 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

**Diseño y construcción de etapa de
procesamiento de señal y visualización de
medida para un transformador de medida de
potenciales óptico basado en el efecto
Electroóptico de Pockels.**

Estudiante:

Santiago Meneses García

Tecnología en Electrónica

Director(es) del trabajo de grado:

German David Goez Sánchez

Nicolas A. Gomez Montoya

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

Fecha: 21 de agosto 2018

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

El objeto del trabajo consiste en determinar el voltaje aplicado a un cristal el cual debido a unos efectos electro-ópticos concede una señal de variaciones ópticas a un fotodetector el cual se encarga de obtener esta señal y por medio de tratamientos ópticos este entrega una señal de AC de muy pocas magnitudes a un bloque electrónico el cual se ocupa de acondicionar la señal, amplificándola y filtrándola para poder ser llevada a un ADC en el cual se hace el tratamiento matemático por medio de software eliminando las no linealidades provenientes del fotodetector y determinando su valor RMS para luego ser visualizado por medio de una pantalla TFT.

Diseñar y construir una tarjeta de acondicionamiento de señales la cual tratará una señal proveniente de un fotodetector. La cual consiste en una etapa de pre-amplificación y filtrado.

Implementar una tarjeta de adquisición de datos la cual sirva para convertir el valor analógico entregado por el bloque de acondicionamiento de señales en un valor digital para luego mediante un software de programación se puedan hacer las correcciones de no linealidades provenientes del sensor óptico y la fuente de luz laser y se obtenga el voltaje de la señal el cual posteriormente mediante tratamiento matemático se hará

Palabras clave: foto detector, cristal electro óptico, ADC, acondicionamiento de señales, efecto pockels.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

Los acrónimos empleados en este trabajo son los siguientes:

ADC conversor análogo digital

OP-AMP amplificador operacional

LASER emisión estimulada de luz

AC corriente alterna

DC corriente directa

TFT pantalla de cristal líquido de transistores de película fina

RMS root mean square

AD análoga-digital

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	6
3. METODOLOGÍA.....	12
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	20

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

Un requisito para la operación estable y segura de un sistema de potencia eléctrica es una medida de los parámetros del sistema en forma precisa y confiable, en particular el voltaje y la corriente. Tradicionalmente esto se ha logrado en los sistemas de alto voltaje (HV) por medio de la utilización de transformadores costosos y voluminosos de núcleo de hierro y devanado de alambre sumergido en aceite aislante en la medida de corrientes (CT), mientras que en la medida de potenciales se ha utilizado transformadores tipo divisor capacitivo. Ambos dispositivos están siendo cuestionados debido a sus altos costos, a las implicaciones de seguridad para el personal de las subestaciones eléctricas y los propios dispositivos y equipos de esta, en caso de ocurrir alguna falla, se cuestiona el tiempo de corrección e instalación de los equipos defectuosos además de su mantenimiento y la necesidad de espacio disponible.

Es así como surge la necesidad de emplear algún otro equipo el cual permita la obtención de datos de manera confiable, precisa y estable dando así mayor confiabilidad y seguridad al personal de la subestación eléctrica.

Los sensores ópticos integrados basados en el efecto electro óptico de Pockels, es una tecnología óptica que brinda todas las ventajas de los dispositivos ópticos de medida como son: la medida no es invasiva, el alto aislamiento eléctrico que ofrece la fibra óptica, rápida respuesta, inmunidad a la inducción de ruido electromagnético, son más pequeños, livianos, compactos, además de que la señal de salida del detector es compatible con los niveles de señal requeridos por los sistemas de protección digital.

2. MARCO TEÓRICO

A. El efecto electroóptico

En algunos materiales, la birrefringencia ocurre cuando un campo eléctrico se aplica a través de ellos. La birrefringencia causa que las componentes ortogonales de la luz polarizada viajen a diferentes velocidades, y la luz linealmente polarizada, luego de pasar por el cristal foto refractivo, se convierte en elípticamente polarizada [3.4]. Esto es lo que se denomina el efecto electroóptico. La figura 1, muestra el principio del efecto electro de Pockels.

El índice refractivo n_x y n_y para cada una de las componentes de polarización en un campo eléctrico E aplicado está relacionado por medio de:

$$n_x - n_y = n_0^3 r_p E + \lambda B E^2 + \dots \dots \dots, \quad (1)$$

Donde n_0 es el índice refractivo normal del material, r_p es el coeficiente de Pockels, B es la constante de Kerr. El primer término en el lado derecho de la ecuación (1) muestra una dependencia lineal del campo eléctrico aplicado correspondiente al efecto Pockels (un efecto electroóptico lineal) y el segundo término muestra una dependencia cuadrática correspondiente al efecto Kerr (un efecto electro óptico cuadrático). Los términos por encima de E^3 contribuyen a pequeños cambios en el índice refractivo. Los efectos Pockels y Kerr no aparecen simultáneamente pero cada uno de ellos será dominante dependiendo de la simetría del cristal y de la estructura de polarización eléctrica del material.

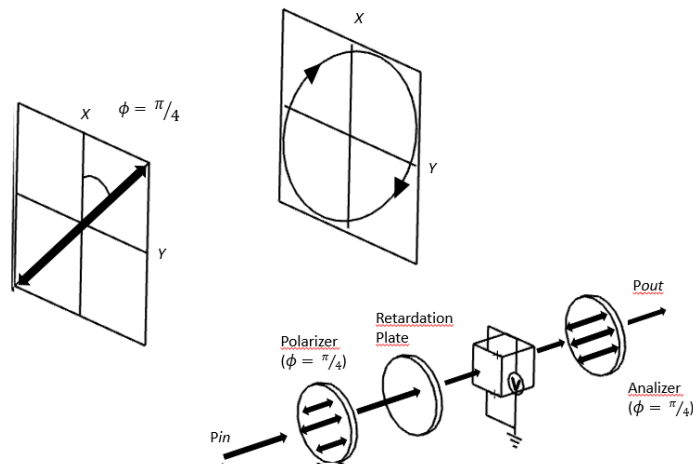


Figura 1. Principio del efecto Pockels

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Debido a que las velocidades de la fase viajera de los dos componentes de campo de la luz dependen de cada uno de los índices refractivos, la birrefringencia causa una diferencia entre las dos componentes y esto resulta en un desplazamiento de fase entre ellos. Esta diferencia de fase $\Delta\theta$ esta dado por:

