

# Multiplexed Optical Link for Gating Pulse Transmission in Multilevel Converters

Pablo Meza, Hector Young, *Member, IEEE*, Ramiro Donoso and Marcelo Faundez

**Abstract**—Multilevel power converters play an increasingly important role in energy transmission, high-power electric drives and renewable energy systems. The transmission of control signals for the semiconductor switches in power converters is critical for the operation of the system, and therefore optical communications links are employed to minimize electromagnetic interference. However, conventional parallel communication topologies have the drawback of requiring a high number of independent optical fibers and transmitter-receiver pairs as the number of transmitted signals increase, which limits the flexibility and scalability of the link. In this paper we propose the design of an optical link with wavelength division multiplexing (WDM) based on a digital micromirror device (DMD) and a linear detector array as receiver. The main advantages of the proposed system are the high flexibility and scalability of the communications link. Simulation results are obtained from a mathematical modeling of the transmitter, the link and the receiver. The communication is established by means of an asynchronous protocol in order to ensure the correct decoding of the transmitted gating signals. A feasibility analysis of the optical link is carried out in terms of the waveform quality of the multilevel inverter output voltage, measured by its total harmonic distortion (THD). The simulation results obtained in MATLAB/Simulink environment validate the methodology to enable a future implementation of the proposed optical communication link.

**Index Terms**—Wavelength division multiplexing, Micromirrors, Pulse width modulation converters, Asynchronous communication.

## I. INTRODUCCIÓN

Topologías de convertidores de potencia multinivel (CPM) con un elevado número de interruptores semiconductores, tales como puente H en cascada (CHB) [1] ó convertidor modular multinivel (MMC) [2], [3] son utilizados en accionamientos eléctricos de media tensión, sistemas de transmisión de alto voltaje en corriente directa (CD) y sistemas de energías renovables conectados a la red [4]. Comúnmente, los esquemas de control y etapas de modulación requerida para operar los CPM se implementan a cierta distancia de los circuitos de disparo y los interruptores semiconductores. La transmisión de estas señales a través de cables eléctricos puede verse afectada por interferencia electromagnética, especialmente en ambientes donde existe conmutación de alta potencia y la distancia entre el procesador de señales digitales (DSP) y los circuitos

excitadores de compuerta es del orden de algunos metros. Por esta razón, la transmisión de los pulsos de disparo para convertidores de alta potencia es usualmente implementada por medio de enlaces de fibra óptica [5].

La comunicación entre el DSP maestro y los módulos de potencia en el sistema convertidor de potencia se puede implementar principalmente en dos formas, como se representa en la Fig. 1, donde cada módulo está compuesto por un interruptor de potencia y su circuito excitador de compuerta. La configuración paralela (Fig. 1a) consiste en transmitir cada señal de disparo por medio de una fibra óptica independiente. Las ventajas de esta topología son su simplicidad con respecto a la codificación de las señales, y el hecho de que no se introducen retardos adicionales en la comunicación entre el DSP y los módulos de potencia. Sin embargo, la congestión de cables se incrementa rápidamente a medida que aumenta el número de señales de control que se requiere transmitir en paralelo, sufriendo de pobre escalabilidad y flexibilidad.

Por otro lado, la topología en serie (Fig.1b) permite reducir la congestión al implementar un único enlace físico de comunicación entre el controlador digital y los módulos en el convertidor de potencia. Sin embargo, en aplicaciones con numerosos módulos de potencia es necesario mantener una alta tasa de transmisión, complicando así la sincronización de las señales debido a errores inducidos por retardos en la conversión optoelectrónica [6]. Esto reduce la fiabilidad de las señales transmitidas y hace necesario implementar mecanismos adicionales para garantizar la adecuada sincronización entre módulos [7].

Los problemas identificados con los enlaces tradicionales de fibra óptica han motivado el desarrollo de esquemas alternativos para la transmisión óptica de los pulsos de disparo en los los sistemas convertidores con un gran número de módulos de potencia. Broadmeadow y Walker [8] proponen una modificación al protocolo industrial de red local interconectada (LIN), implementando el bus de datos por medio de un enlace óptico como remplazo de los cables de cobre empleados en el protocolo original. El enlace fue construido siguiendo el estándar Asociación de Datos Infra-rojos (IrDA) utilizando un canal en el espacio libre, resultando en una aplicación de bajo costo que cumple con las condiciones de aislamiento eléctrico y de inmunidad a la interferencia electromagnética. Sin embargo, el enlace IrDA depende de una línea de visión directa para su correcta operación, lo que limita la escalabilidad del sistema. Más aún, el sistema propuesto en [8] opera en modo de difusión ancha (*broadcast*), transmitiendo la misma señal a todos los módulos de potencia. Esto implica que la sincronización y las etapas de generación de

Pablo Meza is with Department of Electrical Engineering, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile, email:pablo.meza@ufrontera.cl.

Hector Young is with Department of Electrical Engineering, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile, email:hector.young@ufrontera.cl.

Ramiro Donoso is with Department of Electrical Engineering, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile, email:ramiro.donoso@ufrontera.cl.

Marcelo Faundez is with Department of Electrical Engineering, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile, email:m.faundezlobos@gmail.com.

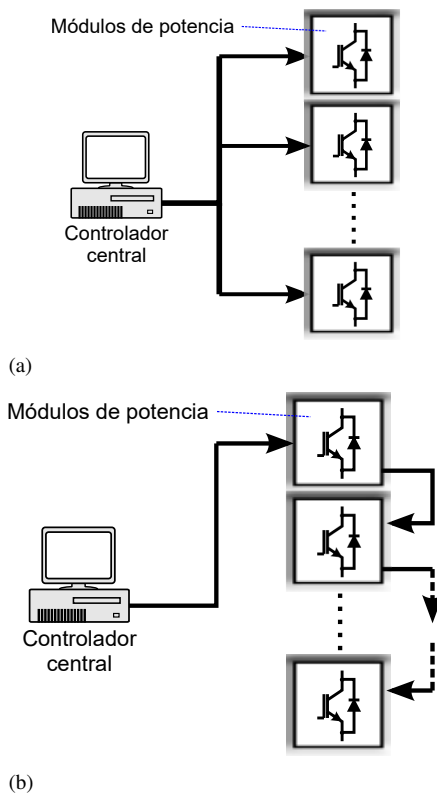


Fig. 1. Topologías de red para transmisión de pulsos de disparo a convertidores de potencia: (a) paralelo; (b) serie.

pulsos de disparo necesitan ser implementadas en cada módulo según un esquema de modulación predefinido, reduciendo la flexibilidad en el diseño de control y en los algoritmos de modulación. Arquitecturas en serie utilizando enlaces de fibra óptica han sido propuestos como la solución a convertidores con un elevado número de módulos de potencia [3], [9]. Sin embargo, estas alternativas requieren seguridad en la sincronización puesto que es un aspecto crítico para la correcta operación del convertidor [10]. Cabe resaltar que, en una topología serial, cada módulo del convertidor de potencia debe integrar su propio elemento de comunicación, incrementando la complejidad y costos del hardware.

