



**Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica**

# **SISTEMAS ÓPTICOS DIGITALES PARA MEDICIÓN DE ENERGÍA EN ALTA TENSIÓN**

**Francisco Alberto Aldana de León**

**Asesorado por el Ing. Otto Andrino González**

**Guatemala, septiembre de 2007**



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

## **SISTEMAS ÓPTICOS DIGITALES PARA MEDICIÓN DE ENERGÍA EN ALTA TENSIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

**FRANCISCO ALBERTO ALDANA DE LEON**  
ASESORADO POR EL ING. OTTO ANDRINO GONZÁLEZ.

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



### **NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruíz
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

### **TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Andrino González
EXAMINADOR	Ing. Juan Fernando Morales Mazariegos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Francisco Gressi López
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **SISTEMAS ÓPTICOS DIGITALES PARA MEDICIÓN DE ENERGIA EN ALTA TENSIÓN,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, en octubre de 2006.

Francisco Alberto Aldana de León

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

Guatemala, 28 de agosto 2007.

Señor Director  
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de investigación titulado:  
**SISTEMAS OPTICOS DIGITALES PARA MEDICIÓN DE  
ENERGÍA EN ALTA TENSIÓN** desarrollado por el estudiante:  
Francisco Alberto Ajón de León, por considerar que cumple con los  
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

A atentamente,

DIRIGIDO Y ENSEÑADO A TODOS

Ing. José Guillermo Rodríguez Barrios  
Coordinador Área de Patente

JCEB/bo



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Francisco Alberto Aldana de León titulado: **SISTEMAS ÓPTICOS DIGITALES PARA MEDICIÓN DE ENERGÍA EN ALTA TENSION**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez

DIRECTOR



GUATEMALA, 5 DE SEPTIEMBRE 2,007.

Guatemala, 22 de agosto de 2007

Ingeniero  
Guillermo Bedoya  
Coordinador Área de Potencia  
Escuela Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Ingeniero Bedoya,

De manera atenta envío a usted el trabajo de tesis elaborado por el estudiante Francisco Alberto Aldana de León, el cual se titula SISTEMAS ÓPTICOS DIGITALES PARA MEDICIÓN DE ENERGÍA EN ALTA TENSIÓN.

En mi calidad de asesor, le informo que he revisado el mencionado trabajo y considero que cumple con los objetivos planteados por los que me complace la aprobación de la tesis.

Cordialmente,

  
Ing. Otto Andriano  
Colegiado # 4038  
Asesor



## **ACTO QUE DEDICO A:**

Dios, por darme vida.

Mis padres, por darme el impulso a los proyectos emprendidos a lo largo de mi vida.

Mi familia, por todo el apoyo en mi proyecto de vida.

Mis amigos, por su apoyo y compañía en cada etapa del camino recorrido.

A todos los catedráticos que sin egoísmo me han enseñado el arte de la ingeniería eléctrica.

Gracias



# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>VII</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>IX</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>XI</b>

## **1. PRINCIPIOS FÍSICOS DE LOS DISPOSITIVOS ÓPTICOS**

### **DIGITALES.....1**

1.1 Aspectos Generales.....	1
1.2 Fenómenos Físicos en que se basa los dispositivos ópticos digitales.....	2
1.2.1. Efecto Faraday.....	2
1.2.2. Ley de Ampere .....	6
1.2.3. Efecto Kerr.....	7
1.2.4. Efecto Pockels.....	7
1.3 Consideraciones básicas acerca de las fibras ópticas.....	9

## **2. TRANSDUCTORES ÓPTICOS DE VOLTAJE Y**

### **CORRIENTE.....13**

2.1 Transductores eléctricos.....	13
2.2 Transductor óptico de corriente.....	14
2.3 Principio de operación del transductor óptico de corriente.....	16
2.2.1. Componentes del transductor óptico Corriente.....	20
2.2.2. Precisión del transductor óptico de corriente.....	22
2.2.3. Ventajas del transductor óptico de corriente.....	26

2.4	Transductor óptico de voltaje.....	27
2.4.1	Principio de operación del transductor óptico de voltaje.....	27
2.4.2	Diseño del transductor óptico de voltaje.....	32
2.4.3	Precisión del transductor óptico de voltaje.....	35
2.4.4	Ventajas del transductor óptico de voltaje.....	36
2.5	Transductor óptico de voltaje y corriente.....	38
2.5.1	Ventajas del transductor óptico de voltaje y corriente.....	38
2.5.2	Precisión del transductor óptico de voltaje y corriente.....	39
2.6	Transductores ópticos para protección y medición.....	40
2.6.1	Consideraciones técnicas para el uso de transductores medición.....	40
2.6.2	Consideraciones técnicas para el uso de transductores protección.....	41
2.7	Referencia de Transductores ópticos instalados en el mundo.....	42
<b>3.</b>	<b>SISTEMA DE MEDICIÓN CON FIBRA ÓPTICA.....</b>	<b>45</b>
3.1	Generalidades.....	45
3.2	Características de un sistema de medición con fibra óptica.....	47
3.2.1	Elementos básicos de un sistema de medición con fibra óptica.....	51
3.2.2	Sistemas de comunicación de fibra óptica.....	52
3.2.3	Ventajas y desventajas del uso de fibra óptica.....	54
3.2.4	Interferencias en la fibra óptica.....	55
<b>4.</b>	<b>APLICACIÓN DE SENSORES ÓPTICOS DE CORRIENTE EN UNA SUBESTACIÓN.....</b>	<b>57</b>
4.1	Generalidades.....	57
4.2	Alternativas de conexión de los sensores ópticos de corriente.....	59
4.2.1	Salida digital hacia un medidor o rele digital.....	61
4.2.2	Salida análoga de baja energía hacia un medidor o rele análogo.....	62

4.2.1	Salida análoga de alta energía.....	65
4.3	Selección de un sensor óptico de corriente.....	67
4.4	Perturbaciones en el sensor óptico de corriente.....	69
<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS TRANSDUCTORES</b>	
	<b>ÓPTICOS VRS. CONVENCIONALES.....</b>	<b>71</b>
5.1	Transductor óptico de corriente vrs. transformador convencional de corriente.....	74
5.2	Transductor óptico de voltaje vrs. transformador convencional de voltaje.....	75
5.3	Análisis económico de los sensores ópticos vrs. transformadores de instrumento convencionales.....	77
5.3.1	Sensores ópticos de corriente vrs. transformadores convencionales de corriente.....	81
5.3.2	Sensores ópticos de voltaje vrs. transformadores convencionales de voltaje.....	85
5.3.3	Sensores ópticos de voltaje y corriente vrs. transformadores convencionales de voltaje y corriente.....	88
<b>6.</b>	<b>ENCUESTA - UTILIZACIÓN DE TRANSDUCTORES</b>	
	<b>ÓPTICOS EN EL SECTOR ELÉCTRICO.....</b>	<b>91</b>
6.1	Encuesta.....	91
6.2	Análisis de resultados.....	92
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>95</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>97</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>99</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>101</b>



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Efecto de Rotación de Faraday.....	3
2.	Ley de Ampere.....	6
3.	Ejemplo de fibra óptica.....	10
4.	Fibra óptica brillando cuando transmite luz .....	11
5.	Polarización en el sensor óptico.....	17
6.	Reflector en el sensor óptico.....	18
7.	Desfase de las señales ópticas.....	19
8.	Sensor de corriente de fibra óptica.....	21
9.	Error de relación versus corriente para transductor de corriente.....	22
10.	Error de fase versus corriente para transformador de corriente.....	23
11.	Corriente primaria y corriente secundaria.....	24
12.	Amplitud versus frecuencia para transductor de corriente.....	25
13.	Porcentaje de error de amplitud versus frecuencia para transductor de corriente.....	25
14.	Líneas de campo de los sensores de voltaje.....	29
15.	Celdas Pockels.....	30
16.	Cambio en la polarización de la luz.....	31
17.	Transductor óptico de voltaje.....	31
18.	Campo eléctrico versus la distancia en el sensor.....	33
19.	Precisión del transductor óptico de voltaje.....	35
20.	Respuesta en la salida a la frecuencia del sensor de voltaje.....	36
21.	Diseño del transductor óptico de voltaje y Corriente.....	40
22.	Fibra óptica de tubo suelto.....	48
23.	Fibra óptica restringida.....	48
24.	Fibra óptica de múltiples hilos.....	49
25.	Fibra óptica tipo liston.....	49

26. Muestra de fibra óptica.....	49
27. Tipos de fibra óptica.....	50
28. Salidas secundarias de los transductores ópticos.....	60
29. Salida digital.....	61
30. Pérdida de energía en un convertidor D/A.....	63
31. Gráfico de falla en transductor de corriente.....	66
32. Comparación de dos sensores de corriente ópticos.....	70
33. Anualidades de costos comparativos.....	80
34. Comparación de respuesta a corrientes de corto circuito.....	83

### **TABLAS**

I. Posiciones y pesos calculados para sensor.....	34
II. Referencias de transductores ópticos instalados en el Mundo.....	43



## RESUMEN

La medición de energía en alta tensión es un aspecto importante para el consumidor y los comercializadores de electricidad. Los dispositivos más comunes utilizados para transformar la energía a niveles seguros son los transformadores de instrumento convencionales. En años recientes la tecnología óptica ha ido evolucionando y revolucionando la forma de medir corrientes y altos voltajes en subestaciones.

La creación de los transductores ópticos para medición en alta tensión, ha ido cambiando la forma de hacer mediciones precisas en aplicaciones en donde el costo de una medición óptica puede significar un beneficio para el comercializador a mediano y largo plazo.

Los transductores ópticos basan su tecnología en los efectos ópticos que ocasionan los voltajes y las corrientes del sistema en el elemento sensor de cada instrumento. En ciertas aplicaciones han sustituido a los transformadores de instrumento convencionales gracias a las grandes ventajas que los ópticos ofrecen.

En el presente trabajo se estudian los efectos físicos que utilizan los sensores ópticos para medir los parámetros eléctricos. Se describen, los efectos que causan el voltaje y la corriente en elemento sensor y los principios físicos a los que corresponden tales efectos.

También, se analizan las características, principios de operación, accesorios y métodos de trasladar las señales de los transductores ópticos de medición. Se describen las características fundamentales de los transductores ópticos de corriente y los de voltaje.

Más adelante, se definen los diferentes tipos de fibra óptica y la utilización de la fibra para trasladar la señal desde el sensor en la línea de transmisión y el receptor en el cuarto de control de la subestación. La utilización de la fibra óptica hace posible utilizar el transductor óptico en un sistema totalmente digital.

Se explican las diferentes formas de obtener la señal adecuada y normada para los medidores y relevadores que comercial se consiguen en el mercado y las restricciones respecto al ancho de banda, la precisión para protección y medición y la confiabilidad del sistema de medición.

También se realiza un análisis comparativo técnico y económico para evaluar las ventajas y desventajas de la utilización de los transductores ópticos en lugar de los transformadores de instrumento convencionales.

Por último, se realiza una encuesta para evaluar la posible utilización de los transductores ópticos. Se utiliza una muestra de personas que laboran en el sector eléctrico y que tienen relación directa o indirecta con este tipo de instrumentos en el campo laboral. Se detallan los resultados de la encuesta y se establecen recomendaciones y conclusiones.

## OBJETIVOS

- **General**

Efectuar un estudio de la tecnología de los instrumentos ópticos digitales, para medición de energía en alta tensión y proporcionar los criterios adecuados para la selección y el uso adecuado de los equipos en la industria eléctrica guatemalteca.

- **Específicos**

1. Analizar y describir las ventajas comparativas de los sensores ópticos de voltaje y corriente contra los tradicionales transformadores de instrumento.
2. Explicar los principios físicos en que se basan los transductores ópticos.
3. Estudiar los fundamentos básicos de la transmisión de datos por fibra óptica.
4. Estudiar el costo-beneficio de los nuevos sistemas de medición óptica en comparación con los tradicionales.
5. Definir las posibles interfases entre medidor o relevador y transductor óptico.
6. Investigar la viabilidad en la aplicación de sistemas de medición ópticos en subestaciones de alta tensión en Guatemala.



## INTRODUCCIÓN

La mayoría de subestaciones eléctricas actuales están diseñadas con equipos convencionales, tales como: transformadores de potencia, interruptores de potencia, seccionadores, transformadores de corriente y de potencial, etc.

Este sistema convencional ha sido funcional y efectivo durante mucho tiempo. Ahora, con los avances tecnológicos se hace necesario, en algunos casos, implementar nuevas tecnologías para que el sistema esté integrado en una misma plataforma de información, más precisa y exacta.

La tecnología de medición óptica para líneas de alta tensión, ha evolucionado la forma de obtener la medición de energía. En algunas aplicaciones, utilizar los transductores de corriente y voltaje ópticos puede ser una solución técnica para la aplicación específica y económicamente rentable.

Como se sabe, la precisión en las mediciones eléctricas, especialmente para facturación, es muy importante y significativa. Esta es la principal razón del desarrollo de esta tecnología. Tiene muchas ventajas en comparación con los sistemas convencionales de medición. Estos nuevos sistemas se están implementando en varios países del mundo dejando a un lado los sistemas convencionales, aun cuando el costo inicial es mayor.

El objetivo del trabajo de graduación es difundir la tecnología de medición óptica en alta tensión, las interfases disponibles, y sus aplicaciones en subestaciones eléctricas.



# **1. PRINCIPIOS FÍSICOS DE LOS DISPOSITIVOS ÓPTICOS DIGITALES**

Las nuevas tecnológicas referentes a los transformadores de instrumento han centrado su interés en promover avances en la de medición de energía utilizando tecnología óptica. Estos instrumentos tienen muchas ventajas tales como: la insensibilidad a las interferencias electromagnéticas, la facilidad de transportar, su ligereza y la su fácil instalación. En ciertas aplicaciones pueden sustituir a un sistema convencional de medición.

Cuando se requiere una adquisición de datos precisa y segura se debe pensar en fibra óptica, y esta precisión se puede apreciar cuando en los transductores de medición los errores en la lectura son mínimos, después de procesada, transmitida y almacenada la información. Esto último es en gran parte debido a que las señales luminosas son insensibles a perturbaciones electromagnéticas, en consecuencia, una excelente capacidad para transmisión de datos. En los casos de medición de energía en alta tensión, ya sea con el objetivo de protección o medición, se necesita que el instrumento sea preciso y exacto.

## **1.1 Aspectos generales**

En los sistemas actuales de medición de energía en alta tensión, cada instrumento de medición, no importando que sea TP (transformador de potencial) o TC (transformador de corriente), están conformados por núcleos ferromagnéticos. Estos instrumentos adquieren un pequeño porcentaje de energía de la línea de transmisión para la medición, por lo que se tiene que tomar en consideración la saturación de dicho núcleo, y esta se relaciona con la precisión y exactitud del transformador.

A diferencia de los sistemas convencionales, un sistema basado en medición indirecta cuenta con un sensor del campo magnético circundante y lo convierte a una señal óptica. Este sensor cuenta con una propia alimentación, dejando sin alteración la energía eléctrica circundante. El sensor basa su funcionamiento en principios físicos tales como los efectos Pockels, Kerr, Faraday y Ampere.

El sensor simplemente se basa en el principio físico de que un material cambia o rota el plano de polarización de la onda luminosa que pasa a través del mismo, la cantidad de rotación depende del campo eléctrico o magnético. El sensor debe ser capaz de medir los pequeños cambios de polarización del haz de luz.

Para la transmisión y comunicación de los efectos ópticos, utilizan fibra óptica. La fibra óptica es capaz de transmitir gran cantidad de información en trayectos relativamente largos, con pocas pérdidas. Esto se debe a su característica de funcionamiento utilizando la reflexión interna total en el material. En los últimos años se ha estado utilizando cada vez más la fibra óptica, especialmente para las telecomunicaciones.

## **1.2 Fenómenos físicos en que se basan los dispositivos ópticos digitales**

### **1.2.1 Efecto Faraday**

El efecto Faraday (denominado a veces como: Rotación Faraday) fue descubierto en 1845 por el físico Michael Faraday, e intenta demostrar la interacción entre la luz y un campo magnético. Para ser más precisos, el efecto describe como el plano de polarización de la luz puede cambiar.

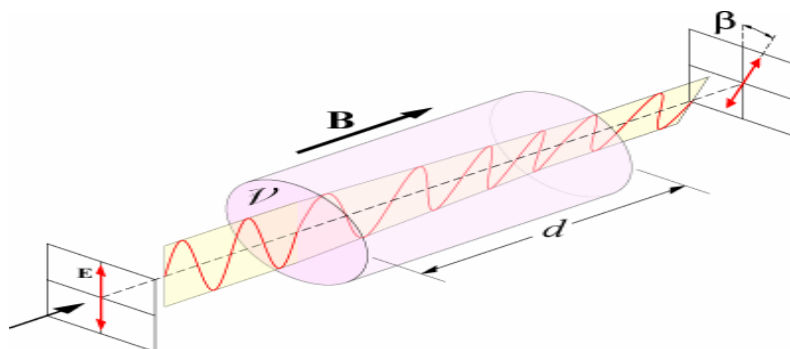


También muestra como su alteración es proporcional a la intensidad del componente del campo magnético en la dirección de propagación de la onda luminosa.

El efecto Faraday es un efecto magneto-óptico. El efecto es la primera evidencia experimental de que la luz y el magnetismo están relacionados. Hoy en día la base teórica para definir esta relación se denomina Teoría electromagnética, y fue desarrollado por James Clerk Maxwell entre los 60 y 70. Este efecto ocurre en la mayoría de los materiales dieléctricos transparentes afectados por fuertes campos magnéticos (por ejemplo: 5 Tesla (50000 gauss) para hacer rotar la polarización 90 grados).

El efecto Faraday es resultado de una resonancia ferromagnética cuando la permeabilidad de un material se representa por un tensor. Esta resonancia provoca que las ondas se descompongan en dos rayos polarizados circularmente y que se propagan con velocidades diferentes, esta propiedad se conoce como birrefringencia circular. Los rayos se recombinan al llegar a la interfase del medio, de tal forma que la onda resultante final tiene una rotación de su plano de polarización.

**Figura 1. Efecto de Rotación de Faraday**



Fuente: página web. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org) – Portal de descargas

Para poder determinar el grado de giro del plano de polarización en los diferentes materiales, se emplea la siguiente fórmula:

$$\beta = \mathcal{V}Bd$$

Donde:

$\beta$  es el ángulo de rotación (en radianes).

$B$  es flujo de densidad magnético en la dirección de propagación (en teslas).

$d$  es la longitud del camino óptico (en metros)

$\mathcal{V}$  es la constante de Verdet del material. Este valor es una constante empírica que muestra la proporcionalidad (en unidades de radianes por tesla y por metro) entre el campo y la rotación del plano de polarización para varios materiales. Un valor positivo de esta constante indica que el giro del plano será levógiro (contrario a las agujas del reloj) y por el contrario un valor negativo indica un giro dextrógiro (sentido de las agujas del reloj).

Algunos materiales tales como las aleaciones transparentes de terbio y galio (denominadas abreviadamente como **TGG**) tienen un valor de la constante de Verdet extremadamente elevada ( $\approx -40 \text{ rad T}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ). De esta forma si se coloca una barra de este material en un intenso campo magnético, el ángulo de la rotación Faraday puede llegar a ser de 0.78 Rad. (45°). Este efecto permite la construcción del Rotator de Faraday, que tienen como propiedad aislar algunos componentes de la luz transmitida en una dirección. Aislantes similares se construyen en los sistemas de microondas empleando barras de ferrita en una guía de onda envuelta en un campo magnético.

El efecto de Faraday se considera de mucha importancia en campos tales como la astronomía, que se emplea en la medición de campos magnéticos de pulsares de radio, que puede ser estimada mediante las medidas combinada de la rotación del plano de polarización y los retrasos existentes entre los pulsos de radio en diferentes longitudes de onda.

