

Desempeño de Controladores Inalámbricos Codificados Aplicados en Turbinas Eólicas Conectadas a una Smart Grid

Angelo S. Lunardi, Eduardo V. V. Cambero, Jaqueline G. Cardoso, Ivan R. S. Casella, Alfeu J. Sguarezi Filho, Carlos E. Capovilla*

Universidade Federal do ABC, Av. dos Estados, 5001, 09210-580, Santo Andre, Brasil

Resumen

Actualmente, con el avance de las tecnologías de *smart grid*, la participación de las fuentes renovables en los sistemas energéticos está cambiando para atender las nuevas necesidades y aumentar la eficiencia de los sistemas. Con una visión del contexto de *smart grid*, este trabajo propone la revisión del moderno sistema de control inalámbrico propuesto basado en los generadores de inducción de jaula de ardilla conectados a la red eléctrica. El sistema de comunicación inalámbrico aplicado transmite las señales de potencia de referencia al controlador SCIG con la confiabilidad necesaria para asegurar la calidad de energía proporcionada por el generador eólico con codificación LDPC y OFDM. Los resultados de esta investigación respaldan la operatividad y las ventajas de la aplicación del sistema de control inalámbrico para plantas eólicas cuando son empleados requisitos y técnicas basados en la modulación digital y las técnicas de codificación.

Palabras Clave:

Energías renovables, Ingeniería de control, Sistemas eléctricos y electrónicos de potencia, Comunicaciones y redes de comunicaciones

Performance of Coded Wireless Power Controllers for Wind Turbines Connected to a Smart Grid

Abstract

Nowadays, with the advance of smart grid technologies, the participation of renewable energy in the power systems is changing for attend new requirements and increase efficiency of the systems. With a view of smart grid context, this work proposes the review of a modern wireless control system proposed based on for squirrel cage induction generators connected to the power grid. The wireless communication system applied transmits the reference power signals to the SCIG controller with the necessary reliability to ensure the power quality provided by the wind turbine employing the OFDM multi-carrier transmission technique associated with an LDPC coding scheme. The satisfactory results of this research endorse the operability and advantages of application of wireless control system for windy plants when some requirements and techniques, based on digital modulation and coding techniques, are employees.

Keywords:

Renewable Energy, Control, Power Systems, Communication and communication Networks

1. Introducción

La tecnología de *smart grid* puede considerarse como una evolución de la disposición de energía eléctrica actual. Esta tecnología está compuesta básicamente por una moderna infraestructura bidireccional de generación, transmisión, distribución

y consumo de energía. *Smart Grid* se basa en las nuevas tecnologías de la información y de la comunicación, para llevar a cabo las tareas de seguimiento y control de la red energética. De esta manera puede obtenerse un incremento significativo en la eficiencia, la confiabilidad, la seguridad del suministro y el uso

*Autor para correspondencia: carlos.capovilla@ufabc.edu.br

To cite this article: Angelo S. Lunardi, Eduardo V. V. Cambero, Jaqueline G. Cardoso, Ivan R. S. Casella, Alfeu J. Sguarezi Filho, Carlos E. Capovilla. 2018. Performance of Coded Wireless Power Controllers for Wind Turbines Connected to a Smart Grid. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 15, 448-456. <https://doi.org/10.4995/riai.2017.9100>

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4,0 International (CC BY-NC-ND 4,0)

de energía, con un ahorro de consumo sustancial (Fang et al., 2012; Hashmi et al., 2011).

Con el avance de las tecnologías de *smart grid*, la participación de las fuentes renovables en los sistemas energéticos está aumentando año tras año. La energía eólica se está convirtiendo en un recurso importante entre las fuentes de energía renovables, como una energía limpia que no emite gases de efecto invernadero y por presentar una de las mayores tasas de instalación e inversión en el mundo (COUNCIL, 2016; Janekova et al., 2016).

Las turbinas más utilizadas en sistemas eólicos son los generadores síncronos (SG, del inglés *Synchronous Generators*), generadores de inducción de doble alimentación (DFIG, del inglés *Doubly Fed Induction Generator*) y los generadores de inducción de jaula de ardilla (SCIG, del inglés *Squirrel-Cage Induction Generator*). El SCIG presenta características interesantes como bajos costos, pequeños tamaños, instalación sencilla, robustez y fácil mantenimiento. Estos últimos se utilizan en parques eólicos desde sus primeras aplicaciones, y a pesar de que tradicionalmente trabajan en velocidades fijas, actualmente existe un gran interés científico en estudiar nuevas arquitecturas que permitan su uso en velocidades variables (Trapp et al., 2012; García-Sanz and Torres, 2010).

En los nuevos sistemas eólicos inteligentes, los generadores eólicos deben ser capaces de comunicar y compartir datos para optimizar la generación de energía. El uso de un moderno sistema de comunicación para controlar y monitorear generadores eólicos en estos sistemas, requiere una infraestructura compleja para una operación eficiente. La comunicación inalámbrica presenta una excelente respuesta para transmitir la información de control de potencia a las turbinas eólicas en el escenario *smart grid*, ya que presenta muchos beneficios, tales como bajos costos de despliegue, fácil expansión, alta flexibilidad, mantenimientos simples y administración distribuida (Liu et al., 2013; Charni and Maier, 2014; Gentile et al., 2012).

Sin embargo, el uso de la comunicación inalámbrica en los sistemas de control de energía de los parques eólicos puede generar preocupación, ya que en caso de errores en el proceso de transmisión de la señal de control, se pueden causar daños graves a la red eléctrica y a los generadores. Por esta causa, se hace imprescindible el uso de una arquitectura de comunicación eficiente y fiable para potenciar la disponibilidad y duración del equipamiento (Pereira et al., 2015; Cardoso et al., 2016).