Por otro lado, Pritz *et al.* [11] proponen un esquema basado en modulación de intensidad con 5 niveles y detección mediante conversores análogo-digitales. Sin embargo, el proceso de recepción depende de la capacidad de distinguir con precisión los diferentes niveles de intensidad de la codificación, aumentando la complejidad del receptor. Otro esquema de modulación de amplitud fue propuesto por Heining *et al.* [12] con el objetivo de transmitir simultáneamente datos y potencia para circuitos de disparo. Una limitación del sistema propuesto en [12] es que su escalabilidad para transmitir un mayor número de señales en paralelo en convertidores de potencia con un mayor número de interruptores no fue considerada.

Considerando la discusión anterior, idealmente la transmisión de múltiples señales de disparo debiera hacerse simultáneamente y sin interferencia alguna entre ellas, mediante un único canal físico. Con esto, se puede evitar la

congestión de conexiones entre el DSP y el convertidor de potencia, eliminando también el retardo y los requerimientos de sincronización impuestos por la topología de comunicación serial. Todos estos objetivos pueden ser alcanzados mediante un enlace de comunicación basado en multiplexación óptica.

La multiplexación permite transmitir múltiples señales independientes a través de un único canal de comunicación. Los métodos de multiplexación por división de tiempo (TDM), multiplexación por división de código (CDM) y multiplexación por división de polarización (PDM) son ejemplos bien conocidos de esta tecnología aplicada a comunicaciones ópticas [13]. Sin embargo, las aplicaciones comerciales se han enfocado principalmente en multiplexación por división de longitud de onda (WDM) debido a que el tratamiento de la señal ocurre en el dominio de la luz, sin necesitar etapas de conversión adicionales [14].

Este trabajo propone un diseño de enlace de comunicación óptica con WDM para convertidores electrónicos de potencia con un gran número de señales de control de disparo, tales como los CPM. El enlace WDM está construido con base en un Dispositivo Digital de Micro-Espejos (DMD), que normalmente se emplea como un enrutador óptico de señales. El uso de arreglos lineales de fotodetectores, acoplado con el sistema WDM-DMD, permite un diseño escalable y flexible. La flexibilidad radica en la capacidad para configurar las propiedades del canal mediante sólo una tarjeta de control conectada al arreglo de sensores lineales, evitando así la necesidad de configurar múltiples módulos de comunicación por separado. Lo anterior permite la transmisión de forma simultánea de un gran número de señales de control, las cuales son enviadas mediante la utilización del protocolo de comunicación asíncrono [15], permitiendo así sincronizar la emisión y recepción del mensaje sin el uso de una línea de referencia. Estas características contrastan con soluciones donde cada módulo de potencia posee su propio controlador de comunicación con parámetros configurados por hardware que manejan tareas de modulación [8]. Cabe resaltar que la escalabilidad es posible dado que el número de canales es configurable digitalmente sin la necesidad de modificar físicamente el enlace establecido, es decir, sin cambiar el número de pares transmisor/receptor.

## II. TECNOLOGÍAS INVOLUCRADAS

### A. Convertidor Multinivel

El convertidor multinivel CHB es una topología ampliamente utilizada en la industria para aplicaciones tales como accionamientos de alta potencia o sistemas de alto voltaje en CD, debido a su estructura modular y alta calidad de potencia [16]. En la Fig. 2a se muestra la estructura de una celda individual, compuesta por cuatro interruptores de potencia. Cada celda es capaz de entregar tres niveles de voltaje en su salida  $v_{a,k}$ ; sin embargo, en aplicaciones de alta potencia la conexión en cascada de múltiples celdas permite obtener un mayor número de niveles. La estructura de un convertidor CHB trifásico con  $N$  celdas en cascada por fase se presenta en la Fig. 2b, donde en cada fase el voltaje  $v_{a0}$  tiene un número de niveles igual a  $2N + 1$ .

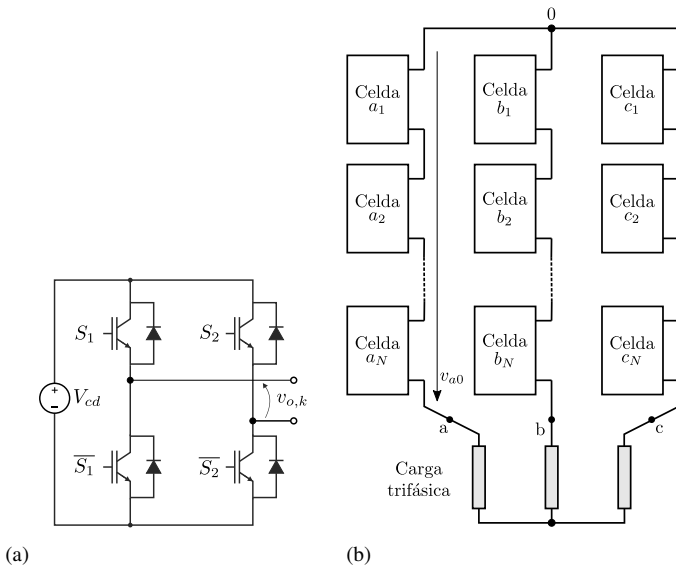


Fig. 2. (a) Celda puente H individual; (b) Esquema de un inversor multinivel trifásico puente H en cascada.

Desde el punto de vista de las señales de control, cada celda en el CHB requiere dos señales digitales independientes:  $S_1$  y  $S_2$ , según el esquema de la Fig. 2a. En consecuencia, el número de señales independientes necesarias para controlar un convertidor multinivel trifásico con  $N$  celdas por fase es  $6N$ .