$$\Delta\theta = \left(\frac{2\pi L}{\lambda}\right)(n_x - n_y) = \pi\left(\frac{E}{E_\pi}\right) + \pi\left(\frac{E}{E_m}\right)^2 \quad (2)$$

$$E_\pi = \frac{\lambda}{(2n_0^3 r_{41} L)} \quad (3)$$

$$E_m = \frac{1}{\sqrt{2BL}} \quad (4)$$

Donde E_π es el campo debido al efecto Pockels, el cual se define como el valor de \mathbb{E} en el cual θ alcanza π . Para la realización de este trabajo, necesitábamos utilizar un cristal que cumplieran con los siguientes requisitos: que presentaran una muy buena sensibilidad a pequeñas variaciones del campo eléctrico, que no fueran higroscópicos, y que permitan trabajar en el rango de longitud de onda de 530 nm a los 1000 nm[5,6]. El cristal seleccionado para realizar este trabajo, fue un cristal $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{20}$, (BGO), el cual cumplen con los requisitos exigidos. El cristal BGO presenta un voltaje de media onda del orden de 31 Kv. Las dimensiones del cristal BGO fueron 3 x 3 x 30 mm (L x A x A),

el valor de r_{41} de nuestro cristal a sido reportado que tiene un valor de 0.96 a 1.11[p/m/V] para una longitud de onda de 633 a 1000 nm [3-7], y el valor de n_0 se aproxima a 2.0975 [5]. E_m es el campo debido el efecto Kerr, y L es la longitud del cristal a lo largo de la trayectoria de la luz (eje z), y la magnitud y la dirección de E se asume constante a lo largo de la trayectoria de propagación de la luz.

Esta diferencia de fase produce una variación en el grado de elasticidad de la luz polarizada como se muestra en la figura 1. Si el material electro óptico se coloca entre dos polarizadores cuya orientación de polarización son ortogonalmente cruzados, la intensidad de la luz transmitida I_0 normalizada por la luz incidente I_i esta dada por medio de:

$$\frac{I_0}{I_i} = \text{sen}^2\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \quad (5)$$

En el caso donde el efecto Pockels es predominante se tiene

$$\frac{I_0}{I_i} = \text{sen}^2\left\{\left(\frac{\pi}{2}\right)\left(\frac{E}{E_\pi}\right)\right\} \quad (6)$$

Y en el caso donde el efecto Kerr es predominante tenemos

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\frac{I_0}{I_i} = \text{sen}^2\left\{\left(\frac{\pi}{2}\right)\left(\frac{E}{E_m}\right)^2\right\} \quad (7)$$

Cuando aplicamos un voltaje E alterno de una frecuencia de 60Hz; según la ecuación (6), hay un aumento en el corrimiento de fase de las dos componentes de la luz linealmente polarizadas, si además agregamos el corrimiento de fase introducido por la lamina $\frac{\lambda}{4}$ el estado final consistirá en que el analizador convertirá estas variaciones de fase en variaciones de intensidad I_0 , las cuales al llegar hasta el fotodiodo son convertidas o transformadas en variaciones de corriente eléctrica.

B. Conversión Análogo Digital

En algunos campos de la ciencia el tratamiento de las señales constituye una importante fracción en lo que a la obtención de datos se trata, y es que en la mayoría de fenómenos naturales y sus más importantes atributos se describen con la variación de sus propiedades físicas, como lo son la temperatura, humedad, presión, reacción a la luz, entre otros y es ahí donde hace la aparición los sensores, objetos capaces de medir cualquier variación en el tiempo en lo que a las magnitudes físicas se trata, estos elementos entregan señales las cuales son de vital importancia ya que ayudan a describir el comportamiento del fenómeno el cual se desea estudiar detalladamente, pero en lo que al mundo natural concierne estas variaciones en la medida en el que el tiempo avanza no son estables y pueden fluctuar de manera muy rápida provocando cambios impredecibles en su comportamiento, es ahí donde nace el concepto de señal analógica, una señal que varía en la medida que el tiempo avanza provocando cambios en su forma y describiendo un recorrido no estable. En la década de los años 80 se dio inicio a la era de la digitalización, componentes que utilizaban señales de cambios de estados de "0" a "1" esto provoco un inconveniente debido a que la mayoría de fenómenos naturales de la época se describían atreves de señales analógicas, debido a este importante hito se empezó a pensar en la forma de convertir una señal analógica en una señal digital ya que con la era de la digitalización, los componentes y equipos analógicos iban quedando obsoletos o hechos a un lado, es por este acontecimiento que los ingenieros y científicos de dicha época hicieron hincapié en la teoría del ADC (Analog to digital converter), un dispositivo capaz de convertir una señal Analógica en una señal Digital, su transformación depende de muchos factores como lo son el tiempo de muestro de la señal, la cuantificación y por último la codificación elementos que según sus características influyen en la calidad de la conversión.

Para poder realizar una conversión Análogo Digital lo que primero tiene que hacer el dispositivo que realizara el trabajo es empezar a tomar una serie de muestras de la señal

Análoga original para luego estas poder ser cuantificadas en un rango específico y luego ser decodificadas en un rango específico de bits.