Si se considera que un rayo de luz pasa a través de un medio interestelar en el que existe una cierta cantidad de electrones libres, se puede observar como existe un índice de refracción que consiste en hacer que la luz se propague en dos modos polarizados circularmente. El efecto Faraday en las nubes interestelares, al contrario de lo que pasa en los líquidos y sólidos, tiene una simple dependencia con la longitud de onda de la luz ( $\lambda$ ), de esta forma:

$$\beta = RM\lambda^2$$

donde el efecto global de esta perturbación, caracterizado por MR, **M**edida de la **R**otación, indica el giro del plano de polarización en función de  $B$  y de la densidad de electrones,  $n_e$ , ambos pueden variara a lo largo de la trayectoria lumínica, de esta forma se tiene que:

$$MR = \frac{e^3}{2\pi m^2 c^4} \int_0^d n_e B ds ,$$

donde:

$e$  es el carga de un electrón

$m$  es la masa de un electrón

$c$  es la velocidad de la luz en el vacío

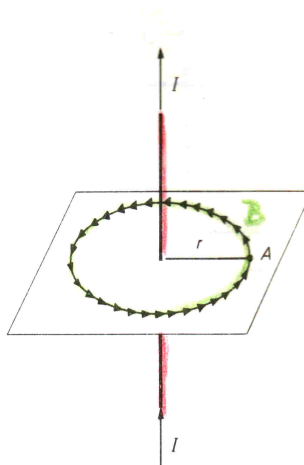
Las ondas de radio que pasan a través de la ionosfera están sujetas igualmente a rotación del plano de polarización según el efecto Faraday, y el efecto es proporcional al cuadrado de la longitud de onda. A 435 MHz (UHF), se puede esperar que las ondas hayan cambiado su plano de polarización en 1.5 grados a causa del tránsito por la ionosfera, mientras que las ondas de 1.2 GHz lo hacen en cerca de un cuadrante.

### 1.2.2 Ley de Ampere

André Marie Ampere fue un físico y matemático francés que en el año 1825 publico sus teorías en electrostática y electrodinámica, estudio la equivalencia entre imanes y corrientes y distinguió la diferencia entre tensión eléctrica y corriente eléctrica. Se le acredita a Ampere el descubrimiento del electromagnetismo.

La ley de Ampere expresa que si la onda luminosa es uniformemente sensitiva al campo magnético a lo largo del camino de la onda luminosa y si este camino define un lazo o bucle cerrado, entonces la rotación acumulada del plano de polarización de la onda luminosa debido al campo es directamente proporcional a la corriente fluyendo por el conductor encerrado por el lazo.

Figura 2. Ley de Ampere



Fuente: página web. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org) – Portal de descargas

### 1.2.3 Efecto Kerr

Descubierto en 1875 por el físico escocés **John Kerr**, el **efecto Kerr** es una birrefringencia o doble refracción, creada en un material por un campo eléctrico exterior. Se caracteriza por la existencia de dos índices de refracción diferentes: un haz luminoso se divide en dos haces cuando penetra en este material.

La birrefringencia creada, a diferencia de la del efecto Pockels, varía según el cuadrado del campo eléctrico aplicado. Los materiales presentan en general un efecto Kerr muy débil, sin embargo, algunos líquidos presentan un efecto Kerr medible.

Un campo eléctrico aplicado a un material genera una birrefringencia en ese material: la luz tiene un índice de refracción diferente según su polarización sea ortogonal o paralela al campo. La diferencia entre los dos índices **n<sub>2</sub>-n<sub>1</sub>** es:

$$\Delta n = \lambda K E^2 ,$$

**K** es la constante Kerr, cuando K es positiva, **n<sub>2</sub>-n<sub>1</sub>** es positivo y la sustancia se comporta como un cristal uniaxial positivo.

**E** es la amplitud del campo eléctrico.

### 1.2.4. Efecto Pockels

El efecto electro-óptico Pockels produce una birrefringencia en un medio óptico inducido por un constante o cambiante campo eléctrico. A diferencia del efecto Kerr, el efecto Pockels produce una birrefringencia proporcional al campo eléctrico, mientras que en el efecto Kerr es al cuadrado del campo. El efecto Pockels ocurre solo en cristales desprovistos de un centro de simetría, como el Litio Nobio Oxígeno y el Galio Arsénico.

Friedrich Carl Alwin Pockels estudio el efecto que lleva su nombre en 1880, este efecto es utilizado para la fabricación de celdas Pockels, estas no son mas que un monocristal orientado sin centro de simetría sumergido en un campo eléctrico controlable.

El campo eléctrico puede ser aplicado al cristal ya sea de forma longitudinal o transversal al rayo de luz. El eje del cristal puede ser longitudinal o transversal. Una celda longitudinal es un poco más grande, y los cristales son un poco menos eficientes en este modo. El alineamiento del eje del cristal con el eje del rayo es crítico, ya que el des-alineamiento produce una birrefringencia y un cambio en la fase a lo largo del cristal, y estos una rotación polarizada, si el alineamiento no es exactamente paralelo o perpendicular a la polarización.

Una celda transversal consiste en dos cristales en una orientación opuesta, esto produce un valor cero de la onda cuando el voltaje es llevado a cero. Esta celda no es ideal y tiene cambios debido a la temperatura. El alineamiento mecánico del eje del cristal no es tan crítico y es regularmente hecho con la mano sin necesidad de desarmadores; mientras el des-alineamiento produce una energía en un sentido erróneo, en contraste al caso longitudinal, este no es amplificado proporcionalmente a la longitud del cristal.

Las celdas de Pockels son comúnmente usadas para rotar la polarización del rayo de luz que pasa a través de ellas.

Debido a la gran constante dieléctrica del cristal, las celdas Pockels se comportan como un capacitor. Cuando estas se maniobran a un estado de alto voltaje, se necesita una alta descarga, consecuentemente, estas rápidas maniobras requieren el manejo de grandes corrientes. Las celdas Pockels para fibra óptica utilizan un diseño de onda viajera para reducir los requerimientos de corriente.

Las celdas Pockels son utilizadas en una variedad de aplicaciones técnicas cuando se combinan con un polarizador:

1. Maniobras de apertura y cerrado en nanosegundos.
2. Imprimir información en el rayo por medio de modulación de la rotación entre cero y noventa grados.
3. Obtener una señal de amplitud modulada de la intensidad del rayo, cuando es visto por medio del polarizador.
4. Prevenir el feedback utilizando el prisma polarizador.

### **1.3 Consideraciones básicas acerca de las fibras ópticas**

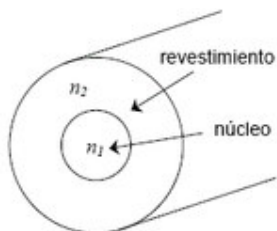
Fibra óptica, guía o conducto de ondas en forma de filamento, generalmente de vidrio (polisilicio), aunque también puede ser de materiales plásticos, capaz de transportar una potencia óptica en forma de luz, normalmente emitida por un láser o LED. Las fibras utilizadas en telecomunicación a largas distancias son siempre de vidrio, utilizándose las de plástico solo en algunas redes locales y otras aplicaciones de corta distancia, debido a que presentan mayor atenuación o posibilidad de sufrir interferencias.

En el interior de una fibra óptica, la luz se va reflejando contra las paredes en ángulos muy abiertos, de tal forma que prácticamente avanza por su centro. De este modo, se pueden guiar las señales luminosas sin pérdidas por largas distancias.

La fibra óptica ha representado una revolución en el mundo de las telecomunicaciones, por cuanto ha desplazado a los cables de cobre para la transmisión de grandes cantidades de información, sea en forma de canales telefónicos, televisión, datos, etc.

Las diferentes trayectorias que puede seguir un haz de luz en el interior de una fibra se denominan modos de propagación.

**Figura 3. Ejemplo de Fibra óptica**



Fuente: página web. [www.monografias.com](http://www.monografias.com) – Fibra óptica

Una fibra multimodo es una fibra que puede propagar más de un modo de luz. Una fibra multimodo puede tener más de mil modos de propagación de luz. Las fibras multimodo se usan comúnmente en aplicaciones de corta distancia, menores a 1 km. Simple de diseñar y económico. El núcleo de una fibra multimodo es inferior, pero del mismo orden de magnitud, que el revestimiento. Debido al gran tamaño del núcleo de una fibra multimodo, es más fácil de conectar y tiene una mayor tolerancia a componentes de menor precisión.

Una fibra monomodo es una fibra óptica en la que sólo se propaga un modo de luz. Se logra reduciendo el diámetro del núcleo de la fibra hasta un tamaño que sólo permite un modo de propagación. Se utiliza en aplicaciones de larga distancia, más de 300 km.

La fibra óptica se emplea en multitud de sistemas y el actual auge de los sistemas de banda ancha se debe en gran medida a la elevada capacidad de tráfico que pueden transmitir las redes de las operadoras basadas en fibra óptica. Las fibras ópticas pueden ahora usarse como los alambres de cobre convencionales, tanto en pequeños ambientes, dada la dificultad de hacer imperceptible una interceptación de los datos transmitidos.

Algunas de las desventajas son el costo, la fragilidad de las fibras, la disponibilidad limitada de conectores y la dificultad de reparar un cable de fibras roto en el campo.



Charles Kao en su tesis doctoral de 1966 estimó que las máximas pérdidas que debería tener la fibra óptica para que resultara práctica en enlaces de comunicaciones eran de 20 dB/km. En 1970 los investigadores Maurer, Keck, Schultz y Zimar que trabajaban para Corning Glass Works fabricaron la primera fibra óptica dopando el sílice con titanio. Las pérdidas eran de 17 dB/km.

El primer enlace transoceánico con fibras ópticas fue el TAT-8, comenzó a operar en 1988. Desde entonces se ha empleado fibra óptica en multitud de enlaces transoceánicos, entre ciudades y poco a poco se va extendiendo su uso desde las redes troncales de las operadoras hacia los usuarios finales.

**Figura 4. Fibra óptica brillando cuando transmite luz.**



Fuente: página web. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org) – Fibra óptica

Algunos de los usos que se le ha dado a la fibra óptica son:

- Se puede usar como una guía de onda en aplicaciones médicas o industriales en las que es necesario guiar un haz de luz hasta un blanco que no se encuentra en la línea de visión.
- La fibra óptica se puede emplear como sensor para medir tensiones, voltajes, corrientes, temperatura, presión así como otros parámetros.
- Es posible usar latiguillos de fibra junto con lentes para fabricar instrumentos de visualización largos y delgados llamados endoscopios. Los endoscopios se usan en medicina para visualizar objetos a través de un agujero pequeño. Los endoscopios industriales se usan para propósitos similares, como por ejemplo, para inspeccionar el interior de turbinas.
- Las fibras ópticas se han empleado también para usos decorativos incluyendo iluminación, árboles de Navidad.

## **2. TRANSDUCTORES ÓPTICOS DE VOLTAJE Y CORRIENTE**

### **2.1 Transductores eléctricos**

Un transductor se define como un dispositivo, usualmente eléctrico, electrónico o electromecánico, que transforma un tipo de energía a otro para diferentes propósitos tales como, medición y transferencia de información. Generalmente, un transductor es un dispositivo que convierte una señal de una forma a otra.

Algunos ejemplos de transductores son los termómetros, sensores de posición, sensores de presión, fotoceldas, galvanómetros, etc. Los transductores están clasificados según su funcionamiento como electromecánicos, electroquímicos, electroacústicos, fotoeléctricos, electromagnéticos, electroestáticos, termoeléctricos, y otros.

El transductor eléctrico se utiliza comúnmente para convertir una variable física en una señal eléctrica. Estos dispositivos son muy útiles para interconectar sistemas similares.

Un transductor óptico realiza la transformación de energía por medio de diferentes métodos, utilizando los principios físicos descritos en el capítulo uno. La transformación de la variable da como resultado una mejor eficiencia en la medición. En el presente capítulo ampliaremos la información de los diferentes tipos de traductores ópticos para la medición de corriente y voltaje en aplicaciones de alta tensión.

El transformador óptico digital es utilizado para la medición de corriente y voltaje en sistemas de potencia.

El instrumento esta destinado para aplicaciones de protección, medición, control y supervisión de la calidad de energía. Estos transformadores combinan técnicas tradicionales de medición conjuntamente con señales ópticas para transmisión, permitiendo esto, una conexión no conductiva entre el transductor en la subestación y la interfase en el cuarto de control.

### **Transductor óptico de corriente**

La medición de la intensidad que viaja en un conductor permite conocer condiciones de funcionamiento de los equipos conectados a la línea, detectar y prevenir fallos, optimizar el flujo de energía, cerrar el lazo de control de dispositivos y establecer la facturación del consumo de energía. En alta tensión es demasiada riesgosa la manipulación de elementos conectados a la línea, por lo que se descarta la idea de utilizar amperímetros en serie. Es necesario utilizar métodos indirectos para la medición de corriente. Los métodos convencionales de medida de grandes corrientes son los transformadores de corriente y las sondas de efecto Hall.

Aunque los transformadores de corriente convencionales dominan el mercado, estos tienen algunas limitaciones como:

1. No pueden medir corriente directa.
2. Pueden haber problemas de aislamiento entre primario y secundario
3. Se saturan con picos de corrientes debidos a fallas
4. Tienen problemas de histéresis y en consecuencia de calentamiento
5. La tensión en bornes es muy alta cuando se encuentran en vacío debido a la relación de espiras.
6. Se ven influidos por interferencias electromagnéticas

En los años recientes se han desarrollado nuevas tecnologías tales como los sensores de corriente basados en anillos de Rogowski. Estos instrumentos están basados en la ley de inducción de Faraday y necesitan un integrador para obtener la intensidad que circula por el primario. Su principal atractivo es que pueden medir altas frecuencias, pero la desventaja es que al integrar la fuerza electromotriz inducida no miden corriente continua.

Las investigaciones sobre las propiedades ópticas de los materiales influidos por un campo magnético ha sido la base para desarrollar la tecnología de los sensores magneto ópticos.

Más de cien años después de que Michael Faraday descubriera la relación que existe entre la polarización de una onda electromagnética a la entrada y la polarización de la onda a la salida de un material imanado, A.J. Rogers propuso un método para la medida de corriente con un método óptico. Desde entonces el desarrollo de esta tecnología ha ido mejorando.

La principal ventaja de los transductores ópticos de corriente es que pueden medir, a distancia, campos magnéticos que son proporcionales a intensidades. Además, como la luz es la que transmite la información medida ganamos un aislamiento total entre primario y secundario. Otra de las ventajas que agrada a los ingenieros eléctricos es que no tienen problemas de saturación en condiciones de falla y su ancho de banda es prácticamente ilimitado, es decir, también puede medir corriente continua.

Las importantes desventajas del transductor óptico que se deben tomar en consideración en el momento del diseño son:

- La baja sensibilidad
- Las pequeñas variaciones en el ángulo de rotación en el plano de polarización de la luz, este ángulo es proporcional a la magnitud medida.

Debido a lo anterior es necesaria la incorporación de amplificadores con una alta ganancia para obtener medidas aceptables. Además, las propiedades ópticas de los materiales, su constante Verdet, dependen de la temperatura en mayor o menor medida dependiendo de la composición química del sensor.

### **2.3 Principio de operación del transductor óptico de corriente**

En años recientes los transductores ópticos de corriente y voltaje han alcanzado un alto grado de madurez en su desarrollo y están empezando a competir con los transformadores de instrumentos convencionales. Los transductores de fibra óptica se pueden adaptar muy bien a las condiciones de alto voltaje, esto es debido a que son inmunes a las interferencias electromagnéticas y no existe conexión galvánica entre la cabeza del sensor en alto voltaje y los circuitos electrónicos de la subestación.

Existen varios tipos de sensores desarrollados por los fabricantes de los transductores ópticos de corriente, pero todos tienen como base de funcionamiento los principios ópticos desarrollados en el capítulo uno.

El fabricante NXP HASE utiliza en sus transductores de corriente un diseño interferométrico. El diseño utiliza una fibra óptica que actúa como material magnetoóptico, la fibra se enrolla alrededor de un conductor. La luz entra al enrollamiento a través de un acoplador de fibra óptica que la divide en dos haces. Cada uno de ellos tiene la luz polarizada en un sentido. Si por el conductor no circula intensidad, la luz que se recupera en el sensor es la misma que la emite la fuente. Si por el contrario el conductor lleva corriente se crea un campo magnético que lleva la misma dirección que la fibra y sentidos contrarios o iguales a la circulación de la luz, dependiendo del haz que se considere. Debido a que el efecto Faraday es no recíproco, es decir, este depende del sentido del campo magnético.

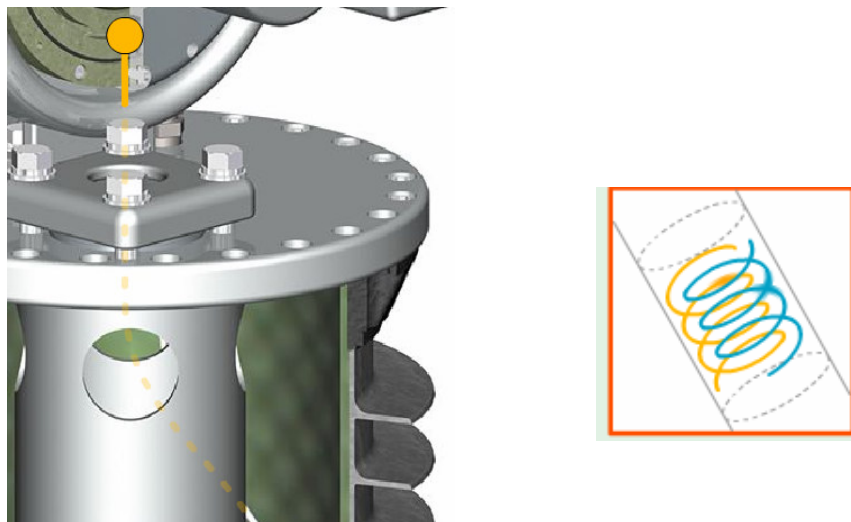
Cuando los haces se recomponen de nuevo en el acoplador de la fibra, la luz tiene la fase desplazada con respecto al emisor. La relación matemática es una senoidal al cuadrado.

Los diferentes pasos en que se recoge la señal de corriente en el transductor serán analizados a continuación.

El transductor empieza a funcionar cuando el modulo opto-electrónico en el cuarto de control, convierte la señal de un diodo emisor de luz, en dos señales ortogonalmente polarizadas. Estas señales son transmitidas hacia la cabeza del sensor por medio de fibra óptica capaz de mantener la polarización.

En el tope de la columna del instrumento se encuentra instalado un polarizador elíptico, que no es más que una placa de cuarto de onda. Este polarizador convierte las dos señales de luz ortogonalmente polarizadas en una polarización elíptica de izquierda-derecha.

**Figura 5. Polarización en el sensor óptico**

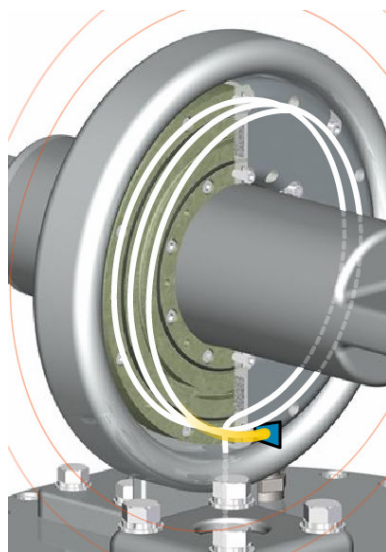


Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

Las señales viajan en la fibra óptica enrollada alrededor del conductor muchas veces. El campo magnético generado por la corriente que fluye en el conductor desacelera una señal y acelera la otra, dándose el efecto Faraday.

