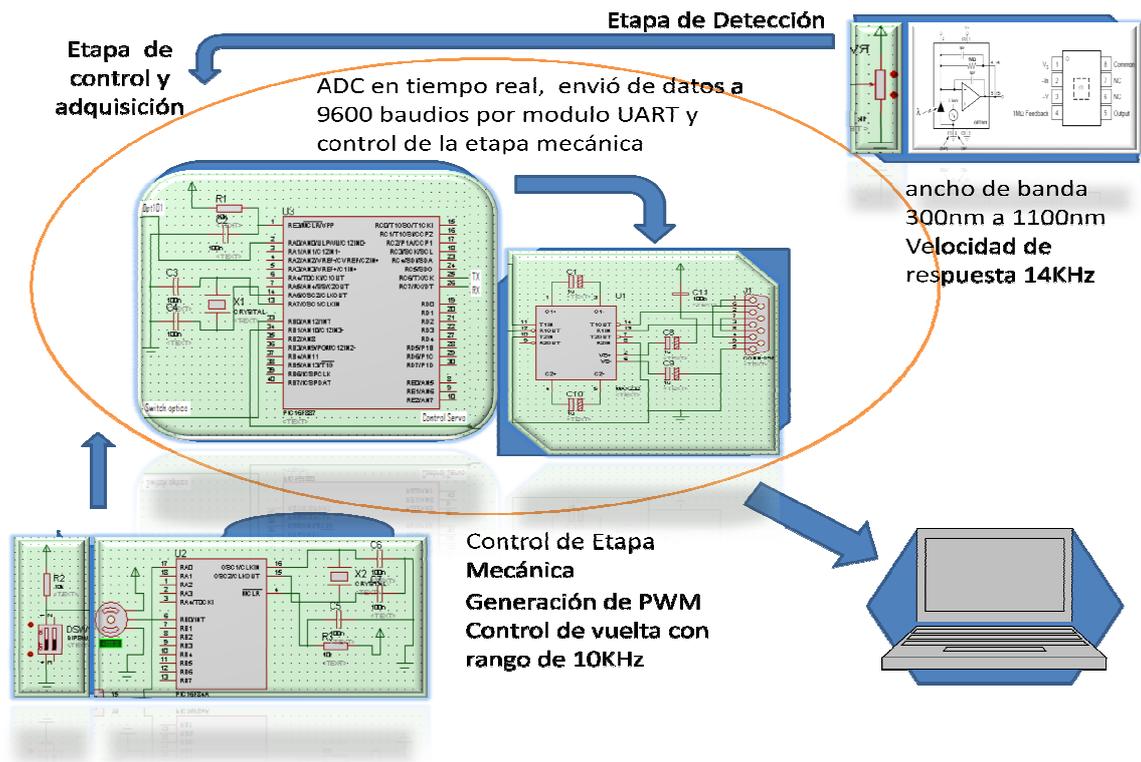


Figura 3.14. Esquema a bloques del sistema electrónico.

Todos los circuitos manejan niveles de voltaje TTL y un consumo de amperaje de 500mA a 1.5 A para su funcionamiento, por consiguiente se diseño también una fuente de voltaje para alimentar el sistema completo y que nos entregue los valores necesarios de voltaje y corriente suficientes, el cual se muestra en la Figura. 3.15.

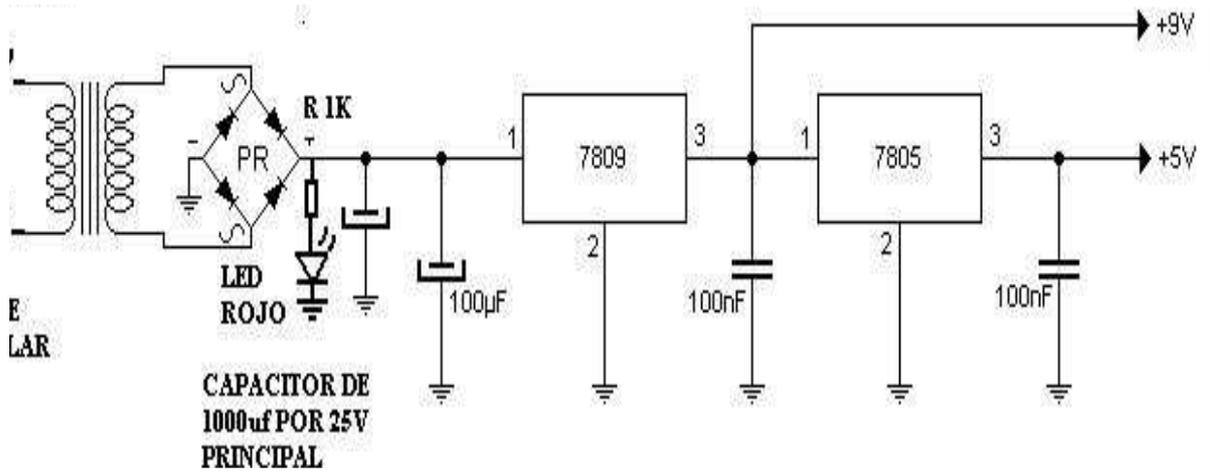


Figura.-3.15 fuente de voltaje del sistema.

### 3.4 Integración de la etapa de modulación y detección.

Los valores de la simulación del sistema y los obtenidos en la experimentación con la utilización del fotodetector se muestran en las siguientes gráficas tanto de valores reales como valores resultado de nuestra simulación; los valores simulados fueron obtenidos mediante el Matlab, en el cual mediante el análisis de Fourier podemos obtener los parámetros de Stokes.

Con esto observamos en las figuras 3.15 y 3.16, la modulación de la señal mediante la placa retardadora, podemos asegurar el funcionamiento correcto del detector para el funcionamiento del instrumento.

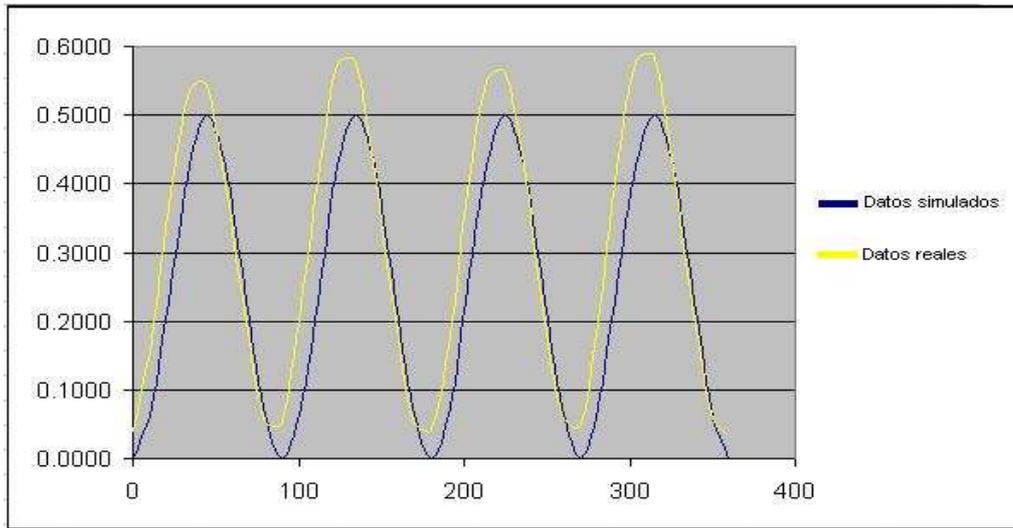


Figura 3.15.- grafica de intensidad en relación a el ángulo de la placa retardadora con un haz con polarización linealmente vertical.

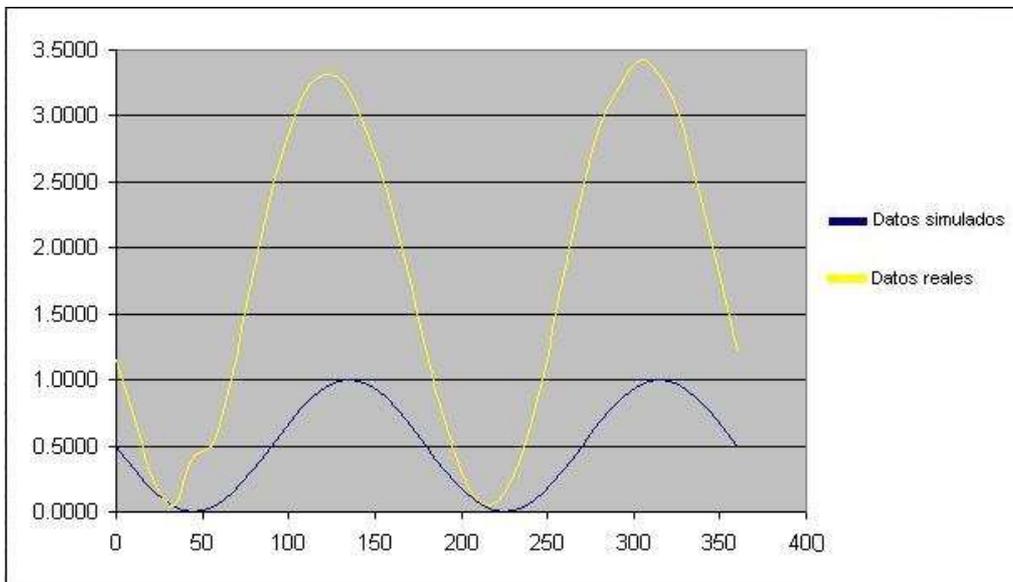


Figura 3.16.- grafica de intensidad en relación al ángulo de la placa retardadora con un haz con polarización linealmente vertical.