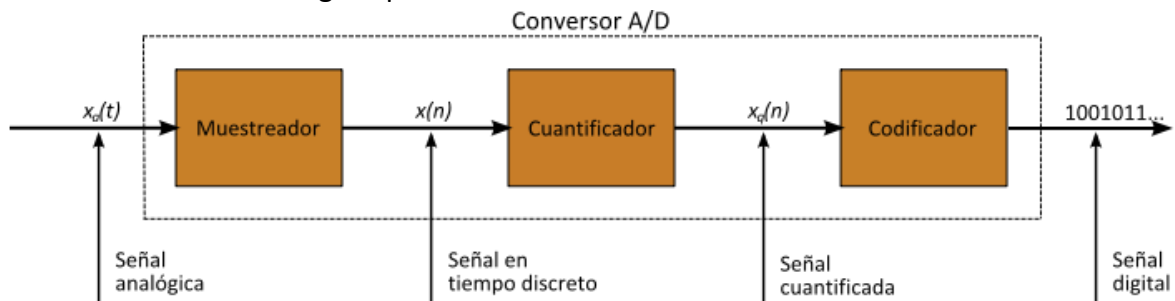


Figura 2. Proceso de conversión AD

- Muestreo de la señal

El muestreo de la señal es una de las etapas de la conversión análogo digital consiste en la primera de ellas y radica en la toma de las muestras de la señal Análoga; Para poder determinar cómo buena una conversión AD (análogo digital) se debe tomar suficientes muestras de la señal en la menor cantidad de tiempo posible, este concepto da lugar a la frecuencia de muestreo que no es más que la cantidad de muestras que se toman de la señal analógica en un segundo. Se debe tener en cuenta que una mayor cantidad de muestras no implica una mejor conversión AD, se debe tener un rango adecuado ya que también se ve afectado la velocidad de comunicación con la que se envían las muestras al bloque de cuantificación que es el segundo en el proceso.

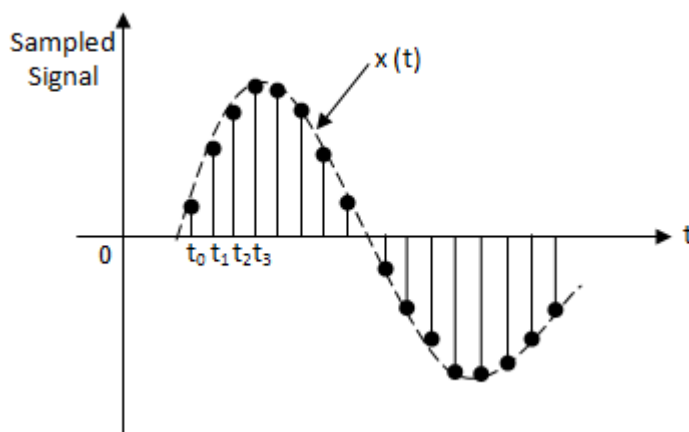


Figura 3. Muestreo de una señal analógica

Se puede observar en la figura 3 un ciclo de una señal senoidal, la cual es muestreada en diferentes instantes de tiempo $x(t)$.

- Cuantización y codificación

En este bloque del proceso la cuantización y la codificación se hacen al mismo tiempo. Una vez se tiene la señal en un tiempo discreto (que no es continua a lo largo del tiempo) se procede primero a medir el valor de voltaje tomado de las muestras y se asigna un valor en específico a cada una de las muestras; la resolución de la cuantización depende del número total de bits con el que dispone el conversor AD a mayor cantidad de bits mejor resolución. Se procede a asignar valores que van desde 0 hasta $2^n - 1$ así por ejemplo si tenemos un ADC de 16 bits tenemos valores desde 0 hasta 65.535, esto también depende del voltaje de referencia que se tenga, el cual define desde que valor se toma la señal, por ejemplo si una señal va desde 0v hasta 5v su voltaje de referencia será 5, adicional a esto la calidad de la codificación también depende de este valor, si tenemos valores menores que el voltaje de referencia estamos desperdiciando valores de la cuantificación. posterior a esto se procede a codificar los valores en números binarios dependiendo nuevamente de la resolución del cuantificador, es por ejemplo que si tenemos una muestra de 65.535 en valor cuantificado su valor decodificado lo entrega en tramas de números binarios así:

1111 1111 1111 1111 y si por ejemplo tenemos un valor cuantificado de 20560 su valor codificado sería de 0101 0000 0101 0000.

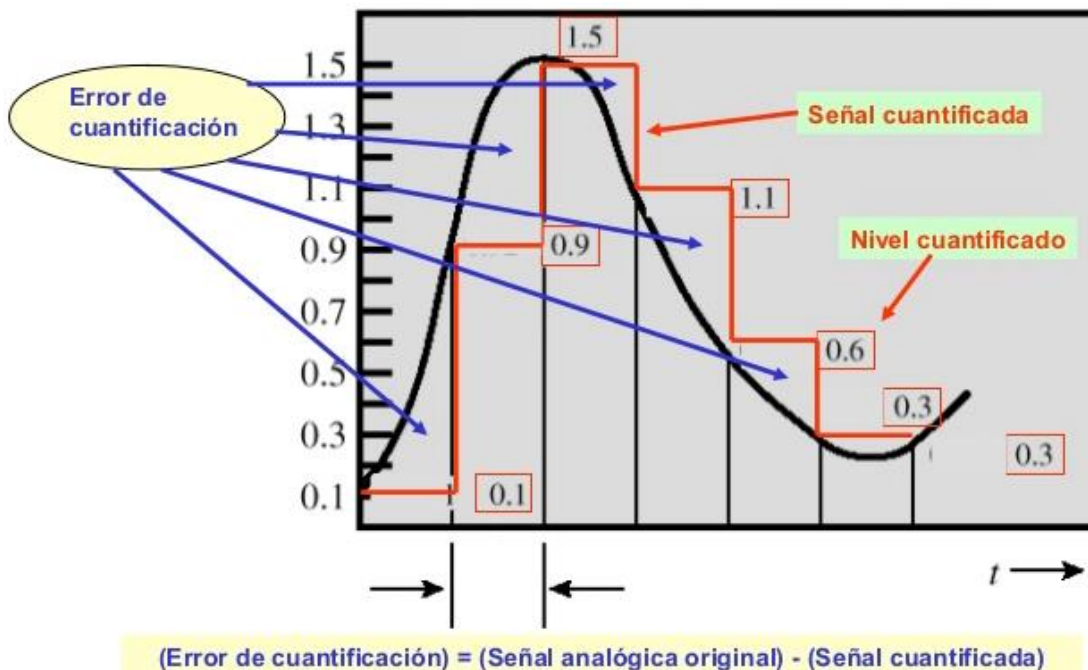


Figura 4. Cuantización y sus errores

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Ahora bien, como se ha dicho anteriormente la resolución de la conversión AD depende de muchos factores pero en cierta forma el único que podemos cambiar a nuestro gusto es el valor de voltaje de referencia, o como lo llamaremos de ahora en adelante Aref; debido a que un ADC trae ya definida la resolución con su cantidad exacta de bits y su frecuencia de muestreo el Aref es un valor el cual dependiendo del valor de voltaje máximo de la señal analógica podemos manipular a nuestra medida obteniendo así resultados más precisos.

