

Embedded Tunable Laser Control for WDM Optical Communications Systems

M. Bustillos, and G. Rinalde

Abstract—In this work we present the design, implementation and evaluation of an embedded control solution for a WDM tunable laser. A brief description of the tunable laser components and operation is given and the required hardware is proposed. The required temperature, power and wavelength controllers are designed placing great emphasis on response time. Additionally, we present the characteristics and configurations of the microcontroller, along with the control algorithms implementation. Finally, the time response and wavelength accuracy of the solution is evaluated.

Index Terms—Tunable Lasers, Optical Communications, Embedded Digital Control, MPPT algorithm, Y-Branch Laser.

I. INTRODUCCIÓN

LOS láseres semiconductores sintonizables son dispositivos fundamentales en sistemas de comunicaciones ópticas modernos que utilizan multiplexación por división de longitud de onda (WDM *Wavelength Division Multiplexing*) [1]. Estos láseres reducen los costos de implementación y hacen a las redes de comunicaciones más flexibles mediante la reducción en el número de fuentes de luz utilizadas [2]. En particular, las redes ópticas pasivas (PONs *Passive Optical Networks*) se benefician del uso de los láseres sintonizables, ya que estos permiten brindar servicio a un gran número de usuarios mediante un solo dispositivo [3], [4].

Los sistemas de comunicación coherente también se benefician de los láseres sintonizables. Dichos sistemas permiten el uso de formatos de transmisión más eficientes, lo que reduce los efectos de dispersión en la fibra óptica e incrementan la distancia de transmisión permitiendo satisfacer la siempre creciente demanda de velocidad de transmisión [5], [6].

Entre los láseres semiconductores sintonizables más comunes se pueden mencionar los basados en realimentación distribuida (DFB *Distributed FeedBack*), reflector de Bragg distribuido (DBR *Distributed Bragg Reflector*) y los de cavidad externa [7]. Los láseres basados en DBR, por ejemplo, los láseres tipo Y-Branch, son utilizados en WDM debido a ventajas tales como un tamaño reducido, gran estabilidad mecánica y facilidad de integración con otros componentes ópticos [2]. Estos láseres permiten alcanzar rangos de ajuste de longitud de onda superiores a 40nm, tienen una relación de supresión de modo adyacente (SMSR *Side Mode Suppression Ratio*) mayor a 35dB y entregan potencias de salida superiores a los 10 dBm [5].

La operación de un láser sintonizable tipo Y-Branch requiere de circuitos adicionales capaces de manejar el láser de manera

eficiente, en donde la velocidad de conmutación entre longitudes de onda depende del diseño del *hardware* asociado. De igual forma, los algoritmos de control del láser juegan un papel fundamental en su desempeño. Los mismos deben ser robustos, permitiendo la operación a altas velocidades y aprovechando todo el rango de ajuste inherente al dispositivo, permitiéndole ser utilizado en distintos tipos de aplicaciones.

Las aplicaciones de láseres sintonizables abarcan un gran espectro, dentro las cuales, la velocidad de conmutación de longitud de onda permite diferenciarlas en dos grupos: en los que la velocidad de conmutación es lenta o bien no es un parámetro relevante y en los que las altas velocidades de conmutación son indispensables. Por ejemplo, en algunas aplicaciones se realiza el control de láseres sintonizables tipo Y-Branch implementando plataformas de control que utilizan FPGAs [8], [9]. En esta clase de trabajos, el láser es utilizado para excitar sensores de fibra óptica en aplicaciones de ingeniería civil, por lo que las necesidades se enfocan en obtener un ajuste continuo sin importar la velocidad de conmutación.

En el otro extremo, en aplicaciones de comunicaciones ópticas basadas en la técnica de Conmutación Óptica de Paquetes (OPS *Optical Packet Switching*), los paquetes tienen duración de algunos cientos de nanosegundos por lo que se requieren láseres sintonizables con elevadas velocidades de conmutación [10], [11].

Como se ha mencionado anteriormente, existen equipos de comunicaciones que realizan WDM utilizando láseres sintonizables. En estos, la velocidad de conmutación entre canales se encuentra en un punto intermedio, siendo esta del orden de los milisegundos [12]. En esta línea, existen a su vez equipos de laboratorio que implementan láseres ajustables para aplicaciones en comunicaciones en la banda C [13]. Si bien estos equipos proveen facilidades para su aplicación en comunicaciones ópticas, su costo es elevado, su velocidad de conmutación entre canales es limitada y poseen escasas posibilidades de configuración.

En este trabajo se describe el desarrollo de un sistema embebido de bajo costo capaz de operar un láser sintonizable tipo Y-Branch a ser utilizado en aplicaciones de comunicaciones WDM de alta velocidad. En particular, la solución implementada se basa en una plataforma microcontrolada para el manejo del láser, donde el control de temperatura, potencia y longitud de onda se realizan a través de dicha plataforma. Mediante el diseño preciso del sistema de control y del *hardware* asociado al láser se pretende alcanzar, a un costo asequible, altas velocidades de conmutación y un alto grado de personalización de todos los parámetros del láser.

M. C. Bustillos Barcaya, Instituto Balseiro, CONICET, e-mail: marvin.bustillos@ib.edu.ar.

G. F. Rinalde, Instituto Balseiro, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina, e-mail: rinalde@cab.cnea.gov.ar.

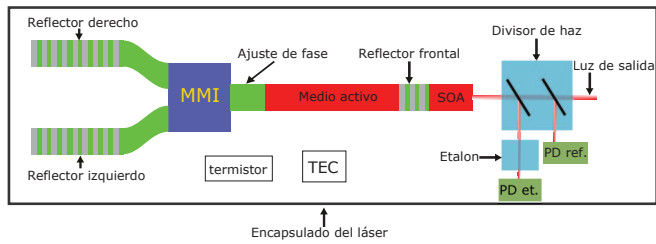


Fig. 1. Esquema interno del encapsulado del láser.

