

Fuzzy Logic Active Yaw Control of a Low-Power Wind Generator

Alfredo Haro, Hector Young, *Member, IEEE*, and Boris Pavez

Abstract—Active yaw control systems are important for improving the efficiency of the wind generator by keeping a proper orientation of the turbine upon changing wind conditions. Moreover, they can be used for protecting the generator in the case of excessive wind speeds. However, the complex and nonlinear relationship between mechanical variables and the electrical power makes the controller design difficult using conventional techniques such as proportional-integral (PI) or proportional-integral-derivative (PID) controllers. In this paper we present the development of a fuzzy logic yaw control system for low-power wind generators, requiring only intuitive knowledge of the physical system and a set of logic rules established from the operator's experience. A 20 kW wind generator model including a permanent-magnet synchronous generator (PMSG) is implemented in order to assess the performance of the proposed yaw system in terms of the generated power. The parameters of the generator are selected according a commercial Ginlong GL-PMG-20K PMSG. Simulation results obtained in the MATLAB/Simulink environment considering different wind conditions show the effectiveness of the proposed method.

Index Terms—Wind energy generation, fuzzy control, yaw control.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la energía eólica está considerada como una de las fuentes renovables de electricidad más utilizadas en el mundo, con una capacidad instalada de 651 GW el año 2019 [1]. El sistema de orientación (*yaw system*) es un componente importante en aerogeneradores (AG), ya que permite direccionar la góndola y mantener el eje del rotor alineado con la dirección del viento, maximizando así el uso del potencial eólico disponible [2]. Además, el control de orientación (*yaw control*) permite proteger el AG ante velocidades altas de viento sin necesidad de controlar el ángulo de las palas (*pitch angle*), orientando de manera controlada la turbina hacia un punto de operación seguro [3].

En AG de eje horizontal, los sistemas de orientación se dividen en sistemas activos y pasivos. Estos últimos utilizan la fuerza del viento para ajustar la orientación del AG, que gira libremente sobre la torre, mediante una aleta o cola montada en la góndola cuya función es aplicar un torque para rotar el sistema en dirección al viento [4]. Estos sistemas ofrecen una solución de bajo costo principalmente para su aplicación en pequeñas turbinas eólicas [5]. Sin embargo, al no poder autorregularse y poseer una baja inercia en la orientación, se

producen frecuentes y repentinos cambios en la orientación que reducen la eficiencia de la generación y acortan la vida útil de la turbina [6]. Por otro lado, los sistemas de orientación activos están equipados con actuadores capaces de girar la góndola del AG según un esquema de control basado en sensores que miden la dirección del viento [4], [5].

En los últimos años se han desarrollado diferentes estrategias de control de orientación en AG, dando importancia a lograr un mejor rendimiento en los sistemas de generación eólica a menor costo y prolongar así su vida útil. El control de orientación mediante reguladores de tipo proporcional-integral (PI) o proporcional-integral-derivativo (PID) clásicos se ha implementado usando esquemas de ganancia programada (*gain scheduling*) para trabajar en diferentes regiones de operación. Esto es debido a la dificultad inherente de estos sistemas de control para alcanzar múltiples objetivos, tales como máxima producción de potencia y protección contra sobrecarga del generador ante velocidades altas del viento [3].

El uso de reguladores PID convencionales para el control de orientación se encuentra con el problema de dinámicas complejas y que cambian según el punto de operación para este tipo de sistemas. Por esta razón, se han presentado controladores PI que requieren un sistema adicional de autosintonización de parámetros [7], lo que aumenta la complejidad de la solución. Recientemente, en [8] se ha propuesto un método de control predictivo con conjunto de control finito que incluye modelos de predicción de múltiples pasos para un sistema de orientación en un AG de eje horizontal. Una limitación de este enfoque es que su desempeño depende de la calidad del modelo de predicción, que incluye la dirección del viento siendo esta variable difícil de modelar por su naturaleza estocástica.

Ante la dinámica compleja y no lineal de un AG, sujeta además a perturbaciones difíciles de modelar, los esquemas de control basados en lógica difusa aparecen como una alternativa simple y efectiva. El método conocido como PID-difuso consiste en una estructura de controlador PID tradicional, cuyos parámetros son ajustados de manera adaptativa usando un sistema de lógica difusa. El control mediante PID-difuso ha sido reportado en la literatura para el seguimiento de una referencia de orientación [9]–[12]. Alternativamente, se han desarrollado controladores de orientación diseñados por completo en base a sistemas difusos y considerando diferentes variables de entrada, donde la ventaja radica en una mayor flexibilidad al definir la lógica de control. En [13] se planteó un controlador que utilizaba como entradas exclusivamente el error de orientación y su tasa de cambio. Con el objetivo de mejorar el desempeño del controlador y la adaptabilidad a

Alfredo Haro, Department of Electrical Engineering, Universidad de La Frontera, Temuco 4811230, Chile, a.haro01@ufromail.cl.

Hector Young, Department of Electrical Engineering, Universidad de La Frontera, Temuco 4811230, Chile, hector.young@ufrontera.cl.

Boris Pavez, Department of Electrical Engineering, Universidad de La Frontera, Temuco 4811230, Chile, boris.pavez@ufrontera.cl.

condiciones de operación, variables adicionales como la velocidad del viento pueden ser también incluidas como entrada al sistema de control difuso [5]. Similarmente, en el trabajo de Bharani et al. [14] se desarrolló un controlador difuso usando como entradas la dirección del viento y la orientación de la góndola, con el propósito de seguir el punto de máxima potencia.

Si bien en trabajos existentes se demuestra la efectividad del control difuso de orientación, el seguimiento de una referencia de potencia eléctrica generada no ha sido considerado como objetivo de control. Con esto se lograría no sólo maximizar la generación, como en [14], sino también proteger al sistema en caso de velocidades altas de viento. Por consiguiente, en este artículo se desarrolla un esquema de control de orientación para un AG de baja potencia basado en lógica difusa que permite, al mismo tiempo, mantener la potencia eléctrica generada cerca del valor nominal, y proteger a la turbina de velocidades de viento altas. La estrategia de control se diseña para un modelo de AG de 20 kW, donde las principales características del sistema propuesto son:

- El diseño del controlador puede realizarse sin necesidad de un modelo dinámico preciso del sistema.
- No es necesario el ajuste de parámetros para trabajar en diferentes puntos de operación.
- Los requerimientos de potencia generada y protección contra velocidades altas de viento pueden combinarse en una única ley de control.