Estas mediciones fueron realizadas en condiciones normales de temperatura y presión, con poca luminosidad. Se tomaron promedios de varias mediciones para lograr obtener esos resultados el corrimiento entre la real y la simulada se debe a que en la simulación se tiene valores ideales. En el experimento real, se tiene condiciones diferentes con respecto a los ángulos de refracción y difracción. El cambio en las amplitudes se debe a que los valores reales no fueron normalizados, por ende se ve que las señales se diferencian pero con los valores normalizados se tiene una respuesta eficiente del fotodetector.

# CAPITULO 4

## 4.1 Interfaz

La interfaz es la forma en que los usuarios pueden comunicarse con una computadora, y comprende todos los puntos de contacto entre el usuario y el equipo. Sus principales funciones son:

- Manipulación de archivos y directorios
- Herramientas de desarrollo de aplicaciones
- Comunicación con otros sistemas
- Información de estado
- Configuración de la propia interfaz y entorno
- Intercambio de datos entre aplicaciones
- Control de acceso

### Interfaz gráfica

Se trata del artefacto tecnológico de un sistema interactivo que posibilita, a través del uso y la representación del lenguaje visual, una interacción amigable con un sistema informático.

La interfaz gráfica de usuario (*Graphical User Interface*, 'GUI') es un tipo de interfaz de usuario que utiliza un conjunto de imágenes y objetos gráficos para representar la información y acciones disponibles en la interfaz. Habitualmente las acciones se realizan mediante manipulación directa para facilitar la interacción del usuario con la computadora y es pieza fundamental en un entorno gráfico.

### Implementación en Labview

LabView de la multinacional National Instruments. Labview permite recoger, analizar y monitorizar los datos dentro de un entorno de programación gráfico en el que se ensamblan objetos llamados instrumentos virtuales (Vis) para formar el programa de aplicación con el que interactuará el usuario y que se denomina instrumento virtual.

Además de lo que es la propia representación de los datos en los paneles interactivos que funcionan como si se tratara de instrumentación real, permite múltiples opciones de manejo de datos, como su almacenamiento en disco y compartirlos en red o con otras aplicaciones. La interacción con otras aplicaciones se podrá realizar mediante llamadas a librerías de enlace dinámico (DLL: Dynamic Link Library) e intercambio dinámico de datos (DDE: Dynamic Data Exchange) en modo local o mediante TCP/IP en conexiones remotas. Siempre buscando independencia de la plataforma en la que hayamos realizado nuestra aplicación.

A diferencia de un instrumento real, que podemos tener en cualquier laboratorio o planta de procesos, y que queda perfectamente definido por unos mandos de control y unos elementos de representación, un instrumento virtual estará ligado al concepto de software. Este software se ejecutará en un ordenador que tendrá alojado unos elementos hardware concretos, tarjetas de adquisición de datos (analógicos y digitales), tarjetas de interfaz con los buses de instrumentación y unos canales de control también analógicos y digitales.

El instrumento virtual permitirá manejar ese hardware mediante una interfaz gráfica de usuario (IGU) que se asemejará al panel de mandos de los aparatos habituales. Mediante la representación en pantalla de los elementos gráficos de visualización y control que servirán de interfaz con el usuario, este observará los estados de las entradas seleccionadas en la pantalla e interactuará con las salidas directamente, o mediante la ejecución de las rutinas que se programen.

Básicamente, el software se encargará de comunicar la interfaz de usuario del ordenador con el hardware de adquisición de datos dotando a la aplicación de la funcionalidad requerida.

### Programa de Aplicación

El programa de aplicación, también llamado instrumento virtual, consta de dos partes: interfaz de usuario y funcionalidad de la aplicación

- Una de las funciones básicas será la de obtener datos del hardware de forma transparente al usuario.
- La funcionalidad del programa incluye tratamiento de señal, control del flujo de programa, control de errores, etc....

## 4.2 Panel Frontal

Se trata de la interfaz gráfica del VI con el usuario. Esta interfaz recoge las entradas procedentes del usuario y representa las salidas proporcionadas por el programa. Un *panel frontal* está formado por una serie de botones, gráficos, etc.

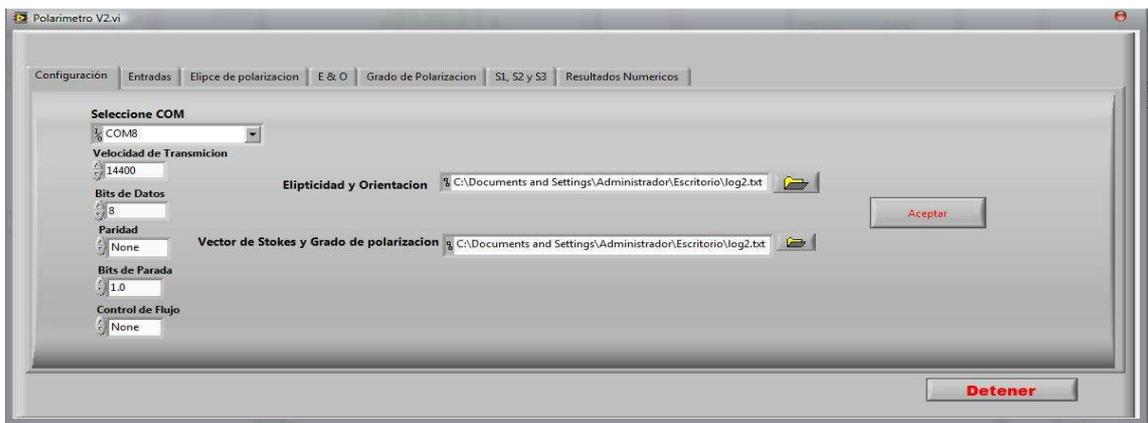


Figura.4.1.- Interfaz gráfica del Procesador de efectos en LabView.

Cada uno de ellos puede estar definido como un *control* o un *indicador*. Los primeros sirven para introducir parámetros al VI, mientras que los indicadores se emplean para mostrar los resultados producidos, ya sean datos adquiridos o resultados de alguna operación.

### 4.2.1 Controles.

En el panel frontal se tiene el control de la ruta en la cual se guardarán los Data log. En la Fig.4.1 se tiene la primera ubicación a especificar donde se guardara un archivo .txt con los valores obtenidos del Vector de Stokes y el grado

de polarización de la luz. Se especifica la ruta donde se guardará el segundo Data log pero en extensión .xls con los valores de elipticidad y el ángulo de orientación.

Además de tener controles de selección, se tienen controles con botones los cuales tienen las siguientes funciones:

- iniciar: con pulsar este botón comienza la lectura de los datos y su posterior análisis mediante el cálculo para obtener los resultados que se visualizarán en los indicadores.
- Guardar Vector de Stokes y Grado polarización: al pulsar este botón y activarlo se genera el primer Data log en extensión .txt, con los valores de los resultados obtenidos marcados y bien definidos con la fecha y hora del muestreo según el reloj de la máquina.
- Guardar E y O: con este botón inicia el proceso de guardado de los valores de elipticidad y ángulo de orientación con la diferencia que este se guarda en un data log de extensión .xls.



Figura. 4.2.- Botones de control general.

#### **4.2.2 Indicadores.**

Al igual que los controles también se tienen indicadores alfanuméricos los cuales muestran, los valores obtenidos mediante el cálculo y procesamiento de la señal que se obtiene. En las figuras siguientes se visualizara numéricamente el valor de los elementos del vector de Stokes y los parámetros de ángulo de orientación, elipticidad, grado de polarización y si la luz esta polarizada.



Figura. 4.3. Indicadores numéricos Vector de Stokes, ángulo de orientación y elipticidad.



Figura. 4.4. Indicadores numéricos grado de polarización, circular, lineal y si la luz es polarizada.

Al igual de los indicadores alfanuméricos también tenemos, indicadores gráficos los cuales muestran los siguientes parámetros.

- Estado de polarización: en esta pantalla muestra el estado de polarización de la luz (figura 4.5).
- Elipticidad: esta gráfica muestra las variaciones de la elipticidad con respecto al tiempo de muestreo (figura 4.6).
- Angulo de orientación: muestra las variaciones del ángulo de orientación con respecto al tiempo (figura 4.6).

- Elementos del vector de Stokes: muestra cómo se comportan los elementos del vector de Stokes en el tiempo (figura 4.7).
- Intensidades: esta grafica muestra los valores de intensidades digitalizadas en la entrada del puerto y muestra la modulación de la señal estudiada (figura 4.5).

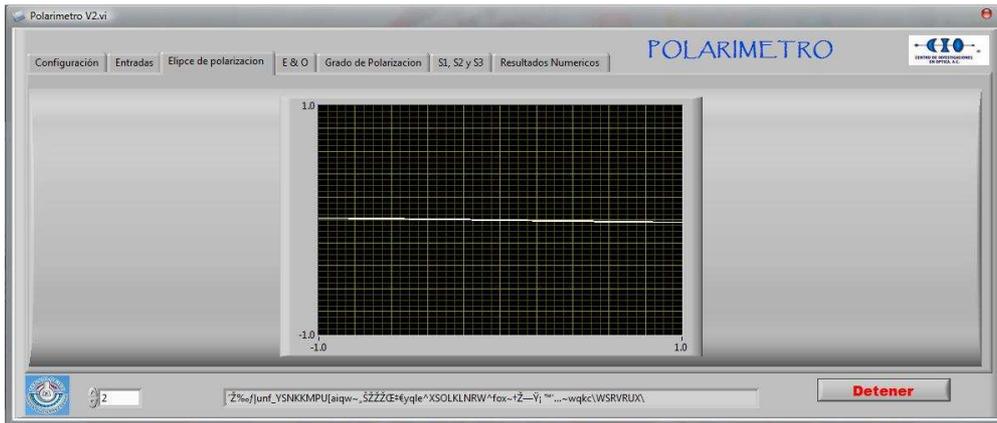


Figura. 4.5. Indicadores gráficos elipse de polarización.