Para modelar matemáticamente el convertidor CHB, se asume que las señales de control pueden tomar valores discretos  $\{1, 0\}$ , con lo cual el voltaje de salida de cada celda se calcula como:

$$v_{a,k} = V_{cd}(S_1 - S_2). \quad (1)$$

Asimismo, el voltaje de salida de una fase completa del convertidor está dado por la suma de los voltajes individuales de cada una de las celdas en cascada:

$$v_{a0} = \sum_{k=0}^N v_{a,k}. \quad (2)$$

Para evaluar la calidad de la forma de onda de salida de un convertidor se emplea como indicador la distorsión armónica total (THD; por sus siglas en inglés), que se define como [17]:

$$THD = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{1,rms}^2}}{V_{1,rms}}. \quad (3)$$

Donde  $V_{rms}$  es el valor efectivo del voltaje, y  $V_{1,rms}$  es el valor efectivo de su componente a frecuencia fundamental.

### B. Arreglo de Micro-Espejos

En general, los sistemas comerciales de WDM son diseñados considerando el número de emisores de luz, sintonizados a diferentes longitudes de onda, generando pulsos luminosos los cuales son mezclados y enviados a través de un enlace de comunicación. Nuevos esquemas ópticos basados en dispositivos como diodos láser de banda angosta, fibra dopada con tierras raras para realizar amplificación óptica en un rango

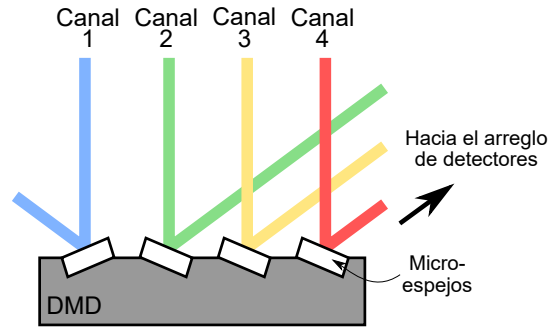


Fig. 3. Funcionamiento básico de un DMD como conmutador óptico.

amplio de bandas, y ruteadores ópticos han sido aplicados para incrementar la velocidad en la transmisión y el número de canales en WDM, manteniendo un diseño compacto [18]–[20].

En particular, los DMD han experimentado un desarrollo importante como ruteadores ópticos, logrando mayores velocidades que sistemas tradicionales puesto que no involucra la conversión de la señal óptica a electrónica [21]. Los DMDs son dispositivos opto-mecánicos compuestos por un arreglo de espejos extremadamente pequeños que pueden ser controlados de manera individual por medio de señales digitales. Los espejos pueden alternar su orientación entre dos ángulos distintos por medio de la atracción electrostática entre un par de electrodos, según se representa esquemáticamente en la Fig. 3. En el sistema propuesto, el DMD realiza la labor de conmutador de la fuente de luz según las señales binarias que son recibidas desde el controlador central o DSP que comandan la operación de los interruptores de potencia perteneciente al convertidor.

**B1. Esquema de Multiplexación Basado en DMD:** La escalabilidad de los sistemas WDM convencionales presenta un desafío debido a que se incrementa el número de módulos transmisores y receptores a medida que el número de canales aumenta [22], aún cuando se utilice una sola fibra óptica como enlace físico en la comunicación. En este sentido, es necesario modificar el diseño de la transmisión óptica para reducir la cantidad de transmisores sin reducir el número de señales generadas a diferentes longitudes de onda. Bajo esta condición, es posible realizar una descomposición espectral a un transmisor óptico de amplio espectro para luego dirigir las múltiples longitudes de onda a un DMD. Por lo tanto, la conmutación de los pulsos ópticos es llevada a cabo de manera independiente mientras el transmisor envía una señal óptica constante [23]. Actualmente, la frecuencia de conmutación binaria de un DMD puede alcanzar 32 kHz, la cual no es suficiente para establecer un enlace de comunicación WDM de alta velocidad. Sin embargo, las señales de conmutaciones para convertidores multinivel de media y alta potencia son cercanas a 1000 Hz [24], lo cual está en el rango de operación de un DMD.

### C. Arreglo Lineal de Detectores

El proceso de foto-detección, asociado a los enlaces de datos de alta velocidad óptica, considera el mismo número de módulos independientes que el de canales de comunicación, donde cada módulo es diseñado para una rápida conversión

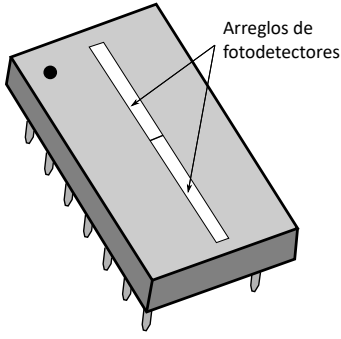


Fig. 4. Arreglo de detectores lineales TSL1402R en formato empaquetado de doble hilera, 14 pines.

fotón-electrón [25]. Considerando que las señales de disparo para semiconductores en CPMs son por lo general menores a 1 kHz [24], es posible trabajar con sistemas de foto-detección con más baja velocidad de conversión. En esta categoría se encuentra el arreglo lineal de detectores (LDA), que corresponde a un conjunto de detectores integrados en un solo dispositivo, con un área individual sensible a la foto-detección  $A_{pd}$  y una amplificación de la señal análoga compartida. En general, los LDAs transfieren las señales detectadas de manera secuencial, lo que involucra un tiempo adicional para la conversión serie-paralelo de los datos. A pesar de esto, el uso de este tipo de dispositivos permite configurar decenas de canales en solo algunos centímetros, como se puede apreciar en la Fig. 4 donde se representa la estructura de un arreglo lineal de detectores integrado en formato empaquetado de doble hilera con 14 pines. Cabe resaltar que los LDAs también permiten agrupar detectores a nivel de software con el objetivo de potenciar la relación señal-ruido (SNR), sacrificando la resolución espectral de los canales que se transmiten [26].