Los errores en el proceso de transmisión de la señal de control de manera inalámbrica, pueden ser eludidos mediante el uso de la técnica de *Forward Error Correction* (FEC). Esta técnica es común en la mayoría de los sistemas digitales inalámbricos modernos y contribuye a garantizar la integridad de la información, porque puede ofrecer un control de errores con un retardo de retransmisión bajo en la transmisión de datos, eliminando casi por completo la tasa de errores de bits (BER) (Proakis, 2008; Lin and Costello, 2004).

En la actualidad, dentro de las comunicaciones inalámbricas, existen varios esquemas de FEC, por ejemplo, la codificación Reed Solomon (RS), la Codificación Convolutiva (CC), *Turbo Coding* (TC) y *Low-Density Parity Check* (LDPC). Los diferentes códigos difieren entre sí en sus aplicaciones y dificultad de implementación.

En la actualidad, la codificación LDPC se ha utilizado am-

pliamente en varios sistemas de comunicaciones debido a sus mejores y más rápidos esquemas de corrección de errores, cerca del límite de Shannons, que se considera como la solución de codificación más potente conocida hoy en día. Sin embargo, los códigos LDPC son complejos y difíciles de implementar. Para mejorar esto, esta técnica ha sido adoptada por IEEE 802.16 de estándares inalámbricos, conocida como Interoperabilidad Mundial para Acceso a Microondas (WiMAX). El WiMAX presenta diversas aplicaciones en servicios de telecomunicaciones, celular y sistema de banda ancha.

La estructura de los códigos WiMAX LDPC se puede describir mediante el uso de la matriz exponencial, especificando la matriz de chequeo de paridad de código. Esta última contiene gran número de ceros y muy pocos dígitos con valor de uno. Por esta razón, los códigos LDPC no sólo permiten un proceso de codificación/decodificación de baja latencia, sino que también provocan un consumo limitado de memoria para el almacenamiento de la matriz de chequeo de paridad en el procesador de señales digitales (Manzoor and Kansal, 2016; Liu et al., 2015; Wang et al., 2016).

Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) es otro elemento importante dentro de los sistemas WiMAX. Esta técnica es muy utilizada debido a su gran flexibilidad y productividad computacional. Las tecnologías OFDM se han convertido en parte integral de numerosos estándares, gracias a su resistencia a la interferencia entre símbolos (ISI, del inglés *Inter Symbol Interference*) y a su eficiente implementación. Además, se utilizan en comunicaciones inalámbricas 3G y 4G, demostrando ser una técnica prometedora para sistemas de comunicación inalámbrica de próxima generación.

En OFDM se utiliza una técnica de transmisión basada en múltiples portadoras para lograr mayores velocidades de transmisión de datos, transmitiendo algunas subportadoras ortogonales que se superponen entre sí (Deepa and Bartalwar, 2016; Hung, 2016; El Chall et al., 2016).

En el contexto de *smart grid*, las utilidades de comunicaciones inalámbricas se propusieron principalmente para el control de potencia de máquinas de viento como DFIG (Costa et al., 2014; Capovilla et al., 2014; Azcue et al., 2012) y Generador de reluctancia conmutada (SRG, del inglés *Switched Reluctance Generator*) (Capovilla et al., 2015). En estos trabajos, el sistema tiene un rendimiento satisfactorio frente a los errores debidos al canal inalámbrico, utilizando para ello, varios tipos de codificación y filtrado. Sin embargo, no se presenta en la bibliografía un análisis profundo para el control de potencia inalámbrico codificado para SCIG conectado a la red usando un sistema OFDM-LDPC.

Este estudio propone el empleo de OFDM-LDPC vinculando distintas áreas de conocimiento, integrando el conocimiento tecnológico en un sistema único y completo. Es decir, se trata de presentar el análisis de una SCIG conectada a la red a través de un convertidor bidireccional *back-to-back*, en el que las señales del sistema de control de las referencias de potencia se envían inicialmente a través de un sistema de comunicación OFDM inalámbrico codificado, en concordancia con el diagrama mostrado en la Figura 1.

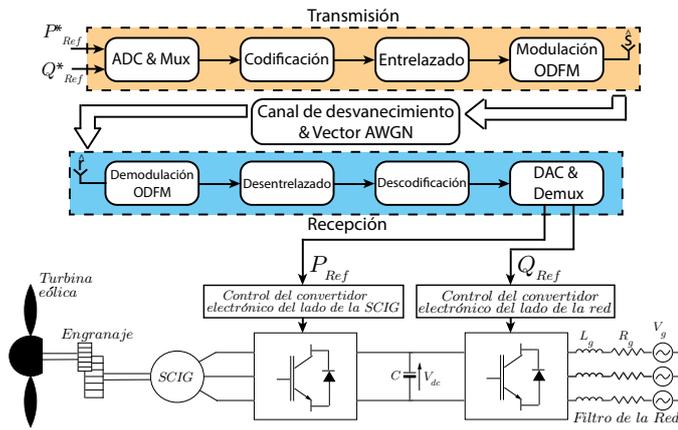


Figura 1: Sistema de conversión de energía y control de potencia inalámbrico de la SCIG conectada a la smart grid.

En este trabajo, los comandos de control de potencias son enviados a través de un canal inalámbrico desde una central de control remota conectada a una Smart Grid. Esta central monitorea la velocidad del viento o la obtiene directamente de la turbina en un instante de tiempo determinado, dependiendo de la distancia. Con los parámetros de la turbina, la central calcula la potencia activa nominal de la máquina en aquel instante de tiempo. Una característica adicional a la operación convencional es que eventualmente, debido a alguna necesidad de la red, se puede enviar un valor de potencia activa menor para atender alguna demanda específica en aquel momento. En el caso de la potencia nominal, sucede lo contrario, o sea, se maximiza la operación para una condición de viento determinada. En relación con la potencia reactiva, las referencias son enviadas al generador por el canal inalámbrico según la necesidad de la red eléctrica de alimentación, pudiendo ser mantenida en un patrón de cero var o con valores distintos de manera que compense un desbalance reactivo de la red.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera. Luego de la sección de introducción, la segunda sección describe brevemente el sistema de energía eólica. La tercera muestra el sistema de comunicación inalámbrico y el modelado del canal. Los resultados y discusiones se presentan en la cuarta y la quinta concluye el trabajo.