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En esta sección se describen los principales componentes del sistema de generación eólico, para luego describir el modelo matemático que será implementado mediante simulación para las pruebas del controlador propuesto.

A. Estructura del Aerogenerador

La estructura de un AG de eje horizontal se muestra en la Fig. 1 con sus componentes principales. A continuación se da una breve descripción de cada uno de éstos [15]:

- **Rotor:** Es el componente móvil que transforma la energía cinética del viento en la energía mecánica que se utiliza para impulsar el generador eléctrico. Está conformado por aspas o palas, el cubo o el buje en donde se ensamblan las aspas, y la nariz o el carenado que es la punta frontal en forma de cono que se utiliza para evitar turbulencias en el centro del rotor.
- **Palas:** Éstas interactúan con el viento para producir el movimiento del eje del rotor, por lo que se diseñan con un perfil que sea eficaz frente a la resistencia aerodinámica y a las cargas mecánicas que produzcan el efecto de desgaste a lo largo del tiempo. La mayoría de las turbinas eólicas comerciales tienen dos o tres palas.
- **Cubo:** Este componente une las palas del rotor, y en su interior alojan actuadores que permiten el cambio del ángulo de paso que regula la orientación de la pala con respecto a la dirección del viento.

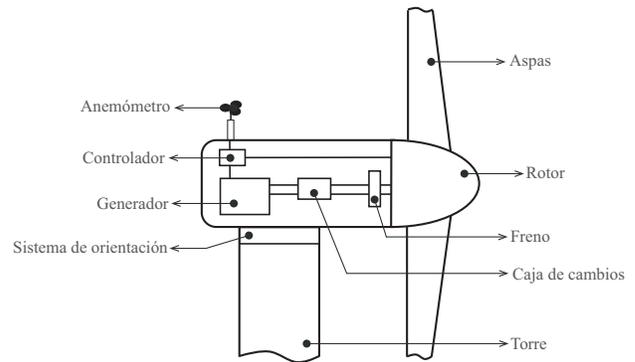


Fig. 1. Componentes principales de un AG de eje horizontal.

- **Frenos:** Su objetivo es detener el movimiento del rotor para que la turbina se mantenga en condiciones no operativas. Su accionamiento puede ser mecánico, hidráulico o eléctrico.
- **Caja de cambios:** Se utiliza para adaptar la potencia mecánica del eje del rotor al eje del generador, aumentando la velocidad de rotación y disminuyendo el torque electromagnético, con el fin de permitir una conversión eficiente de energía mecánica a eléctrica. La caja de cambios consta de una serie de engranajes, que en varias etapas multiplica las revoluciones del rotor, de manera tal que un generador convencional pueda producir electricidad.
- **Generador:** Convierte la energía mecánica del eje de alta velocidad proveniente de la caja de cambios en energía eléctrica. Puede ser una máquina asíncrona o síncrona.
- **Góndola:** Es la carcasa que contiene los ejes, los frenos, la caja de cambios, el generador y el equipo de control. Se acopla a la torre y al rotor.
- **Anemómetro:** Es el sensor que proporciona la velocidad del viento.
- **Sistema de orientación:** Generalmente consiste en un servomotor que gira la góndola en dirección al viento.
- **Torre:** Soporta la góndola y el rotor. La altura de la torre es un factor relevante en la generación de energía, ya que la velocidad del viento aumenta a mayor altitud sobre la superficie terrestre.

B. Modelo Matemático

El AG de baja potencia se modela mediante las ecuaciones fenomenológicas características de la turbina, en donde se expresan la potencia mecánica P_m , el torque mecánico T_m , y la relación de velocidad de punta λ [16]–[18]:

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho_{air} \pi r^2 v_w^3 \cos(\gamma_{yaw}) \quad (1)$$

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{r \omega_m}{v_w} \quad (3)$$

donde C_p es el coeficiente de potencia, ρ_{air} es la densidad volumétrica del aire, r es el radio del rotor que corresponde a la longitud de pala, v_w es la velocidad del viento, ω_m es la

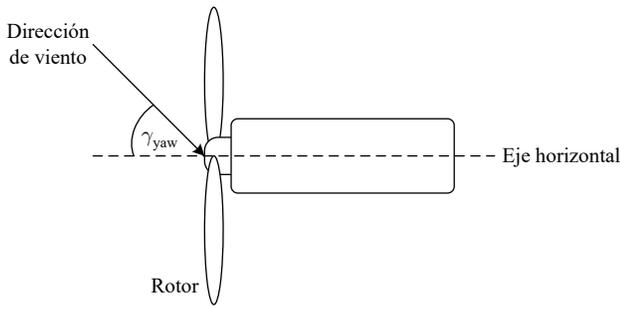


Fig. 2. Representación del ángulo de orientación en un AG de eje horizontal.

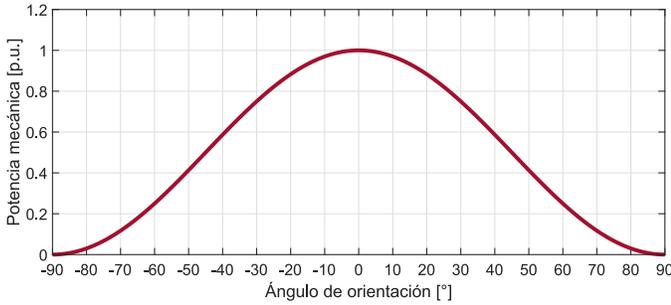


Fig. 3. Potencia mecánica capturada en función del ángulo de orientación γ_{yaw} , normalizada con respecto a su máximo en $\gamma_{yaw} = 0^\circ$.

velocidad angular mecánica (de giro) del rotor, y γ_{yaw} es el ángulo de orientación del AG que corresponde al ángulo de desalineación entre la dirección del viento y el eje del rotor, tal como se indica en la Fig. 2.