En el mercado disponemos de una alta variedad de ADC con múltiples características, los mas comunes los encontramos en las tarjetas de adquisición de datos como por ejemplo: Arduino, Texas Instrumens, NXP, entre otros, así mismo se disponen también como circuitos integrados los cuales se pueden acoplar a múltiples otros dispositivos formando así bloques de conversión mucho más robustos; otras cualidades también son los ADC diferenciales, capaces de tomar valores negativos de la señal haciendo la conversión AD mucho más precisa y sin tener que acoplar otros bloques de acondicionamiento y preparación de la señal.

Para poder determinar el nivel de voltaje que se asigna a cada valor cuantizado se procede con la siguiente formula.

$$vol = \frac{voltaje\ de\ referencia}{2^{nbits}} * lectura \quad (8)$$

Donde el voltaje de referencia lo determina la tarjeta de adquisición de datos mediante programación o valores predeterminados además el número total de bits con el que dispone el ADC

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

La metodología usada consistió en la implementación de una serie de etapas secuenciales las cuales permitieron obtener el diseño y construcción de etapa de procesamiento de señal y visualización de medida para un transformador de medida de potenciales óptico basado en el efecto Electroóptico de Pockels. En el siguiente diagrama se muestran las etapas que se implementaron en el desarrollo.

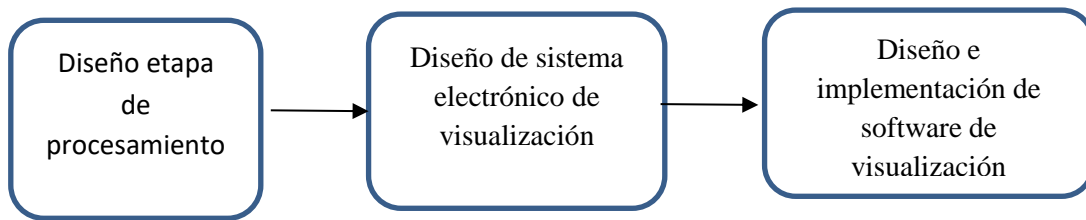


Figura 5: diagrama de procedimientos del sistema.

La etapa de procesamiento consistió en el diseño de un sistema basado en amplificadores operacionales para estabilizar y amplificar la señal del detector, además de la implementación de un sistema de conversión análogo a digital para tener la señal en datos digitales y facilitar su manipulación. La etapa de visualización consistió en el diseño de un sistema electrónico de basado en Arduino para procesar la señal y mostrarla en una pantalla LCD. Finalmente se diseñó e implementó un software para el control y gestión de la plataforma electrónica diseñada previamente.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el diseño y construcción de la etapa de procesamiento de señal y visualización de medida del transformador de medida de potenciales óptico basado en el efecto Electroóptico de Pockels. La señal a procesar se tomó de un foto-detector; este fotodetector, recoge la luz proveniente del cristal electro óptico. Esta luz es convertida en variaciones de intensidad eléctrica, la frecuencia de esta es de 60 Hz, la señal se preamplificador, se filtra y se lleva hasta una etapa de microprocesador. La etapa de foto detección se muestra en la figura 6.