2. Modelado del Sistema de Generación Eólica

2.1. Modelo de SCIG y Control Directo del Torque

Resumidamente el SCIG es un tipo de generador de inducción que posee alta robustez y bajo costo de fabricación y mantenimiento. Esto en comparación con DFIG o con una máquina de corriente continua, porque SCIG tiene el rotor enjaulado. Es interesante para aplicaciones en generación eólica con demandas de hasta algunas centenas de Kilowatts.

El modelo dinámico de SCIG se puede describir mediante ecuaciones diferenciales que muestran el comportamiento dinámico en un marco de referencia estacionario, los ejes $\alpha\beta$ se pueden representar matemáticamente con las ecuaciones:

$$\vec{v}_{1,\alpha\beta} = R_1 \vec{i}_{1,\alpha\beta} + \frac{d\vec{\lambda}_{1,\alpha\beta}}{dt} \quad (1)$$

$$0 = \vec{v}_{2,\alpha\beta} = R_2 \vec{i}_{2,\alpha\beta} + \frac{d\vec{\lambda}_{2,\alpha\beta}}{dt} - j(N_p \omega_{mec}) \vec{\lambda}_{2,\alpha\beta} \quad (2)$$

$$\vec{\lambda}_{1,\alpha\beta} = L_1 \vec{i}_{1,\alpha\beta} + L_m \vec{i}_{2,\alpha\beta} \quad (3)$$

$$\vec{\lambda}_{2,\alpha\beta} = L_m \vec{i}_{1,\alpha\beta} + L_2 \vec{i}_{2,\alpha\beta} \quad (4)$$

Donde, el subíndice 1 y 2 se refiere al estator y al rotor respectivamente, \vec{v} son los vectores de tensión, \vec{i} son los vectores de corrientes. R son las resistencias eléctricas, L son las inductancias de la máquina y L_m es la inductancia de la magnetización. N_p es el número de pares de polos y ω_{mec} es la velocidad de rotación mecánica en el rotor.

El par electromagnético puede calcularse mediante la Ecuación (5).

$$T_e = \frac{3}{2} N_p \Im m[\vec{\lambda}_{1,\alpha\beta}^* \cdot \vec{i}_{1,\alpha\beta}] \quad (5)$$

donde, el superíndice * indica el complejo conjugado (Hernandez Navas et al., 2015; Abad et al., 2011). Además, la máquina dinámica puede ser descrita por la Ecuación (6)

$$J \frac{d\omega_{mec}}{dt} = T_e - T_{mec} \quad (6)$$

donde J es la inercia del eje mecánico, T_{mec} es el par mecánico y T_e es el par electromagnético.

2.2. Control Directo del Torque

El Control Directo del Torque (DTC, del inglés *Direct Torque Control*) es una estrategia de control vectorial cuyo enfoque es controlar tanto el flujo del estator (λ_1) como el par electromagnético (T_e). El control se logra mediante el voltaje aplicado a los terminales del estator. Por lo tanto, el controlador cambia el flujo del estator y el ángulo (θ_T) entre el flujo del rotor y del estator, por lo que el T_e puede controlarse manipulando el ángulo θ_T , representado matemáticamente por la Ecuación (7) (Takahashi and Noguchi, 1986; Rodriguez et al., 2004)

$$T_e = \frac{3}{2} N_p \frac{L_m}{L_1 L_2 \sigma} \lambda_1 \lambda_2 \sin(\theta_T) \quad (7)$$

De acuerdo con la Ecuación (7) es necesario estimar el estator y el flujo del rotor, estos se pueden obtener mediante las Ecuaciones (8) y (9),

$$\vec{\lambda}_{1,\alpha\beta} = \int (\vec{v}_{1,\alpha\beta} - r_1 \vec{i}_{1,\alpha\beta}) dt \quad (8)$$

$$\vec{\lambda}_{2,\alpha\beta} = \frac{L_2}{L_M} \vec{\lambda}_{1,\alpha\beta} - \frac{L_1 L_2}{L_m} \sigma \vec{i}_{1,\alpha\beta} \quad (9)$$

$$\text{donde : } \sigma = 1 - \left(\frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right)$$

El diagrama de bloques para el control DTC se presenta en la Figura 2. Donde el par de referencia T_{eRef} se obtiene de una división entre P_{Ref} y ω , donde ω es la velocidad medida. El ángulo de carga se obtiene del bucle de control del par electromagnético y matemáticamente está dado por:

$$\theta_T = (K_p + \frac{K_i}{s})(T_{eRef} - T_{e_est}) \quad (10)$$

La referencia de flujo del estator se calcula mediante el ángulo (θ_T) presentado en la Ecuación (10) y la magnitud deseada del flujo del estator se calcula con la siguiente ecuación:

$$\vec{\lambda}_1 = |\lambda_{1Ref}| \cos(\theta_T + \angle \lambda_{2est}) + j|\lambda_{1Ref}| \sin(\theta_T + \angle \lambda_{2est}) \quad (11)$$

La tensión a ser aplicada en el estator viene dada por:

$$\vec{v}_{1,\alpha\beta Ref} = (K_p + \frac{K_i}{s})(\vec{\lambda}_1 - \vec{\lambda}_{1 est}) \quad (12)$$

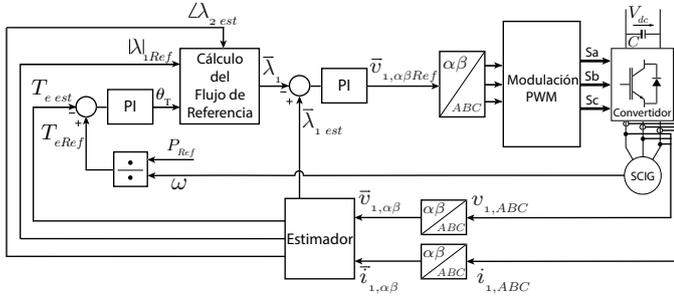


Figura 2: Diagrama en bloques para el control de torque directo basado en el ángulo de carga.