La ecuación (1) se sustenta en el hecho de que el flujo de masa del viento que atraviesa la superficie del rotor disminuye con el factor $\cos(\gamma_{yaw})$ cuando la normal de la superficie del rotor está orientado a un ángulo γ_{yaw} con respecto a la dirección del viento. En efecto la potencia extraída del viento es proporcional al flujo de masa del viento y, en consecuencia, ésta también decrece a razón de $\cos(\gamma_{yaw})$ [19].

La Fig. 3 muestra gráficamente la variación de la potencia mecánica producida a partir la energía eólica en relación al ángulo de orientación. En ésta se observa que si el rotor se encuentra en barlovento ($\gamma_{yaw} = 0^\circ$), es decir de frente en dirección al viento, el AG obtendrá la máxima eficiencia en la generación de potencia. De lo contrario, al existir una desalineación entre el eje del rotor y la dirección del viento ($\gamma_{yaw} \neq 0^\circ$), implica una disminución en la captación de energía eólica.

Cabe mencionar que la obtención de los coeficientes de potencia C_p se realizó con una matriz de datos cuyos valores fueron extraídos mediante un modelo de elementos finitos de las aspas y fueron expuestas a un túnel de viento, obteniendo así las curvas de los coeficientes de potencia para diferentes valores del ángulo de paso β y de la relación de velocidad de punta λ [20], [21].

Dentro del modelo del AG se dispone de un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) el cual se modela en el marco de referencia del rotor utilizando la transformación de Park que convierte las componentes “abc” del sistema trifásico

TABLA I
PARÁMETROS MECÁNICOS Y CONSTRUCTIVOS DEL AG MODELADO.

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Densidad del aire	ρ_{air}	1.225	kg/m ³
Radio de la pala	r	5	m
Número de palas	–	3	
Momento de inercia	J	3090	kg·m ²
Coefficiente de roce	b	41	N·m·s/rad

TABLA II
PARÁMETROS DEL PMSG GINLONG GL-PMG-20K.

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Potencia eléctrica nominal	P_{nom}	20	kW
Velocidad de rotación	n_m	100	rpm
Número de polos	p	20	–
Momento de inercia	J	3.24	kg·m ²
Auto-inductancia	L_s	5	mH
Enlace de flujo	λ_m	1.5	V·s
Resistencia de estator	R_s	0.6	Ω

a otro sistema de referencia “dq”, con lo que se tienen las siguientes expresiones [3], [22], [23]:

$$v_d = -R_s i_d - L_s \frac{di_d}{dt} + \omega_e L_s i_q \quad (4)$$

$$v_q = -R_s i_q - L_s \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_s i_d + \lambda_m) \quad (5)$$

$$\omega_e = \omega_m p \quad (6)$$

$$P_e = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \quad (7)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p \lambda_m i_q \quad (8)$$

donde v_d , v_q e i_d , i_q son las tensiones y corrientes en el marco de referencia dq; λ_m es el enlace del flujo magnético de los imanes permanentes, ω_e es la velocidad angular eléctrica del rotor, P_e es la potencia eléctrica, T_e es el torque electromagnético, y p es el número de polos de la máquina.

Asimismo, la ecuación de movimiento que describe la dinámica del AG se escribe como [24]:

$$T_m - T_e = b \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (9)$$

donde b es el coeficiente de fricción viscosa, y J es la inercia total del sistema.

Para efectos del diseño dinámico del AG, se considera un prototipo de turbina eólica de eje horizontal compuesta de tres aspas, una torre de altura de 20 m y un diámetro de rotor de 10 m, el cual utiliza un PMSG de marca Ginlong modelo GL-PMG-20K. Los parámetros utilizados para la modelación del sistema de generación eólico se encuentran en las Tablas I y II para las variables mecánicas y eléctricas, respectivamente.

III. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO

El control difuso es un método que genera acciones de control en sistemas complejos basados en reglas para manejar

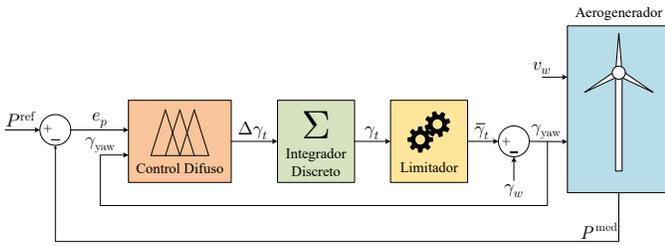


Fig. 4. Esquema del control difuso de orientación en AG.

variables con alto grado de incertidumbre. En este tipo de control se toman variables de entrada reales y se transforman en una variable lingüística, luego se aplican una serie de reglas condicionales para su conversión final a una variable de salida real [25].

En esta sección se presentan los detalles con respecto a la implementación del controlador difuso propuesto.

A. Modelo del Controlador Difuso

Tomando en consideración el modelo del AG con sus ecuaciones características y especificaciones técnicas mencionadas en la Sección II, se procede a desarrollar un controlador difuso que sea capaz de regular la potencia eléctrica generada ante los cambios que puedan surgir en el seguimiento de la dirección de viento. Para ello se definen las señales de entrada que recibe el controlador, comenzando por el error de potencia e_p :

$$e_p = P^{\text{ref}} - P^{\text{med}}, \quad (10)$$

donde P^{ref} es la potencia de referencia y P^{med} es la potencia real medida. Además, se cuenta como entrada el ángulo de orientación del AG γ_{yaw} que se define como:

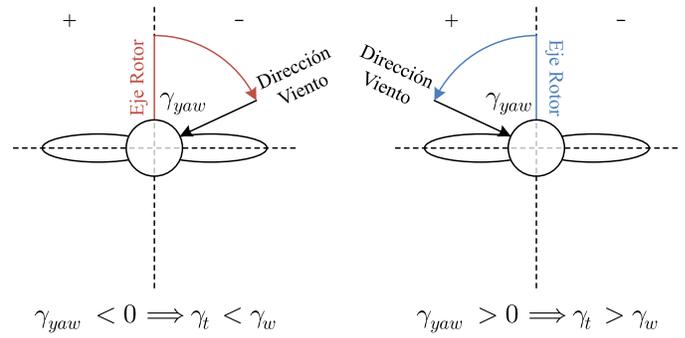
$$\gamma_{\text{yaw}} = \gamma_t - \gamma_w, \quad (11)$$

donde γ_t es el ángulo de posicionamiento del AG y γ_w es el ángulo de dirección del viento.

