

## IV. Investigación de sensores optoelectrónicos para la medición del consumo de corriente eléctrica, en casas-habitación de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez

Rubén Alejandro Vázquez Sánchez, Jorge Luis Camas Anzueto

### Introducción

Los medidores que hoy en día tiene Comisión Federal de Electricidad (CFE) en una casa-habitación, son de difícil acceso en la toma de una lectura adecuada si la persona no tiene conocimiento de cómo funciona dicho medidor, y con ello, el propietario no tiene el control de la cantidad de corriente eléctrica que consume mensualmente ni el costo de la misma. Por ello, la demanda de corriente eléctrica en una casa no se visualiza de manera controlada y el consumo de corriente eléctrica no se aprovecha al máximo. Debido a esto, surge la idea de desarrollar dispositivos que midan el consumo de corriente eléctrica y que la lectura sea presentada de forma digital para que cualquier persona en una casa habitación tenga la facilidad de leer su consumo en KW-HR y el pago que debe hacer en ese momento. Con ello, se pretende que la persona que habite dicha casa, tenga conciencia de no consumir energía eléctrica de manera inadecuada y estar consciente del pago que debe de hacer ante CFE.

En este capítulo presentamos la investigación de dos estructuras de sensores optoelectrónicos para realizar dicho proceso: uno de ellos es un medidor digital de corriente eléctrica para el cual se describe paso a paso el procedimiento con el cual el circuito funciona a través de un

diagrama a bloques. Se analiza la ventaja ante los medidores convencionales que CFE (Comisión Federal de Electricidad) tiene instalados en una casa-habitación en México. En este diseño, toda la información es manejada o controlada por un microcontrolador PIC16F877. Este microcontrolador consta de un cristal externo como oscilador con una frecuencia de 4Mhz. El diseño presenta la información en una pantalla de cristal líquido (Liquid Crystal Display, LCD). Además, se utiliza una interrupción de luz como contador para cuantificar la corriente eléctrica de la casa-habitación. La segunda estructura propuesta consiste de un sistema láser de fibra óptica en el cual un dispositivo llamado rejilla de Bragg de fibra óptica esta adherido a un conductor de cobre por el que circula una corriente eléctrica. Al momento de aumentar el consumo de corriente eléctrica el conductor cambia en temperatura transfiriendo calor a la rejilla de Bragg y ésta a su vez modifica sus propiedades termo-ópticas dando lugar a una disminución gradual de la intensidad de salida del láser. La medición de la señal de salida del láser es una cuantificación de la corriente que se está consumiendo.

## Marco teórico

Como todos sabemos, la electrónica es parte importante en el desarrollo de tecnología en el diseño de circuitos electrónicos para manipular a los electrones acorde a la aplicación del circuito. En el desarrollo de la primera estructura se debe tener conocimiento de la Electrónica Analógica la cual estudia la aplicación de circuitos electrónicos que interactúan con señales que son continuas en función del tiempo. La Electrónica Digital que trabaja con señales que tienen valores discretos, es decir, la representación digital asigna un número a una cantidad que varía en forma continua. Esta puede estar representada con números y a estos números se les llama niveles lógicos que están representados por ceros y unos lógicos (0, 1). También, debemos involucrar a la optoelectrónica que es la interacción de la electrónica con la óptica. La óptica estudia el comportamiento de la interacción de la luz con la materia y la electrónica viene a procesar toda la información de dicha interacción con técnicas adecuadas. Para la segunda estructura es necesario hablar

de un dispositivo de fibra óptica llamada rejilla de Bragg y sus propiedades importantes.

### *Señal analógica*

La señal analógica es una señal que varía de forma continua a lo largo del tiempo. En general, las señales que representan una magnitud física (temperatura, luminosidad, humedad, etc.) son señales analógicas, pudiendo asumir un número infinito de valores entre sus límites mínimos y máximos. En la figura 1 se muestra el perfil típico de una señal analógica. Obsérvese que estas señales se definen para una sucesión continua de valores de la variable independiente.

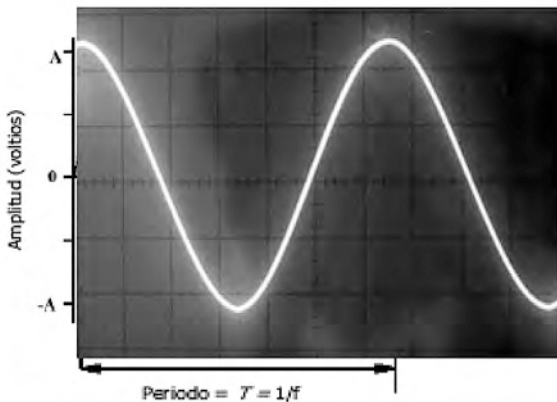


Figura 1. Ejemplo de una señal analógica

### *Señal digital*

La palabra digital proviene de la misma fuente que la palabra digito: La palabra en latín para “dedo” (contar con los dedos), por el uso para contar en valores discretos y no continuos como en los sistemas analógicos. Los sistemas digitales, como por ejemplo un microcontrolador, usan lógica de dos estados representados por dos niveles de tensión eléctrica, uno alto, H y otro bajo, L (de High y Low, respectivamente, en inglés). Por abstracción, dichos estados se sustituyen por ceros y unos, lo que

facilita la aplicación de la lógica y la aritmética binaria. Si el nivel alto se representa por 1 y el bajo por 0, se habla de lógica positiva y en caso contrario de lógica negativa.

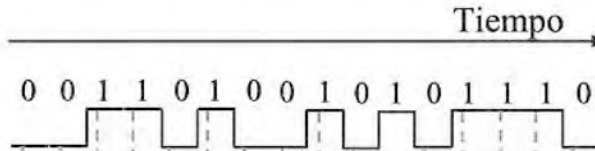


Figura 2. Ejemplo de una señal digital

### *Microcontrolador*

Se denomina microcontrolador a un dispositivo programable capaz de realizar diferentes actividades que requieran del procesamiento de datos digitales y del control y comunicación digital de diferentes dispositivos.



Figura 3. Microcontrolador PIC16F877

Los microcontroladores poseen una memoria interna que almacena dos tipos de datos; las instrucciones, que corresponden al programa que se ejecuta, y los registros, es decir, los datos que el usuario maneja, así como registros especiales para el control de las diferentes funciones del microcontrolador.