La tensión del estator $\vec{v}_{1,\alpha\beta Ref}$ se transforma en $v_{1,ABCRef}$ mediante la transformación de Clarke inversa, porque ya tiene $\alpha\beta$ como referencia, y los voltajes se modulan usando una sinusoide con modulación por ancho de pulso, (SPWM del inglés, *Sinusoidal Pulse Width Modulation*) (Wu et al., 2011).

2.3. Modelo de la grid y Control Orientado al Voltaje

El Control Orientado al Voltaje (VOC, del inglés *Voltage Oriented Control*) para el lado de la red tiene como objetivo mantener constante el voltaje de DC-link y controlar la potencia activa y reactiva inyectada a la red eléctrica. Esta estrategia utiliza el voltaje de la red en una referencia síncrona para convertir las variables $v_d = |v_g|$ y $v_q = 0$, por lo que las Ecuaciones de potencia (13) y (14) pueden ser simplificadas y representadas por las expresiones (15) y (16).

$$P = \frac{3}{2} \Re[\vec{v}_g \vec{i}_g^*] \quad (13)$$

$$Q = \frac{3}{2} \Im[\vec{v}_g \vec{i}_g^*] \quad (14)$$

donde, el superíndice * indica el complejo conjugado, P es la potencia activa, Q es la potencia reactiva.

$$P = \frac{3}{2} [v_d i_d] \quad (15)$$

$$Q = -\frac{3}{2} [v_d i_q] \quad (16)$$

La Figura 3 muestra el diagrama en bloques del controlador que actúa sobre el convertidor lateral de la red de alimentación. Esta red contiene un bucle del controlador PI para generar la referencia de potencia activa según la Ecuación (17)

$$P_{Ref} = (K_p + \frac{K_i}{s})(v_{dc} - v_{dcRef}) \quad (17)$$

La referencia de potencia activa se multiplica por una constante $\frac{1}{3/2v_d}$, que determina la corriente de referencia (i_{dRef}).

El error obtenido en la comparación con la corriente actual (i_d) también se procesa a través de otro controlador PI dado por:

$$u_d = (K_p + \frac{K_i}{s})(i_{dRef} - i_d) + v_d - \omega_g L_g i_q \quad (18)$$

donde, ω_g es la frecuencia angular de la red.

Después de calcular el valor de u_d , la potencia reactiva de referencia (Q_{qRef}) del sistema de potencia, se multiplica por una constante $\frac{-1}{3/2v_d}$ la cual determina la corriente de referencia (i_{qRef}), luego usando el proceso del controlador PI y comparando el error entre la corriente real (i_q) y su referencia, se calcula el voltaje (u_q) usando:

$$u_q = (K_p + \frac{K_i}{s})(i_{qRef} - i_q) + v_q + \omega_g L_g i_d \quad (19)$$

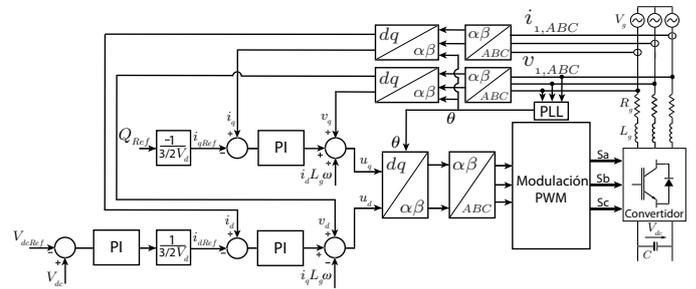


Figura 3: Diagrama en bloques para el control orientado a voltaje.

Como las tensiones del estator U_d y U_q están referenciadas a dp la transformación en $v_{1,ABCRef}$ utiliza la transformada inversa de Park y Clarke, y las tensiones se modulan usando un SPWM. Para la transformación de Park es necesario utilizar una *Phase-locked Loop* (PLL) y generar el ángulo de fase de la red.

2.4. Modelado del Sistema de Comunicación Inalámbrica

El sistema de comunicación inalámbrica, presentado en la Figura 1, es responsable de enviar la información de referencia de potencia desde el control central al generador eólico. Este sistema considera los esquemas de codificación LDPC (Gallager, 1963; Zhang and Ryan, 2009) y transmisión por multiporadoras OFDM (Proakis, 2008) en canales de desvanecimiento selectivos de frecuencia con el objetivo de obtener mejores resultados con alta fiabilidad (Casella, 2007).

Los bloques de códigos LDPC son códigos lineales definidos por la matriz H de chequeo de paridad dispersa con (N_c, N_b) códigos binarios de bloques lineales, donde cada bit y cada ecuación de chequeo de paridad en la palabra de código, corresponde a un nodo variable y a un nodo de chequeo, respectivamente. El nodo de verificación j está conectado a un nodo variable k (Tanner, 1981; Lin and Costello, 2004).

Los códigos *extended Irregular Repeat-Accumulate* (eIRA) se insertan en el esquema de codificación logrando códigos de alta velocidad con niveles de errores muy bajos. Esto mejora el rendimiento del LDPC. (Jin et al., 2000; Zhang and Ryan, 2009). La matriz de chequeo de paridad reformulada es:

$$H = [H_1 \quad H_2] \quad (20)$$

donde H_1 es una matriz esparcida N_m por N_c , que puede ser formada irregularmente por la evolución de la densidad siguiendo la óptima distribución de pesos (Zhang et al., 2005); H_2 es la matriz doble cuadrada diagonal N_m por N_m ; N_b es el número de bits de control; N_c es el número de bits codificados; y N_m es el número de bits de paridad.