Cuando las señales circularmente polarizadas completan su camino en la fibra alrededor del conductor, estas son reflejadas por medio de un espejo en el sensor. Las señales viajan de regreso por medio de la fibra y la dirección de sus polarizaciones es invertida. Cuando se da esta inversión el efecto Faraday se duplica. Las señales mantienen su diferencia de velocidad para el viaje de retorno alrededor de la fibra.

**Figura 6. Reflector en el sensor óptico**



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

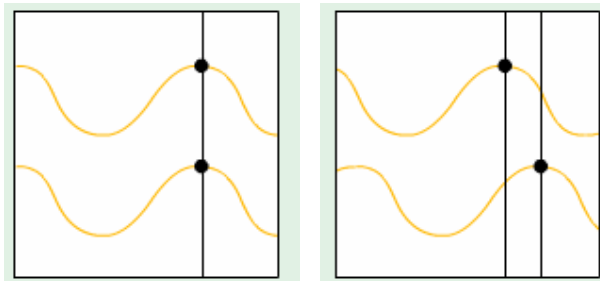
Las dos señales viajan ahora de regreso y pasan de nuevo por el polarizador elíptico. El polarizador las convierte nuevamente en haces de luz ortogonalmente polarizados. Las dos ondas son recombinadas en el polarizador, luego descienden por medio de la fibra en la columna aislante del transductor hacia un fotodetector del modulo opto-electrónico.



La diferencia en la velocidad de propagación se traduce en un cambio de fase entre los dos haces de luz. Como las dos señales han viajado sobre un camino idéntico, los cambios de temperatura y vibración, afectan de la misma forma a las dos señales, por lo que la medición de corriente es altamente precisa y se mantiene sin perturbaciones.

Cuando por el conductor no circula corriente, las dos señales viajan en fase por la fibra óptica, pero cuando la corriente circula en el conductor, el efecto magneto-óptico cambia las señales de luz en una dirección opuesta, poniéndolas fuera de fase.

**Figura 7. Desfase de las señales ópticas**



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

Por último, el módulo opto-electrónico mide la diferencia del tiempo de recorrido entre las dos ondas luminosas, y es una medida precisa de la corriente que fluye en el conductor.

El módulo opto-electrónico es capaz de medir diferencias en el tiempo de  $10E-21$  a  $10E-15$  segundos, para un rango de corrientes de 100mA a 100 kA. Un modulador convierte la señal del tiempo de desfase en una onda portadora de alta frecuencia. La señal es desmodulada en el fotodetector, y esta es convertida a una forma digital regularmente descrita por 16 bits. El tiempo total que se toma una medición de corriente para que se muestre en el sensor de salida es de 11.25 microsegundos, con una incertidumbre de 100 nanosegundos.

Como la señal es convertida en una onda portadora de alta frecuencia el sensor responde a una frecuencia igual a  $\frac{1}{4}$  de la onda portadora de alta frecuencia.

### **2.3.1 Componentes del transductor óptico de corriente**

El transductor óptico de corriente esta constituido por partes separables, los que lo hace más liviano para su transporte e instalación. Las partes del transformador óptico de corriente son: el modulo opto electrónico, el cableado de fibra óptica y las columnas aislantes donde se encuentra el sensor principal.

El modulo opto-electrónico situado en el cuarto de control de la subestación es fácilmente configurable. En este se encuentran los componentes electrónicos tales como, el fotodetector, la fuente de luz, fuente de poder, y otros elementos electrónicos.

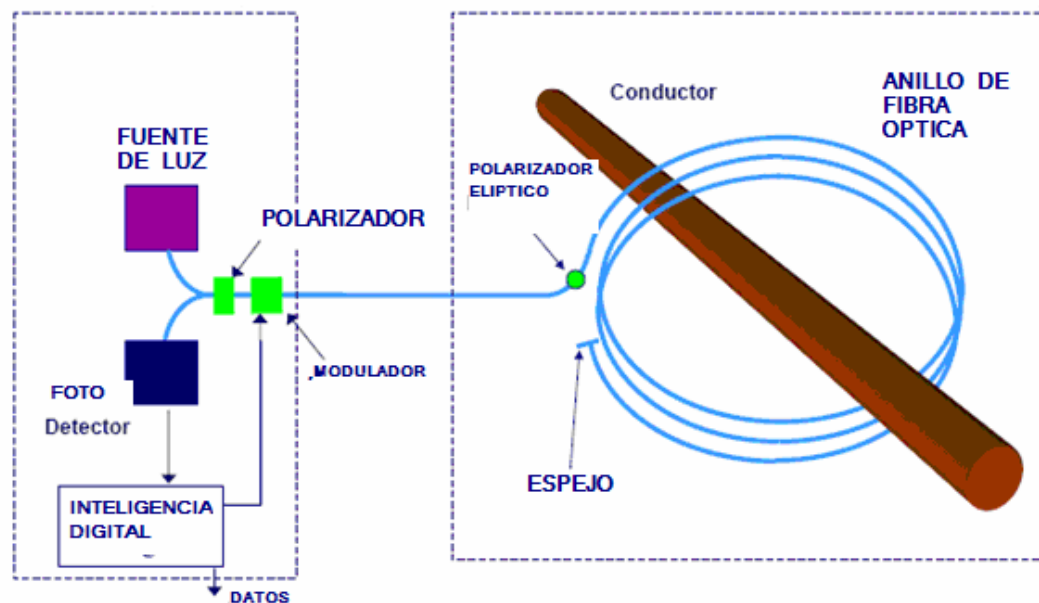
El diseño altamente flexible permite varias configuraciones para las aplicaciones de medición o protección. El modulo esta disponible en varios rangos de interfases, capaz de hacer conexiones análogas con medidores y relevadores, así como, comunicase por medio de protocolos digitales. El usuario tiene disponible un completo historial de los sucesos que han ocurrido con la corriente, el módulo es capaz de almacenar toda la información.

El cableado de fibra óptica lo despachan con sus terminaciones de fábrica para una instalación más sencilla. El cableado se debe ordenar al fabricante con una longitud definida para su instalación. El cableado puede instalarse aéreo, subterráneo (con opción contra roedores), o en tubería conduit.

Las columnas de sensores de alto voltaje están basadas en un diseño pasivo, en donde no se encuentra un solo componente electrónico en el campo donde se encuentran instalados los equipos de la subestación. Las columnas aislantes están diseñadas para que tengan un bajo grado de mantenimiento, gracias a que no utilizan gases SF6, o aceite mineral, o papel para aislamiento.

En la cabeza de la columna se encuentra ubicado el enrollamiento de fibra óptica, el reflector y un polarizador. En el módulo opto-electrónico están ubicados el modulador, el polarizador, la fuente de luz, el fotodetector y los circuitos digitales para el procesamiento de las señales.

**Figura 8. Sensor de corriente de fibra óptica**



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

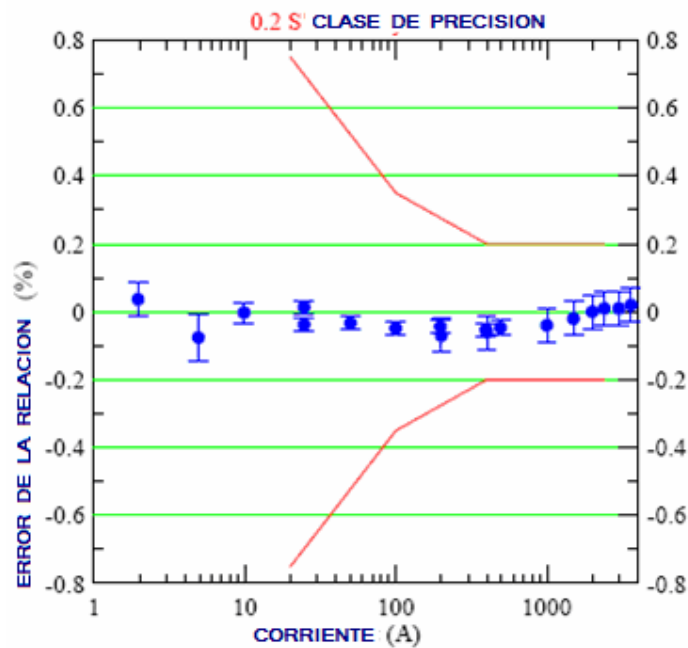
La alta precisión en la medición se gana gracias al modulador y a la electrónica en el módulo ubicado en el cuarto de control, estos permiten mediciones precisas, excediendo la norma IEEE clase 0.15S.

Se pueden lograr mediciones en un rango dinámico de 1A (rms) hasta 4,000 A (rms), para aplicaciones de medición, y censando transitorios de corriente de hasta 80KA rms, o 216KA pico.

### 2.3.2 Precisión del transductor óptico de corriente

Una de las características mas importantes de los transductores ópticos de corriente para instalaciones en alto voltaje es la precisión. El transductor excede en precisión a las normas ANSI/IEEE clase 0.15 y la IEC clase 0.2S.

Figura 9. Error de relación vs corriente para el transductor de corriente

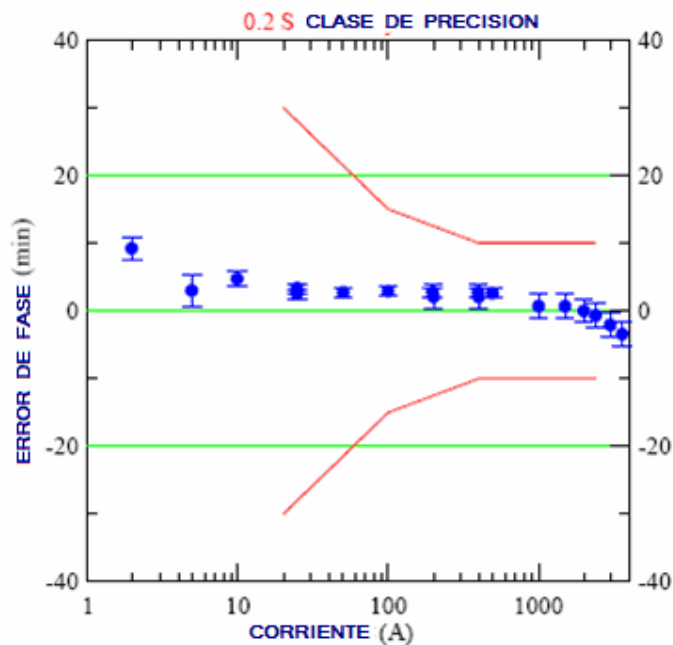


Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

La gráfica anterior muestra la relación entre el error en la relación de transformación y la corriente en la línea, en un marco donde supera la clase IEC 0.2S.

Como se puede observar, para intensidades menores de 10 amperios es cuando se presenta el mayor error, sin embargo, esta medición se encuentra fuera del rango dinámico del sensor, y para intensidades mayores el error es casi imperceptible. Aun así, el porcentaje de error no supera el 1.5%, en todo el rango dinámico de medición.

**Figura 10. Error de fase vrs corriente para transformador de corriente**



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

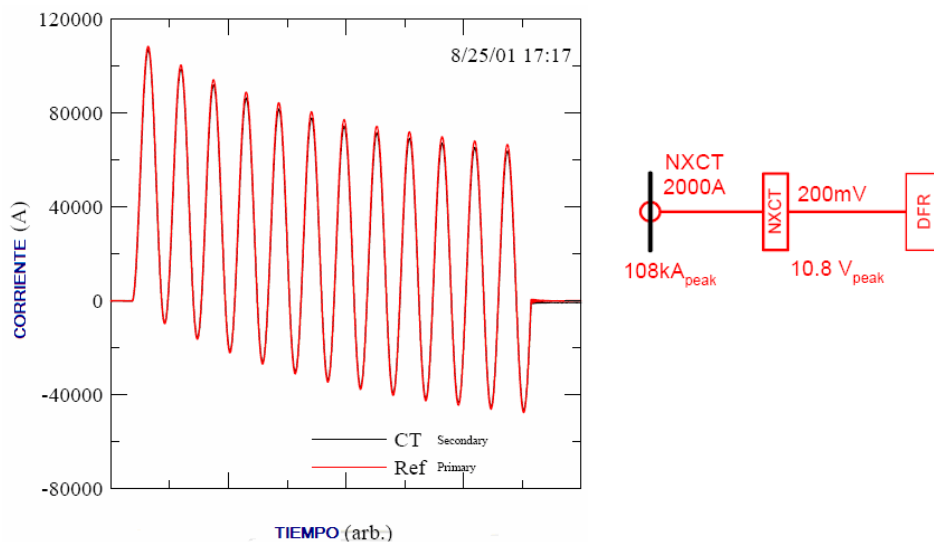
En esta nueva gráfica se puede observar que el error en la fase no es mayor a 5 minutos dentro de todo el rango dinámico de medición.

En lo que se refiere a la utilización del transductor óptico para aplicaciones de protección, el mismo transductor óptico es capaz de realizar una replica exacta de la corriente primaria.

Por ejemplo, si en el circuito primario ocurre un transitorio de corriente de 108KA pico, en un offset positivo, y la corriente nominal es de 2000 A, el transductor responde de la siguiente forma: como el transductor tienen en el secundario un voltaje nominal de 200mV correspondiente a los 2000 nominales, el secundario mide un pico de 10.8 V y reproduce los sags del transitorio casi instantáneamente. Además, esta señal es enviada directamente al relevador correspondiente para que analice si es necesario el disparo o no. En la grafica siguiente se puede observar el ejemplo.

En la gráfica se puede observar que el proporcional a la corriente secundaria se dibuja casi exactamente sobre la grafica de referencia en el primario.

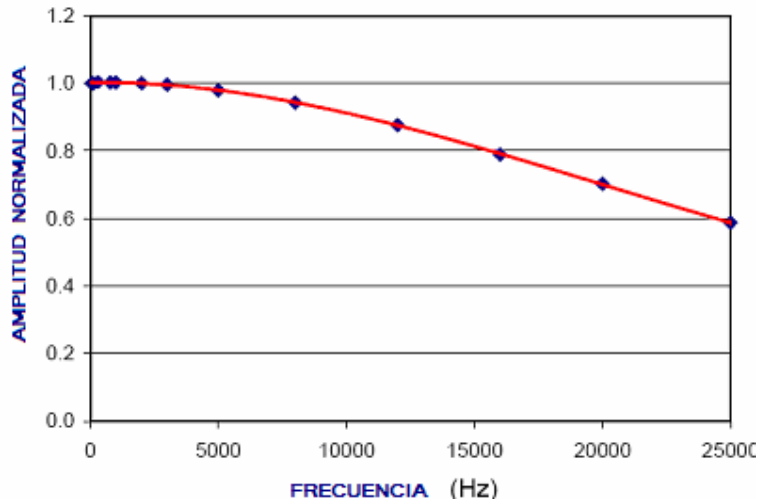
**Figura 11. Corriente Primaria y Corriente Secundaria**



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

La gráfica siguiente define la respuesta a la frecuencia que tiene un transductor óptico de corriente sometido a una prueba con una corriente de 100KA pico. Se puede observar que a 60HZ la amplitud normalizada se mantiene en la unidad.

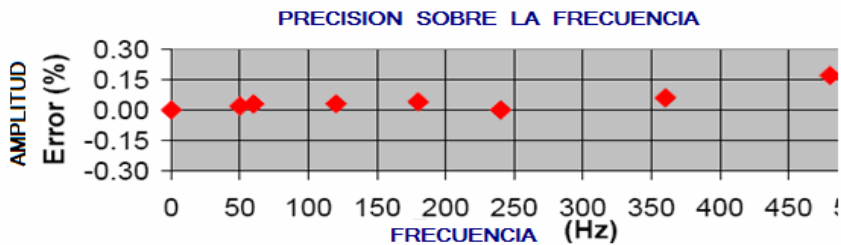
**Figura 12. Amplitud vrs Frecuencia para transductor de corriente**



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

Por último, en la siguiente gráfica se puede apreciar que la precisión del sensor respecto a la respuesta a la frecuencia se da en una forma muy horizontal, en donde no supera el 0.15% de error en la amplitud. A 60HZ el error es menor al 0.1%. Esta respuesta a la frecuencia lo hace un instrumento ideal para aplicaciones de monitoreos de línea, calibraciones en vivo, y generación de altas corrientes.

**Figura 13. Porcentaje de error de amplitud vrs Frecuencia para transductor de corriente**



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

### **2.3.3 Ventajas del transductor óptico de corriente**

Algunas de las ventajas del transductor óptico de corriente ya se mencionaron anteriormente, sin embargo en este inciso se enumeran las ventajas más importantes en la utilización de estos equipos.

#### **Ventajas de operación:**

- La precisión excede las normas ANSI/IEEE clase 0.15 e IEC clase 0.2S
- Un largo rango dinámico.
- Un ancho de banda desde CD hasta la armónica +100th
- Buen funcionamiento en regiones altamente sísmicas.
- El usuario configura la relación de transformación.
- No existe la saturación del transformador
- Excelente precisión de fases.

#### **Ventajas ambientales y en seguridad:**

- No utiliza aislamiento de aceite o SF6
- No existe riesgo de secundarios en circuito abierto
- No se da la ferresonancia
- Aislamiento galvánico de la línea de alta tensión.

#### **Ventajas en la instalación e innovaciones:**

- El peso es un 10% de un transformador de corriente convencional.
- El voltaje y la corriente pueden estar combinados en un equipo.
- Medición de corriente cero.
- El mismo instrumento para medición, protección y calidad de energía.
- Capaz de monitorearse a si mismo.
- La interfase gráfica es amigable y permite el monitoreo del sistema y la modificación de los parámetros.



- Simplifica el diseño de la subestación un solo diseño para múltiples aplicaciones.

## **2.4 Transductor óptico de voltaje**

### **2.4.1 Principio de operación del transductor óptico de voltaje**

Las tecnología en la fabricación de transductores de voltaje y corriente ópticos esta emergiendo en el sector eléctrico con muchas ventajas respecto de los transformadores de instrumento convencionales, basados en acoplamientos inductivos o capacitivos.

Para medir voltaje por medio del campo eléctrico, se puede utilizar uno de dos principios básicos: la integración del campo eléctrico y el blindaje del campo eléctrico. Para implementar el método de la integral de línea del campo eléctrico se debe combinar ya sea, un gran efecto Pockels, o fibra óptica con elementos piezoeléctricos, o una distribución uniforme del efecto Pockels, o sensores de fibra óptica con elementos piezoeléctricos entre una terminal en alto voltaje y una terminal de tierra. El transductor detecta la componente longitudinal del campo eléctrico entre terminales. Esto da una medida de la integral de línea de la componente longitudinal del campo eléctrico que es proporcional al voltaje.

La implementación de blindar el campo eléctrico involucra encerrar una región entre las terminales de alto voltaje y tierra por medio de paredes metálicas, y la colocación de un sensor de campo electro-óptico en algún lugar de la región encerrada. La geometría en esta región es determinada y se aísla de influencias eléctricas externas, por lo que el campo eléctrico medido en cualquier punto de la región da una medida del voltaje.

Debido al tamaño limitado de los elementos sensores (aproximadamente 25cm) en el caso de implementar una integración de línea y debido a que el espacio es limitado en el caso de un blindaje metálico, las terminales metálicas en ambos casos deben estar lo mas cerca una de la otra, resultando en un gran estrés de campo eléctrico presente a altos voltajes. Por lo tanto, un aislamiento poco ambiental como el SF6, se requiere para soportar el estrés en los transductores ópticos de voltaje.

El transductor de la firma NXTPHASE utiliza un método eficiente de integral de línea, conocido como el método en cuadratura, y un nuevo método para el blindaje del campo eléctrico, conocido como blindaje por permitividad. Ambos métodos, junto con tres sensores ópticos para campo eléctrico miden la tensión con muy buena precisión.