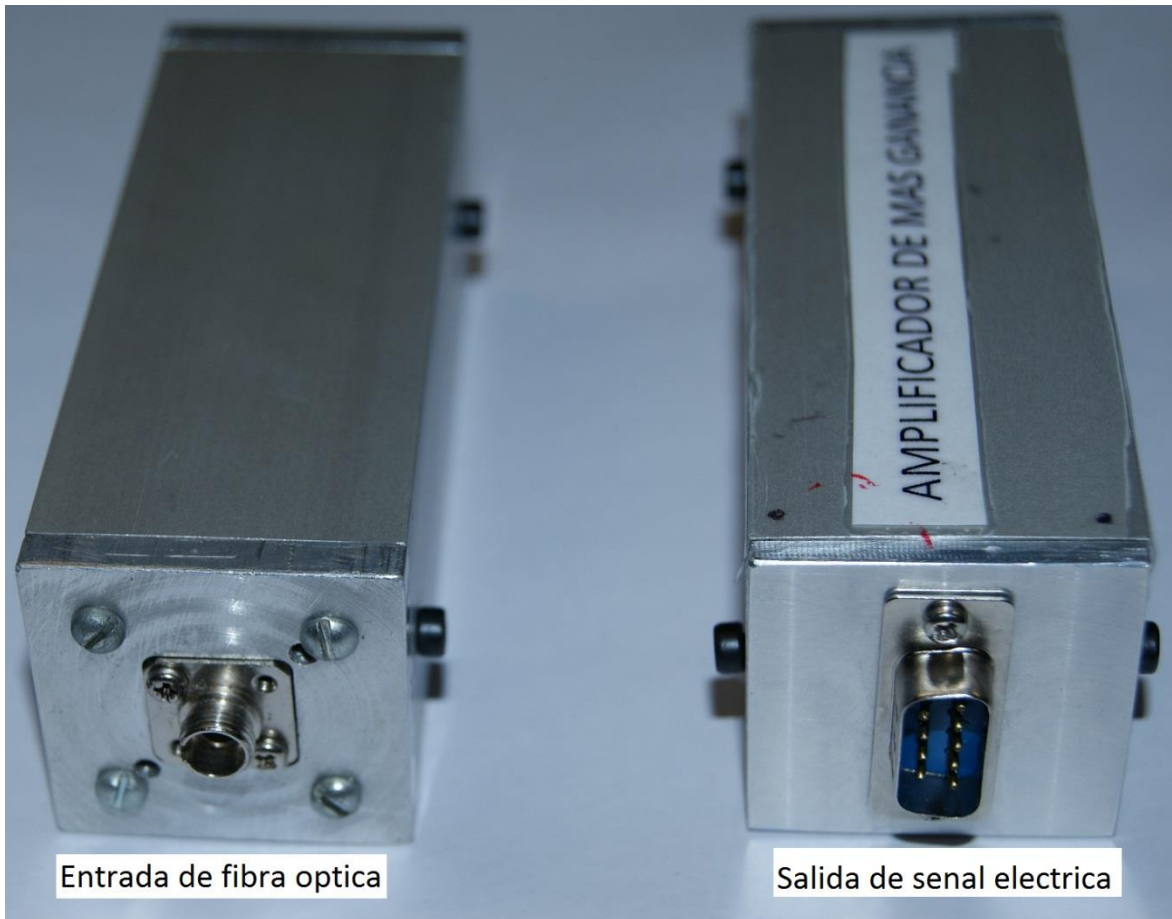


Figura 6. Foto de la etapa de foto detección utilizada en el transformador óptico.

Como puede verse de la figura 4, la respuesta del cristal electro óptico es lineal, como previamente se había anunciado por medio de la ecuación (1), y de la gráfica puede verse el rango de voltajes de prueba, entre 25 voltios A.C y 2100 voltios A.C.

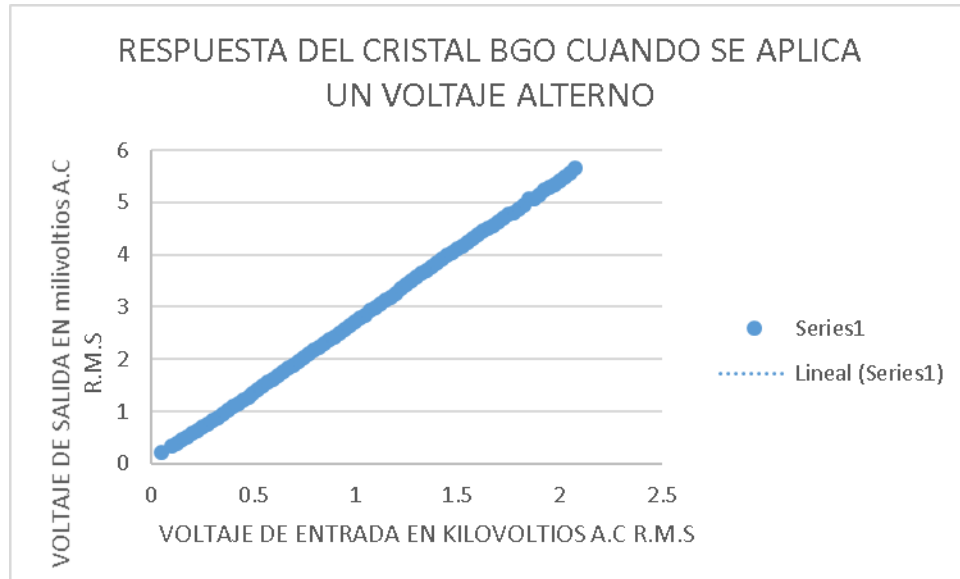


Figura 7. Respuesta lineal del sensor de Pockels

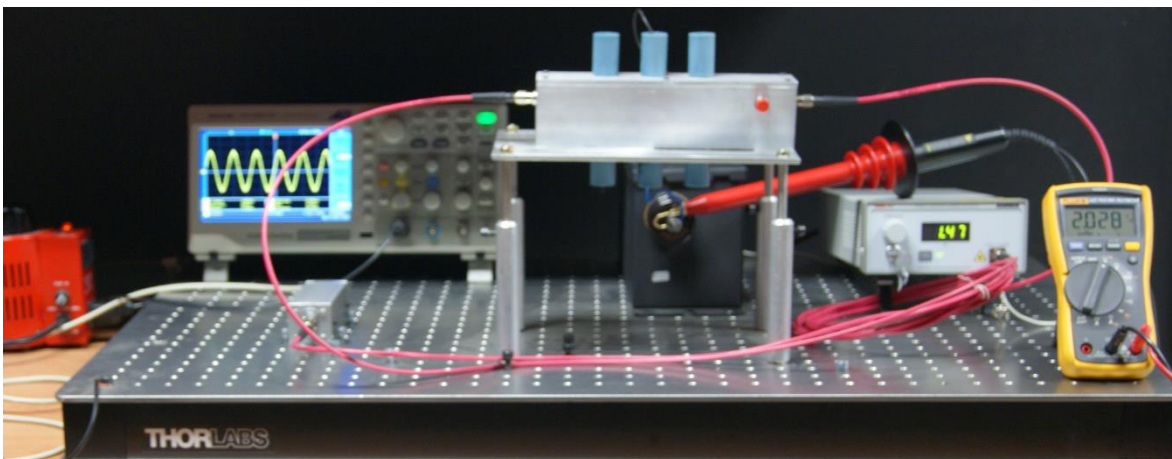


Figura 8. Disposición experimental en primer plano puede verse la celda Pockels, con las fibras ópticas, puede verse también la fuente de luz láser, el fotodiodo, el transformador elevador (negro centro), con su punta

medidora de alto voltaje (el multímetro indica dos mil veintiocho voltios A.C), y también se ve la forma de onda de salida del fotodiodo en el osciloscopio.