Dentro de las funciones a realizar están las de leer, procesar y responder a la señal de entrada. Básicamente este elemento es el encargado de llevar el control en la medición de la energía eléctrica, ya que internamente y mediante la programación adecuada se leerán datos (provenientes de la etapa de digitalización) para procesarlos y así mandar una instrucción al puerto en donde se encuentra conectado un LCD, con el fin de enseñar un mensaje donde se especifique la cantidad de KW-HR

consumidos y la cantidad de efectivo a pagar por dicho consumo. También al término de cada mes, este dispositivo ejecutará la instrucción para almacenar los datos de consumo y costo en una memoria externa con la finalidad de tener un historial de la energía eléctrica utilizada anualmente.

En la siguiente tabla se pueden observar las características más relevantes del dispositivo:

Tabla 1. Características principales del microcontrolador PIC16F877

<b>Características</b>	<b>16F877</b>
Frecuencia máxima	0-20MHz
Memoria de programa flash palabra de 14 bits	8KB
Posiciones RAM de datos	368
Posiciones EEPROM de datos	256
Puertos E/S	A,B,C,D,E
Número de pines	40
Interrupciones	14
Timers	3
Módulos CCP	2
Comunicaciones Serie	MSSP, USART
Comunicaciones paralelo	PSP
Líneas de entrada de CAD de 10 bits	8
Arquitectura	Harvard
CPU	Risc
Canales Pwm	2

### *Conversión analógica – digital*

Un ordenador o cualquier sistema de control basado en un microprocesador no pueden interpretar señales analógicas, ya que sólo utiliza señales digitales. Es necesario traducir, o transformar en señales binarias, lo que se denomina proceso de digitalización o conversión de señales analógicas a digitales.

Para realizar esta tarea, un convertidor A-D tiene que efectuar los siguientes procesos:



Figura 4. Señal analógica

La figura 5, representa a una señal eléctrica analógica, con sus correspondientes armónicos. Como se puede observar, los valores de variación de la tensión o voltaje en esta señal pueden variar en una escala que va de “0” a “7” volt.



Figura 5. Muestreo de una señal analógica

Para realizar el muestreo de una señal eléctrica analógica y convertirla después en digital, se necesita tomar valores discretos de tensión o voltaje a intervalos regulares en diferentes puntos de la señal, el siguiente paso es cuantificar dichos valores.

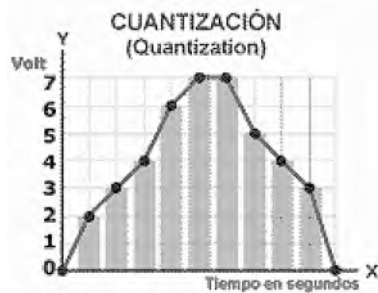


Figura 6. Cuantización del muestreo

Una señal cuyo muestreo se realice a 24 kHz tendrá menos calidad y fidelidad que otra realizada a 48 kHz. Por último la codificación permite asignarle valores numéricos binarios equivalentes a los valores de tensiones o voltajes que conforman la señal eléctrica analógica original.

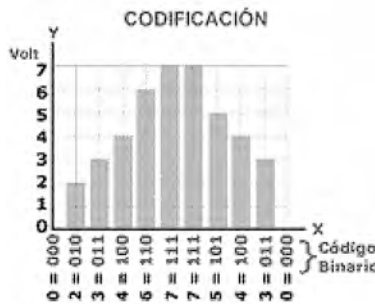


Figura 7. Codificación de la señal analógica

### *Optoelectrónica*

La optoelectrónica constituye, sin duda, una de las materias científico-tecnológicas que más rápido crecimiento ha experimentado en los últimos años. La revolución en este campo se ha producido a partir de una fecha relativamente reciente. Así, prácticamente fue en la década de 1960 cuando se produce el desarrollo de estas tecnologías impulsadas por una serie de empresas punteras en el sector electrónico. Cabe mencionar que la herramienta principal de la optoelectrónica es la luz.

## Luz

La luz (del latín *lux, lucis*) es la clase de energía electromagnética radiante capaz de ser percibida por el ojo humano. En un sentido más amplio, el término luz incluye el rango entero de radiación conocido como el espectro electromagnético. La ciencia que estudia las principales formas de producir luz, así como su control y aplicaciones se le llama Óptica (Rama de la Física).

Se ha demostrado teórica y experimentalmente que la luz tiene una velocidad finita. Actualmente el valor exacto aceptado para la velocidad de la luz en el vacío es de 299.792.458 m/s. La velocidad de la luz al propagarse a través de la materia es menor que a través del vacío y depende de las propiedades dieléctricas del medio y de la energía de la luz. La relación entre la velocidad de la luz en el vacío y en un medio se denomina índice de refracción del medio:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $v$  es la velocidad de la luz en un medio, donde  $c$  y  $v$  están en (m/s),  $n$  es el índice de refracción.

Cuando un haz de luz incide en la superficie de un material, siempre hay una parte de luz que se esparce hacia atrás, y a este fenómeno se le denomina reflexión. Si hacemos un análisis desde el punto de vista de la óptica geométrica, la reflexión de la luz puede ser representada por medio de dos rayos: el que llega a una superficie, rayo incidente, y el que sale “rebotado” después de reflejarse, rayo reflejado, formando en la reflexión un ángulo de incidencia y reflexión, con respecto a una normal. El ángulo con el cual un rayo incide es igual al ángulo reflejado.



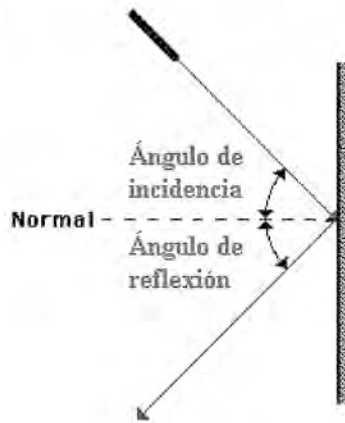


Figura 8. Reflexión de luz en una interfase.