El método en cuadratura es utilizado para escoger las posiciones, pesos, y las salidas de los sensores, para reproducir una integración de línea óptima del campo eléctrico. El blindaje por permitividad es utilizado para reducir las perturbaciones al campo eléctrico debidas por el acercamiento entre fases, movimientos de equipos cercanos, y contaminación en el exterior del transductor. Este método permite que el transductor tenga electrodos internos con gran separación, eliminando la utilización de SF6. En lugar de SF6 el transductor utiliza gas nitrógeno a una presión mayor de 14psi-g para el aislamiento.

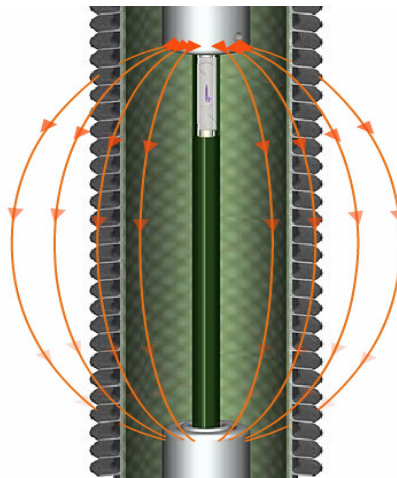
El transductor esta dentro de una columna aislante. Además, resistores cilíndricos huecos están montados dentro del aislador extendiéndose entre dos electrodos colocados a los extremos del aislador, lo anterior permite el blindaje por permitividad. Tres sensores de campo eléctrico en miniatura están posicionados dentro de las resistencias de acuerdo al método de cuadratura. Los diámetros de los aisladores son aproximadamente de 0.3m a 0.5m, su altura entre 1.5m y 2.7m para 138KV y 345KV respectivamente.

El transductor cuenta con señales de salidas digitales y análogas. Las señales análogas pueden ser a bajo voltaje (4V) y a alto voltaje (69V o 115V). La señal digital es la señal natural del instrumento, mientras que la señal análoga es derivada de la señal digital. Todas las señales tienen un retraso en el tiempo de cuatro microsegundos, debido al procesamiento digital. El desplazamiento de fase es establecido a cero utilizando la compensación digital de fase.

A continuación se detalla el proceso de medición del instrumento:

El sensor de voltaje con tecnología óptica esta basado en el efecto Pockels, reproduce una medida de gran precisión utilizando múltiples sensores ópticos con un peso promedio determinado.

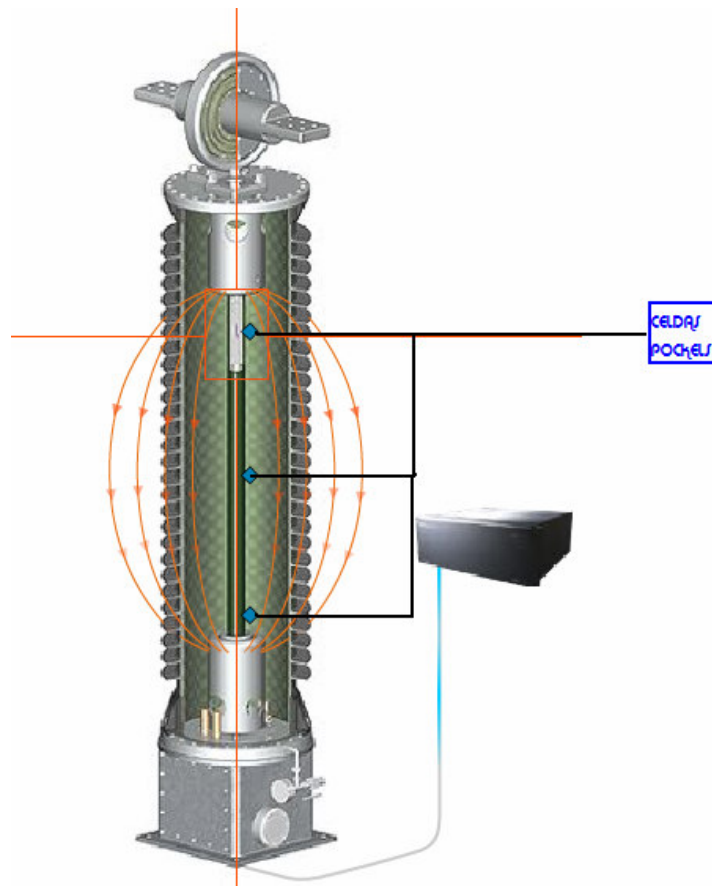
**Figura 14. Líneas de campo de los sensores de voltaje**



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

El voltaje en un conductor crea un campo eléctrico entre el conductor y tierra. Un modulo opto-electrónico especial en el cuarto de control, envía una señal de luz desde un LED por medio de fibra óptica. La señal viaja hacia arriba en la columna aisladora del transductor. La señal de luz entra en cristales electro-ópticos (una celda pockels ), localizados en tres puntos estratégicos de la columna aislante de la alta tensión del transductor.

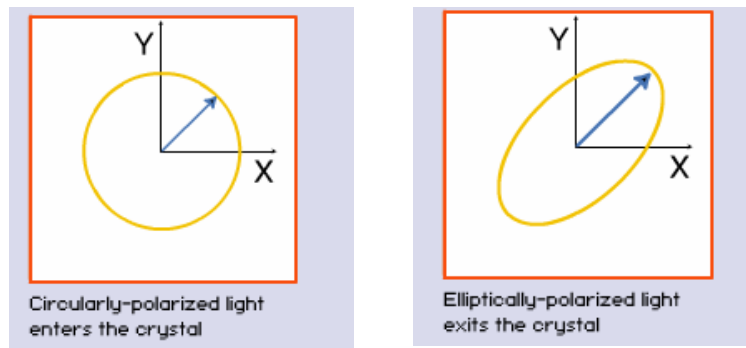
**Figura 15. Celdas Pockels**



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

Mientras la señal de luz atraviesa el cristal, el campo eléctrico cambia su polarización circular a una polarización elíptica. Midiendo la “elipticidad” relativa en cada eje del cuadrante en la salida del cristal, se obtiene una medida precisa del campo eléctrico.

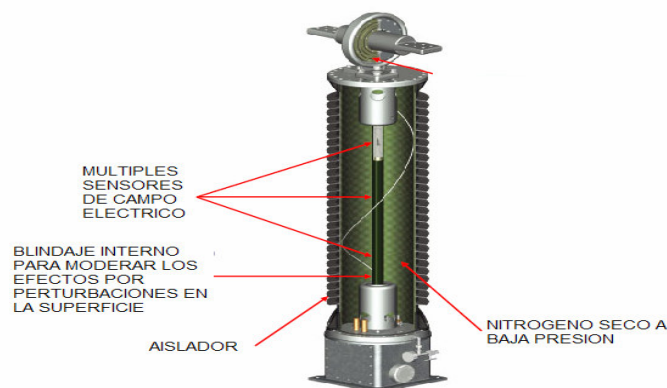
**Figura 16. Cambio en la polarización de la luz**



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

La información es tomada de los tres cristales o sensores estratégicamente colocados a lo largo de la columna. La información es combinada para reproducir una medida altamente precisa del voltaje. La medida de voltaje es inmune a influencias externas tales como la presencia de otras estructuras de alto voltaje o contaminación superficial.

**Figura 17. Transductor óptico de voltaje**



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

### 2.4.2 Diseño del transductor óptico de voltaje

El método en cuadratura, que se define en esta sección, es el principio de operación del transductor óptico de voltaje. La teoría electromagnética indica que el voltaje entre dos puntos **a y b**, puede expresarse como la integral de línea de la componente del campo eléctrico que es tangente a la línea que une a y b. Tomando la integración del camino a lo largo de **a y b**, además, suponiendo que se encuentra en el eje x, y aproximando la integral por medio de una suma de pesos se formula lo siguiente:

$$V_{ba} = - \int_a^b E_x(x) dx \approx - \sum_{i=1}^N \alpha_i E_x(x_i)$$

Donde:  $E_i$  es la componente x del campo eléctrico.  $N$  es el número de muestra,  $(X_i)$  es la posición de la muestra, y  $\alpha_i$  es el peso de las muestras.

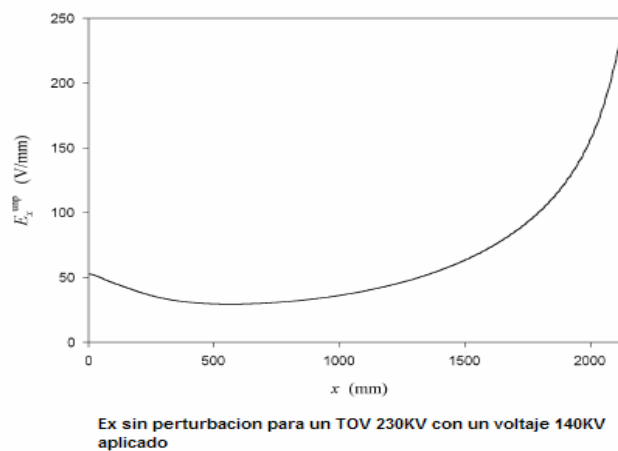
El método en cuadratura determina algunos elementos básicos del diseño como: el número de sensores ( $N$ ), en donde exactamente deben estar localizados ( $X_i$ ), y cual debe ser el peso de cada salida. ( $\alpha_i$ )

La integral asume una geometría particular para el transductor óptico de voltaje, un sistema definido sin perturbaciones, y un inesperado caso de perturbación extrema del campo a lo largo del camino de integración.

Un sistema sin perturbaciones se define como una configuración particular de conductores y un medio, en donde existe para cada cual, un particular campo eléctrico  $E_x$  a lo largo del eje x, entre a y b, definido como  $E_x^{imp}$ , o el campo  $E_x$  sin perturbación.

El sistema sin perturbaciones del transductor óptico de voltaje consiste en situar el transductor en un plano de tierra, donde eje x es tomado como el eje de simetría del transductor óptico. Para el TOV el espacio entre los electrodos a y b, es de 2.16m. En la siguiente figura se muestra la simulación  $E_x^{unp}$ .

**Figura 18. Campo eléctrico vrs la distancia en el sensor**



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

Después de verificar la precisión necesaria para el comportamiento de  $E_x$  en condiciones de perturbación, se ha determinado que tres sensores de campo son suficientes para diseñar el transductor óptico de voltaje. El transductor para 230KV debe cumplir con las normas de la industria en relación a los niveles de precisión (IEC 0.2%), y debe mantener la precisión durante cambios externos en los equipos vecinos de la subestación, que afectarían la geometría externa en el diseño del transductor. La mínima libranza normalizada entre dos equipos de alta tensión en una subestación, se ajusta al rango máximo de perturbaciones. En general, si los cambios en la geometría son más cercanos al transductor, mayor es la distorsión del campo eléctrico dentro del transductor, y por lo tanto, se requiere un mayor número de sensores N para asegurar la precisión.

Varios tipos de perturbaciones fueron simulados durante pruebas y el resultado fue una medida de voltaje con un error menor de 0.2% para perturbaciones tales como cambios en las fases de los equipos vecinos y el acercamiento de una esfera conductora.

El método en cuadratura, junto con la componente  $E_x^{imp}$  del gráfico del campo sin perturbación y el número N escogido, sirven para determinar la localización y el peso de cada sensor. En la siguiente tabla se puede apreciar este hecho.

**Tabla I. Posiciones y pesos calculados para el sensor**

POSICIONES Y PESOS CALCULADOS PARA CADA MUESTRA (PESOS NORMALIZADOS AL PESO CALCULADO EN EL CENTRO DEL SENSOR)

MUESTRA	$x_i$ [mm]	$\alpha_i$
1	231.04	0.60048
2	1229.69	1.00000
3	1997.65	0.41681

Los sensores fueron montados en las posiciones indicadas por la muestra y la salida del sensor alimenta a un modulo electrónico para calcular el voltaje en tiempo real. En el cálculo de la integración se asume que los sensores de campo eléctrico idealmente miden solamente una componente del campo eléctrico en un solo punto.

Cada sensor individual es realmente un cristal miniatura cilíndrico de efecto Pockels, con 2cm de alto y 3.5mm de diámetro y el eje es alineado con el eje de simetría del aislador. Debido al sensor, la luz que viaja a través del eje del cristal es modulada por la componente axial del campo eléctrico. En cambio, el modulo electrónico que procesa la señal, demodula la señal y luego integra el campo eléctrico en tiempo real.

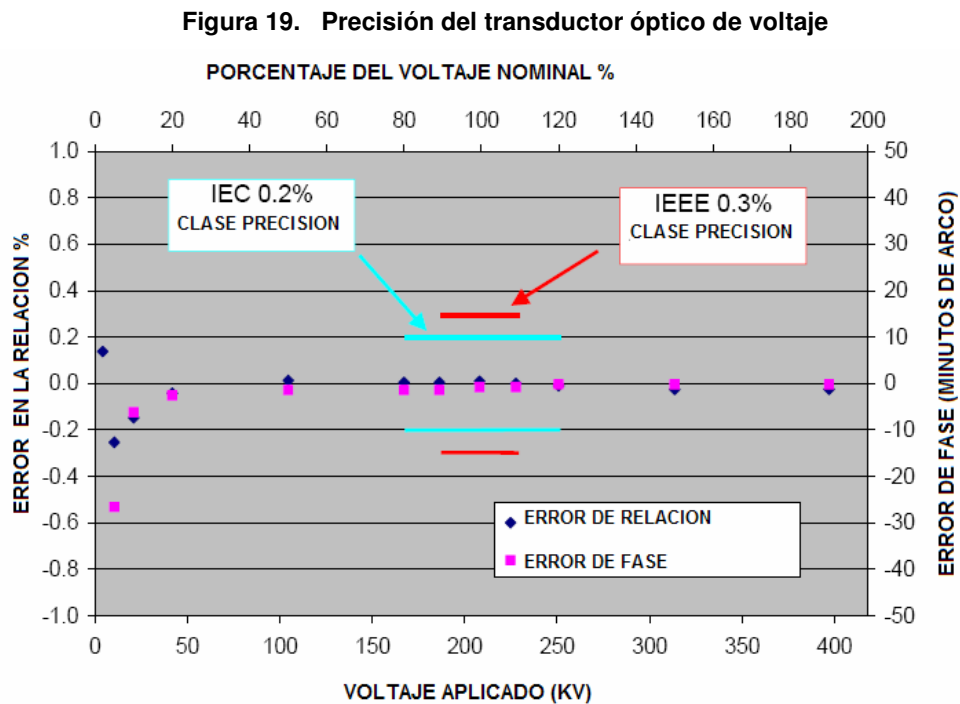


### 2.4.3 Precisión del transductor óptico de voltaje

El transductor óptico de voltaje es comúnmente utilizado en aplicaciones de medición, en donde involucra la cuantificación de la energía despachada. En esta aplicación la precisión del instrumento es de suma importancia. En aplicaciones de monitoreo de la calidad de energía se involucra al sensor con la medición del contenido armónico en la energía despachada y esta limitado al rango de frecuencias de los instrumentos.

Un transductor óptico de voltaje cuenta regularmente con un gran ancho de banda y gran rango dinámico, manteniendo la precisión sobre el rango.

En la siguiente figura se puede observar la linealidad en la precisión del transformador óptico de voltaje.

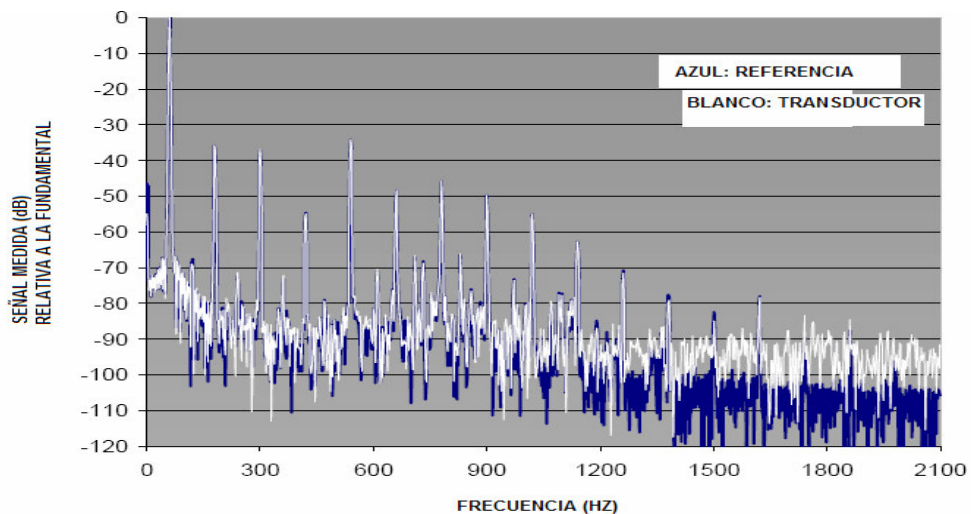


Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

En la gráfica se puede observar que los errores de fase y de relación de transformación para diferentes mediciones esta lejos de acercarse al limite del 0.2% de la clase de precisión IEC. La precisión en la medición se mantiene lineal a lo largo de todo el rango dinámico de medición del instrumento.

En el siguiente gráfico se puede observar el gran ancho de banda que tiene el instrumento, y su respuesta a la frecuencia. Esta característica lo hace un instrumento ideal para aplicaciones de calidad de energía y de medición de tensión en corriente directa. El ancho de banda del instrumento es de 40kHz.

**Figura 20. Respuesta en la salida a la frecuencia del sensor de voltaje**



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

#### **2.4.4 Ventajas del transductor óptico de voltaje**

Después de describir el funcionamiento, diseño y características del transductor óptico de voltaje se pueden definir claramente sus ventajas sobre los transformadores de potencial convencionales. El transductor óptico de voltaje mantiene su precisión sobre un ancho rango de temperatura, sobre un gran ancho de banda, y bajo disturbios ambientales incluyendo la contaminación y el hielo.

El transductor cumple con las distancias dieléctricas de alto voltaje requeridas y cumple con las normas más relevantes de la IEC e IEEE. El transductor no utiliza SF6, ni aceite dieléctrico y esta disponible para varias clases de voltajes hasta 550KV. También puede estar combinado en un solo equipo con el transductor óptico de corriente.

A continuación se detallan las diferentes ventajas del instrumento:

**Ventajas de operación:**

- La precisión excede las normas ANSI/IEEE clase 0.15 e IEC clase 0.2S
- Un ancho rango dinámico de operación.
- Un ancho de banda desde CD hasta la armónica +100th
- Buen funcionamiento en regiones altamente sísmicas.
- No existe la saturación del transformador
- Excelente precisión de fases.

**Ventajas ambientales y en seguridad:**

- No utiliza aislamiento de aceite o SF6
- No se da la ferresonancia
- Aislamiento galvánico de la línea de alta tensión.

**Ventajas en la instalación e innovaciones:**

- El peso es un 10% de un transformador de corriente convencional.
- El voltaje y la corriente pueden estar combinados en un equipo.
- El mismo instrumento para medición, protección y calidad de energía.
- Capaz de monitorearse a si mismo.
- La interfase gráfica es amigable y permite el monitoreo del sistema y la modificación de los parámetros.

- Simplifica el diseño de la subestación un solo diseño para múltiples aplicaciones.

## **2.5 Transductor óptico de voltaje y corriente**

### **2.5.1 Ventajas del transductor óptico de voltaje y corriente**

El sensor óptico de voltaje y corriente combina las ventajas de los dos transformadores de medición ópticos estudiados en las secciones anteriores, en un solo instrumento para voltajes hasta 550KV.

Su tamaño reducido y su peso comparado con los transformadores sumergidos en aceite convencionales permiten su instalación en subestaciones compactas o en subestaciones existentes donde el espacio es limitado. El instrumento combinado reemplaza algunos equipos convencionales y permite flexibilidad en el diseño de la subestación. A continuación se describen algunas de las ventajas del transductor.