La matriz generadora de la matriz de chequeo de paridad H , puede representarse en la forma sistemática por la matriz de la forma N_b por N_c , dada por:

$$G = [I \quad \psi] \quad (21)$$

donde I es la matriz de identidad, $\psi = H_1^T \times H_2^{-T}$, y H_2^{-T} es la matriz triangular superior. Los códigos LDPC pueden descodificarse iterativamente usando algoritmos de *message-passing*, y el intercambio de mensajes tiene lugar en varias rondas o interacciones.

Por otra parte, OFDM es una técnica eficiente de transmisión de datos a través de canales selectivos de frecuencia. En OFDM, la transformada inversa discreta de Fourier (IDFT, del inglés *Inverse Discrete Fourier Transform*) y la Transformada de Fourier Discreta (DFT, del inglés *Discrete Fourier Transform*) se utilizan respectivamente para modular y demodular cada símbolo de datos de baja velocidad en una subportadora ortogonal diferente.

El proceso de codificación se realiza multiplicando el vector de información de control $q_b = [q_b(0)...q_b(N_b - 1)]^T$ por la matriz esparcida H_1^T y luego codificando diferencialmente este resultado parcial para obtener los bits de paridad. El vector sistemático de palabras de código $q_c = [q_c(0)...q_c(N_c - 1)]^T$ se logra combinando la información de control y los bits de paridad.

En el proceso de transmisión, para cada trama transmitida, el vector de palabras de código se entrelaza y se asigna a símbolos QPSK utilizando codificación Gray (Proakis, 2008) para mejorar el rendimiento en el funcionamiento del sistema. El vector resultante, que se compone de N_s símbolos QPSK, se divide en los subvectores V de N_s símbolos QPSK $q_s^v = [q_s^v(0)...q_s^v(N_f - 1)]^T$, donde $0 < v < 1$. Después, cada subvector es sometido a una operación de IFFT para dar como resultado el correspondiente vector de símbolo OFDM $q_f^v = [q_f^v(0)...q_f^v(N_f - 1)]^T$.

Los símbolos CP se añaden a cada vector de símbolos OFDM para desacoplar las transmisiones en el dominio de frecuencia en el receptor (convirtiendo una convolución lineal en una operación de convolución circular), culminando en el vector de símbolo de transmisión $\vec{s} = [\vec{s}(-N_{cp})... \vec{s}(N_f - 1)]^T$, donde N_{cp} es el número de símbolos de CP. Por último, la trama compuesta por todos los vectores de símbolos de transmisión es convertida, filtrada y transmitida por la antena.

En el proceso de recepción, considerando que la duración del CP es más larga que la propagación de retardo del canal de desvanecimiento, puede demostrarse que la señal demodulada paso-bajo compleja de tiempo discreto equivalente, es de la forma de la Ecuación (22) para cada vector de transmisión, después de las operaciones de eliminación de CP y FFT (Casella, 2007).

$$\vec{r} = \vec{j} \cdot \vec{s} + \vec{w} \quad (22)$$

donde $\vec{r} = [\vec{r}(0)... \vec{r}(N_f - 1)]^T$ es el vector recibido; $\vec{j} = [\vec{j}(0)... \vec{j}(N_f - 1)]^T$ es el vector de respuesta en frecuencia relacionado con el canal de desvanecimiento selectivo de frecuencia variable en el tiempo; y $\vec{w} = [\vec{w}(0)... \vec{w}(N_f - 1)]^T$ es el vector de ruido blanco gaussiano aditivo. Ahora se predice cada vector de símbolo QPSK q_s^v transmitido, considerando los criterios de *one-tap* FDE basados en *least squares* (LS), los bits de control transmitidos pueden recuperarse realizando desmapeado de símbolos, desintercalado de código y decodificación de bits. La decodificación puede realizarse mediante un algoritmo de *message-passing* (Richardson et al., 2001), (Dinoi et al., 2008), (Shuval and Sason, 2010) basado en el criterio máximo a posteriori (Lin and Costello, 2004), que intercambia iterativamente la información suave entre la variable y los nodos de chequeo.

Los mensajes intercambiados pueden ser descritos por la siguiente relación *Log-likelihood* (LLR):

$$L_{C_k} = \log \left[\frac{p(q_c(k) = 0|d)}{p(q_c(k) = 1|d)} \right] \quad (23)$$

Donde d es el vector de bits codificados resultante de los procesos de demodulación y desentrelazado.

El mensaje LLR desde el j -ésimo nodo de chequeo al nodo de la k -ésima variable se obtiene con la ecuación

$$L_{r_{jk}} = 2 \operatorname{atanh} \left[\prod_{k' \in V_{j,k}} \tanh \left(\frac{L_{r_{k',j}}}{2} \right) \right] \quad (24)$$

El conjunto V_j contiene los nodos variables conectados al j -ésimo nodo de comprobación, y el conjunto C_k contiene los nodos de chequeo conectados al k -ésimo nodo variable. V_{jk} es el conjunto V_j sin el k -ésimo elemento, y C_{kj} es el conjunto C_k sin el j -ésimo elemento. El mensaje LLR del k -ésimo nodo variable al j -ésimo nodo de chequeo viene dado por

$$L_{q_{k,j}} = L_{C_k} + \sum_{j' \in V_{j,k}} L_{r_{j',k}} \quad (25)$$

Y el LLR para el k -ésimo bit de código se obtiene por

$$L_{Q_k} = L_{C_k} + \sum_{j \in C_k} L_{r_{jk}} \quad (26)$$

Al final de cada iteración, L_{Q_k} organiza una estimación actualizada del LLR a posteriori del bit codificado transmitido $q_c(k)$. Si $L_{Q_k} > 0$, entonces $\hat{q}_c(k) = 1$, en cualquier otro caso $\hat{q}_c(k) = 0$.