Posteriormente luego de que el fotodetector entrega la señal, tenemos que acondicionarla debido a que esta es de muy alta impedancia y además su voltaje es del orden de los milivoltios siendo esta una señal de AC, por lo que tenemos que añadir en una etapa un amplificador seguidor de tensión para que al momento de conectar el ADC de la tarjeta de adquisición de datos su carga no debilite la señal y por último una etapa de filtrado y amplificación añadiendo un OP-AMP.

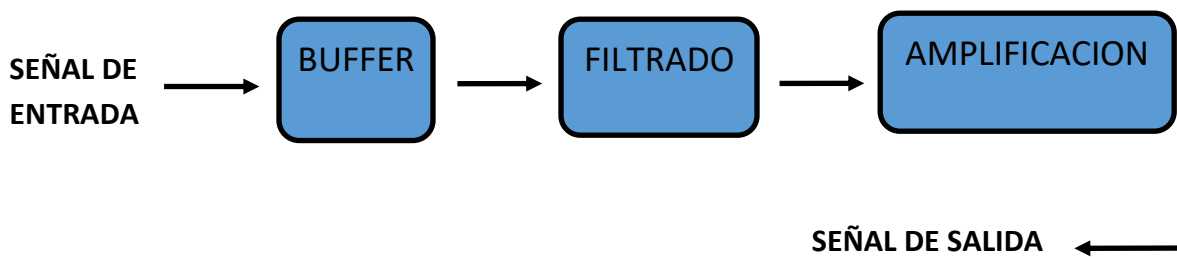


Figura 9, sistema de entrada de la señal.

En esta aplicación se utilizó el OP-AMP LM324 el cual se presenta en un encapsulado J Packaje 14-Pin CDIP teniendo en su interior cuatro OP-AMP, se utilizó este amplificador debido a su bajo nivel de offset tan solo de 2 mV en la señal de salida y su alto porcentaje de rechazo al modo común. En esta práctica se utilizó la alimentación dual la cual consta de +14V en su alimentación positiva pin 4 y -14V en su alimentación negativa pin 11.

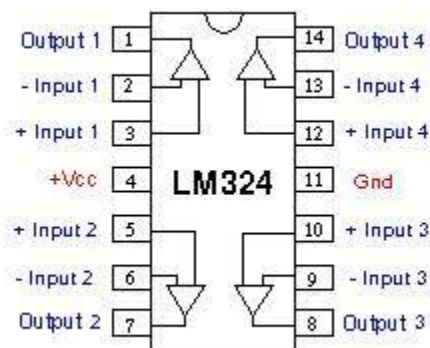


Figura 10: amplificador operacional implementado.

En el bloque de Buffer se utilizó uno de los cuatro OP-AMP que dispone el LM324 en configuración seguidor de tensión con el fin de que nuestra tarjeta de adquisición de datos

que tiene un nivel de baja impedancia no cargue nuestro fotodetector que cuenta con un alto nivel de impedancia, para este caso el voltaje de entrada y salida es el mismo, no varia.

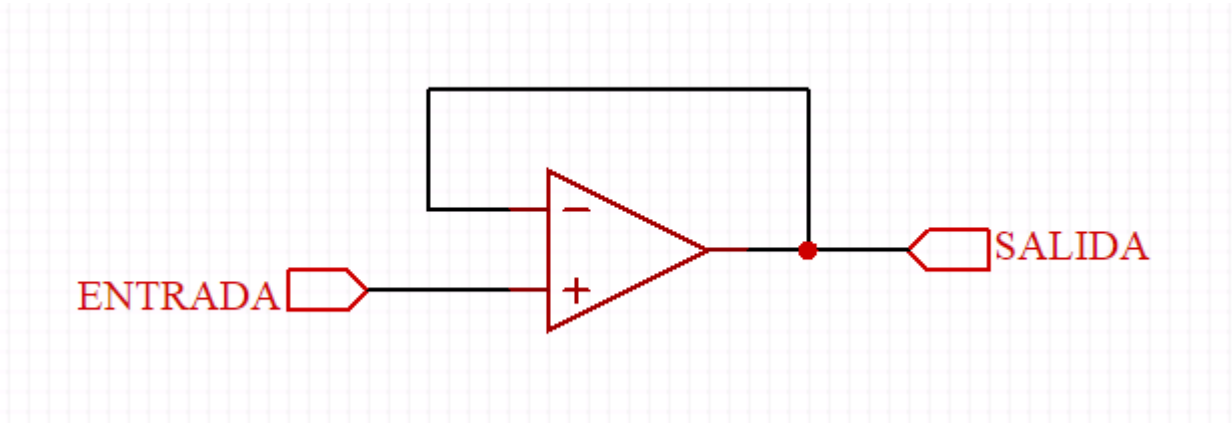


Figura 11: Amplificador como seguidor.

En el bloque de amplificación presentamos un OP-AMP en un configuración inversora con realimentación negativa el cual entrega una ganancia de 10 dada por la ecuación:

$$G = \frac{R_f}{R_i} = \frac{20 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = 10$$

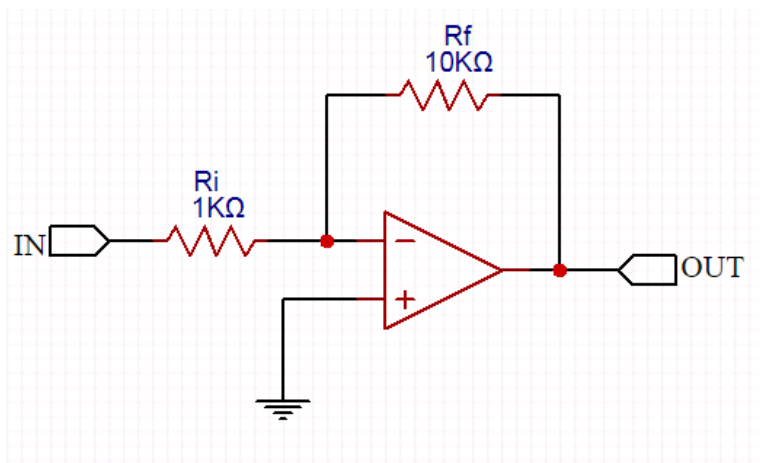


Figura 11: Amplificador con ganancia.