En cuanto a la precisión para medición el diseño del transductor permite mediciones excediendo la clase de precisión IEC 0.2. En cuanto a la protección, el transductor también excede los requerimientos de la IEC e IEEE.

La precisión es mantenida dentro de un ancho rango dinámico desde 1 hasta 3000A con la capacidad del usuario de escoger la relación de transformación.

El transductor reproduce una precisa forma de onda dentro de un gran ancho de banda, lo que lo hace ideal para el análisis de armónicos y transitorios para aplicaciones de calidad de energía.

El peso liviano del transductor reduce los costos de transporte, de la estructura de soporte del sensor, y el equipo para la instalación. El peso liviano también permite la instalación del sensor en áreas sísmicamente activas.

La columna del transductor no contiene SF6 ni aceite. Las terminales de alto voltaje y las de tierra están bastante separadas hasta arriba y abajo del sensor respectivamente, reduciendo significativamente la posibilidad de falla. No hay problemas por restricciones ambientales o gas que haya que reciclar. Con el diseño óptico no hay problemas por secundarios abiertos de los transformadores de corriente o ferresonancia en el transformador de potencial.

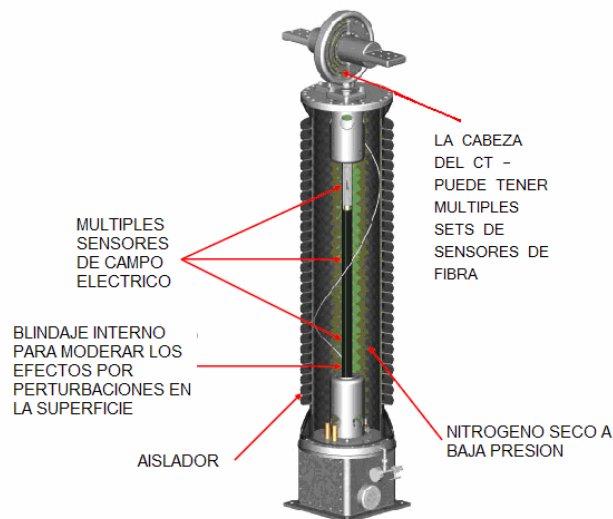
Por último, para el transductor óptico de voltaje y corriente se requiere poco mantenimiento debido a que no contiene componentes activos al voltaje de línea. No necesita pruebas periódicas del factor de disipación. La electrónica situada en el cuarto de control tiene la capacidad de auto diagnosticarse. La columna aislante del transductor es por sus componentes de hule y silicón no necesita limpiarse.

### **2.5.1 Precisión del transductor óptico de voltaje y corriente**

Como se dijo anteriormente el transductor combina las ventajas de voltaje y corriente de los dos transformadores ópticos individuales. El diseño del mismo es una combinación de ambos transductores, por lo tanto el sensor excede la precisión requerida por las normas IEC 0.2 e IEEE 0.3.

Los gráficos con relación a la precisión son exactamente los mismos descritos en las secciones anteriores.

**Figura 21. Diseño del transductor óptico de voltaje y corriente**



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

## 2.6 Transductores ópticos para protección y medición

### 2.6.1 Consideraciones técnicas para el uso de transductores para medición

Debido a que las señales de los transductores ópticos de medición son inherentemente digitales, hay que tomar en consideración el tipo de entradas que contienen y aceptan los equipos secundarios a donde van a ir conectados los instrumentos de medición.

Lo ideal para el uso de estos nuevos equipos de medición sería tener únicamente dispositivos secundarios inteligentes que aceptan las señales digitales, pero estos dispositivos todavía están en proceso de prueba y se cree que se fabricarán comercialmente dentro de unos años.

En estos momentos los fabricantes de los transductores ópticos, fabrican equipos de conversión y amplificación capaces de convertir las señales digitales a señales análogas para que los medidores acepten las señales de entrada. Los dos tipos de señales a las que se pueden convertir la palabra digital del transductor son: señales análogas de alta energía y señales análogas de baja energía. Este tipo de señales se detallara en el capitulo cuatro.

La señal análoga de alta energía es la más apropiada cuando se utilizan los transductores ópticos para medición. Esta interfase permite la instalación de los sensores ópticos y el medidor como si se estuvieran utilizando transformadores de medición convencionales. La medición optima se obtiene cuando se utiliza un medidor clase 2, el medidor actúa con la señal de 1 A de la salida análoga de alta energía. Cualquier medidor clase 20 comercialmente disponible en el mercado puede hacer interfase con la señal de salida de 1 A del transductor óptico de corriente. La precisión global del sistema de medición es superior a la precisión de un sistema utilizando medidores clase 20 y transformadores convencionales de medición.

### **2.6.2 Consideraciones técnicas para el uso de transductores ópticos para protección.**

La interfase análoga de baja energía es la más apropiada para la utilización de transductores ópticos para aplicaciones de protección. La mayoría de fabricantes de relevadores de protección soportan entradas análogas de baja energía. El comité de Relevadores para Sistemas de Potencia de la IEEE tiene un grupo de trabajo que esta desarrollando la normativa para el uso practico de las señales análogas de baja energía para los relevadores.

Las señales análogas de baja energía tienen ventaja sobre las de alta energía que tiene solamente una etapa de amplificación y cumplen con los requerimientos de las normas para salidas durante eventos de falla.

Las normas de protección piden que el instrumento de medición sea capaz de hacer una replica de la corriente de veinte veces la corriente nominal (20 A en este caso) durante 100ms durante eventos de falla.

Cualquier tipo de interfase, alta o baja energía, puede ser utilizada para los transformadores ópticos de voltaje para aplicaciones de protección. La señal análoga de alta energía cumple con los estándares al igual que los transformadores de potencial convencionales, incluyendo el voltaje nominal de señal de salida del transductor. En general, utilizar la señal análoga de baja energía es una mejor decisión de diseño, ya que elimina la etapa de amplificación requerida por la señal análoga de alta energía.

## **2.7 Referencias de transductores ópticos instalados en el mundo**

A continuación se listan algunas referencias de transductores ópticos de corriente instalados en subestaciones de diferentes lugares del mundo.

Para abreviar en la columna de equipos se describe:

TOVC = Transductor óptico de voltaje y corriente combinado

TOC= Transductor óptico de corriente

TOC-DC= Transductor óptico de corriente para corriente directa

TOV= Transductor óptico de voltaje



**Tabla II. Referencias de transductores ópticos instalados en el mundo**

<b>NO.</b>	<b>EQUIPO</b>	<b>VOLTAJE</b>	<b>CLIENTE</b>	<b>APLICACION</b>	<b>LUGAR</b>
1	VCT	230 KV	BC HYDRO	Protección	Subestación de Ingledow, Surrey, BC, Canada
2	VCT	138 KV	Hydro Québec	Medición para Facturación	Estación de turbina de gas Rolls Royce. Montreal, PQ
3	VCT	230 KV	Servicio Publico de Arizona	Medición y Protección	Subestación de Deer Valley, Phoenix, AZ
4	VT	500 KV	BC HYDRO	Calibración	Laboratorio de Prueba POWERTECH
6	VCT	500 KV	BC HYDRO	Medición para Facturación	Subestación de Ingledow, Surrey, BC, Canada
7	CT	230 KV	Northern California Power Authority	Medición para Facturación	Plata Geotermica, Sonoma County, CA
8	VCT	345 KV	American Electric Power	Protección y Medición	Proyecto, PSERC Columbus, OHIO
9	VT	138 KV	Portland General Electric	Calibración	Pórtland, Oregon
10	VT	138 KV	LACTEC	Calibración	Brazil
11	VCT	138 KV	Commonwealth Edison	Facturación	Mendoza Hills, ILLINOIS
12	VT	138 KV	Hydro One	Monitoreo de Transitorios (PQ)	Toronto, ONTARIO
13	CT	115KV	Alabama Power	Facturación	Sylacauga, AL
14	CT	LV	NIST	Calibración de TCs	Gaithersburg, MD

<b>Tabla II. Referencias de transductores ópticos instalados en el mundo</b>					
<b>NO.</b>	<b>EQUIPO</b>	<b>VOLTAJE</b>	<b>CLIENTE</b>	<b>APLICACION</b>	<b>LUGAR</b>
15	CT	138KV	Pórtland General Electric	Medición y Protección	Pórtland, Oregon, Subestación Movil
16	VCT	345 KV	Xcel Energy	Facturación	Lamar, interconexión CO
17	VCT	138 KV	Commonwealth Edison	Facturación	Crescent Ridge, IL
18	CT-DC	50 KA	EKA Chemicals	Medición	Magog, Québec
19	CT	115 KV	Entergy	Facturación	Amite, LA
20	CT-DC	260 KA	DynAmp –Alcan	Protección y Medición	Laterrier, Québec
21	CT	420 KV	VA TECH – ENEL	Protección de Interruptor	Italia, Terna (Candia)
22	CT	420 KV	VA TECH – NGT UK	Protección de Interruptor	Reino Unido, Sundon
23	CT	420 KV	VA TECH – Wienstrom	Medición y Protección	Austria
24	CT-DC	80 KA	DynAmp – Alcan	Protección y Medición	Beauharnouis, Québec, Canada
25	CT-DC	350 KA	DynAmp – Rusal	Protección y Medición	Sayanagorsk, Rusia
26	VCT	230 KV	Pórtland General Electric	Medición y Protección	Pórtland, OR
27	VCT	230 KV	APS	Medición y Protección	Phoenix, Arizona
28	CT	230 KV	Alta Link	Protección de Banco de Capacitores	Alberta, Canada
29	CT-DC	69 KV	Areva/Hydro Québec	Protección de compensación estática de VARs	Québec Canada, Proyecto De-Icer

## 3. FIBRAS ÓPTICAS

### 3.1 Generalidades

Los sistemas clásicos de comunicación utilizan señales eléctricas soportadas por cable coaxial, radio, etc., según el tipo de aplicación. Estos sistemas presentan algunos inconvenientes que hacen necesario buscar otras vías para la transmisión de datos.

Los sistemas de comunicación por fibra óptica utilizan la energía luminosa como soporte. Presentan un conjunto importante de ventajas sobre otros soportes utilizados en la transmisión de señales analógicas y digitales. Entre ellas están:

- Gran ancho de banda, lo que permite la transmisión de un gran volumen de información.
- Atenuación baja. Permite realizar enlaces de mayor longitud sin necesidad de repetidores. La atenuación depende del tipo de fibra óptica y de la longitud de onda utilizada.
- Inmunidad a interferencias electromagnéticas. La fibra óptica es absolutamente inmune a las radio interferencias e impulsos electromagnéticos, presentando un menor índice de errores en la transmisión de señales digitales. Esto es de gran importancia en aplicaciones de control industrial donde se genera gran cantidad de ruido.
- Seguridad y aislamiento eléctrico.

- En determinadas aplicaciones de ambientes peligrosos las fibras ópticas son imprescindibles debido a la imposibilidad de producir descargas eléctricas o chispas.
- Menor peso y volumen. Comparando las fibras ópticas y los cables coaxiales necesarios para obtener las mismas prestaciones, las primeras ocupan un volumen muy inferior y tienen menor peso.
- Seguridad frente a posibles intervenciones de la línea. Aunque no es imposible 'pinchar' una fibra óptica, esto es más difícil que en otros soportes y normalmente se puede detectar la intervención.

La fibra óptica también presenta algunos inconvenientes que no hay que olvidar. Por ejemplo:

- No hay una estandarización de los productos, lo que plantea problemas de compatibilidad.
- Las técnicas de empalme son complejas y necesitan de equipos muy caros y personal muy cualificado.
- La instalación de los conectores es compleja y requiere un personal con formación adecuada.
- La fibra óptica puede ser dañada. Al igual que el cable de cobre, la fibra óptica puede ser deteriorada por excavaciones, corrimiento de tierras, vandalismo y accidentes.

Conceptualmente, y en determinados aspectos, un sistema por fibra óptica es similar a un sistema de microondas vía radio. Las principales diferencias son la frecuencia y el medio de transmisión.

El principio en que se basa la transmisión de luz por la fibra es la reflexión interna total; la luz que viaja por el centro o núcleo de la fibra incide sobre la superficie externa con un ángulo mayor que el ángulo crítico, de forma que toda la luz se refleja sin pérdidas hacia el interior de la fibra. Así, la luz puede transmitirse a larga distancia reflejándose miles de veces. Para evitar pérdidas por dispersión de luz debida a impurezas de la superficie de la fibra, el núcleo de la fibra óptica está recubierto por una capa de vidrio con un índice de refracción mucho menor; las reflexiones se producen en la superficie que separa la fibra de vidrio y el recubrimiento.

### **3.2 Características de un sistema de medición con fibra óptica.**

Una fibra óptica consiste en un filamento transparente llamado núcleo, cuyo diámetro está entre 8 y 600 micras dependiendo del tipo de fibra óptica, y un revestimiento exterior, ambos de cuarzo o plástico, más una cubierta protectora de material plástico.

La capacidad de transmisión de información que tiene una fibra óptica depende de tres características fundamentales:

- a) Del diseño geométrico de la fibra.
- b) De las propiedades de los materiales empleados en su elaboración.  
(Diseño óptico)
- c) De la anchura espectral de la fuente de luz utilizada.

La mayoría de las fibras ópticas se hacen de arena o sílice, materia prima abundante en comparación con el cobre. Con unos kilogramos de vidrio pueden fabricarse aproximadamente 43 kilómetros de fibra óptica. Los dos constituyentes esenciales de las fibras ópticas son el núcleo y el revestimiento.

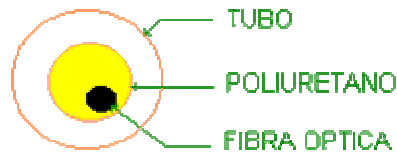
El núcleo es la parte más interna de la fibra y es la que guía la luz, consiste en una o varias hebras delgadas de vidrio o de plástico con diámetro de 50 a 125 micras. El revestimiento es la parte que rodea y protege al núcleo.

El conjunto de núcleo y revestimiento está a su vez rodeado por un forro o funda de plástico u otros materiales que lo resguardan contra la humedad, el aplastamiento, los roedores, y otros riesgos del entorno.

Las principales variantes en cuanto a la construcción son:

1. Tubo suelto. Cada fibra está envuelta en un tubo protector.

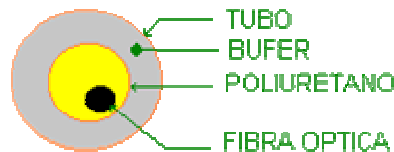
**Figura 22. Fibra óptica de tubo suelto**



Fuente: página web. [www.ilustrados.com](http://www.ilustrados.com) – Portal de Fibra Óptica

2. Fibra óptica restringida. Rodeando al cable hay un búfer primario y uno secundario que proporcionan a la fibra protección de las influencias mecánicas externas que ocasionarían rompimiento o atenuación excesiva.

**Figura 23. Fibra óptica restringida**



Fuente: página web. [www.ilustrados.com](http://www.ilustrados.com) – Portal de fibra óptica

2. Hilos múltiples: Para aumentar la tensión, hay un miembro central de acero y una envoltura con cinta de Mylar.

**Figura 24. Fibra óptica de múltiples hilos**



Fuente: página web. [www.ilustrados.com](http://www.ilustrados.com) – Portal de Fibra Óptica

3. Listón: Empleada en los sistemas telefónicos Tiene varios miembros de fuerza que le dan resistencia mecánica y dos capas de recubrimiento protector térmico.

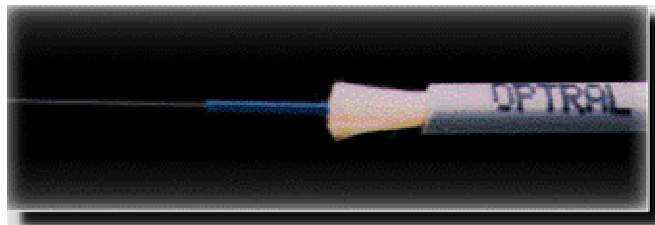
**Figura 25. Fibra óptica tipo listón**



Fuente: página web. [www.ilustrados.com](http://www.ilustrados.com) – Portal de Fibra Óptica

En la foto de abajo se observa un cable de fibra óptica.

**Figura 26. Muestra de fibra óptica**



Fuente: página web. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org) – Portal de Fibra Óptica

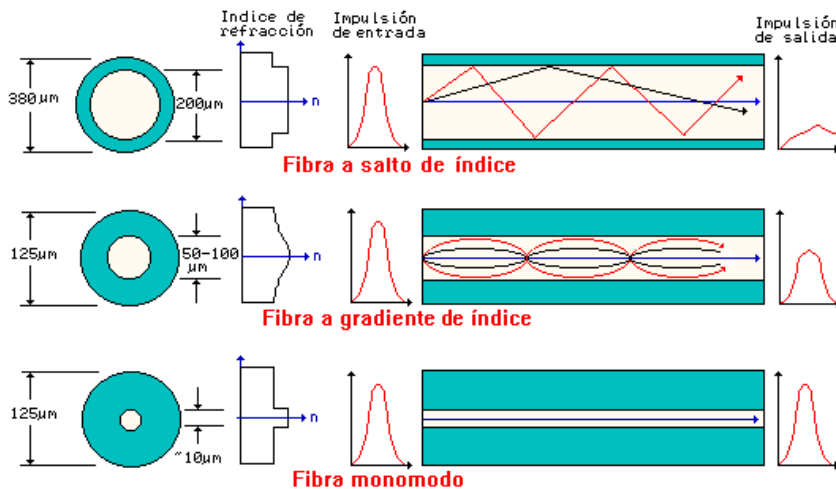
Los tres tipos de fibra óptica:

**La fibra a salto de índice** 200/380 micrómetros, constituida de un corazón y de una faja óptica en vidrio de diferentes índices de refracción. Esta fibra provoca de parte de la importante sección del corazón, una dispersión grande de las señales que la atraviesan, es lo que genera una deformación de la señal recibida.

**La fibra a gradiente de índice** cuyo corazón está constituido de lechos de vidrio sucesivos teniendo un índice de refracción próximo. Se aproxima así a una igualación de los tiempos de propagación, lo que quiere decir que se ha reducido la dispersión nodal. Banda pasante típica 200-1500Mhz por km.

**La fibra monomodo** cuyo corazón es tan fino que el camino de propagación de los diferentes modos es prácticamente directo. La dispersión nodal se hace casi nula. La banda pasante transmitida es casi infinita (> 10Ghz/km). Esta fibra es utilizada esencialmente para los sitios a distancia.

Figura 27. Tipos de fibra óptica



Fuente: página web. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org) – Portal de Fibra Óptica



Las fibras del tipo salto de índice y de gradiente de índice son fibras multimodales. La fibra de salto de índice es útil para distancias cortas (menores a 2km) por tener las pérdidas más altas y el ancho de banda mas reducido.

### 3.2.1 Elementos básicos de un sistema de medición con fibra óptica.

Los bloques principales de un enlace de comunicaciones de fibra óptica son:

- Transmisor
- Receptor
- Guía de fibra

El **transmisor** consiste de una interfase analógica o digital, un conversor de voltaje a corriente, una fuente de luz y un adaptador de fuente de luz a fibra.

La **guía de fibra** es un vidrio ultra puro o un cable plástico.

El **receptor** incluye un dispositivo conector, un fotodetector, un conversor de corriente a voltaje un amplificador de voltaje y una interfase analógica o digital.

En un transmisor de fibra óptica la fuente de luz se puede modular por una señal análoga o digital.

Acoplando impedancias y limitando la amplitud de la señal o en pulsos digitales. El conversor de voltaje a corriente sirve como interfase eléctrica entre los circuitos de entrada y la fuente de luz.