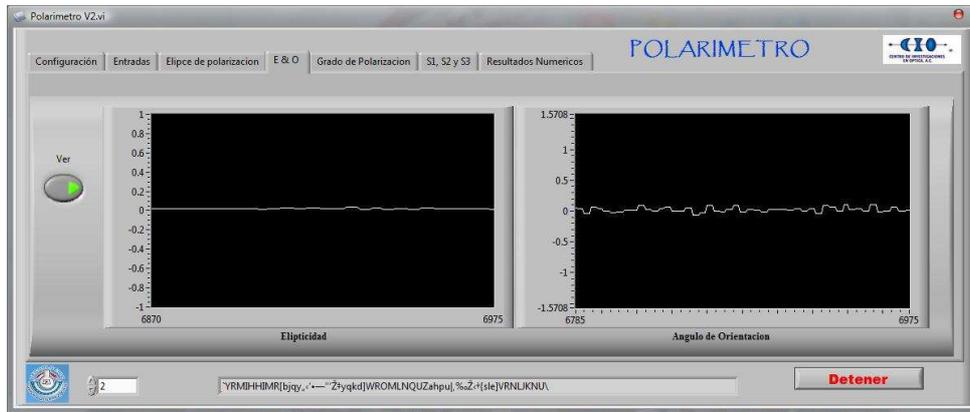


Figura. 4.6. Indicadores gráficos ángulo de orientación y elipticidad.

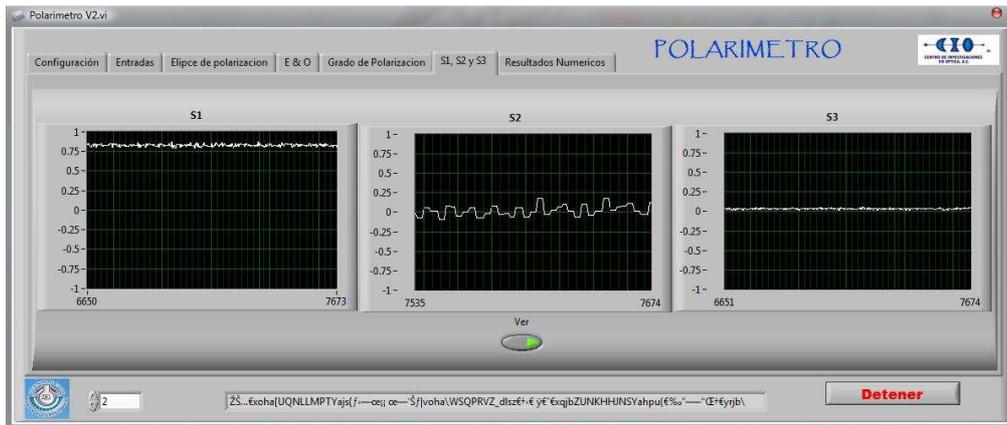


Figura. 4.7. Indicadores gráficos elementos del vector de Stokes S1, S2 y S3.

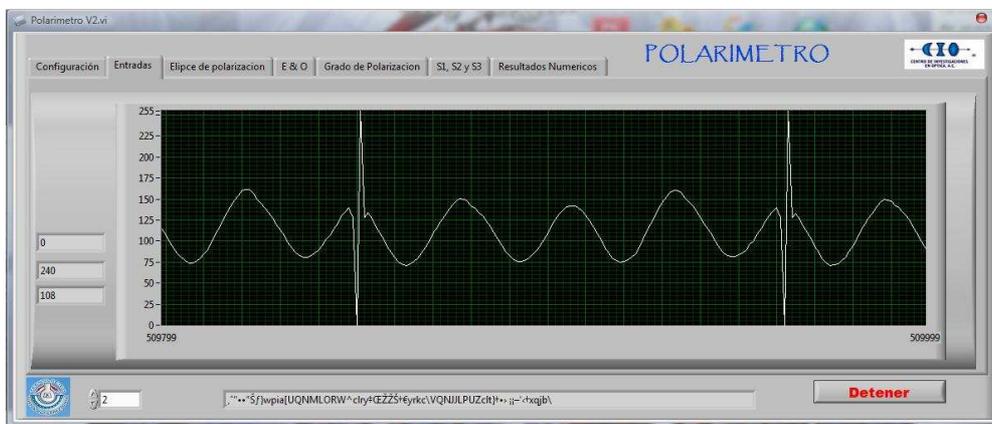


Figura. 4.8. Indicadores gráficos señal muestreada.

### 4.2.3 Instrumentos virtuales

Diversos Instrumentos Virtuales (VI) diseñados mediante lenguaje de programación gráfica LabVIEW, cumplen con tareas de control, adquisición y recolección de los datos de radiación y su intervalo correspondiente de longitud de onda. Se adquieren 1280 datos/s y el sistema ha sido configurado para un tiempo de adquisición de 1 segundo por intervalo de longitud de onda. Los datos adquiridos se procesan y su resultado se guarda en el disco duro del PC, en formato texto o en formato xls según la elección del usuario. Para la visualización de este proyecto se usa como herramienta el software de National Instrument; LabVIEW el cual posee una librería de interfaz simple para controlar VXI, GPIB, RS-232 llamado VISA. El estándar VISA unifica la industria para hacer software

que pueda ser interpretado y usado por más tiempo, sin importar el tipo de operación de su instrumento. El Módulo Datalogging and Supervisory Control (DSC) de National Instruments es la mejor manera de desarrollar interactivamente sus sistemas distribuidos de monitoreo y control. Con el Módulo LabVIEW DSC, usted puede extender su aplicación de LabVIEW para ver datos históricos y en tiempo real, configurar y administrar alarmas y eventos, establecer seguridad a sus aplicaciones.

### 4.3 Panel posterior de la interfaz grafica

La descripción del panel posterior de la interfaz grafica, está constituida de algunas funciones predeterminadas de LabView, para el tratamiento de la señal adquirida mediante la electrónica desarrollada. En la figura 4.9 se puede observar a grandes rasgos los componentes principales del programa principal.

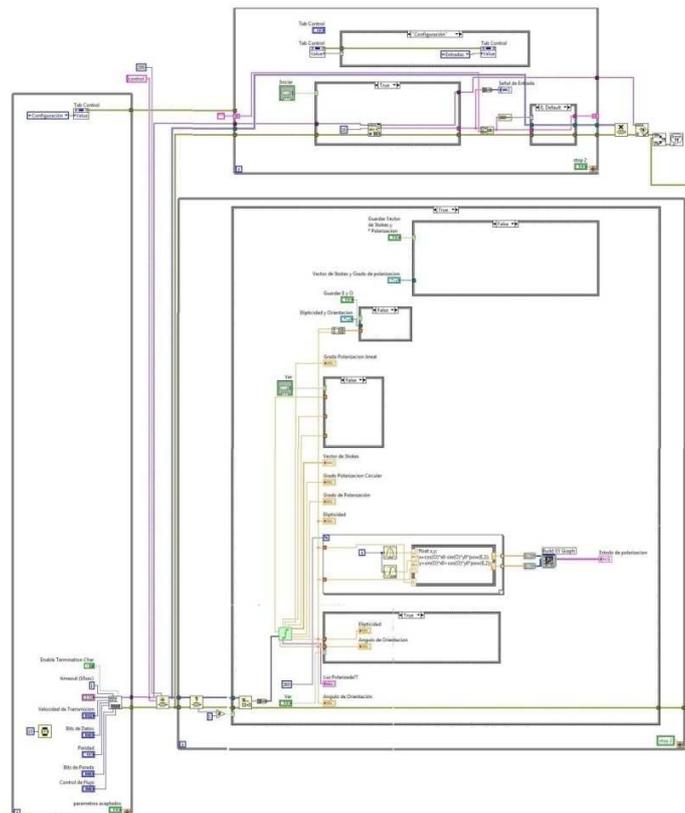


Figura. 4.9. Panel posterior

Para comenzar la descripción del programa se describe brevemente lo que es el control de las pestañas del panel frontal. Este control da la confiabilidad de tener una pestaña de configuración, a la cual solo se ingresara para configurar los detalles de la sesión visa y los directorios donde se guardaran los datalogger's que maneja el programa. En la figura. 4.10 se observa el control de las pestañas.

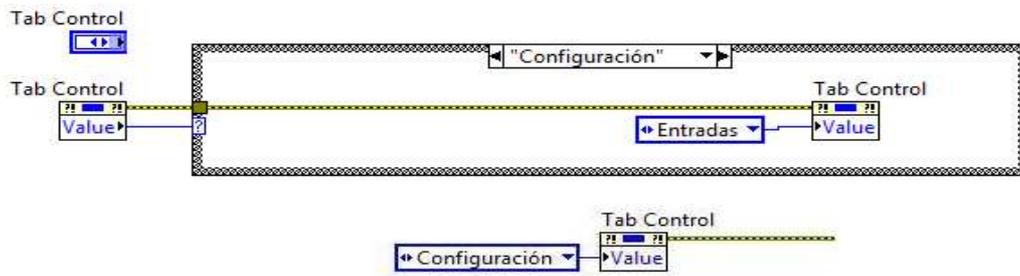


Figura. 4.10 Tab control.