La luz puede ser utilizada en muchas aplicaciones y una de ellas es en las comunicaciones ópticas, y la parte fundamental es ver la manera de manipular la luz para mandar información a grandes distancias. Debido a esto se debe comprender la naturaleza de la luz. La luz es el principal mecanismo por el cual podemos transmitir y recibir información de los objetos que nos rodean y de todo el universo. Una de las principales ventajas de la luz es la alta frecuencia que tiene (del orden de los Terahertz.). Tomando en cuenta lo anterior, la Optoelectrónica utiliza a la luz como el principal elemento que mediante variaciones ópticas se puede transportar información a través de un sistema. En un sistema de comunicación óptica se necesita de una fuente de luz (LED, Láser, etc), un medio de transmisión en donde la luz pueda propagarse con pérdidas bajas (espacio libre, fibra óptica) y de un fotodetector (PIN, o de avalancha) que tenga la capacidad de detectar las variaciones de la luz, ya sea en forma de pulsos o continuo. La Optoelectrónica ha alcanzado el carácter de disciplina científica, rápidamente se impone como una de las piedras angulares de la ingeniería moderna, ya que toma elementos de la Electrónica, Óptica, Electromagnetismo y la Ciencia de materiales. En su sentido más amplio, la Optoelectrónica significa la aplicación de la electrónica a sistemas ópticos. A grandes rasgos, un sistema Optoelectrónico se conforma de la existencia de una fuente de luz, de un detector y de algún medio

donde se pueda propagar la luz entre el transmisor y el receptor. A esto se añade la energía y el procesamiento de las señales de entrada y salida necesaria para completar los elementos básicos de un sistema optoelectrónico (figura 9).

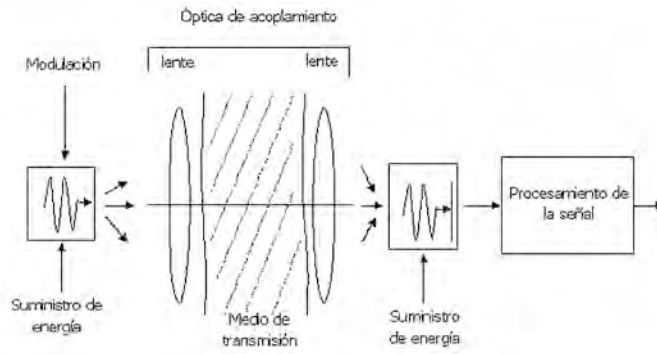


Figura 9. Elementos de un sistema optoelectrónico típico

En un sistema optoelectrónico, se necesita que la señal viaje en forma de luz, y para ello, el transmisor debe generar la señal y convertirla de energía eléctrica a energía luminosa y el receptor tiene la función de recibir energía luminosa y convertirla en energía eléctrica.

### *Fibra óptica*

La fibra óptica es un sistema de transmisión de datos que se hace a través de un filamento de vidrio o plástico. La fibra óptica existe gracias al principio de reflexión total interna, ya que los rayos de luz dentro de la fibra van rebotando con las paredes externas del filamento. Dentro de sus ventajas se encuentra un gran ancho de banda, es inmune totalmente a las interferencias electromagnéticas, cables ligeros y muy pequeños (diámetro aproximado al de un cabello humano entre 50 a 125 micras), No inflamable y es flexible. Un cable de fibra óptica está compuesto de las siguientes partes:

Núcleo: es propiamente la fibra óptica, la hebra delgada de vidrio por donde viaja la luz.

Revestimiento: es una o más capas que rodean a la fibra óptica y están hechas de un material con un índice de refracción menor al de la fibra óptica.

Forro o recubrimiento: es un revestimiento de plástico que protege a la fibra y la capa media de la humedad y otros embates físicos.

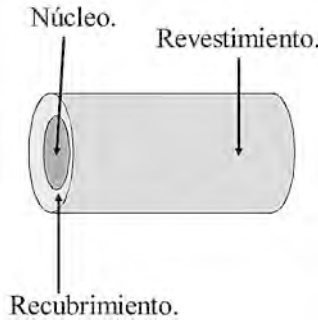


Figura 10. Estructura básica de una fibra óptica

Función a realizar: en principio, para la primer estructura, se utilizará un par de fibras ópticas con el fin de obtener una lectura del medidor convencional, dichas fibras se alinearan de tal manera que entre ellas exista un ángulo ( $\theta$ ) que permitirá la reflexión perfecta de la luz desde una de ellas hacia la otra (figura 11), pudiendo así tener el conteo de cada giro del medidor del hogar, sin embargo, la decisión de utilizar a la fibra óptica, va a depender de la factibilidad de alineación mecánica en función de la transmisión y recepción de luz.

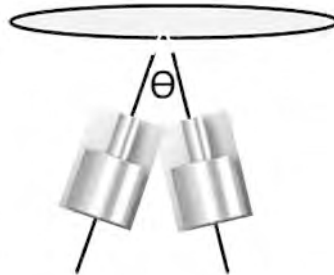


Figura 11. Esquema de dos fibras, enviando y recibiendo señal

### *Dispositivo de visualización*

Una pantalla de cristal líquido o LCD (acrónimo del inglés: Liquid Crystal Display) es una pantalla delgada y plana formada por un número de píxeles en color o monocromos colocados delante de una fuente de luz o reflectora.

El LCD dispone de una matriz de 5x8 puntos para representar cada carácter. En total se pueden representar 256 caracteres diferentes. 240 caracteres están grabados dentro del LCD y representan las letras mayúsculas, minúsculas, signos de puntuación, números, etc. Existen 8 caracteres que pueden ser definidos por el usuario. El bus de datos del display se puede configurar para funcionar de dos formas diferentes. Bien como un bus de 8 bits o bien como un bus multiplexado de 4 bits. El utilizar el bus multiplexado de 4 bits es una opción muy útil para ahorrar bits en el sistema de control. La tensión nominal de alimentación es de 5V, con un consumo menor de 5mA.

Función a realizar: es el medio por el cual se dará a conocer al usuario el consumo de energía eléctrica y el costo aproximado que genera dicho consumo.



Figura 12. Pantalla de cristal líquido

### *Rejillas de Bragg*

En la investigación de la segunda estructura optoelectrónica se utilizan dispositivos de fibras ópticas, destacando por su importancia las rejillas de Bragg, debido a ello se presenta una explicación a grandes rasgos de estos dispositivos. Algunas fibras cambian sus propiedades ópticas permanentemente cuando se exponen a una radiación intensa de un láser operando en la región espectral del azul o el ultravioleta. Este efecto

fotosensible lleva a un cambio periódico en el índice de refracción a lo largo de la longitud de la fibra, resultando en la formación de una rejilla de Bragg intra-núcleo cuando las fibras de Silicio dopadas con Germanio son irradiadas por unos pocos minutos con un haz láser intenso[12]. En su forma más simple, una rejilla de Bragg de fibra consiste de una modulación periódica del índice de refracción del núcleo de una fibra óptica, por lo general monomodo, como se ve en la figura 13. También se puede ver como un arreglo periódico de placas o películas de dos índices de refracción diferentes, denominados índice de refracción alto  $n_H$  ( $\sim 1.4563$ ) e índice de refracción bajo  $n_L$  ( $\sim 1.456$ ).