La fuente de luz puede ser un diodo emisor de luz LED o un diodo de inyección láser ILD, la cantidad de luz emitida es proporcional a la corriente de excitación, por lo tanto el conversor voltaje a corriente convierte el voltaje de la señal de entrada en una corriente que se usa para dirigir la fuente de luz. La conexión de esa fuente a la fibra es una interfase mecánica cuya función es acoplar la fuente de luz al cable.

La fibra óptica consiste de un núcleo de fibra de vidrio o plástico, una cubierta y una capa protectora. El dispositivo de acoplamiento del detector de fibra a luz también es un acoplador mecánico.

El detector de luz generalmente es un diodo PIN o un APD (fotodiodo de avalancha). Ambos convierten la energía de luz en corriente. En consecuencia, se requiere un conversor corriente a voltaje que transforme los cambios en la corriente del detector a cambios de voltaje en la señal de salida.

### **3.2.2 Sistema de comunicación por fibra óptica**

En un sistema de comunicación por fibra óptica existe un transmisor que se encarga de transformar las ondas electromagnéticas en energía óptica o en luminosa, por ello se le considera el componente activo de este proceso. Una vez que es transmitida la señal luminosa por las minúsculas fibras, en otro extremo del circuito se encuentra un tercer componente al que se le denomina detector óptico o receptor, cuya misión consiste en transformar la señal luminosa en energía electromagnética, similar a la señal original.

El sistema básico de transmisión se compone en este orden, de señal de entrada, amplificador, fuente de luz, corrector óptico, línea de fibra óptica (primer tramo ), empalme, línea de fibra óptica (segundo tramo), corrector óptico, receptor, amplificador y señal de salida.

En resumen, se puede decir que este proceso de comunicación, la fibra óptica funciona como medio de transportación de la señal luminosa, generado por el transmisor de LED'S (diodos emisores de luz) y láser.

Los diodos emisores de luz y los diodos láser son fuentes adecuadas para la transmisión mediante fibra óptica, debido a que su salida se puede controlar rápidamente por medio de una corriente de polarización. Además su pequeño tamaño, su luminosidad, longitud de onda y el bajo voltaje necesario para manejarlos son características atractivas.

La fibra óptica se emplea cada vez más en la comunicación, debido a que las ondas de luz tienen una frecuencia alta y la capacidad de una señal para transportar información aumenta con la frecuencia. En las redes de comunicaciones se emplean sistemas de láser con fibra óptica. Hoy funcionan muchas redes de fibra para comunicación a larga distancia, que proporcionan conexiones transcontinentales y transoceánicas.

Una ventaja de los sistemas de fibra óptica es la gran distancia que puede recorrer una señal antes de necesitar un repetidor para recuperar su intensidad. En la actualidad, los repetidores de fibra óptica están separados entre sí unos 100 km, frente a aproximadamente 1,5 km en los sistemas eléctricos. Los amplificadores de fibra óptica recientemente desarrollados pueden aumentar todavía más esta distancia.

### 3.2.3 Ventajas y desventajas del uso de fibra óptica

#### VENTAJAS

- La fibra óptica hace posible navegar por Internet a una velocidad de dos millones de bits por segundo.
- Acceso ilimitado y continuo las 24 horas del día, sin congestiones.
- Video y sonido en tiempo real.
- Fácil de instalar.
- Es inmune al ruido y las interferencias, como ocurre cuando un alambre telefónico pierde parte de su señal a otra.
- Las fibras no pierden luz, por lo que la transmisión es también segura y no puede ser perturbada.
- Carencia de señales eléctricas en la fibra, por lo que no pueden dar sacudidas ni otros peligros. Son convenientes para trabajar en ambientes explosivos.
- Presenta dimensiones más reducidas que los medios preexistentes.

#### DESVENTAJAS

- Sólo pueden suscribirse las personas que viven en las zonas de la ciudad por las cuales ya esté instalada la red de fibra óptica.
- El coste es alto en la conexión de fibra óptica, las empresas no cobran por tiempo de utilización sino por cantidad de información transferida al computador, que se mide en megabytes.
- El coste de instalación es elevado.
- Fragilidad de las fibras.
- Disponibilidad limitada de conectores.
- Dificultad de reparar un cable de fibras roto en el campo.

## **VENTAJAS**

- El peso del cable de fibras ópticas es muy inferior al de los cables metálicos, capaz de llevar un gran número de señales.
- La materia prima para fabricarla es abundante en la naturaleza.
- Compatibilidad con la tecnología digital.

### **3.2.4 Interferencias en la fibra óptica**

La fibra óptica proporciona mayor confiabilidad y flexibilidad, y un rendimiento superior que los sistemas de cobre. La construcción de la fibra óptica la hace inmune a muchos de los factores que afectan al cobre, razón por la cual los costos y la complejidad de las redes aumentan.

Debido a que la fibra óptica transporta la luz mejor que la electricidad, se hace inmune a la interferencia electromagnética (EMI) y a la interferencia provocada por las señales de frecuencias de radio (RFI). Es también invulnerable a los saltos de comunicación. Este fenómeno ocurre en los sistemas cableados de cobre porque se generan campos electromagnéticos alrededor de cada conductor que transporta la señal.

Debido a que la estructura de la fibra contiene casi completamente la energía de la luz en su núcleo, no deberían existir fugas de señales, de modo que se eliminan los saltos de comunicación.

La fibra óptica no necesita ni voltajes, ni corrientes para la transportación de señales lo que la hace un medio de comunicación 100% inmune a todo tipo de interferencias electromagnéticas a su alrededor.

Además, este hecho de no necesitar voltajes y corrientes hace a la fibra óptica ideal en aplicaciones en donde se requiere una probabilidad nula de provocar chispas, como en el caso de industrias petroleras y químicas, en donde existe un ambiente altamente explosivo.

## **4. APLICACIÓN DE SENSORES ÓPTICOS DE CORRIENTE EN UNA SUBESTACIÓN**

### **4.1 Generalidades**

Los sensores ópticos de voltaje y de corriente son un nuevo tipo de transductor utilizado para medición y protección. Las mediciones convencionales utilizan a los transformadores de instrumento tales como los transformadores de corriente (TCs) y los de potencial (TPs). Estos equipos transforman la corriente y el voltaje a niveles utilizables en dispositivos secundarios, tales como: medidores y relevadores de protección de todo tipo, ya sea electromecánicos, de estado sólido y los basados en microprocesadores. Los TCs y PTs convencionales se han ido perfeccionando y tienen muy buen funcionamiento, sin embargo, tienen algunos problemas de operación respecto al acoplamiento con otros dispositivos, tales como: Saturación magnética del núcleo, ferro resonancia, error de fase del circuito inductivo.

Los transductores ópticos de corriente y voltaje miden la corriente y el voltaje por medio de la identificación del efecto que provocan los campos magnéticos y eléctricos en la propagación de señales de luz que viajan a través de un conductor de fibra óptica.

La corriente y el voltaje se pueden medir de una forma muy precisa, y como el sensor óptico es un dispositivo pasivo los problemas relacionados con los instrumentos convencionales inductivos son efectivamente eliminados.

Los transformadores de instrumento convencionales son dispositivos análogos en su totalidad, por lo que únicamente producen señales interfases análogas.

Los medidores y relevadores electrónicos basados en microprocesadores que operan digitalmente, son diseñados para trabajar con señales de entrada análogas.

Las normas ANSI/IEEE y la IEC definen el buen funcionamiento de los transformadores de instrumento, incluyendo los niveles pico y nominal de la resultante de las señales análogas de corriente y voltaje. En las regiones influenciadas por ANSI, los TCs están diseñados para 5A de corriente secundaria y los TPs están típicamente diseñados para voltajes de 69V, 115V y 120V.

Por otro lado, los transductores ópticos de instrumento producen una señal inherentemente digital. Las normas que existen definen los requerimientos para las comunicaciones digitales para comunicar digitalmente transductores de medición ópticos y dispositivos inteligentes electrónicos (DIE) basados en microprocesadores tales como los medidores y relevadores de protección. Una decisión lógica sería tomar únicamente medidas digitales de la corriente y el voltaje y utilizarlos en los DIE que aceptan únicamente señales de entrada digitales. Esto eliminaría los problemas relacionados con la conversión análoga a digital requerida actualmente en los DIEs contemporáneos.

En la actualidad existen versiones de prueba de DIEs que aceptan únicamente señales de entrada digitales. Esto eliminaría los problemas de la conversión análoga- digital requerida en los actuales DIEs. Aunque, existen versiones de prueba de DIEs dotados para manejar señales de entrada digital, ninguno está en producción comercial actualmente. Para obtener compatibilidad con los dispositivos convencionales secundarios, los transformadores de instrumento ópticos, convierten y amplifican la señal digital y proveen dos salidas diferentes de señales de salida análogas.



Los diferentes tipos de medición análoga, y los requerimientos para conectar los instrumentos ópticos a dispositivos convencionales de medición serán tratados en este capítulo.

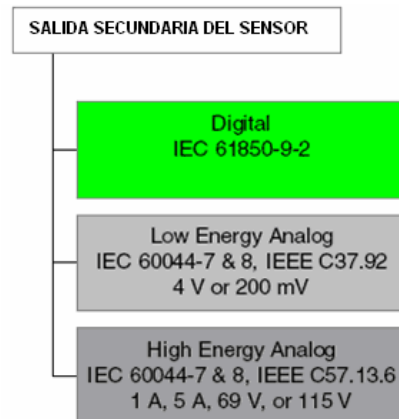
#### **4.2 Alternativas de conexión de los sensores ópticos de corriente**

En las últimas décadas el desarrollo e innovaciones a los sensores ópticos y los sensores de bobina de Rogowski a creado un nuevo mercado de utilización, sin embargo, no han sido totalmente aceptados, debido a que la tecnología no ha sido probada, las salidas secundarias no son de alta energía, y hay muy pocos relevadores y medidores disponibles para la interfase. Existe una barrera en el mercado para los sensores ópticos. Esta barrera esta empezando a desplomarse gracias al desarrollo de normas que indican las especificaciones digitales y de baja energía para los secundarios de los sensores. En el mercado actual, existen reles y medidores que aceptan entradas de baja energía, a un bajo costo. Los dispositivos con entradas digitales aun están en el campo de prueba, pero pronto estarán disponibles para el mercado general.

Uno de los beneficios del procesamiento de señales de forma digital dentro de la norma IEC 61850-9-2 permite comunicaciones en dos vías y redes entre los equipos, esto facilitara el control de la red eléctrica. El costo de un sensor óptico decrece con el formato digital y el costo de los convencionales incrementa.

La siguiente figura muestra las salidas que se pueden producir por cualquier sensor y la norma que especifica cada salida particular.

**Figura 28. Salida secundaria de los transductores ópticos**



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

Si la salida principal de un sensor óptico es típicamente digital, entonces la salida estará en su menor costo y tendrá la mejor calidad.

La salida de baja energía es la más próxima a la natural de un sensor óptico. Los amplificadores operacionales de baja energía son los que regularmente producen esta salida. Sin embargo, como será discutido en este capítulo, la conversión de la señal digital por medio del convertidor digital-análogo y luego pasando esta señal por un amplificador, degrada los datos y pone límites en el rango dinámico de medición.

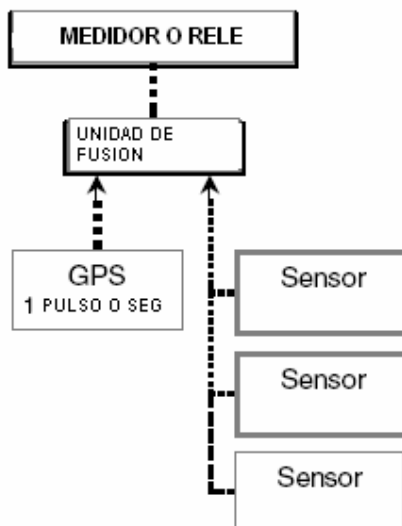
La salida de alta energía en un sensor óptico está diseñada a emular la salida de alta energía convencional, pero debido a las limitaciones de potencia de los amplificadores, las salidas no pueden operar dispositivos electromecánicos y solamente pueden hacer interfase con equipo con bajo burden, regularmente equipo basado en microprocesadores.

La precisión total de la medición de potencia con estas salidas, depende de la precisión del relevador o medidor y también de la precisión de los transductores de voltaje y corriente ópticos.

#### 4.2.1 Salida digital hacia un medidor o rele digital

La arquitectura del sistema de señales digitales se muestra en la siguiente figura. La información digital fluye desde los sensores hacia una unidad de fusión. La unidad de fusión reformatea las señales en un paquete digital que puede ser enviado hacia un medidor, relevador, grabador o cualquier otro dispositivo electrónico inteligente.

Figura 29. Salida digital



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

La salida digital del sensor es presentada por una unidad de fusión en el formato prescrito por la norma IEC 61850-9-2. El flujo de la información hacia la Unidad de Fusión es bidireccional permitiendo una red de sensores y de equipo secundario que puede ser monitoreado remotamente.

La salida inherentemente digital ofrece los mejores datos del dispositivo óptico. Como se mostrara posteriormente, la conversión digital a analógica (D/A) y la amplificación degrada o limita la linealidad y el rango dinámico de la salida, además de aumentar el precio. Los sensores que son solamente analógicos, pierden rendimiento y adicionan costos debido a la conversión analógica a digital.

La firma NXXTPHASE ha desarrollado una unidad de fusión y aplicó las señales digitales del sensor de corriente óptico digital. El rendimiento del sensor de corriente con la salida digital es tan eficiente que esta propuesto para estandarizarse como una señal secundaria. El sensor de corriente puede medir AC y DC con muy buena linealidad y precisión.

Un medidor digital, relevador o grabador pueden utilizar estas señales para realizar mediciones, tiempo de respuesta, diagnósticos, o grabaciones durante eventos. En un futuro las funciones de estos dispositivos se pueden fusionar, pero probablemente debido a lo práctico y la seguridad de la red las funciones de medición y de protección permanecerán separadas.

#### **4.2.2 Salida analógica de baja energía hacia un medidor o rele analógico**

En la norma IEC 60044-7, 60044-8, y la IEEE C37.92, están las provisiones para una salida de baja energía de un transductor electrónico. La salida es nominalmente 4V para aplicaciones de medición y 200mV para transformadores de corriente para aplicaciones de protección. El transformador de corriente óptico especifica un burden de 5k ohmios, además viene con las dos salidas descritas anteriormente, tanto para el transductor de voltaje como para el de corriente.

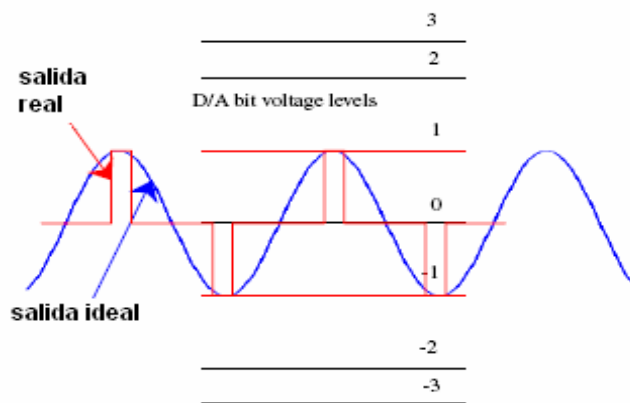
El transformador de corriente está listo para conectarse a varios dispositivos electrónicos inteligentes o hacia los amplificadores de alta energía.

La limitación principal de este tipo de salida, comparada con la digital, es que existe una degradación de los datos digitales cuando pasan a través de la conversión D/A y el amplificador de voltaje. Aun así, esta salida provee una manera de hacer interfase un sensor digital con un equipo secundario análogo, sin ningún costo adicional.

En estos momentos, solamente un selecto número de relevadores y grabadores aceptan esta salida, no se conocen medidores aun disponibles.

Los convertidores A/D y D/A no son dispositivos perfectamente lineales. Ellos tienen un espaciamiento no lineal entre bits y un número finito de bits, que limita la máxima y la mínima salida de voltaje. El límite máximo es alcanzado cuando la palabra digital excede el más alto voltaje que el convertidor puede reproducir. El valor mínimo de error es insignificante. La pérdida de energía en un convertidor D/A es ilustrada en la figura siguiente.

**Figura 30. Pérdida de energía en un convertidor D/A**



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

Cuando la señal del sensor cae de los bits menos significativos del convertidor (1 y -1), no hay salida presente hacia los amplificadores análogos, resultando en un gran error de precisión. En niveles bajos el espaciado no lineal de los bits también afecta la precisión de la magnitud de la señal.

Este problema también existe para los secundarios de los dispositivos electrónicos inteligentes debido a que la recíproca, conversión A/D ocurre en ellos. Los dispositivos con secundarios basados en microprocesadores convierten la señal de entrada, ya sea de corriente o de voltaje, en una palabra digital por medio de un convertidor A/D. A niveles bajos la señal es muy pequeña que la no linealidad de los bits y los últimos bits menos significativos limitan nuevamente la precisión.

La siguiente figura muestra una corriente de falla pico de 108KA. En este ejemplo, el amplificador de entrada del sistema de adquisición de datos se satura a 10.8V, esto ilustra uno de los problemas con las señales análogas. Con la apropiada escala de la salida análoga de baja energía, los sensores ópticos se pueden utilizar como dispositivos de protección, según la norma IEC 5TPE.

Las salidas análogas de baja energía de los sensores ópticos de voltaje tienen un ancho rango dinámico, principalmente porque el sensor óptico y el amplificador tienen un ancho rango dinámico. Un sensor óptico de voltaje fue evaluado en Canadá con un 5% a un 200% de su voltaje nominal. La linealidad del sensor es tal que con la escala correcta puede utilizarse como un sensor de clase de precisión IEC 0.1.

### **4.2.3 Salida análoga de alta energía**

La salida análoga de alta energía de un sensor óptico esta diseñada para emular la salida convencional de alta energía de 1A, 5 A, 69 V, o 115 V. Sin embargo, la salida análoga de alta energía de un sensor óptico no debe confundirse con la alta energía de la salida de un transformador convencional. Los amplificadores con una potencia limitada, llevan la salida de análoga de alta energía, y el burden que estos amplificadores de alta energía pueden manejar es pequeña, típicamente 2.5 VA o menos.

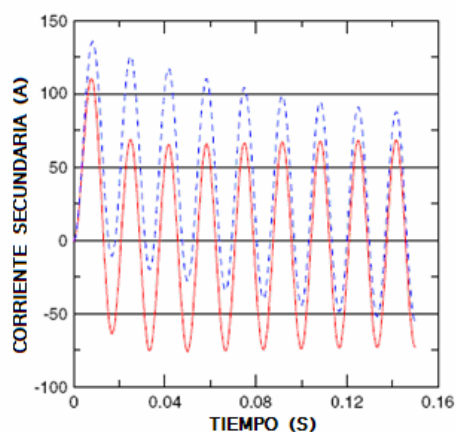
La salida análoga de alta energía es diseñada para usarse en aplicaciones con relevadores basados en microprocesadores y medidores que tengan burdens pequeños. Aun con estas limitaciones, la salida análoga de alta energía es deseada mientras los secundarios de los equipos con señales análogas de baja energía o las entradas digitales estén universalmente disponibles.

Para la medición de corriente de precisión, están los medidores clase 2 disponibles para aceptar 1A de salida de alta energía del transductor óptico de corriente. La señal análoga de alta energía de 1A es menos demandante en el amplificador que la señal de protección de 5A de salida de alta energía. Se ha demostrado que la salida de 1 A del transductor, muestra un rango de 0.1% al 150% de la corriente nominal donde la precisión en la medición es mantenida. La principal razón de que corrientes menores no se puedan medir con precisión es la inherente conversión del 1 A de corriente en una palabra digital en el medidor de energía. Con un medidor con conversión completamente digital se puede alcanzar a medir corrientes más pequeñas.

Se encuentran disponibles los voltajes de 69V ó 115 V para mediciones precisas de voltaje. La linealidad de las mediciones con el transductor óptico de voltaje excede la clase de precisión IEC 0.1.