Iniciamos la sesión visa para tener acceso a los datos que llegan al puerto serie de la computadora, estos controles se muestran en el panel frontal para su fácil acceso y modificación según se requiera. El inicio de la sesión se realiza en un ciclo para configurar y aceptar los datos de configuración y así estos queden en la pestaña de configuración y no se accede a ellos solo al reiniciar la aplicación.

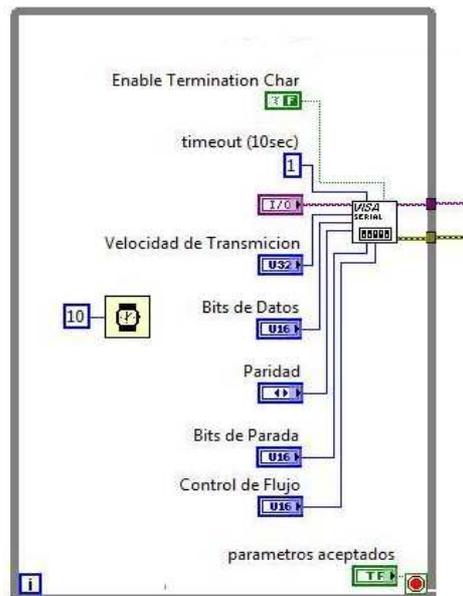


Figura. 9.11.- Sesión de visa.

Al igual de la inicialización de la sesión visa, se inicializa la función Queue la cual dará la facilidad de tratar los datos por cadenas de un número determinado de elementos, para no tener la perdidas en el procesamiento de los datos.

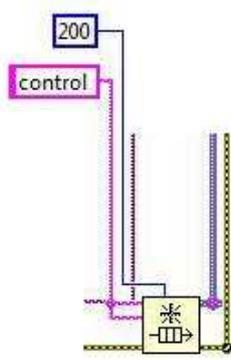


Figura.9.12.- inicio de función Queue

Después del inicio de las funciones principales y las cuales darán estabilidad en el proceso de tratado y análisis de la señal, se procede a leer los datos del puerto serie los cuales serán concatenados para lograr una cadena de valores medidos. Estos datos concatenados son enviados a un elemento queue que recibirá los datos hasta que se tenga un determinado número de ellos para ser procesado en la siguiente parte del programa. Como se puede observar en la fig.4.13.

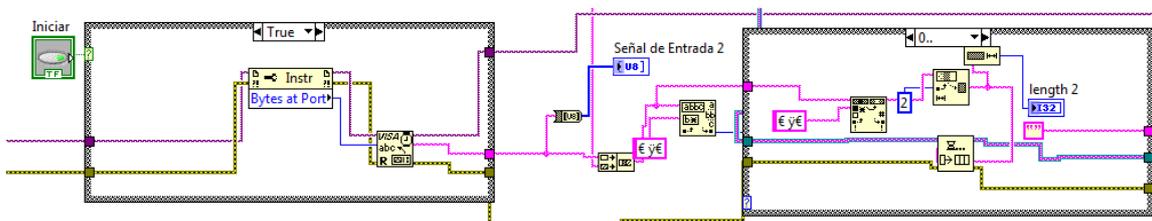


Figura.4.13.- lectura de datos del puerto, concatenación de datos y guardado en el queue.

En la parte del programa de análisis de los datos se tiene el dequeue que entregará la cadena de datos con tamaño determinado por la primera parte del programa, se analizará y se determinará mediante los match pattern el inicio y final de una vuelta en las mediciones, se obtendrá la cadena de valores de esa vuelta y

se enviará a la parte del programa de cálculo en la cual se tratarán dichos valores y el cual nos arrojará los resultados para ser mostrados en el panel frontal.

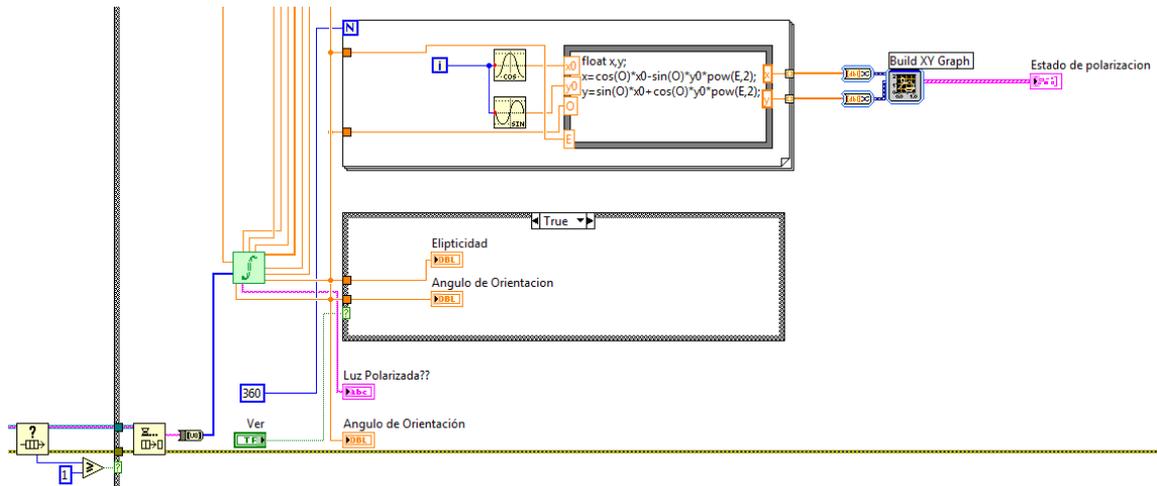


Figura. 4.14.- entrega de la cadena de valores, análisis e ingreso a la subrutina de cálculos.

La subrutina llamada Segunda parte es la encargada del cálculo con la cadena de datos que es enviada desde la función match pattern. A esta subrutina sólo se le ingresa la cadena de datos previamente convertida en un arreglo de datos para su manejo eficiente en la subrutina y la cual entregará los datos que se ven en la figura 4.15.

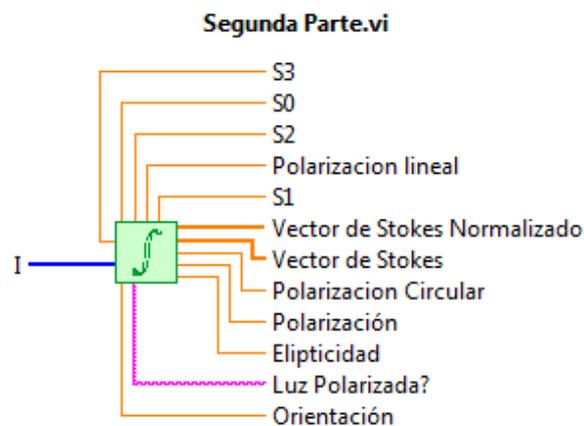


Figura. 4.15 SubVi encargado del análisis matemático de la señal muestreada.

El Subvi está conformado por tres etapas principales que se describirán a continuación.

- ❖ Primera etapa: arreglo con las mediciones de intensidad y determina el valor máximo para normalizar. Realiza los cálculos solicitados: Series de Fourier Truncadas (figura 4.16).
- ❖ Segunda etapa: Calcula los valores  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$ , con los coeficientes de la serie de Fourier de las intensidades ya normalizadas.(figura 4.17)
- ❖ Tercera etapa: Calcula lo orientación, Polarización y Elipticidad, y su envío a las salidas del Subvi. (figura 4.18).

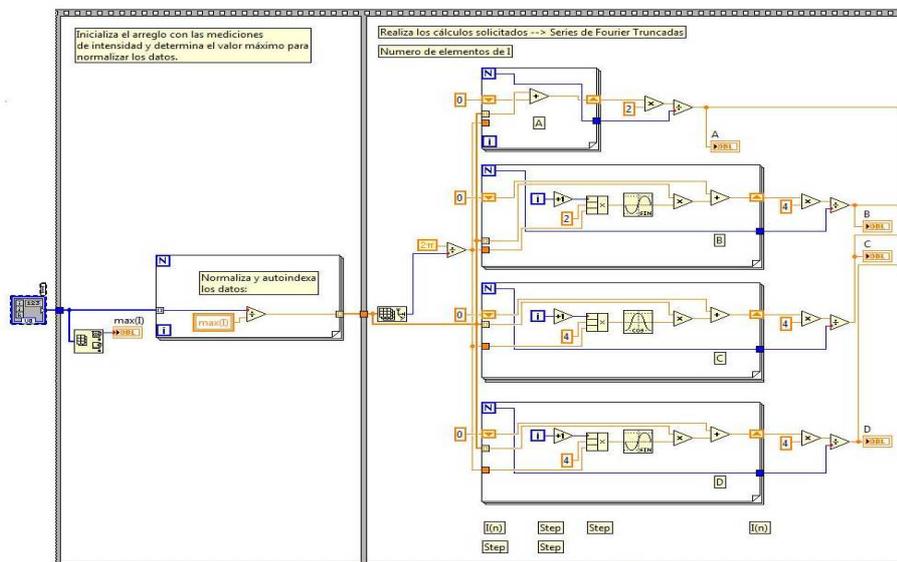


Figura 4.16 Primera etapa del Subvi.