Estas estructuras uniformes de fibra, donde los frentes de onda son perpendiculares al eje longitudinal de la fibra y las placas de la rejilla son de periodo constante, son consideradas estructuras fundamentales para diferentes tipos de rejillas de Bragg.

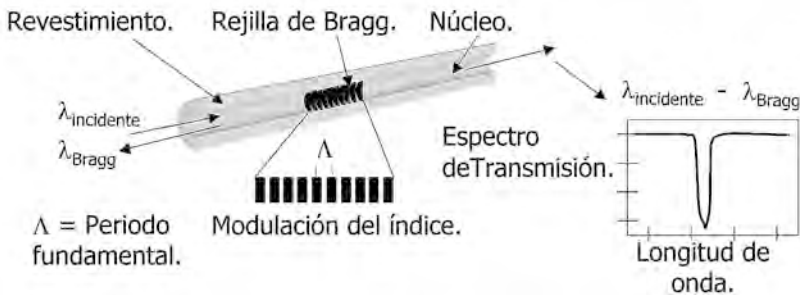


Figura 13. Estructura de una rejilla de Bragg de fibra óptica se muestra el espectro de transmisión y la modulación del índice de refracción.

La luz guiada a lo largo del núcleo de la fibra puede ser dispersada por cada placa de la rejilla. Si la condición de Bragg no se satisface, la luz reflejada por cada placa subsecuente, favorece para estar fuera de fase y puede eventualmente cancelarse.

Cuando la condición de Bragg se satisface, las contribuciones de luz reflejada por cada placa de la rejilla se adicionan constructivamente en la dirección hacia atrás formando un pico de reflexión centrado a la longitud de onda definida por los parámetros de la rejilla.

Una ecuación que nos da la longitud de onda reflejada con mayor intensidad por la rejilla es la siguiente.

$$\lambda_B = 2 n_{\text{eff}} \Lambda \quad (2)$$

Donde la longitud de onda de la rejilla de Bragg,  $\lambda_B$ , es la longitud de onda central de la luz de entrada que pueda ser reflejada por la rejilla,  $\Lambda$  es el periodo fundamental y  $n_{\text{eff}}$  es el índice de refracción promedio efectivo entre  $n_L$  y  $n_H$ .

Físicamente, un ensamble de películas delgadas que satisfaga la ecuación anterior dará lugar a una alta reflectancia a la longitud de onda especificada por esa ecuación debido a que los rayos reflejados por cada una de las interfases interfieren constructivamente en la superficie inicial.

Como una explicación simple, parte de la luz que incide sobre una rejilla se refleja y la otra parte se transmite, la rejilla de Bragg tiene una alta reflectancia debido a que las placas tienen un espesor óptico de  $\lambda/4$  y por lo tanto los rayos que se van reflejando en cada superficie se encuentran en fase al salir de la primera interfase.

Las características interesantes que presenta este dispositivo hacen que tenga aplicación en las áreas de sensores y en telecomunicaciones. Si nos basamos en la ecuación 2, la longitud de onda de Bragg se modificará si el periodo o el índice de refracción efectivo de la rejilla se modifica. Una forma de actuar sobre el periodo de la rejilla es aumentando o disminuyendo su temperatura, o estirando o comprimiéndola. A partir de esto, las rejillas son sensibles a temperatura, tensión y presión. Como dato, una sensibilidad de 1.2 pm (picómetros) se espera para una rejilla centrada a una longitud de onda de Bragg de 1550 nm cuando se le aplica 1  $\mu\epsilon$  (micro tensión), además, una sensibilidad de 13.2 pm por cada  $^\circ\text{C}$  de aumento de temperatura. En el campo de la medición o detección de gases o vapores, se necesita de un traductor entre el gas a medir y la rejilla de Bragg de forma tal que la medición afecte el periodo de la rejilla. Existen muchos tipos de rejillas de Bragg y todos tienen aplicaciones en sensores y telecomunicaciones, entre ellas se encuentran las rejillas inclinadas, las de periodo de espaciado

gradual, las rejillas superimpuestas, las cuales, como su nombre lo indica, varias rejillas ocupan el mismo espacio, pero existen las rejillas que tienen más sensibilidad y estas son las rejillas de periodo largo o rejillas de transmisión, las cuales, tienen una variación más grande del periodo. Una diferencia principal de estas rejillas en comparación con las rejillas de Bragg es que la longitud de onda de Bragg es de transmisión y no de reflexión como las anteriores. Las rejillas de periodo largo acoplan la longitud de onda de Bragg en el revestimiento y por ello es más fácil de aplicarlas en las estructuras de sensores de onda evanescente, ya que modificando el revestimiento en donde se acopla la longitud de onda de Bragg es posible modificar la longitud de onda de transmisión.

## Diseño de un sistema optoelectrónico para medición de corriente eléctrica de una casa habitación

### Introducción

Un medidor o wathhorímetro es un pequeño motor de inducción diseñado para medir energía eléctrica. El par en el medidor es producido por un electroimán llamado estator, el cual tiene dos juegos de devanados. Un devanado, llamado bobina de potencial, el otro devanado llamado bobina de corriente. Estas dos bobinas, están arregladas de tal manera que sus campos magnéticos producen una fuerza en el disco del medidor la cual es directamente proporcional a la potencia de la carga conectada. El número de Watt-horas medido por cada revolución del disco se le conoce como constante del medidor o K-h. Las revoluciones del disco son contadas y presentadas a través de engranajes apropiados como kilowatt-horas (kW-Hr) en el registro de wathhorímetro<sup>[2]</sup>. La relación fundamental del wathhorímetro puede escribirse como: Waththoras = Revoluciones del disco x hora.