Se concluye que un diseño óptico basado en la operación de un DMD como elemento conmutador puede ser utilizado como parte de un sistema generación de pulsos de luz a diferentes longitudes de onda. El esquema, que incluye un LDA en el extremo receptor, permite la implementación de un enlace óptico configurable en términos del número de canales que se necesitan para enviar la señales de control al convertidor multinivel. El enlace WDM propuesto está sujeto a una frecuencia de conmutación y restricciones de tiempos de conversión que no serían aplicables para la transmisión de datos a alta velocidad. No obstante, es una alternativa prometedora para la transmisión de los pulsos de disparo en convertidores multinivel debido a la simpleza del enlace y la capacidad de configurar el número de canales para la transmisión de los pulsos.

### III. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO

El enlace de comunicación WDM para señales de disparo en convertidores multinivel se encuentra descrito en la Fig. 5. El sistema puede ser subdividido en tres sub-sistemas, incluyendo el modelado matemático de cada una de estas etapas para el estudio de factibilidad técnica por medio de simulaciones:

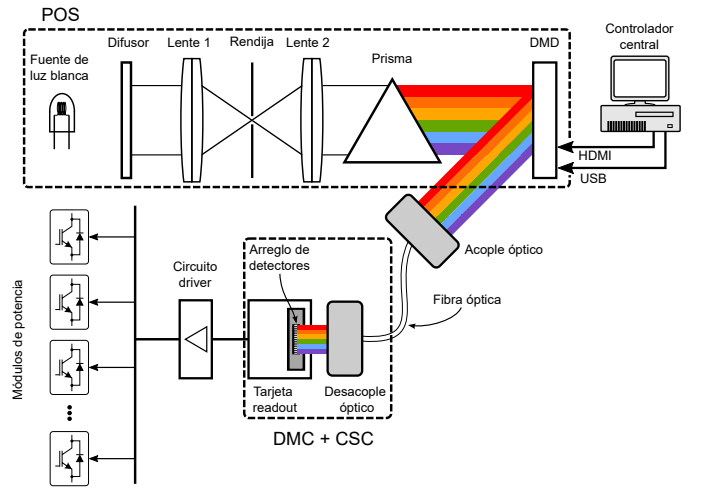


Fig. 5. Descripción por etapas del sistema propuesto.

#### A. Procesador óptico de señales (POS)

Este subsistema está compuesto por una fuente de luz y los elementos ópticos requeridos para generar pulsos de luz a diferente longitud de onda, conmutando según las señales de control digital provenientes de un DSP. La fuente de luz blanca posee una irradiancia espectral  $F(\lambda)$ , con  $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ . Un prisma, el cual está diseñado para no alterar el espectro de la luz incidente en el rango de trabajo, puede ser utilizado para descomponer la luz blanca y así tener acceso a las distintas longitudes de onda que la componen. Este esquema de descomposición se basa en el tradicional monocromador en donde el haz de luz colimado incide sobre un prisma, direccionando con diferentes ángulos las longitudes de onda producto de la dependencia que el índice de refracción posee. De esta forma, cada longitud de onda que impacta el arreglo lineal, luego de ser re-direccionadas por medio del DMD, queda separada espacialmente con respecto a otra, permitiendo que detectores del mismo material semiconductor puedan capturarlas de manera diferenciada. En este sentido, se asume que el DMD opera como un conjunto de espejos que varían su orientación en  $\pm 12$  grados con respecto al eje del sistema óptico [27]. Esto último determina los dos posibles estados que son observados en la etapa de detección. Cabe resaltar que la fibra óptica que enlaza con la siguiente etapa no introduce atenuación en la señal, ya que su distancia es considerada del orden de los metros, por lo cual no es incluida como un factor determinante en el modelado.

#### B. Detección multi-canal (DMC)

Corresponde al subsistema encargado de capturar luz procesada por el DMD por medio del LDA en el extremo receptor del enlace. Este sistema incluye la tarjeta procesadora capaz de enviar las señales de activación y de configuración al LDA. Desde el punto de vista de la detección de la señal óptica, la foto-corriente  $I_i$  generada en el  $i$ -ésimo detector del arreglo a una longitud de onda  $\lambda_i$  puede ser calculada por medio de la siguiente expresión:

$$I_i = R(\lambda_i) \cdot P(\lambda_i) + \eta_i. \quad (4)$$

Donde  $R(\lambda_i)$  corresponde a la responsividad del detector observada en la longitud de onda  $\lambda_i$  y  $\eta_i \sim (\mu, \sigma)$  representa la acumulación de las diferentes fuentes de ruido presentes en el  $i$ -ésimo detector, la cual puede ser definida como ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN) [28]. El término  $P(\lambda_i)$  representa la potencia óptica que impacta al detector y puede ser aproximada a partir de la irradiancia proveniente de la fuente de iluminación multiplicada por el rango espectral  $\Delta\lambda_i$  que llega a cada detector y por el área de cada foto-detector  $P(\lambda_i) \approx F(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda_i \cdot A_{pd}$  [29]. La ecuación (4) queda rescrita para una longitud de onda central de cada canal  $\lambda_i$  como

$$I_i \approx R(\lambda_i) \cdot F(\lambda_i) \cdot A_{pd} \cdot \Delta\lambda_i + \eta_i. \quad (5)$$

Se puede apreciar como varía la foto-corriente  $I_i$  con respecto a la longitud de onda. En este aspecto, es requisito calibrar la respuesta de los detectores, con respecto a una fuente de luz conocida, de manera de obtener un umbral de decisión binario para cada canal durante la conversión análoga-digital. Adicionalmente, los parámetros del LDA, tales como el tiempo de integración y la definición del número de canales, deben ser ajustados para maximizar la razón señal a ruido durante el proceso de conversión de la luz a una señal eléctrica.

### C. Conversión de señales de control (CSC)

El propósito del tercer subsistema es establecer la comunicación entre el LDA y los controladores de disparo en el convertidor multinivel. Esto requiere convertir las señales recibidas desde el formato serial a paralelo, y reconstruir la estructura binaria original de los pulsos de disparo. Debido a su arquitectura de procesamiento paralelo, el uso de una Matriz de Puertas Programable por Campo (FPGA) es recomendado para un procesamiento más rápido de las señales digitales. Las funciones principales de la tarjeta son:

- Configuración de parámetros tales como tiempo de integración y agrupación de pixeles en el LDA integrado.
- Conversión analógica a digital.
- Ecuilibración de la ganancia de los canales ópticos.
- Conversión serial a paralela de las señales recibidas.
- Decodificación asíncrona de los datos recibidos.