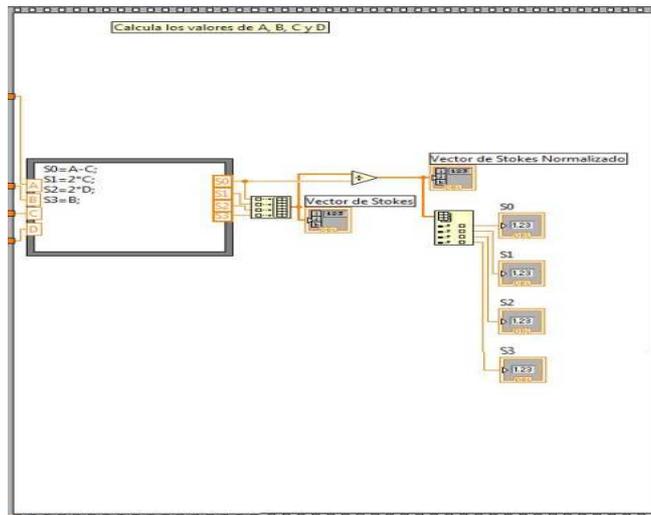


Figura 4.17 Segunda etapa del Subvi.

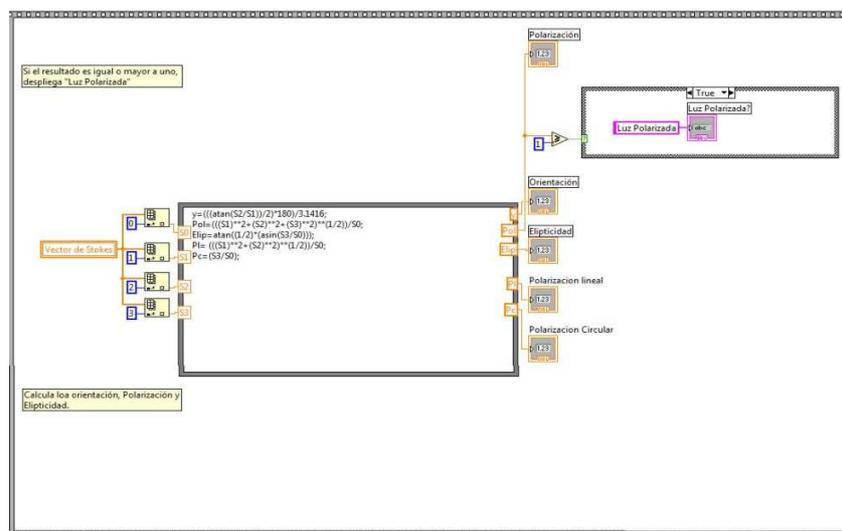


Figura 4.18 Tercera etapa del Subvi.

Los resultados obtenidos de la subrutina son los que se tratan en la última etapa del programa donde serán enviados a indicadores numéricos y gráficos para su observación en la parte frontal del panel. Además de los indicadores también tenemos los datalogger's en los cuales se guardaran estos resultados para un análisis posterior.

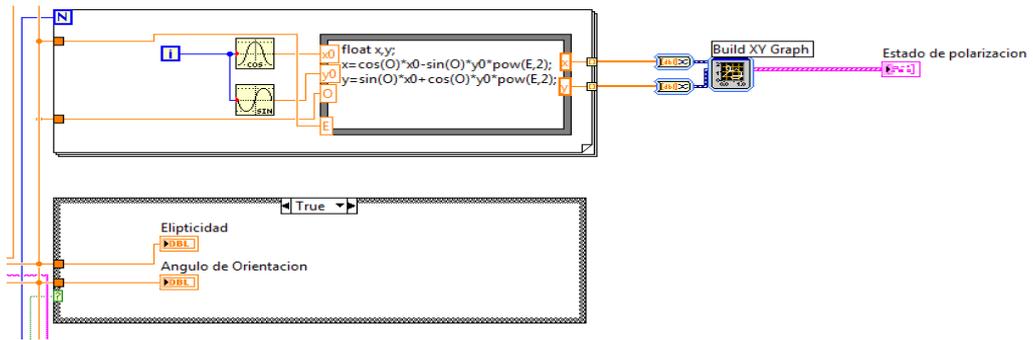


Figura 4.19 Indicadores gráficos.



Figura 4.20 Indicadores numericos.

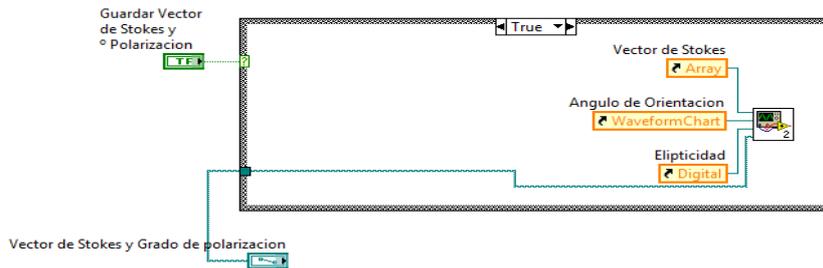


Figura 4.21. Datalogger en extensión .txt.

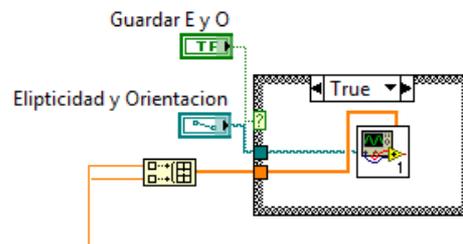


Figura 4.22. Datalogger en extensión .xls.

# CAPITULO 5

## 5.1 Resultados

A continuación tenemos una comparación de resultados obtenidos con el instrumento en condiciones normales de temperatura y presión en el laboratorio donde la iluminación no afecta las mediciones ya que la luz no afecta al fotodetector.

Se muestran tres resultados los cuales son, la polarización lineal horizontal, polarización elípticamente a  $45^\circ$  y polarización circular. Estos tres resultados comparados con resultados obtenidos en la simulación del sistema en matlab reflejan la eficacia del instrumento.

Cabe señalar que los indicadores de inicio y final de un giro completo son los picos más sobresalientes dentro de las intensidades que se muestran en las imágenes.

Polarización lineal horizontal.

En la siguiente figura 5.1 se observa como debe ser la señal de la intensidad con una polarización lineal.

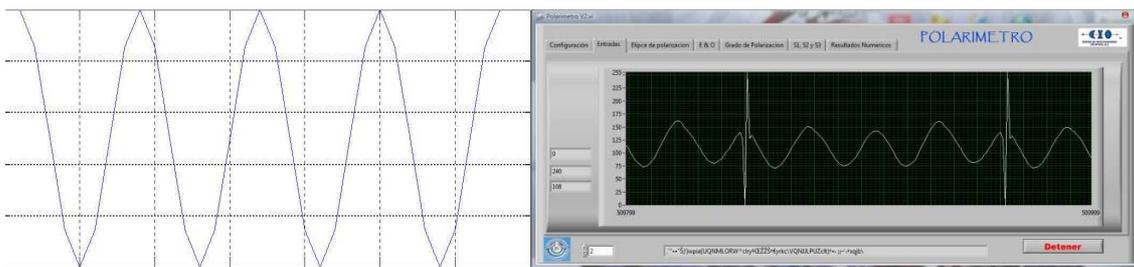


Figura 5.1.- Comparación de intensidades simuladas y reales.

Como se puede observar la señal que se obtiene en la simulación y la que se está obteniendo del sistema es congruente y parecida en un porcentaje alto las diferencias que pueden existir tanto en las reales como las simuladas son debido a

que los datos simulados son ideales y en el instrumento se manejan elementos reales los cuales por sus características no son ideales.

Ahora compararemos la elipse de polarización como se muestra en la figura 5.2.

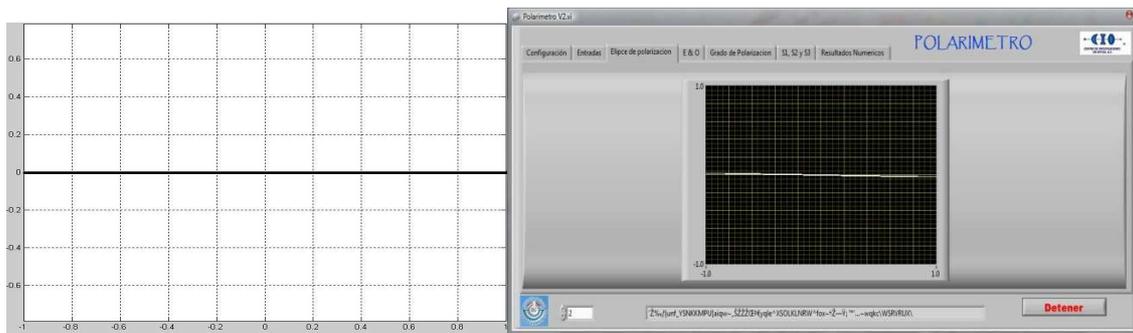


Figura 5.2.- comparativo de la elipse de polarización simulada y obtenida.

En este comparativo podemos ver que el resultado obtenido es bastante bueno, ya que se tiene una polarización lineal horizontal, de la misma manera que como la simulación.

En la siguiente comparativa analizan los resultados del Vector de Stokes, ángulo de orientación y elipticidad.

---

---

```
Ingrese valor de S0: 1
Ingrese valor de S1: 1
Ingrese valor de S2: 0
Ingrese valor de S3: 0
La elipticidad y el angulo de orientacion del haz incidente son:
e          Zeta(expresada en radianes)
0          0
```

---

---

Los resultados obtenidos en el instrumento de los componentes del vector de Stokes se ven en la figura 5.3.