II. LÁSER SINTONIZABLE TIPO Y-BRANCH

Los láseres DBR utilizan un reflector de Bragg como elemento de ajuste de longitud de onda. Dicho ajuste se realiza usualmente mediante un cambio del índice de refracción en la sección apropiada. Sin embargo, el uso de un solo reflector de Bragg produce un rango de ajuste limitado de aproximadamente 8 nm, lo cual es insuficiente para cubrir completamente una banda de comunicaciones ópticas [14]. En cambio, los láseres tipo Y-Branch incorporan dos reflectores de Bragg, lo cual incrementa substancialmente el rango de ajuste haciendo uso del efecto Vernier. Adicionalmente, la estructura de los láseres Y-branch provee dos ventajas importantes en comparación a otros dispositivos con dos reflectores de Bragg: mejora el SMSR y reduce las variaciones de potencia de salida gracias a la implementación de ambos reflectores de Bragg en un solo extremo del láser.

En la figura 1 se muestra el esquema de un láser sintonizable tipo Y-Branch así como los elementos de control incorporados en el mismo encapsulado del láser. Los principales componentes del láser son los reflectores de Bragg, el acoplador de interferencia multimodo (MMI *Multi Mode Interference*), la sección de ajuste de fase, el medio activo y el reflector frontal.

El medio activo provee la ganancia de luz necesaria para la operación del láser, mientras que el reflector frontal permite la extracción de un haz de luz fuera del resonador del láser. El ajuste de longitud de onda es posible gracias a los reflectores de Bragg, el acoplador MMI y la sección de ajuste de fase [14], [15].

Se observa en la figura 2 la reflectancia espectral normalizada que fue calculada para los reflectores de Bragg del láser. Esta reflectancia posee máximos equidistantes con una separación de aproximadamente 5.6 nm, siendo la separación exacta ligeramente distinta para cada reflector de Bragg. Debido a esta diferencia en la separación de máximos de los reflectores solo uno de ellos resulta alineado en cada reflector. Por tanto, la reflectancia combinada, obtenida mediante el acoplador MMI, posee un máximo único. La longitud de onda de emisión del láser corresponde a la longitud de onda del modo de resonancia de la cavidad más próximo al máximo de reflectancia combinada. Esto implica que la longitud de onda de emisión del láser puede ser ajustada mediante cambios en los reflectores de Bragg. Dicho ajuste permite cubrir toda la banda C de forma discontinua con saltos de 0.4 nm correspondientes a la separación entre modos de resonancia de la cavidad.

El ajuste de longitud de onda continuo se logra gracias a la inyección de corriente en la sección de ajuste de fase. Una

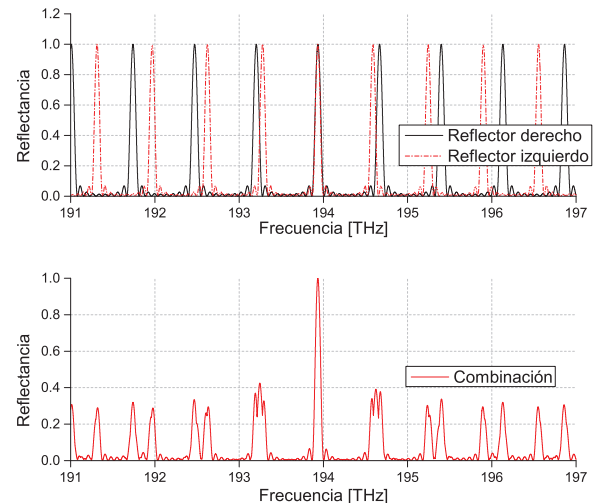


Fig. 2. Reflectancia espectral normalizada, calculada para los reflectores de Bragg de forma individual y combinada.

modificación del índice de refracción debido a la inyección controlada de portadores de carga en la sección de ajuste de fase produce el desplazamiento continuo de los modos de resonancia de la cavidad. Por tanto, se permite el ajuste continuo de longitud de onda en un rango de 0.4 nm. La combinación del ajuste de los reflectores y de la sección de fase permite obtener un ajuste continuo en todo el intervalo de longitud de onda de la banda C. Además de los elementos ya mencionados, los encapsulados de láseres comerciales (figura 1) poseen generalmente sensores y actuadores incorporados los cuales se describen a continuación.

Unos de los elementos incorporados a la mayoría de los láseres son un termistor y un refrigerante termoeléctrico (TEC *Thermo Electric Cooler*) para la medición y el ajuste de la temperatura. Ambos elementos conforman parte fundamental de un lazo de control de temperatura. Se incorpora también un amplificador óptico semiconductor (SOA *Semiconductor Optical Amplifier*) a la salida del láser que se utiliza para modificar la potencia óptica entregada. De esta forma se logra desacoplar el control de potencia del control de longitud de onda. A su vez, una pequeña parte de la luz de salida es extraída mediante un divisor de haz y es dirigida a un fotodiodo de referencia, el cual permite medir la potencia de salida. El fotodiodo de referencia y el SOA forman parte de un lazo de control de potencia óptica de salida.

El divisor de haz extrae además otra parte de la luz de salida hacia un etalon y posteriormente a un fotodiodo asociado al mismo. El etalon es básicamente un filtro y posee transmitancia espectral periódica con máximos equidistantes. La separación entre los máximos de transmitancia del etalon es de 0.4 nm y resulta coincidente con la separación entre canales de la banda C, por lo que es utilizado, luego de ser calibrado, para sintonizar la longitud de onda de emisión del láser en algún canal de la banda C. El fotodiodo del etalon y los componentes de ajuste de longitud de onda (Reflectores de Bragg y sección de ajuste de fase) forman parte de un lazo de control de longitud de onda.