Existen medidores monofásicos y polifásicos (bifásicos y trifásicos). De acuerdo al consumo de potencia de las casas-habitación los wathhorímetros usados en ellas son los de tipo monofásico y bifásico<sup>[3]</sup>. Los medidores tienen una estructura en la cual se indica el consumo de kilowatts de manera mecánica mediante engranes que mueven manecí-

Las similares a las de un reloj (figura 14), sabemos que en la actualidad el ser humano ha comenzado a digitalizar su entorno, por lo que es necesario establecer sistemas de control e instrumentación que vayan a la par de la tecnología que se demanda hoy en día, es por ello que en este trabajo se da una alternativa para cambiar la presentación del consumo de corriente a una forma digital, además de incrementar la información presentada, como lo es el pago por los kW-Hr y el consumo de aparatos específicos. En este trabajo se presenta un medidor digital de corriente que proporciona una lectura de una persona con mayor facilidad que en un medidor que CFE tiene en cada casa-habitación (figura 14). En este diseño se cuenta con un microcontrolador que con una programación adecuada, es capaz de realizar diferentes actividades que requiera un sistema digital y de control<sup>[4-5]</sup>. Para la presentación de la información se dispone de una LCD, el cual es una pantalla delgada y plana formada por un número de píxeles en color o monocromos y se pueden representar 256 caracteres diferentes<sup>[6]</sup>. La confiabilidad de este diseño es considerablemente buena presentando información de consumo en kW-Hr, manejable y entendible para cualquier usuario, desarrollando un sistema de procesamiento de datos de entrada y teniendo un control para visualizar la información de interés.

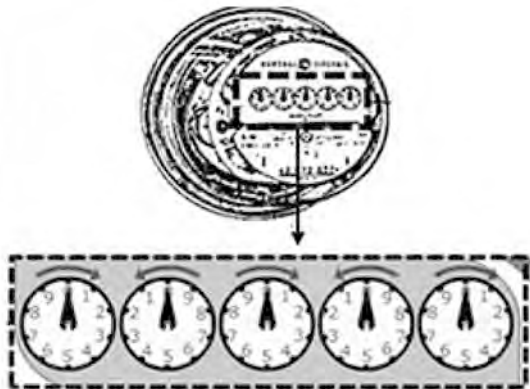


Figura 14. Manecillas del medidor común



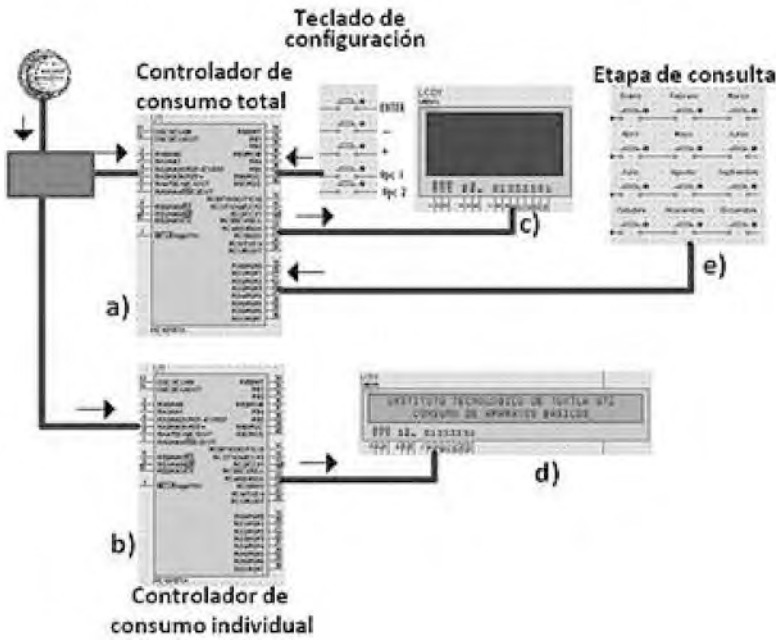


Figura 15. Esquema del diseño optoelectrónico propuesto

## Descripción del sistema optoelectrónico

El diseño de este proyecto consiste en calcular el consumo de los Kilo-watts-Hora a partir del número de vueltas del disco que se encuentra dentro del medidor de CFE, teniendo en cuenta que éste puede ser monofásico o bifásico. En principio, para detectar el giro del disco se utiliza un diodo emisor infrarrojo y un fototransistor. La luz enviada hacia al disco es reflejada por el mismo hacia el fototransistor. El disco cuenta con una línea oscura de aproximadamente 2 mm de espesor. De acuerdo a la ley de Reflexión, el fototransistor debe estar al mismo ángulo de inclinación a la cual se encuentra el emisor para que haya una buena recepción. El disco gira y siempre está reflejando luz, sin embargo, la línea oscura absorberá luz y en ese momento habrá un conteo de revoluciones a la cual el disco gira. Teniendo cuantificadas el número de vueltas del disco en un lapso de tiempo se procede a determinar el con-

sumo y pago a realizar, lo anterior lo determina un microcontrolador previamente programado, al mismo tiempo un segundo microcontrolador se encarga de cuantificar el consumo de corriente de dispositivos comunes en una casa habitación de manera individual. Los resultados se despliegan en una pantalla LCD. En la figura 15 se muestra un diagrama general del diseño propuesto, indicando la etapa optoelectrónica, la cual proporciona la señal de entrada para los dos microcontroladores. También se muestra cada controlador y sus respectivas entradas y salidas, así como los dispositivos de visualización LCD. El microcontrolador es programado con un lenguaje de alto nivel (mikro c) debido a la facilidad en su compilación.

### *Control del sistema*

Como en todo sistema, es necesario tener un control de cada una de las entradas y salidas. En el diseño propuesto, el control lo hacen un par de microcontroladores PIC16F877, ya que este PIC tiene una variedad de puertos, además, soporta hasta 20 Mhz de frecuencia Máxima. Internamente contiene una memoria RAM y una EEprom[5]. Cada uno de ellos realiza diferentes acciones en el sistema, el primero se encarga de presentar el consumo total de la casa-habitación y el segundo muestra el consumo de corriente de manera individual de cada dispositivo electrónico común que se utiliza en una casa habitación.

### *Controlador de consumo total*

En la figura 15a se muestra el primer controlador que es el encargado de contar vía software el número de vueltas que el disco del medidor realiza a través de la activación de una de sus terminales provocada por la señal emitida desde la etapa optoelectrónica, con éste conteo se realizan operaciones matemáticas para determinar el consumo en Kilowatts-Hora y la cuota que se deberá de cubrir, imprimiendo los resultados cada hora en una LCD de 4 x 16 (Fila x Columna) que se observa en la figura 15c. Al término de cada mes, tiene la tarea de almacenar los datos dentro de la memoria interna EEprom, por último reali-

za la función de consulta, la cual se puede llevar a cabo en el momento que se desee. Cabe mencionar que antes de iniciar con el proceso antes mencionado, se debe de acceder a un menú de configuración, en donde la primera parte consta de la actualización de la fecha y hora de instalación. En forma de submenú se encuentra el apartado para seleccionar el tipo de medidor (Monofásico o Bifásico), posteriormente se selecciona al programa principal, en donde se visualiza el consumo de kW-Hr y cuota descritos en el primer párrafo.