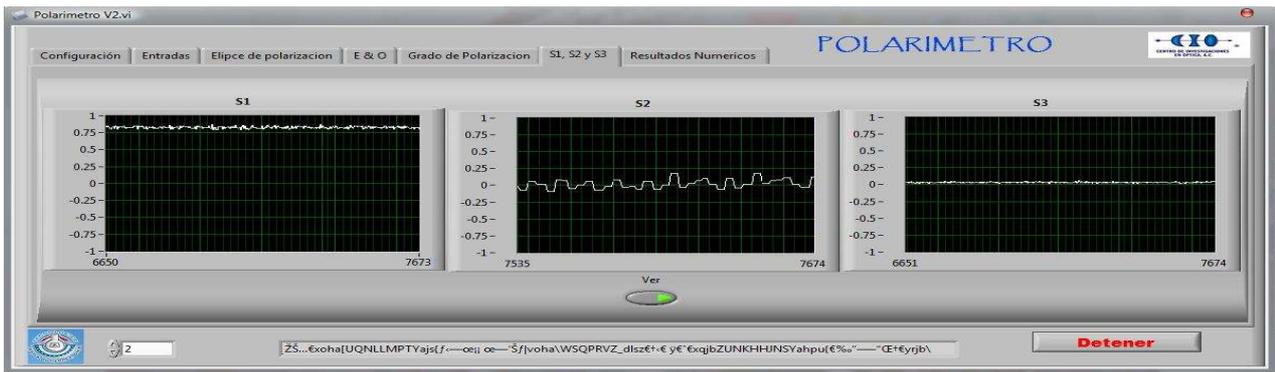


Figura 5.3.- Elementos del Vector de Stokes en el tiempo.

Como se puede visualizar el comportamiento de los tres elementos del vector es parecido a los valores de la simulación, y se mantienen estables con un ligero juego que tiene su origen en la parte mecánica pero que son valores estables y consistentes al estado de polarización que describen, como nota no se presenta el elemento S0 ya que teniendo una polarización con grado de polarización estable este valor siempre será 1.

Como ultimo comparativo se tienen las graficas del ángulo de orientación y la elipticidad del estado de polarización contra el tiempo. Ver figura 5.4.

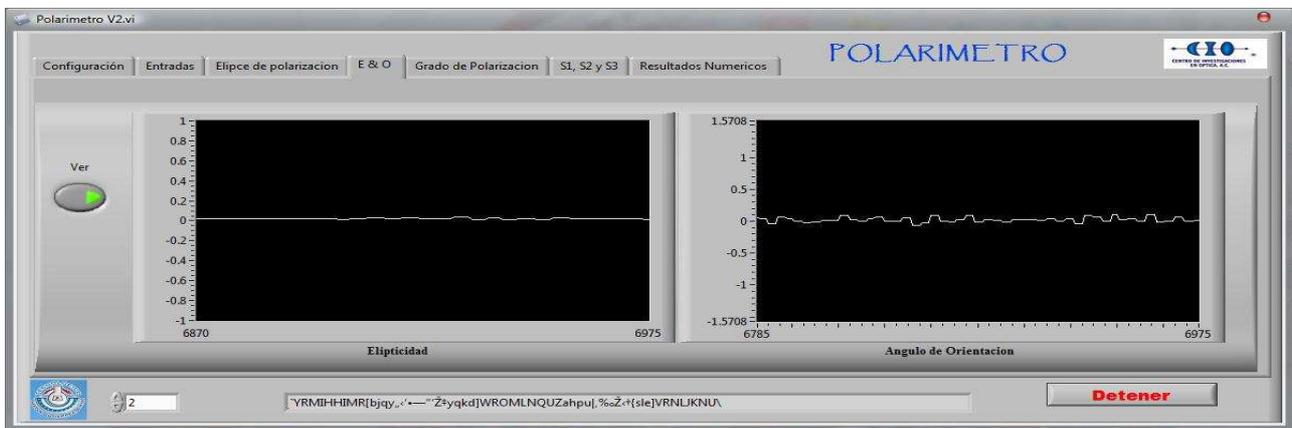


Figura 5.4.- Elipticidad y ángulo de orientación contra tiempo.

Polarización elíptica a  $+45^\circ$ .

Ahora la comparación de intensidades pero de una polarización elíptica a  $+45^\circ$ , que se observa en la figura 5.5..

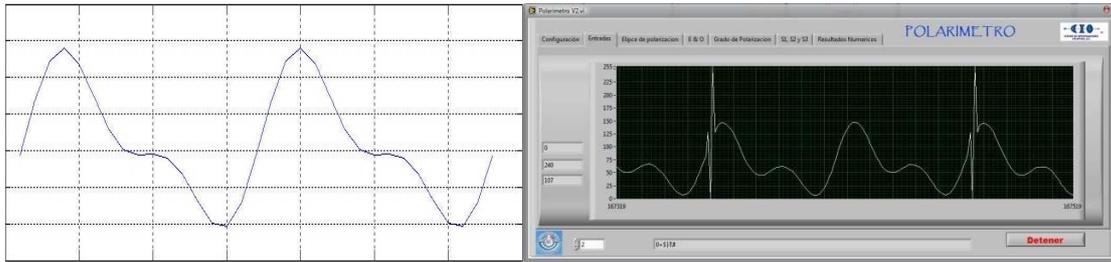


Figura 5.5.- Comparación de intensidades simuladas y reales.

Como se puede observar se tiene una modulación y recepción de datos reales bastante buena comparada con la simulación del sistema.

Ahora comparando la elipse de polarización en la simulación y la obtenida como se ve en la figura 5.6.

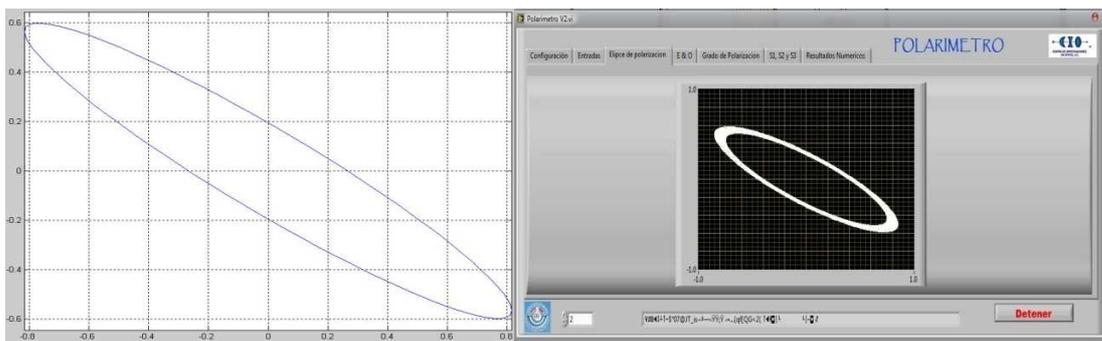


Figura 5.6.- Comparación de la elipse de polarización simuladas y reales.

Como se puede observar se tiene una correspondencia muy buena en cuando a la elipse real con la simulada.

Se tienen los valores simulados para obtener una polarización elíptica a + 45°.

---

```

Ingrese valor de S0: 1
Ingrese valor de S1: -.25
Ingrese valor de S2: .75
Ingrese valor de S3: -.75
La elipticidad y el angulo de orientacion del haz incidente son:
    e          Zeta(expresada en radianes)
-0.3989      -0.6245
  
```

---

En la figura 5.7 se comportan los elementos del vector de Stokes.

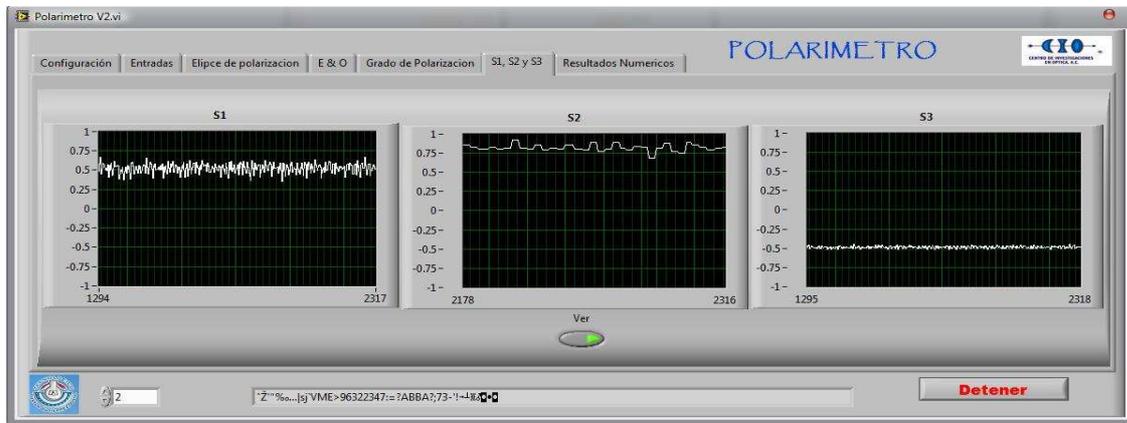


Figura 5.7.- Elementos del Vector de Stokes en el tiempo.

Como se puede visualizar se tiene una correspondencia bastante buena y una estabilidad relativamente aceptable para el instrumento.

Por último comparativo las graficas del ángulo de orientación y la elipticidad del estado de polarización contra el tiempo en la figura 5.8.