III. ESQUEMA DE IMPLEMENTACIÓN

El láser seleccionado para este trabajo es un Finisar S7500 que posee las siguientes características [16]:

- cobertura completa de la banda C de comunicaciones óptica (35 nm),
- potencia óptica de salida de 13 dBm,
- SMSR mayor a 40 dB.

El requerimiento de tiempo de establecimiento para el control de la potencia y la longitud de onda es de 1 ms y se establece en base al análisis realizado de equipos comerciales con aplicaciones DWM y prestaciones similares [13]. En la figura 3 se muestra el esquema propuesto para el control de temperatura, potencia y longitud de onda del láser teniendo en cuenta los sensores y actuadores disponibles.

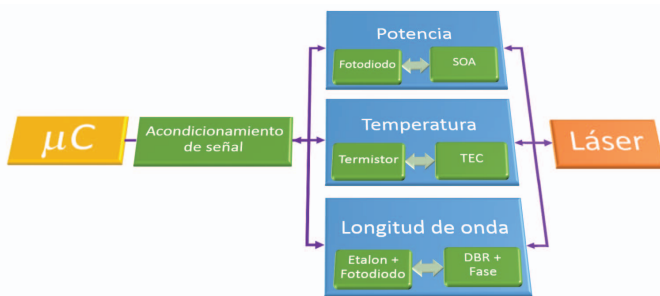


Fig. 3. Esquema de manejo y control del láser.

El láser posee cinco entradas de corriente para su manejo (Medio Activo, Reflector izquierdo, Reflector derecho, Fase y SOA), por lo que se requieren cinco fuentes de corriente. Dichas fuentes tienen distinto intervalo de operación y deben ser lo suficientemente rápidas para satisfacer los requerimientos de control establecidos.

Los dos fotodiodos producen corrientes que deben ser medidas. Para ello se utilizan amplificadores de transimpedancia (TIA *Trans Impedance Amplifier*), los cuales proveen una tensión proporcional a la corriente de los fotodiodos. La respuesta de estos TIA debe ser tan veloz como las fuentes de corriente ya que también son parte de los lazos de control.

Para el sensado de la temperatura, la medición del termistor requiere un circuito que produzca una tensión proporcional al valor de resistencia del mismo. El circuito de medición de los termistores no necesita satisfacer criterios tan exigentes como los circuitos anteriores ya que la respuesta de la temperatura es relativamente lenta en comparación a la longitud de onda y potencia del láser.

Para el manejo del TEC se implementa un circuito capaz de ajustar la magnitud y dirección de la corriente de este. El circuito está basado en un puente H de alta eficiencia y que es controlado mediante modulación por ancho de pulso (PWM *Pulse Width modulation*).

Finalmente, se utiliza un microcontrolador (μC) para manejar todo el sistema. Este controla las entradas del láser mediante convertidores D/A, adquiere las variables de control mediante convertidores A/D y ejecuta los algoritmos de control necesarios.

IV. DISEÑO DE LOS CONTROLADORES

En principio, y considerando un modelo a primer orden, las diferentes variables de control pueden ser modeladas de forma independiente. Bajo esta consideración, se pueden implementar lazos de control de temperatura, potencia y longitud de onda de forma disociada. Sin embargo, la suposición de independencia de las variables solo se cumple en estado estacionario, ya que las variaciones de temperatura afectan sensiblemente la estabilidad de la longitud de onda emitida por el láser. En consecuencia, el diseño y funcionamiento del controlador de temperatura resulta prioritario antes de caracterizar y diseñar del resto de los controladores. Cabe destacar además que, en el proceso de diseño de los controladores de potencia y longitud de onda se utiliza un modelo de simulación del láser previamente desarrollado para tal fin [17].

A. Control de Temperatura

Como se mencionó anteriormente, la estabilidad de temperatura resulta fundamental en la operación del láser, ya que la longitud de onda de emisión del láser depende de la misma. De igual forma, la transmitancia espectral del etalon (usado en el ajuste de longitud de onda) depende de la temperatura, por lo que variaciones de la misma resultan perjudiciales para el controlador de longitud de onda.

El lazo de control de temperatura está formado por un circuito de excitación del TEC, el láser (TEC y termistor) y el circuito de acondicionamiento de señal del termistor. Durante el proceso de diseño se establece los requerimientos de control donde se utiliza el método de lugar de raíces discreto para diseñar el controlador y obtener finalmente la función de transferencia $D_{temp}(z)$ del controlador [18], [19].

B. Control de Potencia

El control de potencia hace uso del SOA integrado al láser. Esto permite desacoplar el control de potencia del de longitud de onda ya que la potencia de salida no depende exclusivamente de la excitación del medio activo.

El lazo de control de potencia incluye un amplificador de transimpedancia asociado al fotodiodo de referencia, el modelo del láser, la fuente de corriente correspondiente a la entrada del SOA y el microcontrolador. Al igual que en el control de temperatura, se establecen los requerimientos para luego diseñar el controlador mediante el método de lugar de raíces discreto. Como resultado del diseño se obtiene una función de transferencia $D_{pow}(z)$.

C. Control de Longitud de Onda

El control de longitud de onda permite sintonizar la longitud de onda de emisión del láser a uno de los canales seleccionados de la banda C de comunicaciones. Para lograr esto se utiliza el fotodiodo del etalon, el cual genera una corriente máxima cuando la longitud de onda de emisión concuerda con uno de los canales de la banda C. El controlador de longitud de onda está compuesto por dos partes importantes: el uso de una tabla de canales para el ajuste de los reflectores de Bragg (ajuste

discontinuo) y un algoritmo de seguimiento de máximos para la sección de ajuste de fase (ajuste continuo).