### D. Canal de Comunicación

Existen diferentes modelos matemáticos que pueden describir como los datos se ven afectados en un enlace de comunicación, tales como el modelo de canal de borradura, tipo Z, Markovianos, canal binario simétrico (BSC), por nombrar algunos [30]. En particular, el modelo BSC utiliza las probabilidades para describir el comportamiento de datos binarios transmitidos a través de un enlace bajo condiciones de ruido que pueden cambiar, con una misma probabilidad  $p$ , el estado del dato. La probabilidad condicional que modela el comportamiento de este canal corresponde a

$$p(Y|X) = \begin{cases} 1 - p, & \text{si } y = x \\ p, & \text{otro caso.} \end{cases} \quad (6)$$

Donde  $X$  e  $Y$  representan a las variables aleatorias de entrada y salida, respectivamente. En este sentido, el modelo BSC se ajusta con el esquema de transmisión de datos propuesto en

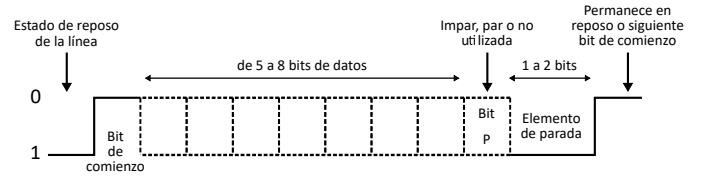


Fig. 6. Formato del protocolo asíncrono.

este trabajo ya que los dos posibles estados de conmutación, requeridos para la operación del interruptor de potencia, puede ser codificados como 0 y 1. Adicionalmente, la probabilidad de error en el canal BSC es consistente con el modelado del ruido AWGN, presente en (5) ya que la mayor fuente de ruido del sistema está a nivel del receptor. De acuerdo con esto, es importante destacar que el valor  $p$  coincide con la tasa de error de bit (BER) =  $P_e$  para este tipo de canal.

### E. Protocolo de Comunicación Asíncrono

El problema de la sincronización en los sistemas de comunicación surge cuando, al transmitir un mensaje por un canal, el receptor obtiene un valor distinto al transmitido por el emisor. Esto se produce ya que, por muy similares que sean ambos nodos de comunicación, los relojes que marcan el tiempo de lectura y escritura en el canal de comunicación son diferentes. Esto quiere decir que la duración del bit en cada nodo es distinta, lo cual ocasiona una pérdida de sincronismo que se acumula a lo largo del tiempo, produciendo finalmente un error de lectura luego de una determinada cantidad de ciclos de reloj. Una aproximación para resolver el problema de la sincronización en los sistemas de comunicación, consiste en resincronizar periódicamente los relojes de ambos nodos, de forma tal de evitar la acumulación prolongada de la pérdida del sincronismo. Una de las metodologías ampliamente conocidas en la actualidad para resolver este problema, es la utilización del protocolo de comunicación asíncrono [15]. Como se puede observar en la Fig. 6, el protocolo asíncrono permite la sincronización de los relojes de ambos nodos antes de la transmisión del mensaje. El bit de comienzo (bit 0) marca el inicio del frame de datos, posteriormente se transmite el dato, el cual suele ser entre 5 a 8 bits, para posteriormente transmitir un bit opcional de paridad utilizado para la detección de errores; por último el protocolo finaliza la transmisión del frame estableciendo 1 a 2 bits de paradas, los cuales tienen la finalidad de diferenciar un frame de datos del siguiente.

## IV. ANÁLISIS POR SIMULACIÓN

En esta sección se evalúa la factibilidad técnica del sistema propuesto utilizando los modelos mencionados en la sección III junto con herramientas de simulación. En este sentido, primero se analizaron los subsistemas POS y DMC, tomando en consideración una fuente de luz halógena de quartz tungsteno (QTH) modelo 6319 con una irradiancia espectral que cubre el rango del visible e infrarrojo cercano. Para la recepción de datos se seleccionó el arreglo lineal modelo TSL1402R, el cual está compuesto por 256 detectores y con un rango de operación espectral entre 300 y 1100 nm.



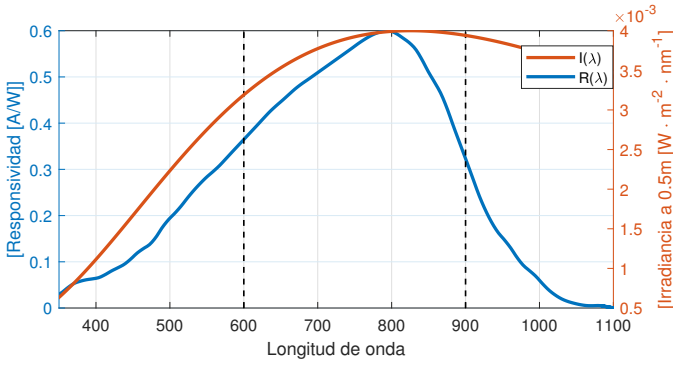


Fig. 7. Curvas de responsividad del arreglo lineal TSL1402R (azul) y de irradiancia espectral de lampara QTH 6319 (naranja).

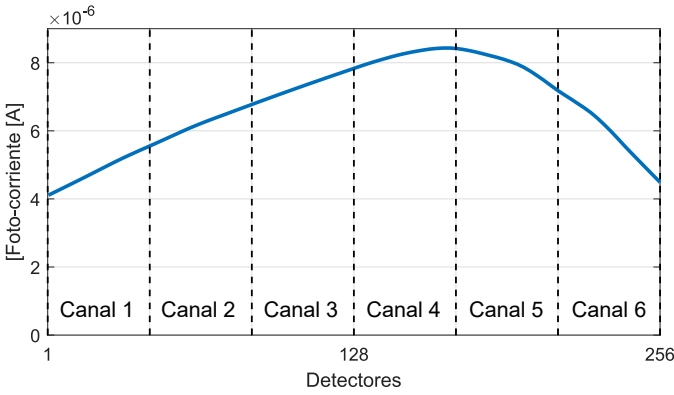


Fig. 8. Foto-corriente observada en los detectores del arreglo lineal.