El controlador difuso propuesto entrega una señal de salida correspondiente a la tasa de cambio en la orientación de la turbina $\Delta\gamma_t$. En este trabajo, el actuador que manipula la orientación del AG se modela mediante un integrador discreto, cuya salida es el ángulo de posición instantáneo γ_t . Para incorporar las restricciones mecánicas del sistema real en la simulación, se incluye un limitador de tasa de cambio que da como resultado el ángulo de posición de la turbina $\bar{\gamma}_t$.

De esta manera, en base a las variables definidas anteriormente se deben establecer un conjunto de reglas difusas que sigan la estructura de control sobre el AG mostrada en la Fig. 4, con tal que responda a diferentes condiciones de operación definidas por la velocidad de viento v_w y la dirección de viento γ_w .

También es importante señalar que la estrategia del control de orientación implica minimizar trabajo en posicionar la turbina de cara al viento. De acuerdo a la Fig. 5, si la dirección de viento se sitúa a la derecha del eje horizontal del rotor la turbina gira en sentido horario. En caso contrario, si la dirección de viento se encuentra a la izquierda del eje del rotor la turbina se mueve en sentido anti-horario. Incluso se muestra



(a) Sentido horario.

(b) Sentido anti-horario.

Fig. 5. Sentido de giro de la turbina.

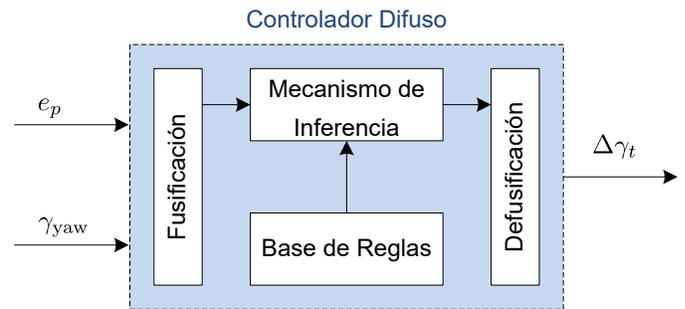


Fig. 6. Diagrama de bloques del controlador difuso.

la forma en que se interpretan los ángulos de orientación para los efectos del controlador, en donde γ_{yaw} es negativo si la turbina gira en sentido horario, y positivo si la turbina se orienta en sentido anti-horario. En ambos casos, el proceso de orientación termina siempre y cuando la turbina se sitúe dentro del rango de orientación permitido por parte del controlador.

Para el diseño del controlador de orientación se utiliza la herramienta de lógica difusa (*fuzzy logic toolbox*) de MATLAB, considerando una estructura de controlador difuso como la que se presenta en la Fig. 6. En el diagrama, las entradas al controlador son e_p y γ_{yaw} , y su salida es la actuación $\Delta\gamma_t$ aplicada al sistema de orientación, según el esquema de la Fig. 4. Internamente, el controlador difuso se compone de las etapas de *fusificación*, *mecanismo de inferencia* y *defusificación*, que son explicadas a continuación.

B. Etapa de Fusificación

Antes de elaborar la base de reglas condicionales para el funcionamiento del control difuso, se requiere establecer la etapa de fusificación. Esta etapa consiste en otorgar grados de membresía a las variables de entrada y salida dentro de las distintas expresiones posibles, buscando la correspondencia entre el estado de las variables (de 0 a 1) y las funciones de pertenencia definidas para tal propósito.

Con respecto a las entradas del controlador, se emplean tres funciones de pertenencia para el error de potencia e_p y el ángulo de orientación γ_{yaw} : negativo (N), cero (Z) y positivo (P). El universo de discurso del error de potencia e_p es de ± 5.0 kW dado que se asigna un rango de operación en torno al 25% del valor nominal de la potencia eléctrica del AG para efectos de diseño del controlador, mientras que el ángulo de

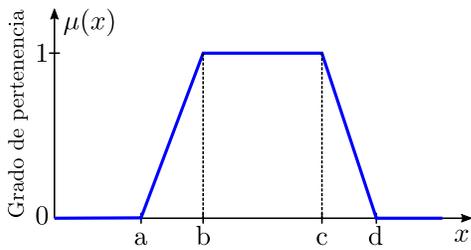


Fig. 7. Función de pertenencia trapezoidal genérica.

TABLA III

PROPIEDADES DE LAS FUNCIONES DE PERTENENCIA PARA LAS ENTRADAS DEL CONTROLADOR DIFUSO.

Notación lingüística	Función de pertenencia
N: Negativo	Trapezoidal
Z: Cero	Triangular
P: Positivo	Trapezoidal

orientación γ_{yaw} ocupa un universo de discurso de $\pm 90^\circ$ en base a que el AG es capaz de generar potencia eléctrica bajo ese rango de operación.

Las funciones de pertenencia propuestas en el diseño del controlador son de tipo triangular y trapezoidal, ya que ofrecen un bajo costo computacional en cuanto al uso de datos y al tiempo de procesamiento [26]. Además, esta geometría facilita el diseño de las funciones de pertenencia a partir de conocimiento experto, expresado mediante puntos e intervalos de operación para el sistema [27]. Las funciones de pertenencia utilizadas en este trabajo tienen la siguiente definición matemática:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{Si } x < a, \text{ ó } x > d \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{Si } a \leq x < b \\ 1 & \text{Si } b \leq x \leq c \\ 1 - \frac{x-c}{d-c} & \text{Si } c \leq x \leq d, \end{cases} \quad (12)$$

donde los parámetros a , b , c y d determinan los límites de los tramos lineales que conforman la función de pertenencia, según se muestra en la Fig. 7. Cabe indicar que mediante (12) es posible representar también una función de pertenencia triangular en el caso que $b = c$.

La Fig. 8 presenta las formas gráficas de las funciones de pertenencia mencionadas y en la Tabla III se muestran las características y etiquetas de dichas funciones.