3. Análisis de los Resultados

El rendimiento de la arquitectura propuesta en la Figura 1 se analizó mediante un modelo computacional desarrollado con la herramienta *Simulink* del *software* MATLAB. El sistema propuesto fue probado bajo diferentes condiciones de potencia activa (P_{Ref}) y reactiva (Q_{Ref}), tal como se presenta en la Tabla 1. Los parámetros de máquina y convertidor utilizados en los análisis presentados en esta sección se enumeran en las Tablas A.4 y A.5 del Apéndice. Durante los análisis, la velocidad del SCIG se mantiene constante a 188 rad/s. Las referencias se transmiten al controlador de potencia SCIG a través del sistema de comunicación inalámbrica mostrado en la sección anterior.

Tabla 1: Referencias de potencia activa y reactiva.

Tiempo (s)	0	1.2	1.2	1.75	1.75	2.5
P_{Ref} (kW)	-1.5	-1.5	-2.5	-2.5	-3.0	-3.0
Tiempo (s)	0	0.6	0.6	1.4	1.4	2.5
Q_{Ref} (kVAR)	0	0	-0.95	-0.95	1.06	1.06

Para los análisis de la simulación, se modela un canal de Rayleigh de desvanecimiento selectivo en frecuencia. Este canal está conformado por dos componentes principales con multitrayectoria y no correlacionadas, debido a la propagación por trayectos múltiples y al ruido blanco gaussiano. El sistema inalámbrico emplea un FDE-LS con *one-tap* basado en la estimación perfecta del canal, así como un esquema CC común con un polinomio generador (171, 133) de longitud de restricción 7. Otros parámetros se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros del Sistema Inalámbrico.

Frecuencia de la Portadora	2.45 GHz
Dispersión Doppler	180 Hz
Codificación eIRA	(64 800; 32 400)

Las características de los esquemas de codificación se presentan en la Tabla 3. Cada trama transmitida está compuesta por 36 símbolos OFDM (cada uno obtenido por la IFT de un vector compuesto por 900 símbolos QPSK codificados diferentes y 124 símbolos en cero de relleno) con el CP correspondiente (cada uno obtenido por los últimos 128 elementos del respectivo vector de símbolo OFDM), donde N_f es 1024 y N_{cp} es 128.

Tabla 3: Características del esquema de codificación.

Tasa de Código	1/2
Longitud del entrelazado aleatorio	64800
Duración del bit	8.104s

El número de iteraciones en la decodificación LDPC está limitado a 25. En esta sección, se considera una E_b/N_0 de 10,0dB para los resultados presentados.

En primer lugar, se analiza el control inalámbrico basado en la técnica OFDM y el esquema CC (OFDM-CC). La respuesta de torque del SCIG, para las variaciones especificadas en las referencias de potencia y velocidad de la máquina, se muestra en la Figura 4.

Es posible observar que hay algunos picos que no siguen la referencia, esto se debe a una variación repentina en la referencia, que hace que el ángulo generado por el controlador PI sea diferente con respecto a la posición real del flujo del rotor, entonces cambia el módulo del flujo cambiando consiguientemente el torque generado.

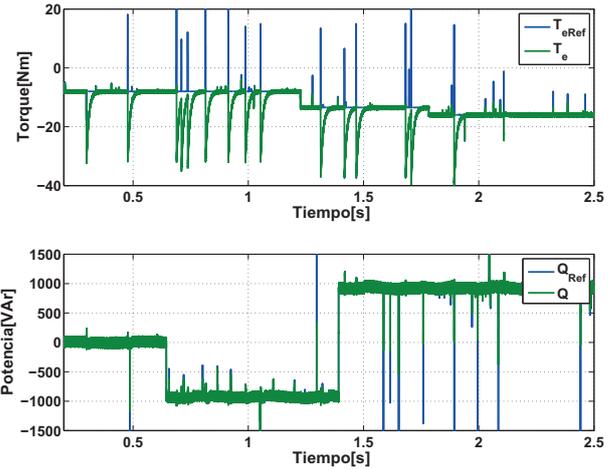


Figura 4: Respuesta de torque SCIG y referencia de potencia reactiva aplicando OFDM-CC.

La potencia reactiva suministrada por el convertidor conectado a la red eléctrica se muestra en la Figura 4b, mientras que en la Figura 5 son presentadas las corrientes en el sistema de referencia dq (i_d y i_q). Se pueden observar picos en la respuesta generada por el sistema de comunicación inalámbrico, debido a los efectos destructivos del canal en la señal transmitida, incluso con el uso de un esquema de corrección de errores muy eficiente como OFDM-CC.

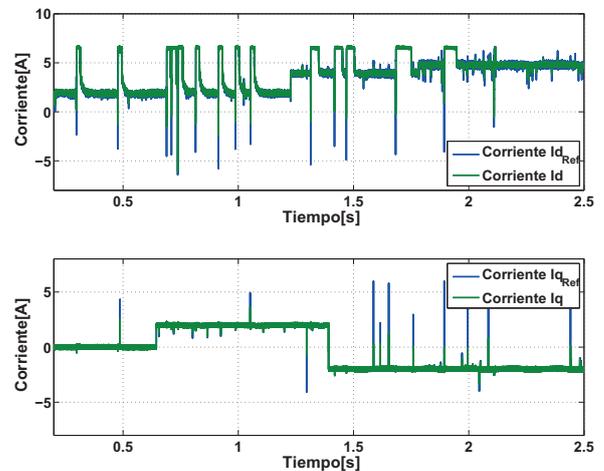


Figura 5: Referencias de Corrientes i_d e i_q aplicando OFDM-CC.