En la Fig. 7 se presentan las curvas de responsividad, a un tiempo de integración  $t_{int} = 5$  ms, y de irradiancia correspondientes. Como se puede apreciar, la conversión fotón-electrón se ve beneficiada en el rango espectral de los 600 a 900 nm, lo que asegura un mejor SNR y determina un  $\Delta\lambda_i \approx 12$  nm. El uso de este rango espectral sólo depende del ajuste óptico que se realiza luego de que la señal lumínica pasa por el DMD. En la Fig. 8 se presenta la fotocorriente que es observada por el dispositivo para las distintas longitudes de onda, dividiendo el espectro en 6 canales a modo de ejemplo. Se puede apreciar que la corriente generada por cada detector depende de la longitud de onda y, por lo tanto, el valor umbral requerido para determinar si la señal es un bit 1 ó 0 también dependerá de la misma.

Cabe resaltar que el umbral de decisión para cada detector es calculado considerando la mitad de la fotocorriente generada cuando el arreglo es expuesto a iluminación de manera constante. Para estas pruebas no se consideró la redundancia de entradas por canal para analizar como se comportaba el sistema sin incluir códigos correctores de errores. Recordando (4), el ruido  $\eta_i$  es calculado con una amplitud proporcional a la corriente máxima observada por cada detector, en donde las simulaciones arrojaron un BER =  $10^{-2}$  (BER =  $10^{-9}$ ) cuando se utiliza un 11 % (6 %) de amplitud.

Finalmente, se acopla el protocolo de comunicación asíncrona a la simulación de la transmisión y recepción de datos. Particularmente, la configuración utilizada en la solución propuesta consiste en la utilización del bit de comienzo, 8 bits

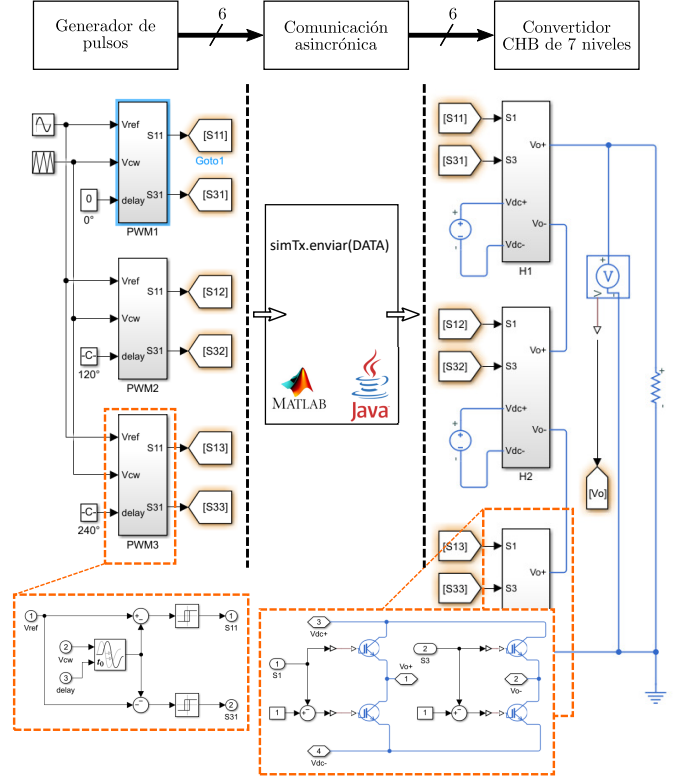


Fig. 9. Diagrama de bloques del sistema implementado por simulación.

TABLA I  
PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN.

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Frecuencia PWM	$f_{cw}$	1000	Hz
Probabilidad de error	$P_e$	$[10^{-9}, 10^{-2}]$	—
Nº de celdas por fase	$N$	3	—
Frecuencia de reloj transmisor	$f_{ck,Tx}$	5000	Hz
Frecuencia de reloj receptor	$f_{ck,Rx}$	5100	Hz

de datos y 2 bits de parada. Se optó por no utilizar paridad, para no aumentar el porcentaje de bits suplementarios (bits asociados al control y no a la información transmitida).

Para obtener los resultados por simulación se empleó el esquema que se muestra en la Fig. 9. Un generador de pulsos produce las señales de activación para los interruptores semiconductores del convertidor multinivel. Para esto se considera la técnica de modulación por ancho de pulsos (PWM) con desplazamiento de fase [24]. El resultado es un conjunto de seis señales de disparo independientes, que son las requeridas para accionar una fase de un convertidor CHB de 7 niveles, según la topología presentada en la sección A. Los pulsos de disparo son transmitidos utilizando el protocolo de comunicación asíncrono descrito en la sección E. El protocolo de comunicación fue implementado mediante funciones en lenguaje Java dentro del entorno MATLAB.

La tabla I presenta los parámetros usados en la simulación. La frecuencia de la portadora en el generador de disparos basado en PWM,  $f_{cw}$ , es de 1000 Hz, que coincide con la frecuencia promedio de conmutación de los interruptores semi-

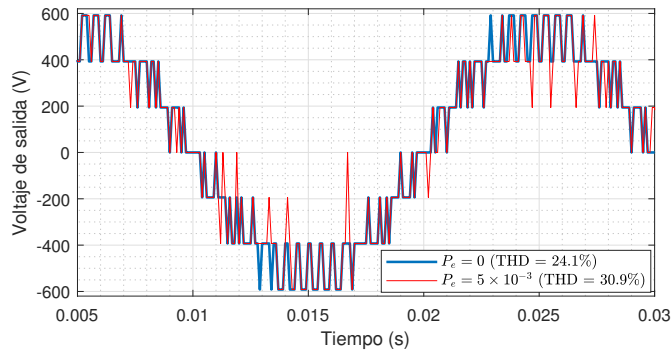


Fig. 10. Voltaje de salida en el convertidor con diferentes probabilidad de error en la transmisión.