Posterior a esto, ya se cuenta con una señal mas robusta y en condiciones ideales para ser tratada por un ADC.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para este caso se cuenta con una tarjeta de adquisición de datos Arduino Due la cual cuenta con un microcontrolador ARM cortex-M3 con arquitectura de 32 Bits la cual posee, además de otras interfaces un ADC de 12 Bits de resolución el cual no es diferencial.

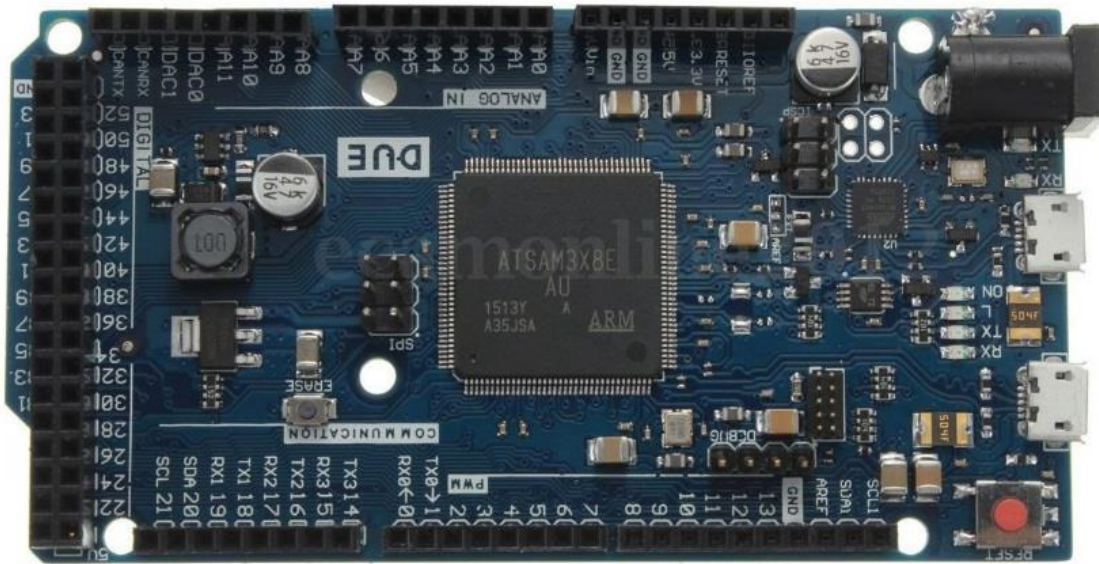


Figura 12. Tarjeta de adquisición de datos Arduino due

Luego de que la señal ingresa a la tarjeta de adquisición de datos es procesada por el ADC, hay que tener en cuenta que nuestra señal es de AC por consiguiente tiene una componente negativa la cual el ADC no toma generando así una línea recta en la gráfica de la señal. Tomando así solamente el semiciclo positivo

Mediante el software de programación arduino IDE se procede con la programación de un sketch el cual permita obtener los datos requeridos en nuestro trabajo, como nuestro ADC es de 12 bits y la señal no supera los 2 podemos utilizar el voltaje de referencia de la misma tarjeta de adquisición de datos que en este caso es de 3.3 V y utilizando la ecuación número 8 procedemos de la siguiente manera.

$$vol = \frac{3.3v}{4095} * lectura$$

$$vol = 8.05mv * lectura$$

Ya sabemos que a cada valor de la cuantización se multiplicara por un valor de 8.05 mv siendo esta una precisión relativamente alta.

Ahora bien, como nosotros necesitamos indagar acerca del valor máximo sobre ese semiciclo positivo, tenemos entendido que nuestra onda tiene una frecuencia de 60 Hz dando un periodo asi 16.66 milisegundos, dado que es una onda simétrica tanto en su ciclo positivo como negativo, ambos sicios duran la mitad, dando lugar a 8,3 milisegundos en ambos semiciclos. Como podemos ver en la figura 13, tenemos una señal senoidal donde su periodo se repite en dos ocasiones y ambos semiciclos tanto negativos como positivos son simétricos.

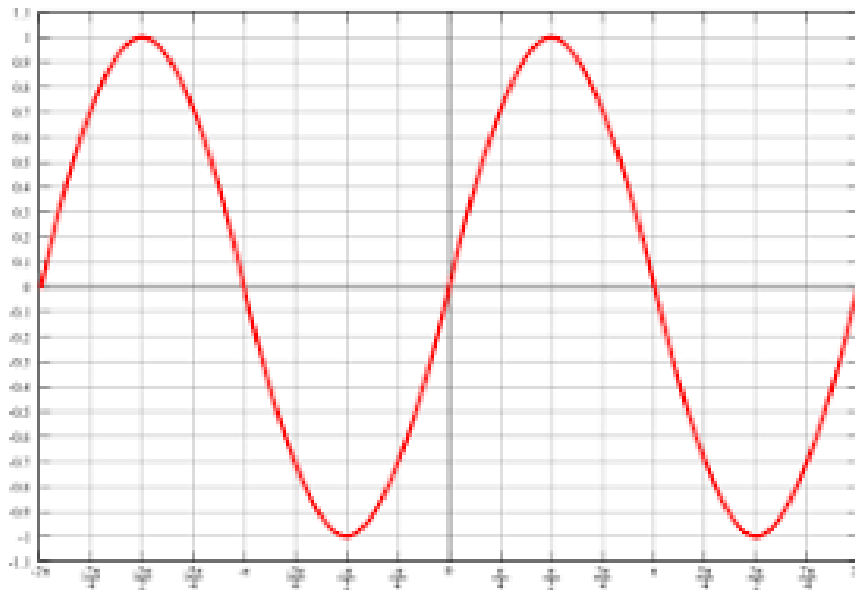


Figura 13. Señal senoidal de dos ciclos

Dando lugar a esto, tenemos que si tomamos el valor del voltaje en el semiciclo positivo este sería el mismo en el negativo solamente cambiando el signo, adicional a esto la señal no es desplazada ni se añade un offset entonces se tiene muchas más ventajas en la simpleza de la conversión AD.