En la Figura 6 se presenta el voltaje de DC. En los resultados anteriores, así como en los de la Figura 7, también hay oscilaciones y variaciones abruptas, con deformaciones en las formas de onda actuales enviadas a la red. En la Figura 8, se observa la distorsión armónica total (THD, del inglés *Total Harmonic Distortion*) de la señal de corriente de fase mediante el análisis de la *Fast Fourier Transformed* (FFT), el resultado de rendimiento es 15,92 %, lo que demuestra un alto número de errores.

Los picos y componentes armónicos presentes en los resultados son consecuencias de errores en la comunicación

inalámbrica, debido a los efectos destructivos del canal en la señal transmitida y también debido al hecho de que el controlador no tiene robustez frente a estos errores. Dichos errores pueden causar varios daños en el sistema completo, por ejemplo, minimizar la vida útil del condensador en el circuito intermedio o un mal funcionamiento del convertidor VSC.

Los picos en la respuesta generada por el sistema inalámbrico también causan distorsiones en las formas de onda de corriente enviadas a la red. Para la implementación de la arquitectura OFDM-CC en el sistema energético, es necesario utilizar un sistema de control inalámbrico capaz de solucionar los problemas de oscilaciones y variaciones abruptas.

Las simulaciones en MATLAB se repitieron para analizar el sistema de control inalámbrico propuesto, el cual emplea la técnica OFDM y el esquema de codificación LDPC (OFDM-LDPC). En la Figura 9 se presenta la respuesta de torque del SCIG para las variaciones especificadas en las referencias de potencia y velocidad de máquina. La Figura 9b muestra la respuesta de potencia reactiva suministrada por el convertidor conectado a la red, considerando el esquema de codificación LDPC, mientras que en la Figura 10 son presentadas las corrientes con referencia dq (id e iq).

La señal de potencia y el factor de potencia son seguidos correctamente por el controlador, demostrando los buenos resultados y la robustez del sistema de control de potencia inalámbrico basado en la codificación LDPC, ya que no hay casos de errores en las referencias recuperadas en el SCIG.

El voltaje V_{dc} no tiene distorsiones en las respuestas, como se muestra en la Figura 11. En la Figura 12 se ilustra la calidad de la energía enviada a la red. También es posible observar que la amplitud de la corriente durante un periodo de 1,68s hasta 1,75s es superior a los otros periodos. Esto se debe a que la referencia de corriente id tiene un paso provocado por la variación en el voltaje del enlace DC, causada por la influencia del ruido sobre el torque. Finalmente, en la Figura 13 se demuestra la reducción de la distorsión armónica en la energía eléctrica, se puede observar que el THD disminuye de 15,92 % a 2,41 %, quedando dentro de los requisitos establecidos para la conexión a la red eléctrica.

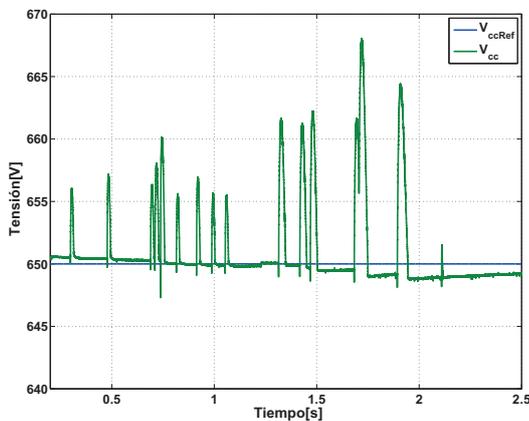


Figura 6: Tensión de control DC aplicando OFDM-CC.

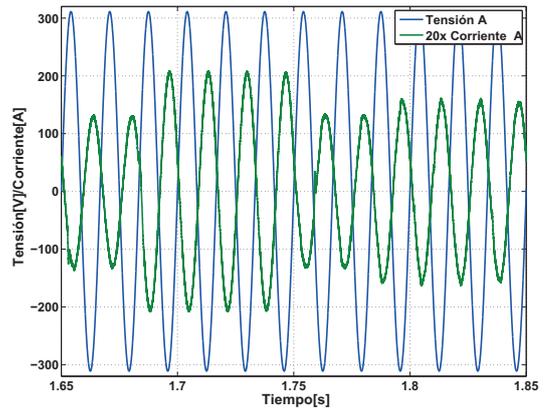


Figura 7: Tensión y corriente de fase de la red aplicando OFDM-CC.

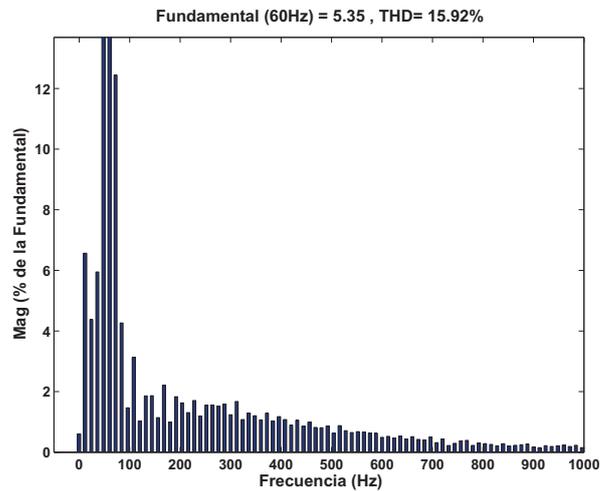


Figura 8: THD de corriente de fase aplicando OFDM-CC.