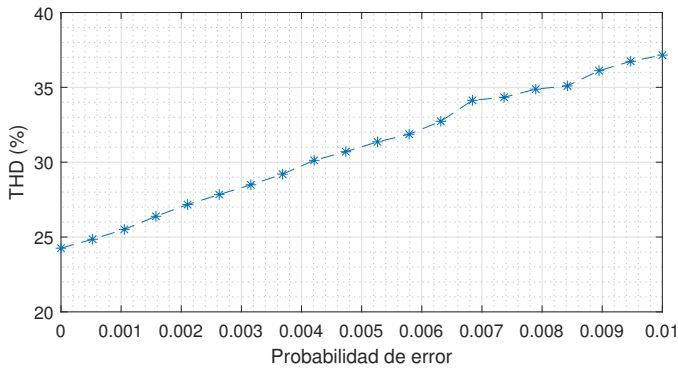


Fig. 11. THD de voltaje versus probabilidad de error en el canal de comunicación.

conductores del convertidor. Los errores atribuibles al esquema de multiplexación óptica propuesto se modelan mediante el parámetro de probabilidad de error,  $P_e$ . Desde el punto de vista del convertidor de potencia, un error en la transmisión de las señales de disparo ocasiona conmutaciones erróneas y, por lo tanto, formas de onda de voltaje que difieren de las esperadas según el esquema de modulación implementado. Este fenómeno se observa en la Fig. 10, donde la forma de onda de voltaje sin errores de comunicación se compara con la obtenida bajo una probabilidad de error  $P_e = 5 \times 10^{-3}$ . Los cambios aleatorios en el patrón de pulsos de disparo, causados por errores de comunicación, generan distorsión adicional que se traduce en un incremento de THD desde 24,1% en el caso sin error hasta un 30,9%.

Para evaluar el efecto del canal sobre la calidad de las formas de onda de voltaje producidas en la salida del convertidor multinivel, se analiza la distorsión armónica total (THD) de voltaje para distintos valores de la probabilidad de error de bits en la transmisión, tal como se muestra en la Fig. 11. Se verifica que la THD aumenta proporcionalmente con la probabilidad de error, la cual se hace variar entre un mínimo de  $10^{-9}$  y un máximo de  $10^{-2}$ . Este resultado coincide con el análisis anterior, donde una mayor cantidad de errores aleatorios en la transmisión de los pulsos de disparo conlleva un aumento de la distorsión en la forma de onda de voltaje.

Por otro lado, la asincronía del canal de comunicación se modela a través de la diferencia de frecuencia entre los relojes del transmisor  $f_{ck,Tx}$  y del receptor  $f_{ck,Rx}$ . El efecto de fre-

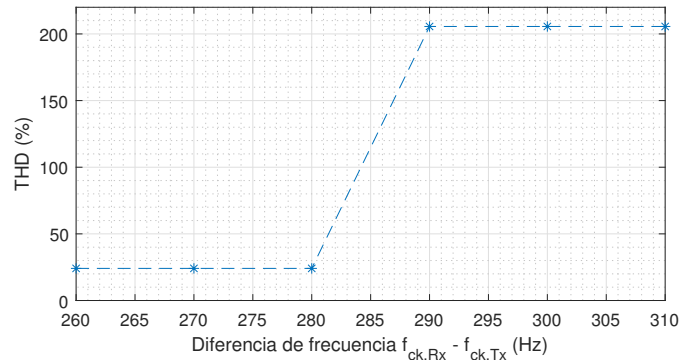


Fig. 12. THD de voltaje versus diferencia de frecuencia entre receptor y transmisor.

cuencias desiguales entre emisor y receptor se puede apreciar en la Fig. 12 donde, para una probabilidad de error constante  $P_e = 10^{-9}$  la THD de voltaje se mantiene consistente a pesar de que ambos nodos presenten velocidades de lectura/escritura levemente diferentes. A partir de una diferencia de 280 Hz entre los relojes, se observa que la comunicación asíncrona entre ambos nodos falla completamente, incrementando el valor de la THD de voltaje. Lo anterior se produce debido a que la diferencia en las velocidades genera una falla de lectura en un bit dentro del frame de datos.

## V. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un nuevo esquema de comunicación de pulsos de disparo para convertidores multinivel, basado en multiplexación óptica. El método propuesto se basa en la modulación espectral por medio de DMD como conmutador óptico y un LDA como elemento de detección multicanal. Los análisis por medio de modelos matemáticos y simulación computacional permiten establecer los rangos aceptables de parámetros del canal de comunicación tales como probabilidad de error, arrojando que la THD de voltaje es directamente proporcional a la probabilidad de error en el enlace. Cabe resaltar que, si se mantienen las mismas condiciones de *BER* en el enlace pero se incrementa el número de niveles del convertidor, un error de bit individual impactará menos en la THD ya que las transiciones entre niveles de voltaje serán mas cercanos entre sí. El protocolo asíncrono permitió realizar una comunicación sin necesidad de compartir una señal de reloj entre transmisor y receptor, con una operación estable hasta que el desajuste de frecuencia entre ambos llega a los 280 Hz. El trabajo futuro consiste en la validación experimental de la metodología propuesta mediante un prototipo a escala de laboratorio.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Universidad de La Frontera, Proyecto DI19-0020. Los autores agradecen además el apoyo de la Vicerrectoría de Investigación y Postgrado de la Universidad de La Frontera.