El primer paso en el diseño del controlador de longitud de onda es calibrar la temperatura necesaria para alinear los modos de transmitancia del etalon con los canales de la banda C. Para esto se realiza un barrido de temperatura, registrando en cada punto la longitud de onda de uno de los modos del etalon mediante un analizador de espectro óptico (OSA *Optical Spectrum Analyzer*). En la figura 4 se muestra el resultado de dicho barrido en temperatura en donde se observa que la relación entre la temperatura y la longitud de onda del modo del etalon seleccionado se aproxima a una función lineal. En la figura 4 se ilustran también las longitudes de onda de los canales de la banda C, lo cual facilita la selección de la temperatura de operación. La calibración en temperatura consiste en seleccionar un punto para el cual la longitud de onda del modo del etalon seleccionado concuerda con la longitud de onda de uno de los canales de la banda C. Finalmente, la temperatura de operación seleccionada resulta de 22,9 °C.

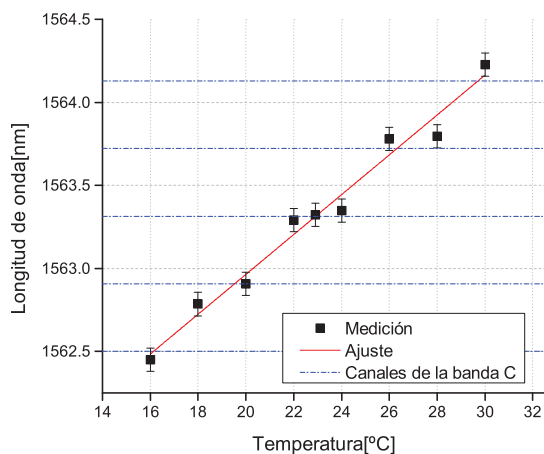


Fig. 4. Longitud de onda de uno de los modos del etalon en función de la temperatura.

Una vez realizada la calibración de temperatura, se procede a construir la tabla de canales necesaria para el ajuste de los reflectores de Bragg. Dicha tabla posee, por cada canal, la combinación de corrientes que debe ser inyectada a los reflectores de Bragg de modo de que la longitud de onda de emisión del láser se posicione tan próxima al canal deseado como sea posible. Para construir la tabla se realiza un barrido en corriente de los reflectores de Bragg y se registra la longitud de onda emitida mediante un OSA.

En la figura 5 se muestra el mapa de longitudes de onda resultante del barrido. Las pequeñas zonas formadas en el mapa de longitud de onda corresponden a los distintos modos de resonancia de la cavidad, por lo que existe un salto de 0.4 nm entre cada zona. En el mapa existen zonas repetidas, por lo que se selecciona solo una por cada canal y se almacena en una tabla los valores de corriente aplicada en cada reflector de Bragg.

La segunda parte importante en el control de longitud de onda es el algoritmo de seguimiento de máximo. El mismo

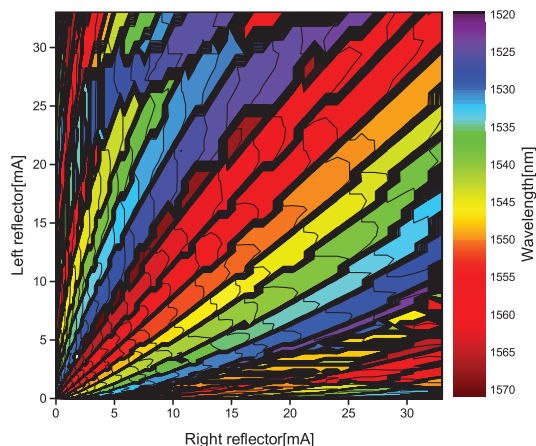


Fig. 5. Mapa de longitud de onda de emisión como resultado del barrido en corriente de los reflectores de Bragg.

permite sintonizar la longitud de onda de emisión con el canal de la banda C más próximo (definido por la tabla de ajuste de reflectores de Bragg). El funcionamiento de este algoritmo consiste en ajustar la longitud de onda de emisión del láser, mediante la aplicación de una corriente a la sección de fase, hasta lograr que la tensión del TIA del etalon sea máxima. Alcanzar el máximo del TIA del etalon implica que se ha conseguido la alineación de la longitud de onda de emisión del láser con el modo del etalon deseado y, por ende, con el canal de la banda C deseado. El algoritmo de seguimiento de máximo elegido se denomina perturbar y observar y consiste en la aplicación de una perturbación a la sección de ajuste fase y observar el efecto en la tensión del TIA del etalon. Utilizando los valores de la observación anterior se calcula la perturbación siguiente y sucesivamente se converge al valor de longitud de onda deseado donde la observación luego de la perturbación tiene un efecto considerado despreciable.

Un aspecto importante a mencionar respecto al algoritmo de seguimiento de máximo es que este no solo modifica la sección de ajuste de fase sino también realiza pequeños reajustes en los reflectores de Bragg. Estos pequeños reajustes son realizados con el propósito de mantener alineados el modo de resonancia de la cavidad y el pico de reflectancia combinada. Dicha alineación es necesaria para mantener un SMSR aceptable y evitar saltos abruptos en la longitud de onda de emisión del láser.

V. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

El microcontrolador elegido para conformar el sistema embebido es un STM32 CortexM de 32 bits con las siguientes características: frecuencia máxima de operación de 180 MHz, memoria flash de 512 kB y memoria RAM de 128 kB. El μC posee además tres convertidores A/D de 12 bits y 2.4 MPSP. Cada convertidor comparte hasta 16 canales. En este trabajo se utilizan 12 de los 16 canales y se opera a la máxima velocidad en modo continuo y con acceso directo de memoria (DMA *Direct Memory Access*).