Asimismo, para la salida del controlador se establecen cinco notaciones para las funciones de pertenencia asociadas a la tasa de cambio en la orientación de la turbina $\Delta\gamma_t$: negativo grande (NG), negativo (N), cero (Z), positivo (P) y positivo grande (PG). En este caso se empleó un universo de discurso de $\pm 0.5^\circ/s$. Esto se fundamenta considerando que el mecanismo de orientación debe operar a una velocidad de giro muy baja para mantener las cargas estructurales del aerogenerador al mínimo, normalmente esto se realiza del orden de $0.5^\circ/s$ [28]. En cuanto al signo de la velocidad de giro del mecanismo de orientación para posicionar la turbina, se indica como positivo si el giro de la rotación es en sentido anti-horario,

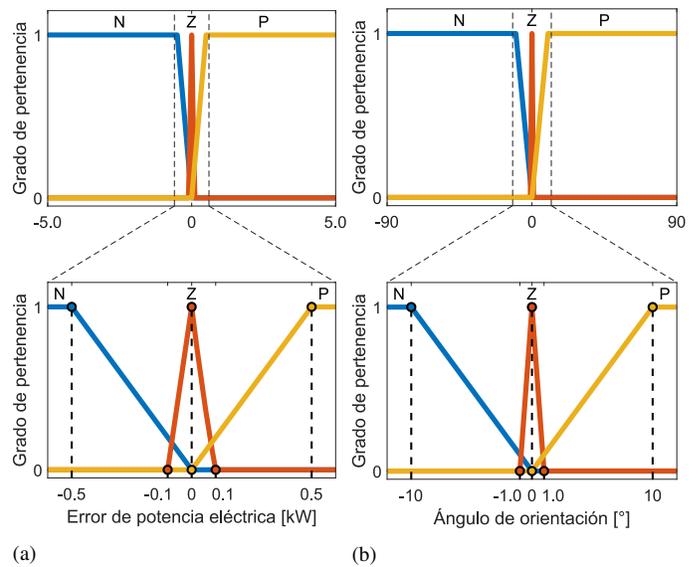


Fig. 8. Funciones de pertenencia de los conjuntos negativo (N), cero (Z) y positivo (P) para las entradas del controlador difuso. (a) Error de potencia eléctrica; (b) Ángulo de orientación.

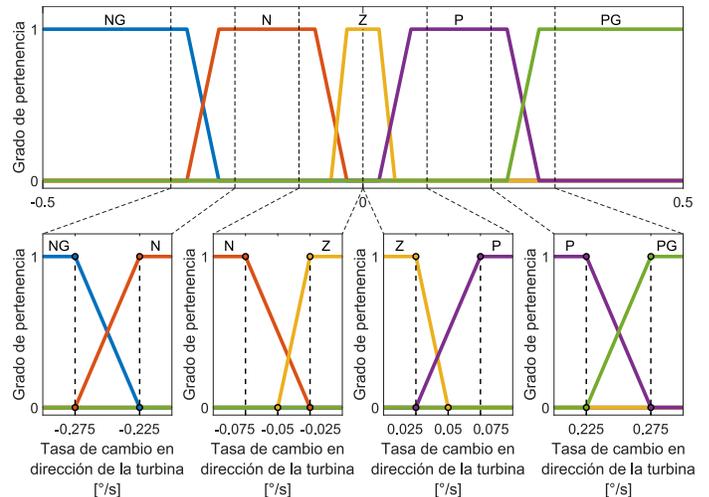


Fig. 9. Funciones de pertenencia para la salida del controlador difuso con conjuntos negativo grande (NG), negativo (N), cero (Z), positivo (P) y positivo grande (PG).

y se indica negativo si el giro de la rotación es en sentido horario. La Fig. 9 presenta las formas gráficas de las funciones de pertenencia correspondientes a la señal de salida y en la Tabla IV se muestran las características y etiquetas de tales funciones.

C. Mecanismo de Inferencia

El mecanismo de inferencia se encarga de tomar los grados de pertenencia provenientes de la etapa de fusificación, con el fin de generar la salida del sistema de control difuso utilizando una base de reglas. La base de reglas difusas consiste en un conjunto de sentencias condicionales “Si-Entonces” que interpreta la toma de decisiones a partir del conocimiento de la planta y permite generar una actuación lingüística adecuada.

TABLA IV

PROPIEDADES DE LAS FUNCIONES DE PERTENENCIA PARA LA SALIDA DEL CONTROLADOR DIFUSO.

Notación lingüística	Función de pertenencia
NG: Negativo grande	Trapezoidal
N: Negativo	Trapezoidal
Z: Cero	Trapezoidal
P: Positivo	Trapezoidal
PG: Positivo grande	Trapezoidal

TABLA V

ESQUEMA DE REGLAS DEL CONTROL DIFUSO.

γ_{yaw}	e_p		
	N	Z	P
N	NG	Z	P
Z	P	Z	Z
P	PG	Z	N

Para efectos del presente artículo, se utiliza la base de reglas planteadas en la Tabla V, en la cual se conjugan las variables de entrada al controlador (e_p y γ_{yaw}) como antecedentes para poder estructurar un resultado en base a la salida generada ($\Delta\gamma_t$). De este modo se derivan nueve reglas para el accionamiento del control difuso en base al conocimiento empírico del sistema de orientación, lo que contempla los siguientes enunciados:

- Si el error de potencia eléctrica es positivo ($e_p > 0$), se requiere disminuir el ángulo de orientación hasta alcanzar un valor lo más cercano a 0° para aumentar la potencia.
- Si el error de potencia eléctrica es nulo ($e_p = 0$), entonces el ángulo de orientación debe permanecer a un valor constante para mantener dicha potencia.
- Si el error de potencia eléctrica es negativo ($e_p < 0$), entonces se necesita llevar el valor del ángulo de orientación a un valor cercano a $\pm 90^\circ$ para reducir el valor de potencia.

Para el procesamiento de las reglas difusas se utilizó el modelo lingüístico difuso de Mamdani, del cual se obtiene un único número que representa el resultado esperado en base a la toma de decisiones previamente establecidas.