Para aplicaciones de protección con los transformadores de corriente se han desarrollado la salida análoga de alta energía de 5 A. El amplificador es capaz de producir 100 A rms de corriente de falla secundaria por 100 ms También puede ser utilizado para aplicaciones de protección con 1 A . La siguiente figura muestra la respuesta del amplificador para un offset de corriente de falla. La entrada al amplificador es filtrada por corrientes DC. La figura muestra una falla OFFSET para una salida de clase de protección IEC TPE que es la línea punteada, y la salida DC filtrada, que cumple con la clase de protección IEC TPZ.

**Figura 31. Gráfico de falla en transductor óptico de corriente**



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas



### 4.3 Selección de un sensor óptico de corriente

Los sensores de corriente de fibra óptica han demostrado su potencial habilidad para medir corrientes con precisiones mejores que 0.1% sobre un rango dinámico que se extiende desde miliamperios hasta kiloamperios. Este hecho tiene muy buena base teórica, pero en el campo es difícil demostrar este hecho, sobre todo en los extremos de este rango. En el extremo mas bajo del rango, el ruido en la salida puede exceder el nivel de la señal y causar interferencia con el proceso de medición. En el nivel más alto del rango, las limitaciones de los equipos son las que interesan.

Los sensores ópticos de corriente tienen ruido que debe ser rechazado. El ruido proviene de la luz que llega al fotodetector. El ruido se trata de hacer cero por medio de una distribución gaussiana y causa que la salida del sensor parezca difusa a corrientes primarias bajas. La cantidad de ruido que existe en el sensor depende del detalle del diseño del transductor óptico de corriente, pero el extremo mas bajo del rango de utilización del sensor puede modificarse utilizando filtros para remover el ruido de la señal. El tiempo de grabado requerido para obtener una medición de calidad depende de la relación que existe entre el ruido y la señal.

Como ejemplo, un transductor óptico de corriente con un nivel de ruido de  $30\text{mA}/\sqrt{\text{Hz}}$  en la salida referenciado a la entrada primaria. Para alcanzar una precisión del 0.1% con 1 A primario, requiere que los datos sean almacenados y promediados cada 450 segundos. Para aplicaciones de medición de transferencia de energía que típicamente tienen un mínimo de duración de 15 minutos, este nivel de ruido contribuirá un 0.07% de error por intervalo de medición. Este error es aleatorio y tiende a cero.

Aparte de tener el debido cuidado de seleccionar el transductor óptico de corriente con el nivel de ruido adecuado para su aplicación, se deben considerar otras especificaciones para el buen funcionamiento del equipo.

#### **Especificaciones mecánicas y eléctricas de la columna:**

- Máximo voltaje: Ej: 72.5KV, 121KV, 145KV, 245KV, ..., 800KV
- BIL
- Peso
- Altura de la columna

#### **Ambientales:**

- Rango de temperatura de operación
- Capacidad sísmica

#### **Mecánicas:**

- Resistencia a la contaminación
- Aislamiento
- Dimensiones del equipo electrónico

#### **Modulo Electrónico:**

- Interfase analógica de baja energía: 4V<sub>rms</sub> para medición  
200 mV<sub>rms</sub> para protección

Rango dinámico: <0.2% error a la corriente nominal para 4V de salida,  
<0.5% error a la corriente nominal para 200mV de salida  
<2% error a 108 kApico Utilizando sensor de protección

Ancho de banda: 0.5Hz a 6KHZ

- Interfase analógica de alta energía: 1 Arms a 5Arms nominal, B-0.1 (2.5VA) Burden a un factor de potencia de 0.9 para medición.

Rango dinámico: <0.2% de error para 1 A a 4000 A

Ancho de banda: 10Hz a 6Khz para 1 A de salida de medición.

- Relación de vueltas del modulo electrónico seleccionable.

#### **Funcionamiento eléctrico:**

- Tipo I: Precisión para medición: IEC clase 0.2S  
IEEE clase 0.3  
Precisión para protección: IEC clase 5P  
IEEE 10%
- Capacidad de cortocircuito: 63KA para 1 s
- Corriente nominal: el usuario lo especifica hasta 4000 A

#### **4.4 Perturbaciones en el sensor óptico de corriente**

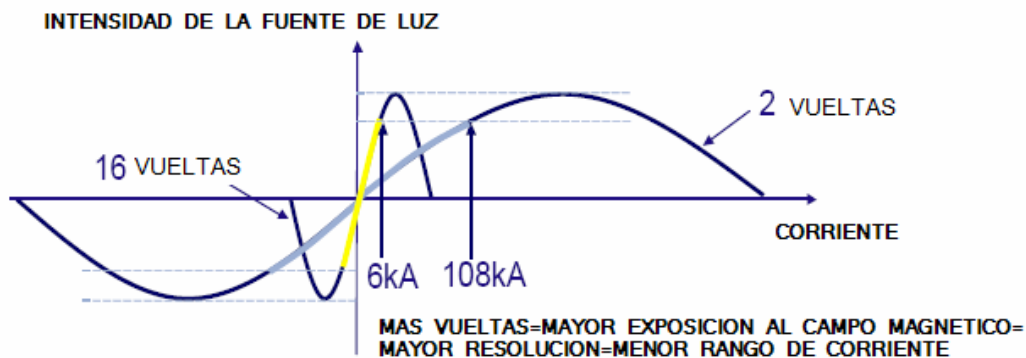
Como vimos en la secciona anterior el ruido eléctrico puede ser la causa de perturbaciones en el transductor óptico que provoquen una mala lectura. Una manera practica de evitar y mejorar estas condiciones de las señales, es realizar un devanado de múltiples vueltas de fibra óptica alrededor del conductor. Este método incrementa la sensibilidad y reduce el ruido eléctrico a un nivel despreciable.

Cuando se hacen los devanados de fibra óptica alrededor del conductor, el dispositivo es capaz de incrementar la calidad de la señal, y los módulos opto electrónicos y medidores la podrán procesar con confianza.

Esto último, permite utilizar el transductor óptico de corriente con cualquier medidor de energía.

Los sensores de fibra óptica regularmente se diseñan de dos o de dieciséis vueltas de fibra óptica, estos dos sensores pueden ir en la misma cabeza del transductor. El sensor de dos vueltas es utilizado regularmente para aplicaciones de protección, y el de dieciséis vueltas para aplicaciones de medición. La función de transferencia de cada uno de estos sensores no es la misma, como se puede observar en la siguiente figura cada curva tiene un punto de corriente diferente que corresponde a la intensidad de la luz. Mientras mas vueltas tiene el medidor menor rango de corriente, pero dará una medición precisa sin problemas de ruido eléctrico, es por ello que se utiliza para medición.

Figura 32. Comparación de dos sensores de corriente ópticos



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

## **5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS TRANSDUCTORES DE INSTRUMENTO ÓPTICOS VRS. TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO CONVENCIONALES**

En el presente existen algunas aplicaciones en donde se puede justificar el uso de los transformadores ópticos de medición, en lugar de los transformadores de medición convencionales. Los transformadores convencionales son más baratos que los transductores ópticos, sin embargo, en algunas aplicaciones los beneficios que la tecnología óptica digital aporta, hace que el sistema de medición óptico sea más económico a largo plazo.

En un futuro, se construirán subestaciones totalmente digitales en cuanto a la medición de energía. Los transductores óptico digitales son los instrumentos que tomaran la medida de la energía y la conducirán a un respectivo medidor o relevador digital, y eliminara la necesidad de que estos equipos cuenten con un convertidor análogo-digital. Lo último, beneficiara a la medición en una mejor precisión, menores perdidas y mejor eficiencia.

Actualmente debido a que los medidores y relevadores no cuentan con entradas puramente digitales, los transductores ópticos se fabrican con dos tipos de interfases adicionales:

- La interfase análoga de baja energía (0 -200mV y 0 – 2 V)

Esta interfase es utilizada para protección.

- La interfase análoga de alta energía (0 - 1 A y 100 V)

Esta interfase es utilizada para medición.

El mismo transductor es capaz de ser utilizado para aplicaciones de medición y de protección. Además, el transductor tiene un amplio ancho de banda y puede utilizarse para aplicaciones de calidad de energía, donde se necesita reproducir la onda de transitorios o armónicos.

Los transductores ópticos son más livianos y pequeños en tamaño que los transformadores convencionales, debido a que no necesitan estar sumergidos en aceite dieléctrico o contener gas SF<sub>6</sub>. En vez de estos elementos, las columnas utilizan nitrógeno, lo que beneficia el riesgo de daño ambiental y reduce los riesgos al personal y equipos vecinos por falla violenta.

Con la utilización de los transductores ópticos no existe ningún peligro debido a secundarios en circuito abierto o por ferro resonancia.

Algunas de las aplicaciones en donde se justifica la utilización de los transductores ópticos son: generadores de energía, medición de puntos estratégicos y medición en corriente directa.

La utilización de los instrumentos de medición ópticos en generadores de energía se justifica por la razón de que los algunos productores generan alrededor de 2000 A cuando están a plena capacidad, pero cuando están en stand-by consumen unos 2 A. Los transductores ópticos digitales pueden medir con una precisión de 0.2% hasta 3000 A y con corrientes bajas con una precisión del 0.3%. Cuando se utilizan transformadores convencionales para medir corrientes bajas con alta precisión, estos transformadores se saturan cuando la corriente primaria rebasa un valor específico, dado por la curva de saturación del transformador.

Utilizando los transductores ópticos en aplicaciones de generación de energía es posible utilizar los mismos transductores para medición y protección.

Además, la posibilidad de utilizar una misma columna para medir voltaje y corriente, lo que reduciría el número de instrumentos a utilizar. Muchas veces el consumo de los generadores externos es obviado, pero este puede significar un costo anual alto, esta energía se puede facturar, y no perder el dinero respectivo.

La precisión en los transductores ópticos se traduce en dinero que el comercializador de energía puede cobrar y el siguiente ejemplo servirá para aclarar este concepto:

Si se considera un generador de energía de 250 MW, que opera 5000 horas al año, si se considera un precio de energía por \$ 35.00 el megavatio-hora. Cada 0.1% en la precisión representa \$43,750.00 al año.  
( $250 \text{ MW} * 5000 \text{ hora/año} * 35 \text{ \$/ MWh} * 0.001$ )

Otra de las aplicaciones justificables para la utilización de transductores ópticos de voltaje y corriente es la medición en puntos estratégicos. En estas subestaciones se puede obtener una recuperación de la inversión en poco tiempo dependiendo de la capacidad de la subestación, con el ahorro de hacer la medición con una mayor precisión.

Los transformadores convencionales de instrumento para medición vienen normados con una precisión de 0.3% tanto el de voltaje como el de corriente, sumando la precisión del medidor que regularmente es de 0.2% y la del cable que es de 0.1% a la precisión de los transformadores de potencial y corriente, nos da un total de 0.9% de precisión en el sistema. El transductor óptico de corriente se fabrica para tener una precisión de 0.1% y el de voltaje una precisión de 0.2%.

Utilizando los transformadores ópticos de potencial y de corriente en el sistema, este suma un 0.6% de precisión, que se traduce en una facturación más rentable.

Por último, otro factor que puede ser determinante en la utilización de la tecnología óptica digital para la medición de energía en alta tensión en lugar de los transformadores convencionales, es la capacidad de medir en corriente alterna y corriente directa, debido al ancho de banda inherente al transductor.

#### **5.4 Transductor óptico de corriente vrs. transformador convencional de corriente.**

El transductor óptico de corriente para medición en alta tensión ofrece algunas ventajas técnicas respecto al transformador de corriente convencional. Algunas de estas ventajas se detallan a continuación.

- Los transductores ópticos de corriente tienen una precisión que excede los mínimos requerimientos establecidos por las normas, mientras que los transformadores convencionales regularmente se diseñan para un 0.3%.
- El transductor óptico de corriente tiene una facilidad para adaptar la relación de vueltas del sensor para diferentes condiciones de carga o corriente. Cuenta con un amplio rango dinámico.
- El transductor óptico de corriente cuenta con un amplio ancho de banda. El instrumento es capaz de sensar corrientes desde DC hasta 6 KHz. Los convencionales se diseñan regularmente para corrientes alternas.
- Los transductores ópticos de corriente se proporciona con curvas de respuesta a la frecuencia, mientras que esta información es bastante limitada para los transformadores de corriente convencionales.



- Los circuitos abiertos en los secundarios de los transformadores de corrientes convencionales pueden ocasionar daños graves al equipo o al personal. Los transductores ópticos de corriente tienen salidas limitadoras de corriente gracias a los circuitos electrónicos. No hay problemas de secundarios abiertos debido a corrientes de falla altas.
- El transformador óptico de corriente puede medir hasta 3000 A siendo la limitante la temperatura en las terminales del sensor. Con los transformadores convencionales se requiere un diseño especial para corrientes de tal magnitud.
- El cuarto de control esta aislado eléctricamente de los equipos de campo de la subestación, gracias a la fibra óptica del transductor. Con los transformadores convencionales no se tiene un aislamiento de señales eléctricas.

### **5.5 Transductor óptico de voltaje vs. transformador convencional de voltaje**

El transductor óptico de voltaje para medición en alta tensión ofrece algunas ventajas técnicas respecto al transformador de voltaje convencional. Algunas de estas ventajas se detallan a continuación.

- Los transductores ópticos de voltaje no utilizan aceite mineral o hexafluoruro de azufre (SF6) para su aislamiento. Estos instrumentos utilizan una columna de aislador llena con nitrógeno a baja presión. Esta cualidad permite que el diseño del instrumento sea mas liviano y de menor tamaño, haciéndolo mas confiable en instalaciones donde las características sísmicas del instrumento se deben tomar en consideración.

- Los transformadores de voltaje convencionales con SF6 se tienen que enviar con SF6 a presión reducida, pero cuando estos se tienen que energizar, se deben volver a rellenar implicando en tiempo y costos de ingeniería. Mientras que los transductores ópticos se envían con el nitrógeno a baja presión, listos para energizar.
- Los transformadores de voltaje ópticos tienen un mejor funcionamiento en cuanto a problemas de estabilidad de temperatura, saturación, y ferro resonancia. Lo anterior es posible gracias a que el instrumento no utiliza núcleo de hierro, cobre, ni capacitores.
- Los costos debido a la ingeniería de calcular el transformador de potencial adecuado debido a la saturación posible o el cálculo de los conductores en los transformadores de potencial convencionales, se reduce gracias a la utilización de fibra óptica para el elemento sensor y la conducción de las señales secundarias.
- Con el transductor de potencial óptico cualquier cambio de relación u otro tipo de configuración se realiza en el cuarto de control por medio de los módulos opto-electrónicos, una vez instalado el equipo. Con los transformadores de potencial convencionales muchas veces se deben realizar algunas modificaciones en el campo.
- Los transductores de potencial ópticos pesan un 10% a 20% de lo que pesan los convencionales esto facilita la instalación, permitiéndola realizar en un menor tiempo.

## **5.6 Análisis económico de los sensores ópticos vrs. transformadores de instrumento convencionales.**

Los transductores ópticos de voltaje y corriente aunque tienen un costo más elevado, tienen algunas ventajas económicas en comparación con los transformadores de instrumento convencionales. Estas ventajas se detallan a continuación.

### a) Operación

- Los transductores ópticos tienen mejor precisión con cargas elevadas y con cargas menores de 10 A, el error no supera el 1.5% del valor real.
- Mejor precisión con un rango amplio de temperatura.
- Debido a la precisión, el instrumento garantiza el cumplimiento de los requerimientos legales para la facturación, evitando multas.
- Debido a una mejor medición de calidad de energía, el transductor es más confiable con las auditorías de calidad de energía.
- Reducción de costos por riesgos de explosión por corrientes de falla altas.
- Reducción de costos por riesgos de ferresonancia.

### b) Seguridad ambiental

- Reducción de los costos debidos a posible contaminación ambiental por el SF6
- Reducción de los costos por problemas de secundarios abiertos. Ambiente de trabajo seguro.

- Aislamiento eléctrico en el cuarto de control, únicamente llegan señales ópticas respectivas al voltaje y corriente en el campo de la subestación.
- c) Costos de mantenimiento
- Reducción de costos por llenado de SF6 o aceite natural.
  - Reducción de costos de mantenimiento del SF6 o del aceite natural.
- d) Costos en la instalación
- Reducción en los costos de transporte y manejo del transformador debido al peso liviano.
  - Eliminación de los costos de transporte y manejo de SF6 o gas natural.
- e) Costos en la subestación
- Reducción en el costo del terreno de la subestación utilizando una medición combinada de transductores ópticos de voltaje y de corriente.
  - Reducción de las unidades de transformadores de medición utilizando una medición combinada.
  - Reducción de los costos de diseño de la subestación utilizando una medición combinada.
  - Reducción en el costo de las estructuras y de la obra civil en la subestación para los transformadores de instrumento, debido al peso liviano de los transformadores.

Como ejemplo se puede tomar el caso de una Subestación en una industria de cerveza. El objetivo del ejemplo es realizar un análisis de valor en el tiempo para tener un mejor criterio de la inversión. En las dos secciones posteriores se comparará el precio directo entre los transformadores convencionales de medición y los ópticos.

Para una subestación con:

Capacidad: 12000 / 14000 KVA OA / FA,

Voltaje primario 69,000 V

Voltaje secundario: 4160 Y / 2400 V

Consumo promedio mensual: 5, 000,000 KW-H

Precio promedio del KW/H: \$0.08

Considerando el primer escenario con transformadores convencionales de medición sumergidos en aceite en 69KV, se tienen los costos detallados a continuación.

- Inversión Inicial de Transformadores de Voltaje y Corriente convencionales 69KV sumergidos en aceite y medidor con 0.3% de precisión: US\$ 30,000.00
- Costos aproximados de instalación: US \$ 9,000.00
- Costos anuales aproximados de mantenimiento: US \$ 2,400.00
- Facturación anual promedio. US\$ 4,800,000.00

Mejorando en un 1% la precisión, utilizando transductores de medición ópticos y un medidor de energía con precisión 0.2%, se puede obtener en el medidor una lectura de 5,005,0000 KW-H.

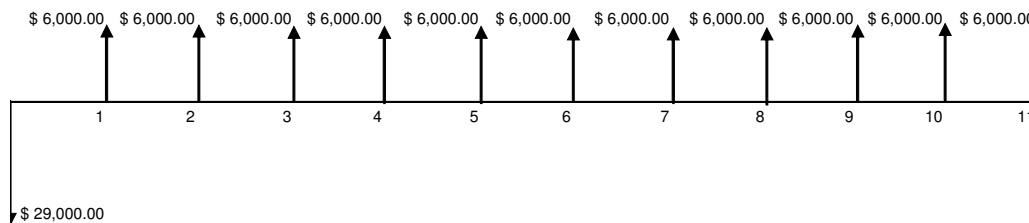
Entonces con el segundo panorama con los transductores ópticos digitales y un medidor con precisión de un 2% quedaría de la siguiente manera:

- Inversión Inicial de Transductores de corriente y voltaje ópticos en 69KV y medidor con 0.2% de precisión: US \$ 60,000.00
- Costos aproximados de instalación: US \$ 8,000.00
- Costos anuales aproximados de mantenimiento: US \$ 1,200.00
- Facturación anual promedio. US\$ 4,804,800.00

Si tomamos los valores marginales de ambas opciones y las consideramos como anualidades, nos quedarían los siguientes valores:

- Inversión adicional: US\$ 30,000.00
- Costos marginales de instalación. US\$ 1,000.00
- Costos marginales de mantenimiento. US\$ 1,200.00
- Facturación anual promedio marginal US\$ 4,800.00

**Figura 33. Anualidades de costos comparativos**



Considerando un premio al riesgo del 9% anual y la inflación en un 7% anual.