Ya que tenemos los valores del semiciclo positivo lo que necesitamos encontrar será el valor máximo el cual será el valor pico de ese semiciclo y según la teoría del voltaje RMS, tenemos:

$$V_{rms} = V_{pico} * 0.707$$

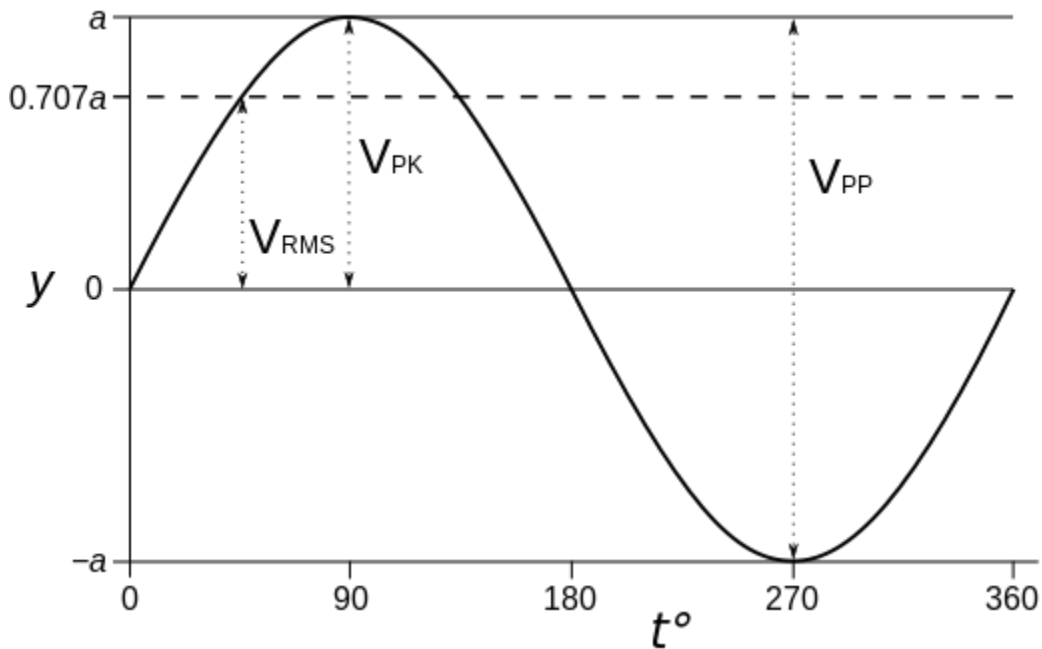


Figura 14. Valor RMS

Para poder encontrar el valor máximo del semiciclo positivo recurrimos a la programación donde cogemos 100 muestras de ese semiciclo mediante una estructura FOR dando tiempos entre muestras de 83.3 nanosegundos y mediante el mismo ciclo se empieza a comparar los valores uno tras otro para determinar el valor máximo el cual posteriormente será multiplicado por la constante 0.707, ya teniendo este valor se procede a realizar la comparación entre el valor entrado hacia el cristal y el valor obtenido luego del procedimiento para luego ser mostrado en la pantalla TFT.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se propuso el diseño de un sistema de procesamiento de señal y visualización de medida para un transformador de medida de potenciales óptico basado en el efecto Electroóptico de Pockels.

Los resultados obtenidos con este trabajo nos permiten concluir que es posible implementar sistemas de bajo costo para la medición de potenciales ópticos basados en efectos electroópticos.

Los costos de diseño están por debajo de sistemas robustos y altamente costosos lo que los hace poco viables.


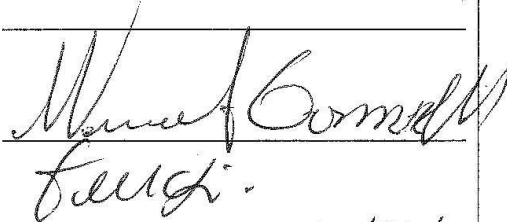
 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

1. K. Bohnert, P. Gabus, J. Kostovic, H. Brandle, “Optical fiber for the electric power industry”, Optics and Laser Engeneering,43, pp,511-526, 2005.
2. Josemir Coelho Santos, M.Cengiz Taplamacioglu, and Hinihiko Hidaka, “Pockels high-voltage measurement system”, IEEE transaction on power delivery, vol.15, n°. 1,pp. 8-13, January 2000.
3. P. A. Williams, A.H. Rose, K.S. Lee, D.C Conrad, G.W. Day and P.D.Hale, , “Optical, thermos-optic, electro- optic and photoelastic properties of bismuth germinate($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) ”, Applied optics, vol. 35, n°. 19, pp.3562-3569, 1 July 1996.
4. D.P. Bortfeld and H Meier, “Refractive indices and electro-optic coefficients of the eulities $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ and $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ”, j. Applied Physics, vol. 43, n°. 12, pp.5110-5111, December 1972.
5. Akiko Kumada, and Kunihiko Hidaka, “Directly High-Voltage Measuring System Base don Pockels Effect”, IEEE Transaction on power Delivery, vol. 28, n°. 3, pp.1306-1313, July 2013.
6. Franjo Cecelja, Michael Bordovsky, and Wamadeva Balachandran” Lithium Niobate sensor for measurement of DC electric fields”, IEEE Transaction on Instrumentation and measurement, vol. 50, n°2, pp. 465-469, April, 2001
7. Qiao Tan, Qifeng Xu, Nan Xie and Chao Li” A new optical voltaje sensor based on radial polarization detection”, IEEE Transaction on Instrumentation and measurement, vol. 66, n°1, pp. 158-164, January 2017, 2001

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES	
FIRMA ASESOR	
FECHA ENTREGA: 22/08/2018	

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____
RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___
ACTA NO. _____
FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____
ACTA NO. _____
FECHA ENTREGA: _____