D. Etapa de Defusificación

La defusificación consiste en la conversión de los datos lingüísticos que provienen del mecanismo de inferencia a una salida numérica, mediante una ponderación y normalización de las sentencias lógicas antecedentes. En este trabajo, el proceso de defusificación fue realizado mediante el método del centroide, que se basa en calcular el punto que representa el centro de gravedad del conjunto difuso obtenido por el mecanismo de inferencia. Utilizando este método, la salida defusificada $\Delta\gamma_t$ viene dada por [29]:

$$\Delta\gamma_t = \frac{\sum_i \mu(x_i) \cdot x_i}{\sum_i \mu(x_i)}, \quad (13)$$

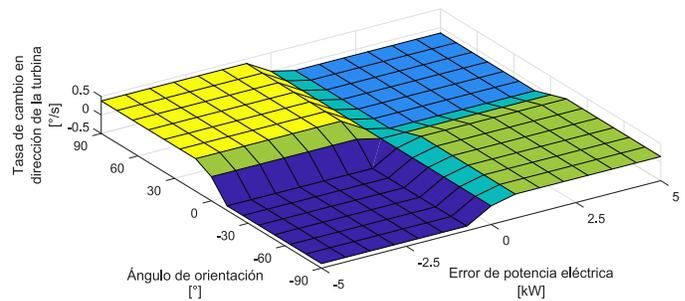


Fig. 10. Salida del controlador difuso en función de las variables de entrada.

donde $\mu(x_i)$ es la función de pertenencia evaluada en el punto x_i del universo de discurso. En la Fig. 10 se aprecia la superficie que representa la salida del controlador difuso $\Delta\gamma_t$ como función de las señales de entrada al controlador, e_p y γ_{yaw} .

Dado que la salida del controlador difuso corresponde a la tasa de cambio en la orientación de la turbina respecto a su posición original $\Delta\gamma_t$, es preciso que la salida defusificada sea integrada en tiempo discreto para obtener el ángulo de posición de la turbina γ_t , y de esta manera exista una regulación adecuada en el ángulo de orientación γ_{yaw} del AG.

IV. RESULTADOS POR SIMULACIÓN

Para evaluar la funcionalidad y el desempeño del esquema de control difuso propuesto en distintos puntos de operación, se implementó una simulación en el entorno MATLAB-Simulink. Los parámetros empleados en la simulación están contenidos en las Tablas I y II.

A. Respuesta ante Cambios en la Dirección de Viento

En la Fig. 11 se describe el comportamiento del AG en régimen permanente con el control difuso de orientación ante diferentes direcciones de viento y a una velocidad constante. Durante la simulación, la dirección de viento experimenta tres cambios escalonados: de 0° a 30° , de 30° a 60° , y de 60° a 90° . Mientras tanto, la velocidad de viento se mantiene en 10.67 m/s dado que a ese valor el AG es capaz de generar electricidad a su potencia nominal (20 kW).

La Fig. 11(a) muestra como, ante cada cambio en la dirección del viento, la turbina es capaz de ajustar su orientación gracias al controlador propuesto. De este modo, la potencia generada por el sistema se mantiene en su nivel de referencia, como se aprecia en la Fig. 11(b). Para fines de comparación, la Fig. 11(c) presenta la potencia generada sin control de orientación, manteniendo ésta fija en 0° . En este caso se puede ver como los cambios de dirección del viento tienen el efecto de disminuir la potencia generada, hasta el extremo donde el sistema es incapaz de generar potencia cuando el viento tiene una dirección perpendicular al eje del rotor.

B. Respuesta ante Cambios en la Velocidad de Viento

En la Fig. 12 se muestra el comportamiento del AG en régimen permanente con el control difuso de orientación

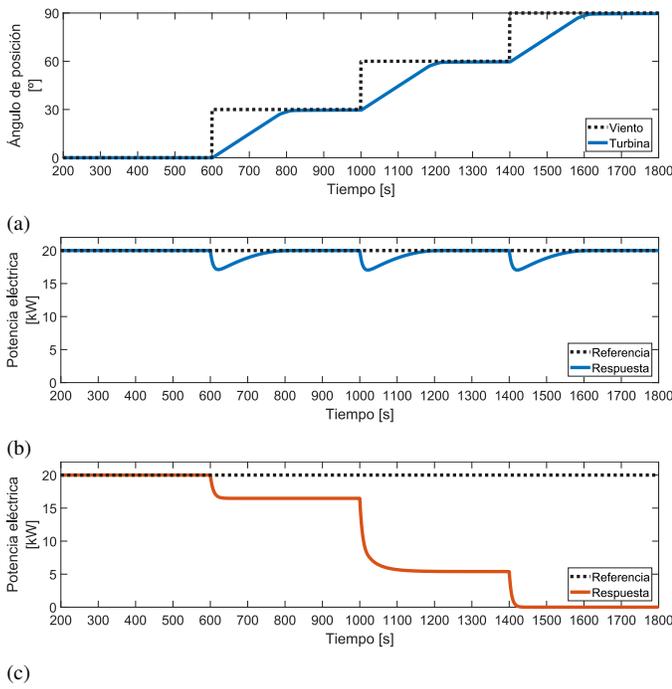


Fig. 11. Resultados de ensayo con control difuso de orientación del AG ante cambios escalonados en dirección de viento y velocidad de viento constante 10.67 m/s. (a) Ángulos de dirección de viento y turbina; Potencia eléctrica (b) con control de orientación y (c) sin control de orientación.

cuando se presentan diferentes velocidades de viento a una dirección de viento constante. Para esta prueba, la dirección de viento se fija a 45°, y su velocidad cambia en tres escalones: 10.67 m/s (velocidad nominal), 9.6 m/s (90 % de la velocidad nominal), y 11.74 m/s (110 % de la velocidad nominal).