La tasa mínima de rendimiento aceptable es:  $0.09 + 0.07 + 0.09 \cdot 0.07 =$   
 TMRA= 16.63%

Actualizando todas las anualidades al año cero, nos dan los siguientes valores presentes ( $VP_n = \text{Anualidad} \cdot (1/(1+TMRA)^n)$ )

$$VP1 = 5,144.47$$

$$VP2 = 4,410.94$$

$$VP3 = 3,781.99$$

$$VP4 = 3,242.73$$

$$VP5 = 2,780.35$$

$$VP6 = 2,383.91$$

$$VP7 = 2,043.99$$

$$VP8 = 1,752.54$$

$$VP9 = 1,502.65$$

$$VP10 = 1,288.39$$

$$VP11 = 1,104.68$$

La suma de todos los valores presentes nos da como resultado un valor actual neto de US \$ 29,436.65

Comparándolo con los US \$ 29,000.00 del costo marginal de la inversión se puede ver que la inversión puede ser aceptable, debido a que el valor actual neto es mayor. La inversión marginal se podría recuperar en 11 años si se facturan por lo menos 5 MW-H mensuales. Cabe mencionar que en una subestación o generador de menor tamaño el proyecto podría ser no viable debido al alto costo del equipo y su lenta recuperación de la inversión. Para instalaciones en voltajes mayores de 69KV y con alta facturación de energía la inversión se puede recuperar en menos de 11 años.

### **5.3.1 Sensores ópticos de corriente vrs. transformadores convencionales de corriente**

Los transformadores de corriente convencionales para aplicaciones en alta tensión son más baratos que los transductores ópticos.

Sin embargo, a largo plazo, los transductores ópticos son la mejor solución aun en voltajes debajo de 230KV.

En resumen, los transductores ópticos de corriente realizan un mejor funcionamiento en la medición debido a que hay menos pérdidas, menores errores de precisión y son más eficientes.

En los capítulos anteriores se explicaron los principios físicos, el diseño y las aplicaciones de los transformadores ópticos de corriente, que son totalmente diferentes en diseño y método de conversión de energía que los transformadores de corriente convencionales.

Unas de las ventajas comparativas más importantes de los transductores ópticos son la inmunidad a la vibración de las señales, que la precisión se mantiene en un amplio rango de temperaturas, el aislamiento entre el voltaje y corriente del campo y la señales hacia el cuarto de control, la eliminación de problemas de saturación y secundarios abiertos.

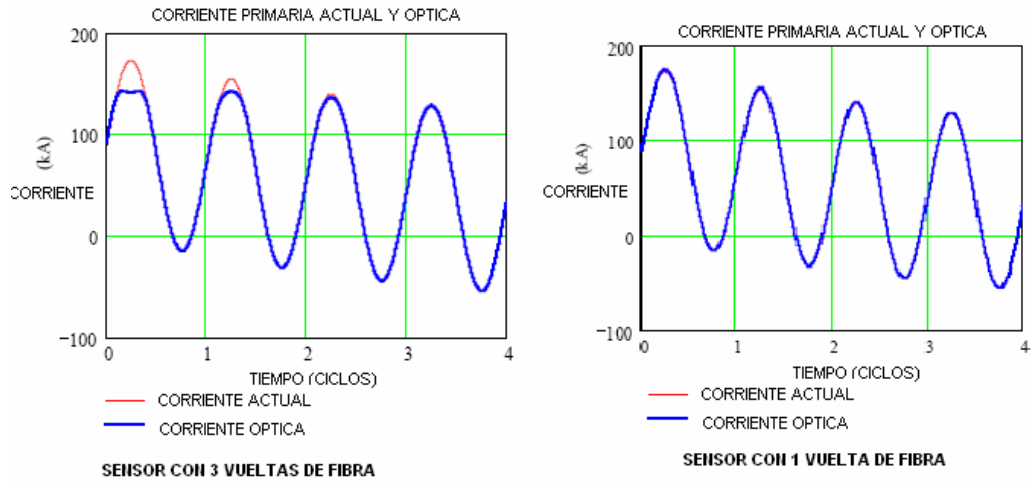
Una última ventaja es la capacidad de medir corrientes de hasta 4000A, manteniendo la precisión normalizada.

Además, debido a que el sensor óptico es un dispositivo pasivo, se eliminan problemas que tienen los transformadores de medición convencionales, como la saturación del núcleo magnético con corrientes de corto circuito.

Dependiendo del diseño del transductor óptico este es capaz de medir una corriente de falla con buena exactitud y sin distorsión. Cuando se utilizan mas vueltas de fibra óptica en el sensor se obtiene una mejor señal sin ruido, pero se pierde la capacidad de medir corrientes de falla sin distorsión. Es recomendable optimizar el sensor a una vuelta de fibra óptica para poder obtener las señales adecuadas para los relevadores de protección.



**Figura 34. Comparación de respuesta a corrientes de corto circuito**



Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas

A continuación se realiza un estudio de costos para comparar los transductores ópticos de corriente contra los transformadores de corriente convencionales para una línea de 69KV.

- Transformador Corriente Convencional 69KV

Voltaje nominal:	69KV
BIL:	350 KV
Relación:	1000/2000:5 //5
Precisión y burden:	0.3 TO B1.8
Rating Factor:	1.5
Corriente Térmica Secundaria:	18KA 60Hz
Corriente nominal de corta duración:	20KA RMS
Sumergido en Aceite.	
Dos núcleos	
Dos bobinas	
Peso:	580Lbs

Marca ITEC Instrument Transformer Equipment Corporation

Valor Aproximado (\$ / por fase): US \$ 9,700.00

- Transductor óptico de corriente NXCT

El sistema de medición trifásico se compone de lo siguiente:

- Tres columnas aislantes con un sensor óptico ubicado en la cabeza.
- Dos módulos electrónicos ubicados en un rack. Uno para la interfase con el sensor y el otro para la amplificación y la fuente de poder.
- Caja de interconexión entre los módulos electrónicos y el sensor en el campo.
- Cable de fibra óptica de 100 metros de longitud, (la longitud es solicitada por el cliente)

Características eléctricas y mecánicas:

Voltaje Nominal:	69KV
BIL:	350 KV
Corriente Nominal:	2500 A
Rating Factor:	1.5
Corriente nominal de corta duración:	69KA RMS
Precisión para Medición:	0.2%
Salidas análogas de alto y bajo nivel de energía.	
Peso:	108 Lb
Capacidad Sísmica:	0.5 g
Marca NXTPHASE	

Valor Aproximado (\$ / por fase): US \$ 19,400.00

Con lo anterior, se puede observar que un transductor óptico de corriente cuesta aproximadamente el doble que uno convencional. La inversión inicial es de un 100% más, pero a largo plazo la inversión se vería justificada con las ventajas técnicas mencionadas en la sección anterior.

Con el transductor óptico de corriente el usuario es capaz de medir la corriente con un 0.2% de precisión hasta 3000 A. Para un generador de energía un mejoramiento de la precisión en un 0.1% puede representar un ahorro de dinero.

La inversión extra en adquirir un transductor óptico de corriente, en vez de un convencional, podría recuperarse en 10 años aproximadamente y luego generar mejores ganancias para el generador.

### **5.3.2 Sensores ópticos de voltaje vrs. transformadores convencionales de voltaje**

Los transformadores de potencial o voltaje convencionales son más baratos en primera instancia, comparados con los transformadores de voltaje con tecnología óptica – digital.

El funcionamiento de los transformadores ópticos de voltaje se desarrollo en los capítulos anteriores. Básicamente, el transformador óptico de voltaje utiliza las celdas Pockels como elemento sensor de voltaje, gracias al campo eléctrico proporcional al voltaje. Los transformadores de potencial convencionales utilizan un método de divisor de voltaje capacitivo, para tener una referencia del voltaje en la línea de alta tensión.

A continuación se realiza un estudio económico de los costos iniciales, para comparar los dos tipos de transformadores.

- Transformador de Potencial Capacitivo 230KV

Voltaje Nominal:	230KV
BIL:	1050 KV
Voltaje Primario:	132.9 KV L-G
Voltaje Secundario:	115/66.4
Factor de Voltaje:	120%
Precisión de Medición:	0.3 W, X, Y, Z, & ZZ

Niveles nominales de aislamiento:

a) Voltaje soportable a onda de impulso	650 KV
b) Voltaje soportable a frecuencia industrial 1 min:	275 KV

Valor Aproximado (\$ / por fase): US \$ 15,000.00

- Transductor óptico de voltaje NXVT

El sistema de medición trifásico se compone de lo siguiente:

- Tres columnas aislantes con un sensores óptico ubicado en cada columna
- Dos módulos electrónicos ubicados en un rack. Uno para la interfase con el sensor y el otro para la amplificación y la fuente de poder.
- Caja de interconexión entre los módulos electrónicos y el sensor en el campo.
- Cable de fibra óptica de 100 metros de longitud, (la longitud es solicitada por el cliente)

Características eléctricas y mecánicas:

Voltaje nominal:	230KV
BIL:	1050 KV
Rating factor:	1.5

Precisión para medición:	0.2%
Interfase análoga de bajo nivel de energía:	4 Vrms
Interfase análoga de alto nivel de energía:	69V (1 VA) o 120V (2.5 VA)
Ancho de banda:	10Hz a 3kHz
Peso:	395 Lb
Precisión medición:	IEC Clase 0.2 IEEE Clase 0.3
Precisión para protección:	IEC Clase 3P IEEE Clase 0.3
Capacidad sísmica:	0.5 g
Aislamiento:	Gas Nitrógeno
Marca	NXTPHASE

Valor Aproximado (\$ / por fase): US \$ 32,000.00

Como se puede observar anteriormente, el transductor óptico de voltaje es mucho más caro que un transformador de potencial convencional. La instalación de la tecnología óptica para la medición de voltaje en alta tensión se justifica por los beneficios que se vinculan con esta tecnología, además que la inversión puede ser recuperada en aproximadamente 10 años dependiendo de la cantidad de energía facturada en ese tiempo.

Con la utilización del sensor óptico de voltaje se puede ganar un 0.2% de precisión y por lo tanto, obtener un ahorro significativo de dinero, especialmente para generadores que facturan energía.

### **5.3.3 Sensor óptico de voltaje y corriente vrs. transformadores convencionales de voltaje y corriente.**

El transductor óptico de voltaje y corriente tiene la ventaja de que puede utilizar una misma columna del medidor para instalar los sensores de corriente y los de voltaje. Además, el mismo transductor es capaz de utilizarse en aplicaciones de protección o medición.

Cuando se utilizan transformadores combinados convencionales para medición, regularmente se necesitan otros transformadores de instrumento para la función de protección de transformadores de potencia u otros equipos.

A continuación se realiza un estudio económico de los costos iniciales, para compara los dos tipos de transformadores.

- Transformadores Convencionales en 230KV

Voltaje nominal:	230KV
BIL:	1050 KV
Voltaje primario:	132.9 KV L-G
Voltaje secundario:	115/66.4
Relación de corriente	1200:5
Factor de voltaje:	120%
Precisión de medición:	0.3 W, X, Y, Z, & ZZ
Niveles nominales de aislamiento:	
a) Voltaje soportable a onda de impulso	650 KV
b) Voltaje soportable a frecuencia industrial 1min:	275 KV

Valor aproximado (\$ / por fase): US \$ 30,000.00

- Transductor óptico de voltaje y corriente NXVCT  
El sistema de medición trifásico se compone de lo siguiente:
  - Tres columnas aislantes con un sensores óptico ubicado en cada columna
  - Dos módulos electrónicos ubicados en un rack. Uno para la interfase con el sensor y el otro para la amplificación y la fuente de poder.
  - Caja de interconexión entre los módulos electrónicos y el sensor en el campo.
  - Cable de fibra óptica de 100 metros de longitud, (la longitud es solicitada por el cliente)

Características eléctricas y mecánicas:

Voltaje nominal:	230KV
BIL:	1050 KV
Rating factor:	1.5
Precisión para medición:	0.2%
Interfase análoga de bajo nivel de energía:	4 Vrms
Interfase análoga de alto nivel de energía:	69V (1 VA) o 120V (2.5 VA)
Ancho de banda:	10 Hz a 3kHz
Peso:	395 Lb
Precisión medición:	IEC Clase 0.2 I EEE Clase 0.3
Precisión para protección:	IEC Clase 3P I EEE Clase 0.3
Capacidad sísmica:	0.5 g
Aislamiento:	Gas Nitrógeno
Corriente nominal:	2500 A
Rating factor:	1.5

Valor aproximado (\$ / por fase): US \$ 60,000.00

Al igual que los otros tipos de transductores ópticos, los que se fabrican para una medición combinada, en la misma columna, son más caros que utilizar los dos transformadores convencionales de corriente y de voltaje. Sin embargo, la inversión se recuperaría en un lapso de 10 años dependiendo de la cantidad de energía facturada por el comercializador.

La alternativa de la tecnología óptica-digital para medición en nuevas subestaciones debe ser una decisión analizada por los ingenieros asesores e inversionistas.

El análisis técnico-económico debe evaluar las ventajas a largo plazo que brindan los transductores ópticos y no solamente el precio inicial, para justificar una inversión viable.

Los transformadores de medición convencionales están más propensos a sufrir fallas mecánicas y eléctricas, además que se deprecian rápidamente.



## 6. ENCUESTA - UTILIZACIÓN DE TRANSDUCTORES ÓPTICOS EN EL SECTOR ELÉCTRICO

### 6.1 Encuesta

1. ¿Ha escuchado hablar sobre la tecnología óptica en aplicaciones de medición de energía en alta tensión?
  - a) Si
  - b) No
  
2. ¿Ha utilizado fibra óptica como medio de comunicación de datos?
  - a) Si
  - b) No
  
3. ¿Conoce los beneficios y ventajas de la utilización de un sensor óptico de medición en una subestación?
  - a) Si
  - b) No
  
4. ¿Conoce las posibles aplicaciones de un transductor óptico para medición de energía en alta tensión?
  - a) Si
  - b) No
  
5. ¿Conoce los requerimientos mínimos que solicita las normas internacionales respecto a la precisión de los transformadores de instrumento convencionales?
  - a) Si
  - b) No

## 6.2 Análisis de resultados de la encuesta

En esta sección se describe los resultados del cuestionario que se trabajó con ingenieros electricistas de diferentes ámbitos del sector eléctrico del país. Entre las empresas a las que pertenecen los encuestados se encuentran:

- Union Fenosa
- Empresa Eléctrica de Guatemala S.A.
- Instituto Nacional de Electrificación INDE
- Ingenio Magdalena
- Generadora del Sur S.A.
- Colgate Palmolive
- Celasa Ingeniería y Equipos S.A.
- Comisión Nacional de Energía Eléctrica de Guatemala
- Mercado Mayorista de Electricidad
- Cementos Progreso
- Ingenio Pantaleón

Los resultados de las preguntas se obtuvieron de una muestra de veinticinco ingenieros encuestados. Las respuestas a las preguntas fueron las siguientes.

1. ¿Ha escuchado hablar sobre la tecnología óptica en aplicaciones de medición de energía en alta tensión?

a) Si	36%
b) No	64%
  
2. ¿Ha utilizado fibra óptica como medio de comunicación de datos?

a) Si	72%
b) No	28%
  
3. ¿Conoce los beneficios y ventajas de la utilización de un transductor óptico de medición en una subestación?

a) Si	20%
b) No	80%

4. ¿Conoce las posibles aplicaciones de un transductor óptico para medición de energía en alta tensión?

- |       |     |
|-------|-----|
| a) Si | 52% |
| b) No | 48% |

5. ¿Conoce los requerimientos mínimos que solicita las normas internacionales respecto a la precisión de los transformadores de instrumento convencionales?

- |       |     |
|-------|-----|
| a) Si | 92% |
| b) No | 8%  |

La tecnología óptica de medición en alta tensión aun es bastante desconocida en el sector eléctrico guatemalteco, aunque la mayor parte de ingenieros electricistas tenga algunos conocimientos sobre la transmisión en fibra óptica. Conocer los requerimientos de precisión que solicitan las normas eléctricas para la medición es un paso importante, para abrir la puerta a nuevas tecnologías que puedan hacer más eficiente las mediciones y protecciones de los circuitos en alta tensión.



## CONCLUSIONES

1. La utilización de transductores ópticos para medición en alta tensión en subestaciones es viable, si y solo si, la cantidad de energía medida por los transductores es lo suficientemente abundante como para que un pequeño porcentaje de mejora en precisión pueda significar mejores ingresos económicos a mediano plazo que justifiquen la inversión inicial del equipo.
2. La utilización de transductores ópticos implica utilizar relevadores y medidores con mejor precisión y rapidez de respuesta, para verdaderamente obtener los resultados deseados para el sistema de medición.
3. Los sensores de medición ópticos técnicamente, tienen una vida útil más larga, mejor precisión y mejor rango dinámico de medición que los transformadores de instrumento convencionales.
4. La ventaja más importante en el uso de la nueva tecnología óptica para medición en alta tensión es la mejorada precisión del instrumento. La mejora de un 0.1% a 0.2% en la precisión en las mediciones para facturación es directamente proporcional al incremento del cobro en la facturación para el usuario final.
5. La interfase que le conviene al mercado local de electricidad, es la interfase análoga de alta energía, debido a que con ella, no hay necesidad de cambiar los medidores y relevadores, pues estos trabajarán con las mismas entradas convencionales de 1 A y 120VAC.



## RECOMENDACIONES

1. Se sugiere especificar los transductores de medición de acuerdo a la aplicación en la subestación, es decir, que el número de vueltas del sensor sea adecuado para el nivel de ruido deseado y la exactitud para medir corrientes de cortocircuito.
2. Se recomienda la utilización de la interfase analógica de alta energía para aplicaciones de medición con medidores que utilicen 1 A y 120 V como señales de entrada, como los medidores clase 20.
3. Se recomienda la interfase análoga de baja energía para aplicaciones de protección debido a que esta interfase cuenta con una sola etapa de amplificación y cumple fácilmente la norma para las señales de salida durante eventos de falla.
4. Es aconsejable profundizar el estudio para utilizar los transductores ópticos en subestaciones especiales en donde se requiere realizar un análisis de calidad de energía.
5. Se sugiere continuar el estudio de los transductores ópticos de medición para aplicaciones de transmisión en alta tensión de corriente directa.





## BIBLIOGRAFÍA

1. MARTIN, Raul, **Diseño de Subestaciones Eléctricas**. Mc Graw-Hill, México: 1987.
2. KOENISBERGER, Rodolfo. **Instrumentación Eléctrica**. 242 p.
3. Electrical Transmission and Distribution. Reference Book, Westinghouse 1964.
4. F. RAHMATIAN, **Optical Voltage Transducers for High Voltage Applications**. 2000.
5. Blake James, **Applications of High Voltage Fiber Optic Sensors**. 2002.
6. **NTDROID**. Normas Técnicas de diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución. Resolución. **CNEE No. 47-99**.
7. **Reglamento de Líneas Eléctricas Aéreas de Alta Tensión**. CNEE 1998.
8. ENRIQUEZ, Harper G., **Técnicas de las Altas Tensiones**. Editorial LIMUSA, México 1980.
9. FINK, DONALD G. **Transformadores convencionales que se emplean para medición indirecta en sistemas de Alta Tensión**. Vol 1. 1995.
10. Transformador Óptico de Intensidad.  
<http://www.abb.com/product/seitp332/87940ee78299379dc125715300251429.aspx>  
Abril, 2007
11. Transductores Ópticos.  
<http://www.nxtphase.com/sub-downloads.htm>  
Abril, 2007



## ANEXOS



TRANSFORMADORES OPTICOS DE CORRIENTE EN 69KV  
ESTADOS UNIDOS

Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas



MEDICIÓN ÓPTICA COMBINADA 115KV

CANADA

Fuente: página web. [www.nxtphase.com](http://www.nxtphase.com) – Portal de descargas