El μC posee también dos convertidores A/D de 12 bits y 1 MPSP. En este trabajo se utilizan ambos convertidores y su

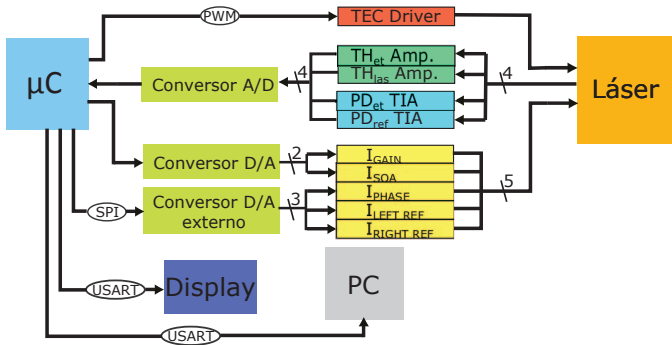


Fig. 6. Esquema del sistema embebido.

velocidad de operación es seleccionada en función del periodo de muestreo de los controladores de potencia y longitud de onda. Sin embargo, se necesitan cinco convertidores A/D para operar las cinco fuentes de corriente asociadas al láser. Por esta razón se complementa con un convertidor A/D externo de 12 bits, 3 μ s de establecimiento, cuatro canales de salida y comunicación SPI.

Se utilizan 3 de los 17 *timers* que posee el microcontrolador. El primer *timer* es usado para generar la señal PWM que utiliza el puente H asociado al TEC. El segundo es utilizado como temporizador para indicar el cumplimiento del periodo de muestreo. El tercer *timer* es utilizado como temporizador asociado a la implementación del protocolo MODBUS elegido para la comunicación con una computadora.

Se utilizan también 2 de las 4 interfaces USART (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver-Transmitter*) de 11,5 Mbit/s. La primera interfaz USART es utilizada en la comunicación del microcontrolador con un *display* externo. El mismo es usado para visualizar el estado de las variables del láser y configurar por pantalla los distintos parámetros de control. La segunda interfaz es utilizada para la comunicación del microcontrolador con una interfaz gráfica en una computadora. Esta interfaz gráfica cumple funciones similares al *display* pero con mayores posibilidades de configuración.

En la figura 6 se muestra esquema del sistema con las nuevas interfaces del microcontrolador descritas anteriormente.

A. Implementación de los Controladores de Temperatura y Potencia

Del diseño de los controladores de potencia y temperatura se obtuvieron las funciones de transferencia discreta $D_{pow}(z)$ y $D_{temp}(z)$, respectivamente. La implementación de dichas funciones en el microcontrolador se describen a continuación.

La función de transferencia de un controlador puede definirse como:

$$D(z) = \frac{U(z)}{E(z)}, \quad (1)$$

donde $U(z)$ y $E(z)$ son la salida y el error de entrada al controlador, respectivamente.

La función de transferencia también puede expresarse genéricamente en función de la variable compleja z de la siguiente manera:

$$D(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}}. \quad (2)$$

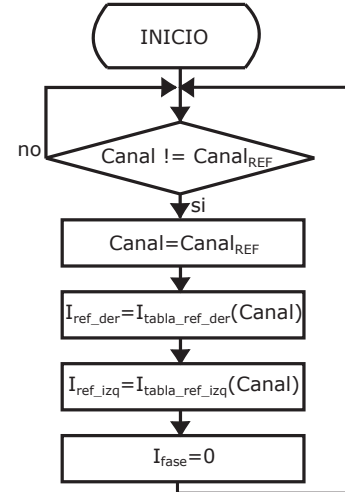


Fig. 7. Algoritmo de ajuste de reflectores ante cambio en el canal de referencia.

Combinando las ecuaciones 1 y 2, expresando el resultado en términos de ecuaciones en diferencia y despejando la salida del controlador se obtiene:

$$u(k) = b_0 e(k) + b_1 e(k-1) + \dots + b_m e(k-m) - a_1 u(k-1) - a_2 u(k-2) - \dots - a_n u(k-n), \quad (3)$$

donde $u(k)$ es una función en tiempo discreto y k es el número de muestra.

La ecuación 3 puede ser implementada directamente en el microcontrolador como una función que se ejecuta en cada intervalo de muestreo y que tiene como argumentos los valores pasados de la misma función y el error de entrada. El procedimiento descrito anteriormente se repite para ambos controladores obteniéndose las funciones $u_{pow}(k)$ y $u_{temp}(k)$, las cuales son implementadas en el microcontrolador.

B. Implementación del Controlador de Longitud de Onda

Como se describió anteriormente, el controlador de longitud de onda está formado por dos partes importantes, la tabla de canales y el algoritmo de seguimiento de máximo. La implementación de ambos se describe a continuación.

La tabla de canales tiene 2 columnas correspondientes a la corriente del reflector izquierdo y derecho. Tiene 89 filas, una por cada canal de la banda C. Dicha tabla es almacenada en el microcontrolador como dos arreglos: $I_{tabla_ref_izq}$ para el reflector izquierdo e $I_{tabla_ref_dch}$ para el derecho. Cuando ocurre un cambio en el canal deseado (referencia) se ejecuta el algoritmo mostrado en la figura 7.

La segunda parte del control de longitud de onda es el seguimiento de máximos del etalon para el ajuste fino. Como se describió anteriormente, el algoritmo seleccionado es el de perturbar y observar con algunas mejoras. En la figura 8 se muestra el algoritmo implementado en el microcontrolador.

En la figura 8, c es una constante utilizada para incrementar el tamaño de la perturbación ΔI_{fase} cuando el voltaje del TIA V_{TIA} es menor a un valor mínimo V_{MIN} .