De acuerdo a las Figs. 12(a) – 12(c), en el primer escalón de velocidad de viento (10.67 m/s), el controlador es capaz de sostener la respuesta de la potencia eléctrica del AG con respecto a la referencia en condiciones nominales (20 kW), a su vez la turbina puede mantener su orientación hacia la dirección del viento. Posteriormente, en el segundo escalón de velocidad de viento (9.6 m/s), la potencia eléctrica disminuyó gradualmente hasta alcanzar un valor de 13.95 kW que corresponde un 69.75 % del valor nominal. En tal situación se genera la máxima potencia eléctrica posible para esta condición de viento, y por tanto no hay desalineación entre la posición de la turbina y la dirección de viento. Finalmente, en el tercer escalón de velocidad de viento (11.74 m/s), es posible apreciar una respuesta subamortiguada con un notorio sobrepaso de un 36.85 % y un establecimiento de la respuesta a los 300 s después del incremento en la velocidad de viento. Sin embargo, en la Fig. 12(b) se observa claramente que el controlador actúa desorientando la turbina hasta ubicarla en 83.31° para alcanzar el nivel de potencia definido por la referencia. En este caso, la velocidad de respuesta está limitada por la capacidad del actuador mecánico para rotar la góndola del AG hacia la orientación calculada por el controlador difuso. La Fig. 12(d) muestra la potencia generada sin control de orientación, asumiendo que inicialmente el eje del rotor se encuentra alineado con la dirección del viento. Bajo estas con-

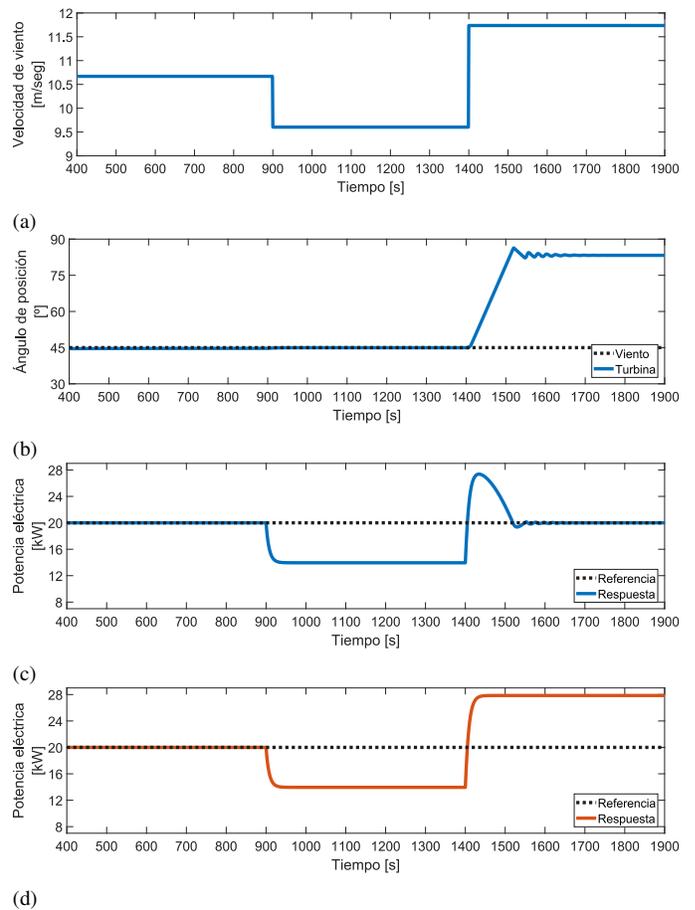


Fig. 12. Resultados de ensayo con control difuso de orientación del AG ante cambios en velocidad de viento con una dirección de viento en 45°. (a) Velocidad de viento; (b) Ángulos de dirección de viento y de turbina; Potencia eléctrica (c) con control de orientación y (d) sin control de orientación.

diciones, el desempeño del sistema sin control es idéntico al del controlador propuesto en la Fig. 12(c) cuando la velocidad del viento es igual o menor a su valor nominal (escalones 1° y 2°). Sin embargo, cuando la velocidad del viento se eleva al 110 % de su valor nominal, la potencia generada crece hasta 27.86 kW, un 39.30 % por encima de la potencia nominal del generador, arriesgando un daño permanente al sistema.

V. CONCLUSIÓN

Este trabajo presenta un controlador difuso de orientación para un AG de pequeña escala (20 kW). El método propuesto permite regular la potencia generada mediante la orientación de la turbina eólica, bajo distintas condiciones de velocidad y dirección del viento, sin requerir ajuste de parámetros según el punto de operación ni modelos dinámicos detallados del sistema. Los resultados obtenidos demuestran la efectividad del método propuesto para aprovechar el potencial eólico disponible y proteger al AG ante cambios imprevistos en la velocidad y dirección del viento. El trabajo futuro contempla la validación experimental en un prototipo de laboratorio.