## REFERENCIAS

- [1] T. Atalik, M. Deniz, E. Koc, C. Ö. Gerçek, B. Gultekin, M. Ermis, and I. Cadirci, "Multi-DSP and -FPGA-Based Fully Digital Control System for Cascaded Multilevel Converters Used in FACTS Applications," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 8, pp. 511–527, aug 2012.
- [2] M. A. Perez, R. Lizana F., and J. Rodriguez, "Decoupled current control of modular multilevel converter for HVDC applications," in *2012 IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, pp. 1979–1984, IEEE, may 2012.
- [3] C. L. Toh and L. E. Norum, "FPGA implementation of slave communication controller for Modular Multilevel Converter," in *2015 IEEE Conf. Energy Convers.*, pp. 486–491, IEEE, oct 2015.
- [4] P. Wang, X.-P. Zhang, P. F. Coventry, and R. Zhang, "Start-Up Control of an Offshore Integrated MMC Multi-Terminal HVDC System With Reduced DC Voltage," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, pp. 2740–2751, jul 2016.
- [5] L. Chang, "Development of a series of optically isolated and fibre-optic coupled gate drivers for medium and high power IGBTs," in *Large Eng. Syst. Conf. Power Eng. 2003*, pp. 65–68, IEEE, 2003.
- [6] S. Zhao, S. Tan, X. Li, H. Geng, and G. Yang, "A hybrid communication method for unit control of cascade multilevel converters," in *2013 1st Int. Futur. Energy Electron. Conf.*, pp. 500–504, IEEE, nov 2013.
- [7] Y. Rongfeng, W. Gaolin, Y. Yong, and X. Dianguo, "Modified fiber-optic serial communication for cascaded multilevel converters," in *2011 6th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl.*, pp. 830–833, IEEE, jun 2011.
- [8] M. A. H. Broadmeadow and G. R. Walker, "A LIN inspired optical bus for signal isolation in multilevel or modular power electronic converters," in *2015 IEEE 11th Int. Conf. Power Electron. Drive Syst.*, pp. 898–902, IEEE, jun 2015.
- [9] F. Xiao, W. Chen, J. Liu, and H. Wang, "Parallel connected three phase inverters based on modular design and distributed control," in *2014 Int. Power Electron. Conf. (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA)*, pp. 72–77, IEEE, may 2014.
- [10] J. Liu, X. Yang, F. Xiao, and R. Wang, "Study on synchronization methods in switchable fiber ring net for distributed control," in *IECON 2013 - 39th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, pp. 3782–3787, IEEE, nov 2013.
- [11] M. Pritz, S. Fuchs, A. Jehle, G. Tsolaridis, and J. Biela, "Low-Cost Multi-Channel Data Transmission over a Single Plastic Optic Fibre for Isolated Sensing Applications," in *2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe)*, pp. P.1–P.11, 2019.
- [12] S. Heinig, K. Jacobs, S. Norrga, and H.-P. Nee, "Single-Fiber Combined Optical Power and Data Transmission for High-Voltage Applications," in *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1473–1480, 2020.
- [13] K. M. Sivalingham and S. Subramaniam, eds., *Optical WDM Networks: Principles and Practice*. Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [14] K. Grobe and M. Eiselt, *Wavelength Division Multiplexing: A Practical Engineering Guide*. John Wiley and Sons, 2013.
- [15] Rad-Com, *Guía completa de protocolos de telecomunicaciones*. McGraw-Hill Editorial, 2002.
- [16] J. Rodríguez, S. Bernet, B. Wu, J. O. Pontt, and S. Kouro, "Multilevel Voltage-Source-Converter Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 6, pp. 2930–2945, 2007.
- [17] D. Hart, *Electrónica de Potencia*. Pearson, 2001.
- [18] A. N. Pinto, N. A. Silva, A. J. Almeida, and N. J. Muga, "Using quantum technologies to improve fiber optic communication systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, pp. 42–48, August 2013.
- [19] D. J. Richardson, "New optical fibres for high-capacity optical communications," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 374, no. 2062, 2016.
- [20] H. Bayrampour and R. Sabbaghi-Nadooshan, "Optimization of quantum networks using novel non-blocking optical switches," *Optical Switching and Networking*, vol. 22, pp. 69 – 76, 2016.
- [21] P.-A. Blanche, D. Carothers, J. Wissinger, and N. Peyghambarian, "Digital micromirror device as a diffractive reconfigurable optical switch for telecommunication," *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, vol. 13, no. 1, 2014.
- [22] P. J. Winzer, "Scaling optical fiber networks: Challenges and solutions," *Opt. Photon. News*, vol. 26, pp. 28–35, Mar 2015.
- [23] S. A. Khan and N. A. Riza, "Demonstration of the MEMS Digital Micromirror Device-Based Broadband Reconfigurable Optical Add-Drop Filter for Dense Wavelength-Division-Multiplexing Systems," *J. Light. Technol.*, vol. 25, pp. 520–526, feb 2007.
- [24] B. Wu, *High power converters and AC drives*. Wiley-IEEE Press, 1 ed., 2006.
- [25] D. Large and J. Farmer, "Chapter 5 - wavelength division multiplexing," in *Broadband Cable Access Networks* (D. Large and J. Farmer, eds.), The Morgan Kaufmann Series in Networking, pp. 127–160, Boston: Morgan Kaufmann, 2009.
- [26] X. Jin and K. Hirakawa, "Analysis and processing of pixel binning for color image sensor," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2012, no. 1, pp. 1–15, 2012.
- [27] M. C. Wu, Jui-Che Tsai, S. Huang, and Dooyoung Hah, "Mems wdm routers using analog micromirror arrays," in *The 15th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, vol. 2, pp. 582–583 vol.2, 2002.
- [28] M. Secondini, "Chapter 20 - information capacity of optical channels," in *Optical Fiber Telecommunications VII* (A. E. Willner, ed.), pp. 867–920, Academic Press, 2020.
- [29] R. A. Schowengerdt, "Chapter 3 - sensor models," in *Remote Sensing (Third Edition)* (R. A. Schowengerdt, ed.), pp. 75–XIV, Burlington: Academic Press, third edition ed., 2007.
- [30] T. M. Cover and J. A. Thomas, *Elements of Information Theory 2nd Edition (Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing)*. Wiley-Interscience, July 2006.



**Pablo Meza** was born on October 6, 1983. He received his B.Sc. in Electronic Engineering and M.S. in Electrical Engineering in 2008, from the University of La Frontera, Temuco, Chile and his Ph.D. degree in Electrical Engineering in 2014, from the University of Concepción, Concepción, Chile. He is currently a full-time Professor of the Electrical Engineering Department at the University of La Frontera. His research activities are focused on areas of signal processing and design of multidimensional data acquisition systems.



**Hector A. Young** (S'12–M'15) was born in Valparaíso, Chile in 1984. He received the B.Eng. and the M.Sc. degrees in electronics engineering in 2009 from the Universidad de la Frontera, Temuco, Chile. He received the PhD degree in power electronics from the Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile in 2014. Since 2014 he has been an Assistant Professor with the Electrical Engineering Department, Universidad de La Frontera. His research interests include modeling and control of power converters and electrical drives, renewable energy systems and microgrids.



**Ramiro Donoso Floody** received the Informatics Engineering degree from Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile, in 2010, and the Ph.D. Engineering degree from Universidad de La Frontera, Temuco, Chile, in 2017. He is a full-time professional in the Department of Electrical Engineering at the Universidad de La Frontera, Temuco, Chile. His research interests include signal processing, Pattern recognition and machine learning.





**Marcelo Faundez** received the diploma in electronics engineering from the Universidad de La Frontera, Temuco, Chile, in 2017. His graduation project focused on the design and production of electronic cards for signal calibration and development of voltage and current sensors for power inverters. Since 2017 he works as a research assistant in renewable energy projects at the Electrical Engineering Department, Universidad de La Frontera. His current activity is to direct the development of monitoring and control systems through FPGA and

microcontroller devices with data transmission via radio frequency, applied to wind generation systems.