Como punto final de la implementación del control de longitud de onda se menciona el reajuste de reflectores de Bragg

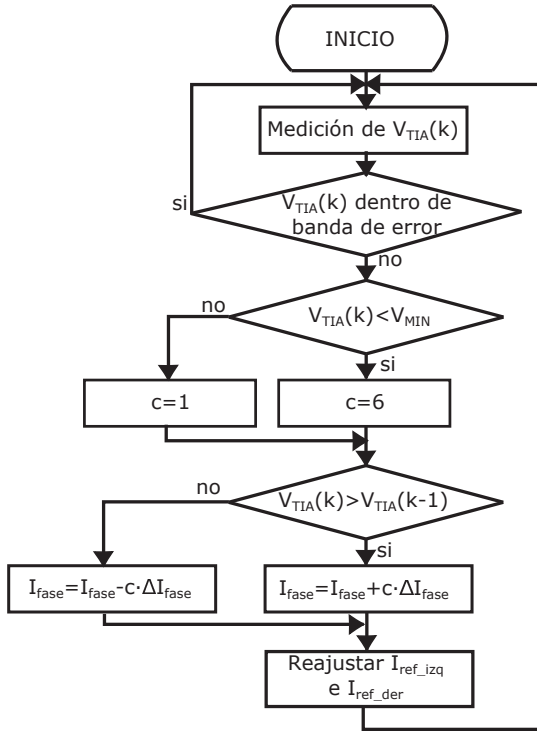


Fig. 8. Algoritmo de seguimiento de máximos del etalon.

que ocurre en el algoritmo de seguimiento de máximo (último paso del algoritmo de la figura 8). Para su implementación se utiliza la relación entre el cambio de corriente de reflectores y la longitud de onda y el cambio de corriente de fase y la longitud de onda:

$$\Delta\lambda = a\Delta I_{fase}^b, \quad (4)$$

$$\Delta\lambda = d\Delta I_{ref}^e. \quad (5)$$

Combinando las ecuaciones 4 y 5 se encuentra el reajuste necesario para cada reflector:

$$\Delta I_{ref} = \frac{a}{d}\Delta I_{fase}^{b/e}. \quad (6)$$

Cabe destacar que durante el periodo de depuración se encontró que las características de la ecuación 6 imponían de un tiempo de procesamiento excesivo por parte del microcontrolador. Dicho tiempo resultaba superior al periodo de muestreo del control de longitud de onda, razón por la cual se decidió aproximar la ecuación 6 a una función lineal.

C. Implementación de la HMI

La interfaz hombre maquina (HMI *Human Machine Interface*) permite la comunicación entre el usuario y el sistema implementado. Se implementan dos interfaces con el usuario: la primera es una *display* táctil y la segunda es una interfaz gráfica en una computadora.

El *display* utilizado es un *Nextion* modelo NX4024 el cual utiliza comunicación serie, tiene una resolución de 400x240 pixeles y un sensor táctil de tipo resistivo. La principal ventaja de este *display* es la facilidad para crear interfaces gráficas y la transmisión de comandos en forma de caracteres ASCII para la

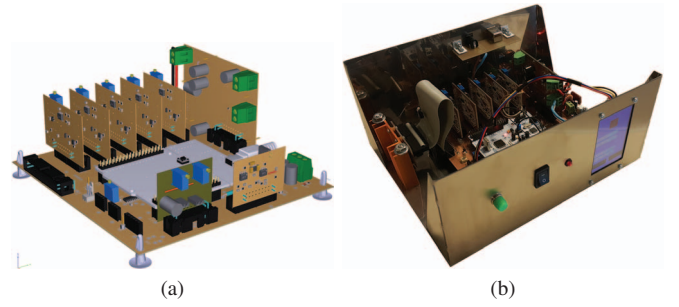


Fig. 9. Resultado del diseño e implementación. (a) Diseño de la electrónica. (b) Vista interna del hardware.

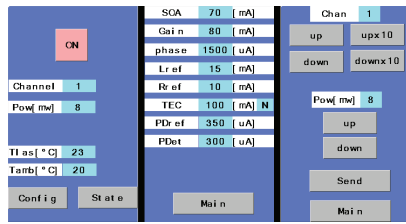
modificación de variables de la interfaz. La interfaz del *display* permite visualizar variables de control importantes tales como el canal de la banda C sintonizado, la potencia del láser y la temperatura del mismo. También es posible visualizar otras variables de estado secundarias como las corrientes aplicadas a las entradas del láser, las corrientes de los fotodiodos y el estado del TEC. En cuanto a las configuraciones posibles, estas se limitan a modificar el canal sintonizado y la potencia del láser.

La interfaz gráfica para computadora también utiliza comunicación serie. Se utiliza el protocolo MODBUS RTU, el cual fue implementado en el microcontrolador. Esta interfaz permite visualizar las mismas variables que el *display*, sin embargo, tiene un mayor número de configuraciones posibles. No solo se puede configurar las variables básicas (canal sintonizado y la potencia de salida) sino también, la temperatura de operación del láser, las corrientes individuales de manejo del láser y la corriente del TEC.

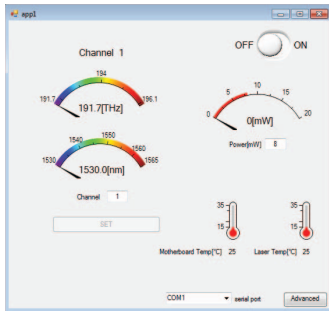
VI. RESULTADOS

El equipo resultante del diseño e implementación de todos los circuitos y software necesario para el manejo y control del láser sintonizable se muestra en la figura 9. En la figura 9a se muestra el diseño preliminar en 3D de la electrónica a implementar y en la figura 9b se muestra el hardware finalmente implementado, en donde la placa central (blanca) contiene al microcontrolador y las demás están posicionadas de forma vertical para reducir espacio de implementación.