REFERENCIAS

- [1] Global Wind Energy Council, "Global Wind Report 2019," Brussels, Belgium, 2019. [Online]. Available: <https://gwec.net/>
- [2] W. Farag, M. El-Hosary, A. Kamel, and K. El-Metwally, "A Comparative Study and Analysis of Different Yaw Control Strategies for Large Wind Turbines," in *2017 Intl Conf. on Adv. Control Circuits Syst. Syst. & 2017 Intl Conf. New Paradig. Electron. & Inf. Technol.*, Alexandria, Egypt, 2017, pp. 132–139.
- [3] H. Shariatpanah, R. Fadaeinedjad, and M. Rashidinejad, "A New Model for PMSG-Based Wind Turbine with Yaw Control," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 4, pp. 929–937, 2013.
- [4] N. C. Raikar and S. A. Kale, "Effect of Tail Shapes on Yawing Performance of Micro Wind Turbine," *International Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 4, pp. 38–42, 2015.
- [5] S. Theodoropoulos, D. Kandris, M. Samarakou, and G. Koulouras, "Fuzzy Regulator Design for Wind Turbine Yaw Control," *Sci. World J.*, 2014.
- [6] Z. Wu and H. Wang, "Research on Active Yaw Mechanism of Small Wind Turbines," *Energy Procedia*, vol. 16, pp. 53–57, 2012. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610212000203>
- [7] N. Karakasis, A. Mesemanolis, T. Nalmpantis, and C. Mademlis, "Active yaw control in a horizontal axis wind system without requiring wind direction measurement," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 10, no. 9, pp. 1441–1449, oct 2016. [Online]. Available: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-rpg.2016.0005>
- [8] D. R. Song, Q. A. Li, Z. Cai, L. Li, J. Yang, M. Su, and Y. H. Joo, "Model Predictive Control Using Multi-Step Prediction Model for Electrical Yaw System of Horizontal-Axis Wind Turbines," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 10, no. 4, pp. 2084–2093, oct 2019. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8514048/>
- [9] F.-Q. Chen and J.-M. Yang, "Fuzzy PID Controller Used in Yaw System of Wind Turbine," *3rd Int. Conf. Power Electron. Syst. Appl.*, pp. 1–4, 2009.
- [10] F. Yang, T. Yang, and X. Yang, "Fuzzy PID Control and Simulation of Wind Power Generation Yaw," *Adv. Mater. Res.*, no. 953-954, pp. 353–356, 2014.
- [11] P. Haiguo and W. Zhixin, "Simulation research of fuzzy-PID synthesis yaw vector control system of wind turbine," *WSEAS Transactions on Systems and Control*, vol. 2, no. 10, pp. 469–476, 2007. [Online]. Available: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/1486749.1486750>
- [12] A. Torabi and E. Tarsaii, "Fuzzy Controller Used In Yaw System Of Wind Turbine Noisy," *J. Math. Comput. Sci.*, vol. 8, pp. 105–112, 2014.
- [13] K. C. Wu, R. K. Joseph, and N. K. Thupili, "Evaluation of Classical and Fuzzy Logic Controllers for Wind Turbine Yaw Control," in *First IEEE Reg. Conf. Aerosp. Control Syst.* Westlake Village, United States: IEEE, 1993, pp. 254–258.
- [14] R. Bharani and K. C. Jayasankar, "Yaw Control of Wind Turbine Using Fuzzy Logic Controller," in *Power Electron. Renew. Energy Syst.*, Lecture Notes in Electrical Engineering, Ed., vol. 326. New Delhi, India: Springer, 2015, pp. 997–1006.
- [15] S. Simani and S. Farsoni, *Fault Diagnosis and Sustainable Control of Wind Turbines: Robust Data-Driven and Model-Based Strategies*, 1st ed. Cambridge (MA), United States: Butterworth-Heinemann, 2018.
- [16] H.-S. Choi, J.-G. Kim, J.-H. Cho, and Y.-S. Nam, "Active Yaw Control of MW Class Wind Turbine," *Int. Conf. Control. Autom. Syst.*, pp. 1075–1078, 2010.
- [17] A. Stotsky and B. Egardt, "Model Based Control of Wind Turbines: Look-Ahead Approach," in *Proc. 7th IFAC Symp. Robust Control Des. Int. Fed. Autom. Control*, vol. 45, no. 13, Aalborg, Dinamarca, 2012, pp. 639–646.
- [18] F. E. V. Taveiros, L. S. Barros, and F. B. Costa, "Back-to-Back Converter State-Feedback Control of DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) based Wind Turbines," *Energy*, vol. 89, pp. 896–906, 2015.
- [19] S. De Zutter, J. D. M. De Kooning, A. E. Samani, J. Baetens, and L. Vandevelde, "Modeling of Active Yaw Systems for Small and Medium Wind Turbines," in *52nd Int. Univ. Power Eng. Conf. (UPEC 2017)*, Heraklion, Greece, 2017, pp. 1–6.
- [20] F. Alarcon, I. Velasquez, R. Hunter, B. Pavez, and R. Moncada, "Hybrid PID-fuzzy pitch control for wind turbines," in *2017 Chil. Conf. Electr. Electron. Eng. Inf. Commun. Technol.* IEEE, oct 2017, pp. 1–6. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8229625/>
- [21] F. Alarcon, I. Velasquez, R. Hunter, B. Pavez, and R. Moncada, "PID-Fuzzy control strategy for nonlinear systems applied to small wind turbines," in *2018 13th IEEE Int. Conf. Ind. Appl.* IEEE, nov 2018, pp. 277–282. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8627276/>
- [22] N. Orlando, M. Liserre, R. A. Mastromauro, and A. Dell'Aquila, "A Survey of Control Issues in PMSG-Based Small Wind-Turbine Systems," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 9, no. 3, pp. 1211–1221, 2013.
- [23] S. M. Dehghan, M. Mohamadian, and A. Y. Varjani, "A New Variable-Speed Wind Energy Conversion System Using Permanent-Magnet Synchronous Generator and Z-Source Inverter," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 3, pp. 714–724, 2009.
- [24] C. Huang, F. Li, and Z. Jin, "Maximum Power Point Tracking Strategy for Large-Scale Wind Generation Systems Considering Wind Turbine Dynamics," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 4, pp. 2530–2539, 2015.
- [25] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller—Part I," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 20, no. 2, pp. 404–418, 1990.
- [26] S. Prajapati and E. Fernandez, "Performance evaluation of membership function on fuzzy logic model for solar PV array," in *2020 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies, GUCON 2020*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., oct 2020, pp. 609–613.
- [27] F. Matia, A. Jimenez, and G. Martinez, "Calibration of fuzzy control systems," in *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, vol. 1. IEEE, 1994, pp. 7–12.
- [28] S. Stubkier, H. Pedersen, T. Andersen, and K. Markussen, "State of the Art-Hydraulic Yaw Systems for Wind Turbines," in *Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power*, 2011.
- [29] H. Ying, *Basic Fuzzy Mathematics for Fuzzy Control and Modeling*, 2000, pp. 1–14.



Alfredo A. Haro was born in Temuco, Chile in 1989. He received the B.Eng. degree and diploma in Electrical Engineering from the Universidad de La Frontera in 2016. He is currently pursuing his M.Sc. degree in Electrical Engineering at the Universidad de La Frontera. His research interests include modeling and control of renewable energy 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 Tecnica Federico Santa Maria, Valparaíso, Chile in 2014. From 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.



Boris J. Pavez was born in Lota, Chile. He received the Electrical Engineering Diploma, the Magister Degree and the Doctor Degree in Electrical Engineering from the University of Concepcion, Concepcion, Chile in 1999, 2002 and 2010, respectively. Currently he is with the Universidad de La Frontera, Temuco, Chile as an Assistant Professor in the area of Power Systems. His research interests include power systems and non-conventional renewable energy.