### *Controlador de consumo de aparatos*

En la figura 15b se encuentra el segundo controlador que es el encargado de determinar el consumo de los aparatos básicos en una casa habitación (refrigerador, plancha, televisor, lavadora, computadora), a través de la medición del tiempo que tarda el disco del medidor en dar una vuelta. En base a una serie de datos almacenados en el microcontrolador, se puede relacionar el tiempo transcurrido por vuelta y así determinar el consumo del o los aparatos. Mandando los datos obtenidos en kW-Hr a un LCD de 2 x 40 (Fila x Columna) que se observa en la parte d de la figura 15

## Resultados

Para poder realizar experimentos acorde a la etapa optoelectrónica independiente del medidor de CFE, se diseñó un prototipo que simula las vueltas del medidor original (figura 16) en el cual se encuentra el diodo emisor infrarrojo y un fototransistor alineado de tal forma que en el disco existe un orificio en el cual la luz pasa hacia el fotodetector. Cada vez que la luz llega al fotodetector, se genera una fotocorriente logrando que se genere un voltaje positivo. Este voltaje es enviado al PIC16f877 como un pulso para su procesamiento, interpretándolo como un conteo de una vuelta. El sistema se inicializa con un menú principal (figura 17a). Seleccionando la opción deseada a partir de los botones de opcl u opc2 (figura 15, etapa Switch de configuración). Al seleccionar la opción 2, todos los datos y variables del programa se inicializarán. Al

seleccionar la opción 1 de inicio, se tiene acceso a la parte de configuración de fecha y hora de instalación (figura 17b), utilizando los botones de incremento y decremento se pueden establecer los valores exactos, pasando de un rubro a otro con el botón enter. Al finalizar la configuración y pulsar el botón enter, se tiene acceso a otro menú (figura 17c), en el cual se configura el tipo de medidor que la casa habitación tiene instalado, utilizando los botones de opción 1 o 2. Después de que se ha elegido el tipo de medidor, automáticamente se entra al programa principal (figura 17d), en el cual se ilustra el consumo en Kilowatt – hora y la cuota a cubrir. La actualización de los datos en LCD se realiza cada lapso de 1 hr y al término de cada mes. El sistema almacena el consumo total en una memoria EEprom que se encuentra integrada al microcontrolador, además, las variables con los valores se inicializan. Lo anterior se ejecuta mientras se seleccione la opción medidor con el switch de modo. Cuando el switch se activa en la opción lectura, el sistema se detiene y espera que se seleccione el mes que se desea consultar, utilizando los botones que indican el mes (figura 18) e imprimiendo en la LCD el valor almacenado en la memoria interna EEprom. Al término de la consulta deberá de seleccionarse nuevamente la opción medidor, para seguir con el funcionamiento principal.

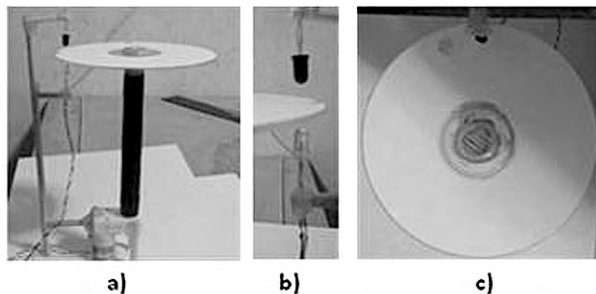


Figura 16. Prototipo que simula al disco giratorio de un medidor convencional de CFE

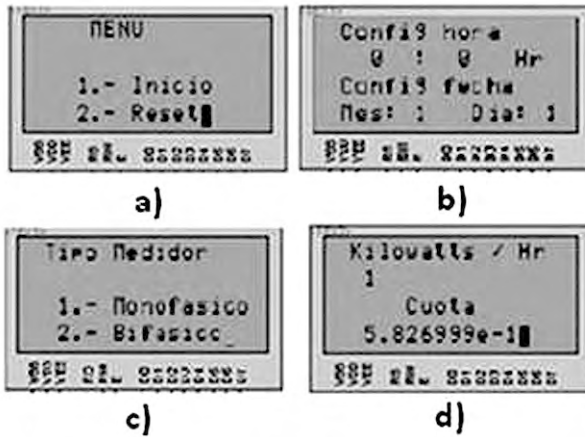


Figura 17. Secuencia de configuración

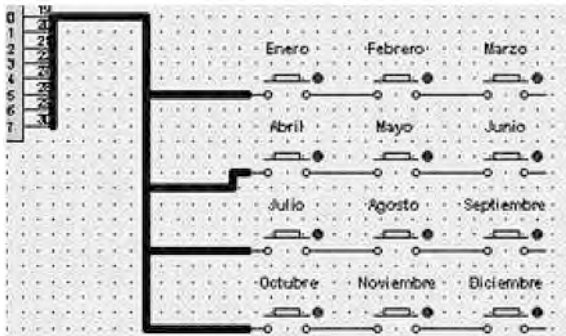


Figura 18. Tablero para seleccionar el mes a consultar

La etapa del segundo controlador, inicia con una referencia del proyecto en la pantalla LCD durante 5 seg (figura 19a). Después de dicho tiempo se imprimen los dispositivos electrónicos que el medidor cuantificará individualmente (figura 19b). Cada vez que se detecta una vuelta, se incrementa un contador vía software, y al detectar otro giro, el controlador determina el tiempo que el disco demoró en realizar la vuelta, dependiendo de los tiempos, se imprime en LCD el consumo de los aparatos (figura 19c).

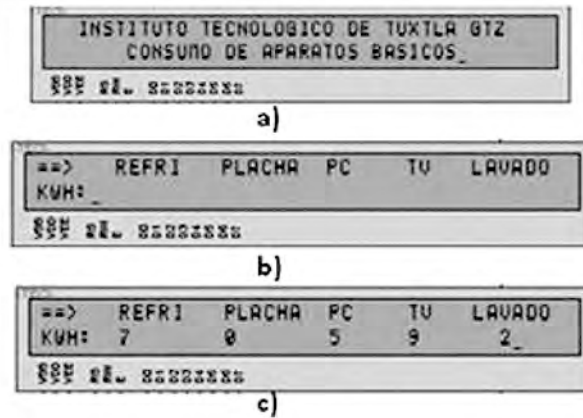


Figura 19. Secuencia de visualización del consumo de corriente de dispositivos electrónicos de forma individual

## Conclusiones

Se ha diseñado un dispositivo digital optoelectrónico, en el cual la lectura del consumo de corriente eléctrica de una casa-habitación es mucho más rápida y fácil de obtener por un usuario, teniendo consigo ventaja sobre los medidores convencionales de CFE. En este medidor, un usuario puede tener el control de cuanta corriente eléctrica que consume mensualmente y el costo de la misma, y así controlar el consumo de energía eléctrica de manera adecuada. La parte de control de consumo total es aplicable a cualquier casa-habitación que se requiera. Cabe mencionar que el control de consumo de aparatos eléctricos se ve afectado dependiendo del tipo de centro de carga que se utilice en la casa-habitación. El problema se resuelve llevando a cabo un estudio del comportamiento del centro de carga y reprogramando el microcontrolador. En general este diseño puede ser de gran utilidad en el ahorro de energía eléctrica.