Las interfaces para el *display* y para la computadora se muestran en la figura 10. En la figura 10a se muestra la interfaz para el *display*. Esta consta de 3 pantallas: la primera es la pantalla principal en donde se muestran las variables más relevantes (canal seleccionado, potencia del láser y temperatura de operación), la segunda permite visualizar otras variables de estado menos importantes y la última es la pantalla de configuración desde donde se puede modificar la potencia del láser y el canal sintonizado. En la figura 10b se muestra la interfaz gráfica implementada en computadora. En esta se visualizan las variables más importantes y permite modificar el canal sintonizado y la potencia del láser. Ingresando a la opción avanzada se puede visualizar variables secundarias así como el estado de la comunicación serie entre el microcontrolador y la PC.



(a)



(b)

Fig. 10. Interfaces HMI. (a) Interfaz en el display. (b) Interfaz en la computadora.

A. Controladores de Potencia y Temperatura

Para evaluar el desempeño del control de potencia y temperatura se obtiene la respuesta a una entrada tipo escalón en la referencia y se evalúan los parámetros de tiempo de establecimiento y sobreimpulso. En la figura 11 se muestra la respuesta al escalón de los controladores de temperatura y potencia.

En la figura 11a se muestra la respuesta al escalón del controlador de temperatura. La temperatura no es un parámetro que se vaya a modificar constantemente, por lo que el requerimiento de tiempo de establecimiento es considerablemente mayor a los establecidos para los controladores de potencia y longitud de onda. Los requerimientos establecidos en el diseño fueron: sobreimpulso menor al 20% y tiempo de establecimiento menor a 10 s. Los valores medidos de tiempo de establecimiento son de 8 s en la simulación y 6,98 s en el sistema implementado. En el caso del sobreimpulso los valores medidos son de 5,26% en la simulación y 1,89% en el sistema implementado.

En el caso del controlador de potencia (figura 11b), los requerimientos establecidos en el diseño fueron: sobreimpulso menor al 10% y tiempo de establecimiento menor a 1 ms. Los valores medidos de tiempo de establecimiento resultaron de 0,21ms en la simulación y 0,2ms en el sistema implementado. El sobreimpulso fue cero tanto en la simulación como en la medición.

B. Controlador de Longitud de Onda

En el caso del controlador de longitud de onda, la evaluación se enfoca en el tiempo de conmutación entre canales de la banda C y la exactitud de la longitud de onda de emisión. En la figura 12 se muestra el resultado de la evaluación.

En la figura 12a muestra la respuesta temporal de la tensión del TIA del etalon cuando ocurre un cambio en el

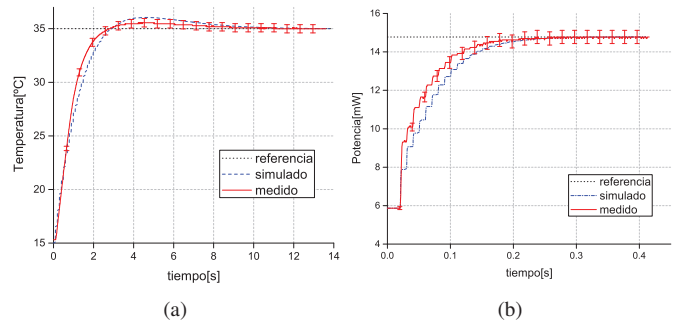


Fig. 11. Respuesta a una entrada tipo escalón. (a) Respuesta del controlador de temperatura. (b) Respuesta del controlador de potencia.

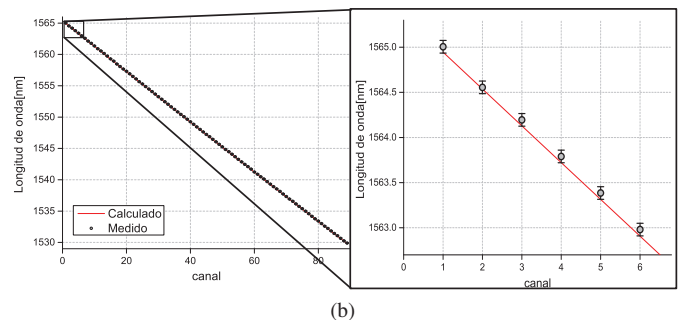
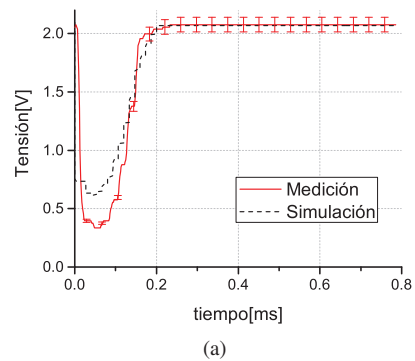


Fig. 12. Evaluación del controlador de longitud de onda. (a) Respuesta de la tensión del TIA del etalon ante un cambio de canal. (b) Barrido de canales.

canal seleccionado. Cuando la tensión del TIA del etalon es máxima se garantiza que la longitud de onda de emisión concuerda con la longitud de onda del canal deseado. La respuesta temporal muestra que la tensión empieza en un valor máximo, correspondiente al anterior canal seleccionado, cae de forma abrupta cuando ocurre el cambio de canal y retorna al máximo gracias al algoritmo de seguimiento de máximos. El requerimiento de tiempo de establecimiento definido en el diseño fue de 1 ms. Los valores medidos en la respuesta temporal resultaron de 0,2ms tanto en la simulación como en el sistema implementado.