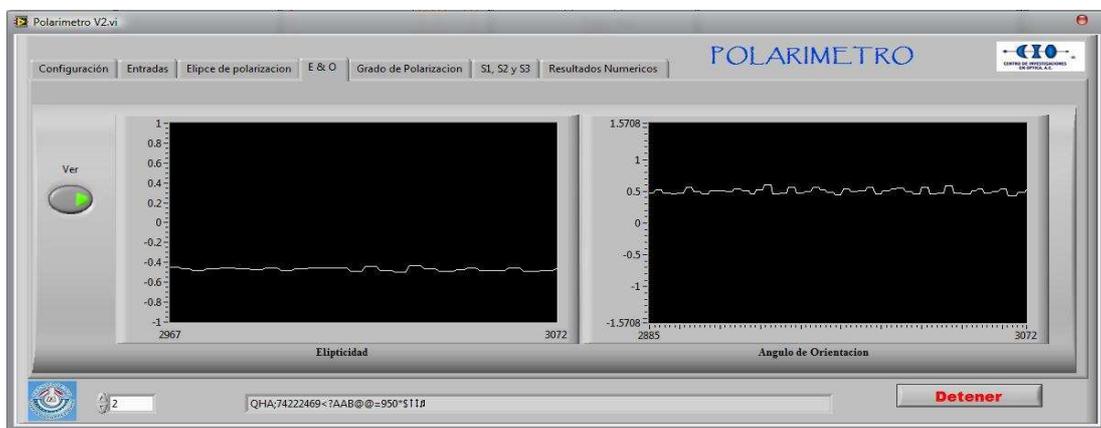


Figura 5.8.- Elipticidad y ángulo de orientación contra tiempo.

Al igual que la polarización lineal horizontal en esta se observa la estabilidad en la medición y que el resultado es fiable.

## Polarización circular.

La comparación de la señal de la intensidad obtenida, con una polarización circular figura 5.9.

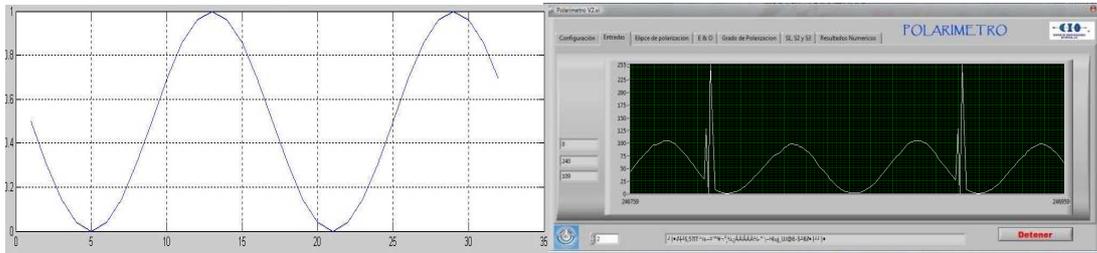


Figura 5.9.- Comparación de intensidades simuladas y reales.

Como podemos se observa las intensidades obtenidas en la simulación como las obtenidas con el instrumento son parecidas y con ellas se tiene un buen análisis de la señal para obtener resultados fiables en la medición.

Comparando la elipse de polarización de una simulación y la obtenida en la medición, figura 5.10.

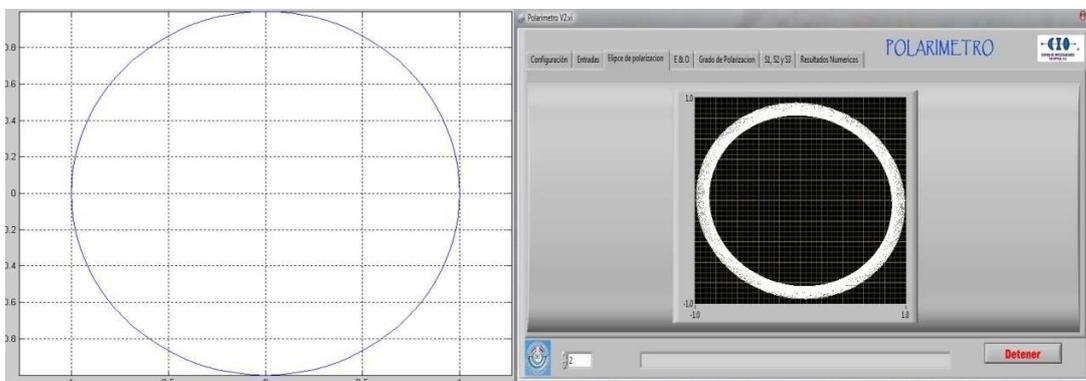


Figura 5.10.- Comparación de la elipse de polarización simuladas y reales.

### Analizando los resultados simulados en la polarización circular.

---

```
Ingrese valor de S0: 1
Ingrese valor de S1: 0
Ingrese valor de S2: 0
Ingrese valor de S3: 1
La elipticidad y el angulo de orientacion son del haz incidente:
e      Zeta(expresada en radianes)
1.0000      0
```

---

Comparando los valores obtenidos mediante la simulación y los obtenidos en los indicadores gráficos de la interfaz se tiene que los elementos del vector de Stokes se comportan de la siguiente de manera, ver figura 5.11.

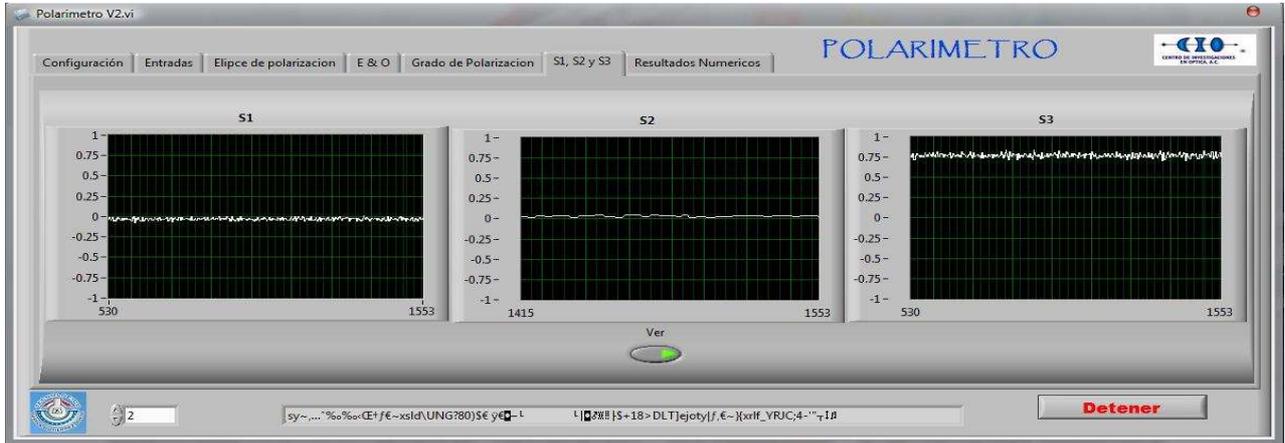


Figura 5.11.- Elementos del Vector de Stokes en el tiempo.

Ahora comparando el ángulo de orientación y la elipticidad de esta polarización circular según lo que nos muestra nuestra interfaz figura 5.12.

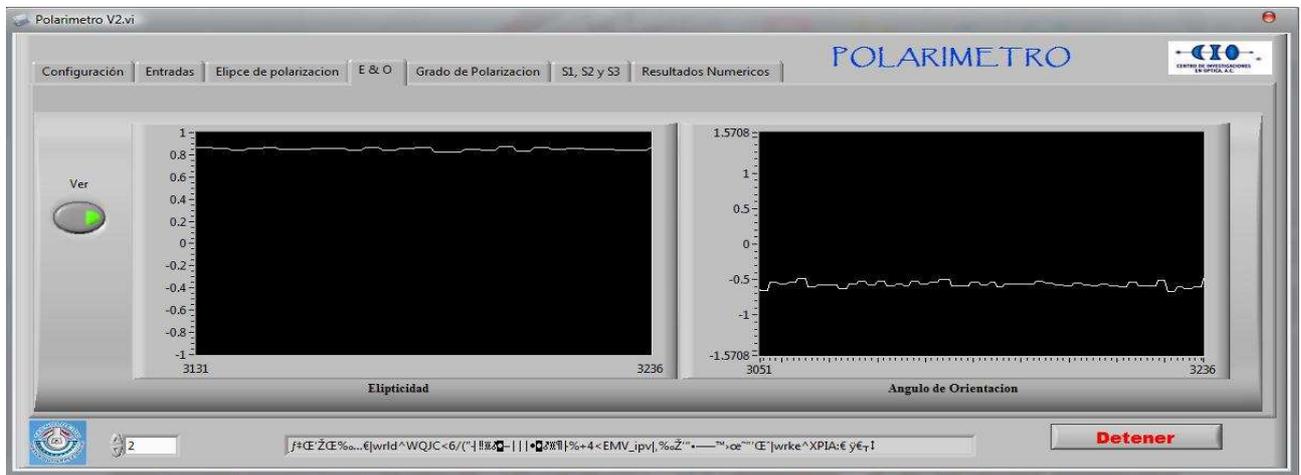


Figura 5.12.- Elipticidad y ángulo de orientación contra tiempo.

Como se puede observar el comportamiento tanto de los elementos del vector de Stokes, ángulo de orientación y elipticidad, se mantienen estables con

respecto al tiempo, y muestran valores aceptables para ser tomados como mediciones buenas reales.

En la figura 5.13. Se muestra el instrumento realizando mediciones en tiempo real en condiciones normales.