## Construcción y caracterización de un sensor de fibra óptica con rejillas de Bragg para aplicación en la medición del consumo de energía eléctrica

### Introducción

Las rejillas de Bragg de fibra óptica son dispositivos que se forman cuando un patrón de interferencia es grabado en una fibra óptica fotosensible. Este patrón de interferencia modifica el índice de refracción del núcleo de la fibra induciéndole una modulación. Este fenómeno fotosensible en fibras ópticas descubierto desde hace más de tres décadas ha apoyado fuertemente la tecnología de las telecomunicaciones, así como la de sensores. Las propiedades que presentan estos dispositivos así formados son diversas e ideales para un amplio rango de aplicaciones, motivo por lo cual han sido tema de muchas investigaciones. En sistemas de telecomunicación, las rejillas de Bragg son utilizadas para filtrar, dispersar, estabilizar diodos láser en longitud de onda, para aplanar el perfil de ganancia de un amplificador de fibra dopada con Erblio, etc., y muchas aplicaciones más, evitando con esto la utilización de elementos ópticos voluminosos disminuyendo las no deseadas pérdidas de energía. En los láseres de fibra, las rejillas son utilizadas como espejos con un medio activo, fibra dopada con Erblio, entre ellas. En la tecnología de sensores de fibra óptica basados en rejillas de Bragg, las rejillas funcionan como elementos sensores de temperatura y tensión. El principio básico comúnmente utilizado en estos sistemas es el de monitorear el desplazamiento de la longitud de onda de Bragg reflejada por la rejilla con los cambios estimulados por algún parámetro físico (tensión, temperatura, presión)<sup>[7-10]</sup>. De esta forma, la medición queda codificada en términos de la longitud de onda, parámetro que no es afectado por cambios en la intensidad de la radiación, característica que hace útiles a estos sensores en mediciones remotas y, aunado a propiedades de la fibra óptica, estos sensores pueden ser aplicados en ambientes altamente corrosivos, de difícil acceso, en donde existe interferencia electromagnética, ambientes en donde los sensores eléctricos no funcionarían.

En este trabajo se aprovecha una de las características que tienen las rejillas de Bragg cuando son sometidas a cambios de temperatura en su estructura física. Esta característica es que la longitud de onda central de la rejilla se cambia de acuerdo a la cantidad de temperatura aplicada. Un cambio de  $13.7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  es esperado para rejillas centradas alrededor de una longitud de onda de  $1550 \text{ nm}$ <sup>[8]</sup>, y para rejillas cercanas a  $1530 \text{ nm}$ , por cada  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  de aumento de temperatura, la longitud de onda central de la rejilla se desplazará aproximadamente  $1 \text{ nm}$ <sup>[11]</sup>.

## Desarrollo experimental

El primer paso fue el de construir el sistema óptico tratando de que fuera lo más sencillo posible para evitar, más que nada, el aumento del costo así como la complejidad.

El sistema propuesto es el mostrado en la figura 20. Un tramo de 10 metros de fibra óptica dopada con erbio se empalma por fusión a una rejilla de Bragg R1 que tiene una longitud de onda central de  $1550 \text{ nm}$ . Esto último significa que la rejilla R1 sólo reflejará luz que tenga la misma longitud de onda que la rejilla. Uno de los puertos de un acoplador por división de longitud de onda (WDM) se empalma a la punta libre de la fibra dopada. El acoplador WDM se utiliza para introducir al sistema la luz de un diodo láser de semiconductor que sirve para bombear a la fibra dopada. Como puede observarse, un puerto del WDM queda libre y los otros tres son utilizados. El puerto que es paralelo al puerto en donde se introduce la luz de bombeo, se empalma con uno de los puertos (S1) de un acoplador divisor 90/10 el cual sirve para monitorear las señales que genera el láser. Otro de los puertos del divisor 90/10 se empalma con la otra rejilla de Bragg R2 que tiene una longitud de onda central de  $1550 \text{ nm}$ , igual a R1, significando que la luz que se propague en la fibra y que coincida con esta longitud de onda, será reflejada por la rejilla R2.



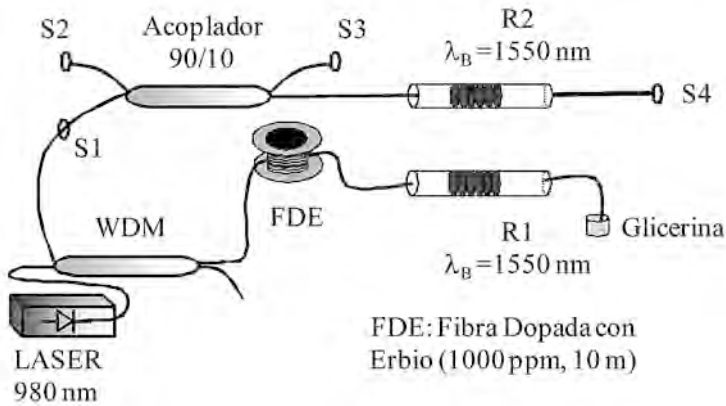


Figura 20. Sistema óptico propuesto que muestra un sensor láser de fibra formado por dos rejillas de Bragg y un medio amplificador

La relación 90/10 del acoplador divisor significa que si en el punto S1 se tiene un 100% de intensidad de señal óptica, en la terminal S3 se tendrá un 10% y el otro 90% seguirá la ruta hacia la rejilla de Bragg R2. De igual forma, de la luz que es reflejada por la rejilla R2 sólo el 10% del total de intensidad será detectada en S2, el 90% restante seguirá hacia el WDM. La punta libre de una de las rejillas (R1) es inmersa en glicerina, el cual es un líquido que acopla el índice de refracción de la fibra con el del aire, evitando con esto que exista luz que se refleje hacia la rejilla y degrade el funcionamiento del sistema. En la terminal libre (S4) de R2 fue colocado un medidor de potencia óptica con un ancho de banda de sensibilidad de 800 a 1650 nm. Esto significa que todas las señales ópticas que se encuentren dentro de este rango pueden detectarse. En esta terminal se monitorea los cambios que tiene la emisión láser. La rejilla R2 fue sujeta a un conductor eléctrico de cobre de calibre 16 por donde circula una corriente eléctrica variable. A medida que la corriente aumenta, genera un aumento de temperatura en el conductor, lo cual modifica la longitud de onda de Bragg de R2, disminuyendo la emisión láser.