Para verificar que los 89 canales de la banda C se sintonizan correctamente se realiza un barrido de canales. En la figura 12b se muestra la longitud de onda en función del canal seleccionado. Se observa que la exactitud del controlador es suficiente para mantener la longitud de onda dentro del margen de error del instrumento utilizado.

VII. CONCLUSIONES

En este trabajo se describió el proceso de diseño, implementación y evaluación de una plataforma de control para un láser sintonizable tipo Y-branch con aplicaciones en comunicaciones ópticas WDM.

Se analizó el funcionamiento y componentes del láser sintonizable, lo que permitió definir los circuitos necesarios para su manejo.

Se diseñaron los controladores de temperatura, potencia y longitud de onda considerando los requerimientos de tiempo de respuesta establecidos. Dichos controladores fueron posteriormente implementados en el microcontrolador elegido.

Se implementaron dos interfaces de comunicación con el microcontrolador. Dichas interfaces permiten la visualización y configuración de parámetros importantes del láser sintonizable. Las posibilidades de configuración con la plataforma de control permiten modificar desde la longitud de onda hasta parámetros particulares como las corrientes individuales del láser. Estas prestaciones exceden las ofrecidas por equipos comerciales y extienden su uso a laboratorios de telecomunicaciones.

Se evaluó el desempeño de los controladores de potencia, temperatura y longitud de onda. En los tres casos se cumplieron con los requerimientos de diseño, siendo el más importante el tiempo de establecimiento. Se alcanzó un tiempo de establecimiento de 0,2 ms en el caso de los controles de potencia y longitud de onda, dicho valor es 5 veces menor al tiempo establecido en los requerimientos y menor al tiempo de equipos comerciales (alrededor de 1 ms).

Finalmente, se verificó la correcta selección de los 89 canales de la banda C mediante un barrido de canales. El error en el ajuste de longitud de onda se encontró siempre dentro del margen que permitió alcanzar el instrumento de medición.

AGRADECIMIENTOS

Los autores dan las gracias a FINISAR por una financiación parcial en la adquisición del láser sintonizable y al Centro de Investigaciones Ópticas (CIOP) por la colaboración en el diseño y la fabricación de el gabinete para el equipo desarrollado.

REFERENCIAS

- [1] G. L. Su and M. C. Wu, "Widely tunable semiconductor lasers with three interferometric arms," *Optic Express*, vol. 25, 2017.
- [2] L. Han, S. Liang, J. Xu, and et. al, "Electroabsorption-modulated widely tunable dbr laser transmitter for wdm-pons," in *14th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, 2015.
- [3] D. C. McIntosh, R. Bikky, H. Zhang, and et. al, "Continuously tunable laser based on multiple-section dbr laser technology for 1.25 gbps wdm-pon applications," in *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2015.
- [4] L. Han, S. Liang, J. Xu, and et. al, "Dbr laser with over 20-nm wavelength tuning range," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 25, 2016.
- [5] F. Liu, Y. Lin, Y. Liu, and et. al, "Investigation into the phase noise of modulated grating y-branch lasers," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 23, 2017.
- [6] Y. Matsui, J. O. Westrom, Y. Liu, and et. al, "Narrow linewidth tunable semiconductor laser," in *Compound Semiconductor Week (CSW) Includes 28th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM) and 43rd International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS)*, 2016.
- [7] C. Raab, R. Neuhaus, S. Falke, and et. al, "53 years tunable semiconductor laser - past, present and future," in *2017 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2017.
- [8] H. Heininger, "Interrogation of optical fiber sensors for civil engineering applications using widely tunable laser," PhD Thesis, BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Purkynova, Czech Republic, 2013.
- [9] H. Heininger, U. Hannemann, and F. Mohr, "Fpga based experimentation system for widely tunable mg-y branch semiconductor laser," *Electroreview*, vol. 3, 06 2012.
- [10] S. Dhoore, A. Köninger, R. Meyer, G. Roelkens, and G. Morthier, "Electronically tunable dfb laser on silicon," in *IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC)*, 2018.
- [11] S. Dhoore, G. Roelkens, and G. Morthier, "Fast wavelength-tunable lasers on silicon," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 25, pp. 1–8, 11 2019.
- [12] H. Krishnamurthy, K. M. Sivalingam, and M. Mishra, "Restoration mechanisms for handling channel and link failures in optical WDM networks: tunable laser-based switch architectures and performance analysis," *Computer Communications*, vol. 28, no. 9, pp. 987–999, Jun. 2005.
- [13] "C-band tunable laser with wavelength sweeping," <https://www.oequest.com/getDatasheet/id/10692-10692.pdf>, ultimo acceso a la pagina: 08-04-2019.
- [14] *Controlling the S7500 CW Tunable Laser*, FINISAR, 2011.
- [15] A. K. Dutta, N. K. Dutta, and M. Fujiwara, *WDM Technologies: Active Optical Components*. California, USA: Academic Press, Inc., 2002, no. 0-12-225261-6.
- [16] *CW Tunable Laser Butterfly Package S7500*, FINISAR, 2015.
- [17] M. C. Bustillos Barcaya, F. G. Rinalde, L. A. Bulus Rossini, A. N., and P. A. Costanzo Caso, "C-band tunable laser modeling and simulation," in *Semiconductor and Integrated Opto-Electronics (SIOE) Conference*, 2019.
- [18] K. Ogata, *Discrete-Time Control Systems*, 2nd ed. Englewood Cliffs, New Jersey, USA: Prentice-Hall International, Inc., 1995, no. 0-13-328642-8.
- [19] G. F. Franklin, J. D. Powell, and M. L. Workman, *Digital Control of Dynamic Systems*. Addison Wesley Longman, Inc., no. 0-201-33153-5.