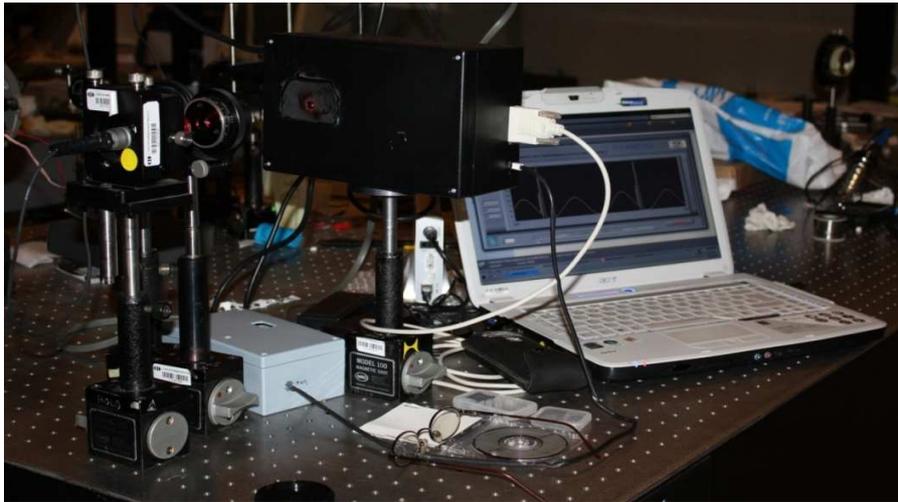


Figura 5.16.- Polarímetro.

## Conclusiones

En el desarrollo del proyecto se determinó el estado de polarización, de un haz de luz coherente con la modulación de su intensidad en un conjunto de elementos ópticos, también se logró tener resultados lo suficientemente estables y confiables. Con esto logramos determinar que el instrumento tiene un margen de error en la medición de 10% debido al problema de juego de un engrane en la etapa mecánica el cual no es sistemático, con lo cual para la eliminación y tener un margen de error menor a 1% se necesitaría rediseñar la parte mecánica de el instrumento.

El tratamiento de los datos adquiridos fue utilizando un instrumento virtual llamado LabVIEW. El utilizar la tarjeta diseñada para el instrumento, hace que la interfaz desarrollada en LabVIEW hace que los resultados son eficientes y no se tenga pérdida de datos en el tratamiento de la señal. Con el cual los resultados obtenidos en las mediciones son ciertamente fiables para el estudio que se lleve a cabo en el laboratorio.

También se demostró que la teoría acerca de los elementos ópticos con la teoría y tratamiento de la señal mediante la serie de Fourier, son buenas en un porcentaje alto y que los detalles de fidelidad de la idealidad de los elementos puede ser descartada, ya que con el estudio demostramos que estos errores están abajo del rango aceptable para un instrumento eficaz.

En el transcurso del proyecto se logró entender en cierta medida el comportamiento de la fuente de luz y la teoría acerca de su comportamiento estadístico para el análisis de los estados de polarización, también de poder visualizar como los parámetros de la polarización cambian con respecto a el tiempo y como se modifican con diferentes materiales ópticamente activos.

## Mejoras.

Los sistemas descritos en el trabajo pueden ser mejorados para un mayor nivel de eficiencia entre los cuales se destacaran los más importantes para una mayor fiabilidad en la medición del instrumento.

- Sistema óptico: compuesto por un filtro atenuador, una placa giratoria de un cuarto de onda y un polarizador fijo, algunas consideraciones para el mejoramiento de esta parte primordial del sistema total son las siguientes:
  - Complementar el sistema con un polarizador más giratorio para una mayor precisión en la modulación de la señal.
  - Agregar un amplificador entre el filtro y la placa retardadora para poder medir intensidades bajas de señal.
- Sistema electrónico: conformado por el fotodetector, la tarjeta de control y adquisición, un servomotor de giro continuo, un detector de vuelta y el convertidor a serial, parte medular del sistema completo al cual se pueden hacer las siguientes mejoras para un optimo desempeño del instrumento:
  - Reemplazo de un micro con mayor rapidez de procesamiento y flexibilidad de comunicación con el ordenador.
  - La utilización de un servomotor con mayor velocidad y torque.
- Sistema mecánico: conformado principalmente por un juego de 4 engranes, para lograr una velocidad de salida lo suficientemente rápida para obtener las muestras suficientes en un tiempo corto:

- Debido a los problemas con ellos una mejora sería el diseño de engranes que puedan tener las especificaciones necesarias para su fabricación local.
- Diseño de las partes de donde se montara con mayor facilidad los nuevos engranes, para eliminar el ruido y atasque de los mismos.
- Utilización de engranes de acrílico para un mejor manejo de los mismos.
- Interfaz grafica: última pieza del instrumento, pero no por ende carente de la importancia que se le da, diseñada para que la comunicación instrumento usuario sea más amigable, con controles fácil de localizar gráficas y botones para el guardado e inicialización de análisis de los datos:
  - Añadir funciones especiales a la interfaz para hacerla más amigable a el usuario.
  - Agregar la opción de observar la esfera de Poincaré´.

## Referencias

- [1] Láser Hand Book, Metrologic Instrumnet Inc. New Jersey 1981.
- [2] Eisberg, R. "Física" Vol. II. Editorial McGraw-Hill. Madrid 1984. □
- [3] Finn, E. "campos y Ondas". Vol. II. F.E.I. México 1976.
- [4] Halliday, R. "Física" Vol. II. Editorial Continental.
- [5] Mckelvey, S. "Física" Vol. II. Editorial Harla. México.
- [6] P.S.S.C. "Física" Editorial Bedout. Medellín 1960.
- [7] Tipler, P. "Física" Vol. II. Editorial Reverté. Madrid 1980.
- [9] A.Gerard, J.M.Burch, "Introduction to matricial methods in optics", 1975.
- [11] J.Lee, J.Koh, R.W.Collins, "Multichanel Mueller matriz ellipsometer for real-time
- [12] A. Luis y L. L. Sánchez-Soto, Progress in Optics 41 (2000) 421
- [13] A. Luis, Phys. Rev. A 66 (2002) 013806
- [14] A. Luis, Opt. Commun. 216 (2003) 165
- [15] Polarization of Light, S. Huard, Wiley
- [16] Polarized Light, D. Goldstein, Marcel Decker
- [17] Polarized Light, C. Brosseau, Wiley
- [18] Handbook of Ellipsometry, H. G. Tompkins, William Andrew Publ.
- [19] Ellipsometry and Polarized Light, R.M.A. Azzam and N.M. Bashara, North Holland
- [20] Optical Waves in Crystals, A. Yariv and P. Yeh, Wiley
- [21] Maltzahn Von, W., and Yapur M., Medical Electronics, Folleto Técnico, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, ESPOL, 1987, pp. 1-20.
- [22] Coughlin, R. and Driscoll F., Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales, México: Prentice Hall, 1999, pp.214-244.
- [23] Jacob, M., Applications and Design with Analog Integrated Circuits, New Jersey: Prentice Hall, 1982, pp. 359-425.
- [24] Iplotlibrary.dll for WIN 2000/XP, Disponible en <http://www.iocomp.com>
- [25] Comandos del puerto serial. En: <http://support.microsoft.com/kb/139526/es>
- [26] National Instruments., "Lookout Developer`s Manual", United States, November 2001, pp.
- [27] Artículo "Supervisión y Control de Procesos". Marzo 2003. Disponible en [http://www.isa.uniovi.es/~vsuarez/ Download/Apuntes.pdf](http://www.isa.uniovi.es/~vsuarez/Download/Apuntes.pdf)
- [28] GABRIUNAS V. Apuntes de Electrónica. Universidad Distrital "Francisco José de Caldas". 1999
- [29] Angulo Usátegui José, Begoña García Zapirain, Sáez Javier Vicente y Angulo Martínez Ignacio. Microcontroladores Avanzados dsPIC: Diseño práctico de aplicaciones, 1era edición. Ed. McGraw-Hill. Pág.: 54-55, 308-310, 336-337, 364-366.
- [30] Lajara Vizcaíno José, Pelegrí José. Labview, Entorno Gráfico de Programación, primera edición, Marcombo, Barcelona, España, 2007. Pag 115,116
- [31] Modulo LabView Data logging and Supervisory Control, disponible en: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/1010>



**Dr. Daniel Samayoa Penagos**  
**Jefe del Departamento de Gestión Tecnológica**  
**y Vinculación**  
**Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez**  
Presente

Por este conducto, se hace constar que el C.

**Alejandro Roblero Hernández**

alumno de la Carrera de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, con el número de control 05270307, concluyó satisfactoriamente con la realización en este Centro la actividad de Residencia Profesional con el proyecto denominado

**"Instrumentación Polarimétrica: Polarímetro de elementos rotatorios" del Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.**

El C. Roblero Hernández estuvo bajo la asesoría del Dr. Geminiano D. Martínez Ponce, en los laboratorios de Holografía del Centro de Investigaciones en Óptica, del 29 de Junio al 4 de Diciembre de 2009, cumpliendo con 640 horas.

Para los fines que al interesado convengan, se extiende la presente a los seis días del mes de Noviembre de 2009.

ATENTAMENTE

**Lic. Guillermina Muñiz Palancares**  
Departamento de Servicios Escolares  
Dirección de Formación Académica

**CENTRO DE INVESTIGACIONES**  
**EN OPTICA, A.C.**  
**DIRECCIÓN DE FORMACIÓN ACADÉMICA**  
**Servicios Escolares**

Gm\*/lhp  
DFA/SE/036