## Resultados

Para aumentar la corriente en el conductor, se utilizó un arreglo en paralelo de varias resistencias, las cuales fueron conectadas de forma secuencial, obteniendo una corriente gradual desde 5 a 23 Amperes. Bajo condiciones normales de temperatura, la rejilla R2 (sensor) tiene la misma longitud de onda de Bragg que la rejilla R1 (referencia), generando la emisión láser. Cuando se aumenta gradualmente la corriente en el conductor, existe un aumento de temperatura en el mismo y por lo tanto también en la rejilla R2. Esto hace que la emisión láser tenga una disminución gradual de su potencia.

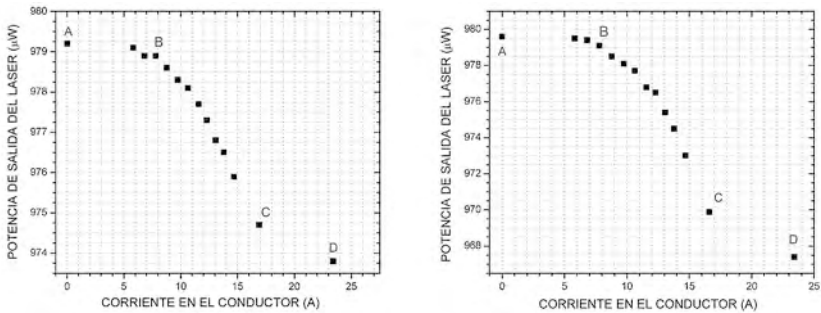


Figura 21. Corriente en el conductor en amperes vs potencia de salida del láser en  $\mu\text{W}$ . Se observa una disminución lineal de la potencia del láser a medida que la corriente aumenta en el conductor

Como se dijo anteriormente, la corriente genera un incremento en la temperatura del conductor, por lo tanto, esta temperatura es el transductor entre la corriente eléctrica y la potencia de salida del láser. En la figura 21 se observa dos graficas en las cuales se refleja que a medida que la corriente aumenta, la potencia del láser disminuye. Se tiene tres intervalos de trabajo. El intervalo de A-B muestra un aumento de la corriente en el conductor desde 0 hasta 8 Amperes, lo cual genera una disminución muy poco notable en la potencia del láser. El intervalo B-C presenta una disminución lineal muy notable de la potencia del láser a

medida que la corriente aumenta. El intervalo C-D sucede cuando se aumenta la corriente desde 16 hasta 23 Amperes y no se puede decir si es lineal o no, debido a que no se tienen caracterizaciones.

El régimen de trabajo para este sistema específico “sensor láser-conductor” está en el intervalo B-C, en donde se tiene un comportamiento lineal. El conductor eléctrico utilizado en este experimento tiene una longitud de 25 cm con un calibre 16. Es de esperarse que cambiando el calibre y la longitud se modifiquen los datos observado en las graficas, debido a la dilatación volumétrica del material lo cual modifica la resistencia. Por ejemplo, si utilizamos un conductor de calibre 14, se necesita una mayor corriente para aumentarle la temperatura.

En la continuación con este trabajo, se piensa utilizar conductores de características diferentes para definir el óptimo tal que amplíe el régimen de trabajo “sensor láser-conductor”.

## Conclusiones

Se presentó una forma de medir la corriente en un conductor eléctrico, a través del monitoreo de la temperatura del mismo utilizando un sensor láser de fibra óptica. La aplicación inmediata es en la determinación del consumo de energía eléctrica, siempre y cuando se determine el sistema óptimo “sensor láser-conductor”. Esto es, definiendo un conductor que nos genere cambios notables de su temperatura al paso de una corriente eléctrica en intervalos específicos. Debido a que se utiliza fibra óptica es posible realizar sistemas remotos de medición, e incluso, sistemas de sensores multipunto aumentando el número de cavidades láser en un solo sistema.



## Referencias Bibliográficas

1. Carlos Manuel García Lara, 2010, *Estudios Ambientales y Riesgos Naturales. Aportaciones al Sureste de México II*, Editorial UNICACH, Cap. 6, Pp. 188.
2. CFE, s. f., “Calibración y prueba de wathhorimetro”, capítulo 12, en *Manual de CFE*, México.
3. CFE, s. f., “Medición de energía para ingenieros, El wathhorímetro de inducción”, en *Manual de CFE*, México.
4. Jose Ma. Angulo Usategui, Susana Romero Yesa, Ignacio Angulo Martínez, s. f., *Microcontroladores PIC: diseño práctico de aplicaciones*, Ed. MC GrawHill, s. l.
5. Roger L. Tohkheim, s. f., *Electrónica digital*, ed. Reverte S. A., s. l.
6. Fredrick J. Hill & Gerald R. Peterson, s. f., *Digital logic and microprocessors*, ed. Hill Peterson, s. l.
7. Alan D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, *et al.*, 1997, “Fiber grating sensors”, en *Journal of Lightwave Technology*, 15, pp. 1442-1452.
8. A. Othonos, K. Kalli, 1999, *Fiber Bragg gratings; fundamentals and applications in telecommunications and sensing*. cap. 1, Artech House, Inc, s. l.

9. M. May Alarcón, E. A. Kuzin, R. Vázquez Sánchez, 2002, “Sensor láser de fibra óptica con una cavidad de 8.6 km formada por dos rejillas de Bragg usadas como espejos”. en *Revista Mexicana de Física*. 48, pp. 434-437.
10. R. A. Vázquez Sánchez, E. A. Kuzin, M. May Alarcón, 2004, “Láser de fibra óptica compuesto por dos cavidades acopladas: aplicación como sensor de fibra óptica”. *Revista Mexicana de Física*. 54, pp. 374-368.
11. R. A. Vázquez-Sánchez, 2004, *Sensor láser con rejillas de Bragg interrogado por la medición de la frecuencia de batido intermodal*, Tesis de Doctorado, Cap. II, INAOE, p. 20.