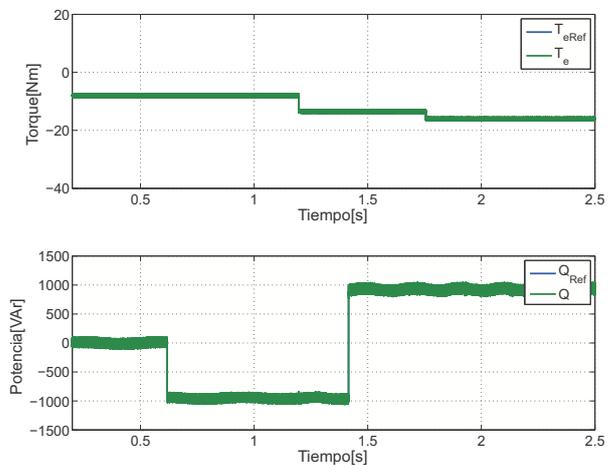


Figura 9: Referencias de la respuesta de torque del SCIG y de la potencia reactiva aplicando OFDM-LDPC.

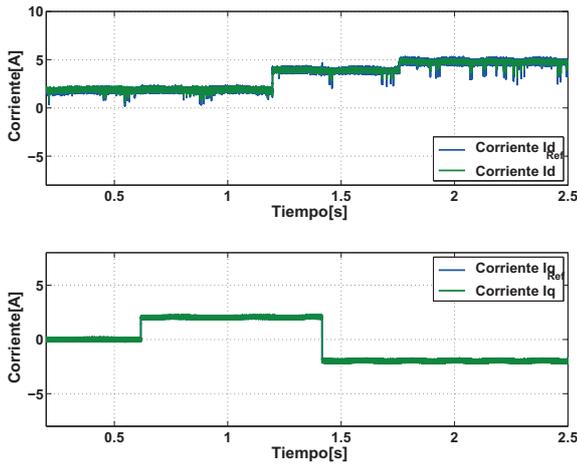


Figura 10: Referencias de las corrientes i_d e i_q aplicando OFDM-LDPC.

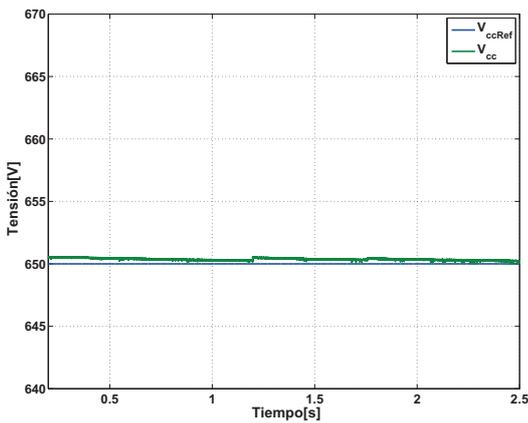


Figura 11: Voltaje de control de DC aplicando OFDM-LDPC.

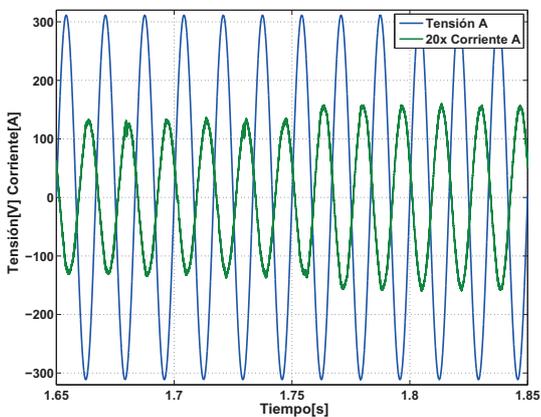


Figura 12: Voltaje y corrientes de fase de la red aplicando OFDM-LDPC.

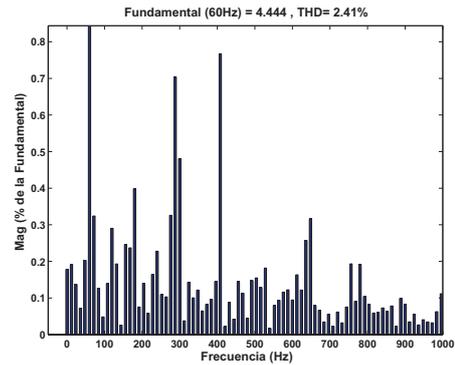


Figura 13: THD de la corriente de fase aplicando OFDM-LDPC.

4. Conclusiones

En esta contribución se presentó una investigación sobre la transmisión de referencias de potencia a través de un canal de comunicación inalámbrica para controlar de forma remota un SCIG operando a velocidad variable. En el sistema convertidor se emplearon técnicas DTC y VOC, y el sistema de comunicaciones emplea la técnica de transmisión por multiportadora OFDM y el esquema de codificación LDPC.

En el primer análisis se utilizó a técnica OFDM con una codificación CC convencional en el sistema de comunicación, sin embargo, con esta arquitectura la potencia activa y reactiva generada por el SCIG enviado a la red no presentó resultados satisfactorios. Estos resultados mostraron variaciones con picos y bajo THD, con un rendimiento fuera de los requerimientos y de la calidad necesaria para la energía a ser entregada a la red. Además, estas variaciones pueden causar daños permanentes en los componentes de la turbina y los convertidores.

Siguiendo la tendencia de comunicación de *smart grid*, se utilizó la codificación LDPC en el canal inalámbrico. Esta técnica presenta un mejor rendimiento, incluso bajo ruido severo y condiciones de desvanecimiento, evitando los errores en el sistema total.

En este trabajo se ha presentado la viabilidad operacional de la comunicación inalámbrica OFDM-LDPC para implementaciones de control de potencia SCIG. Esta aplicación es factible, pero requiere un análisis meticuloso de los diversos parámetros de la red inalámbrica de datos para garantizar que la energía entregada a la red cumpla con la calidad y fiabilidad requeridas.

Agradecimientos

FAPESP, CNPq y UFABC por el apoyo financiero.

Referencias

Abad, G., Lopez, J., Rodríguez, M., Marroyo, L., Iwanski, G., 2011. Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation. Vol. 85. John Wiley & Sons.

Azcue, J. L., Filho, A. J. S., Capovilla, C. E., Casella, I. R. S., Ruppert, E., 2012. A wind energy generator for smart grid applications using wireless coding neuro-fuzzy power control. International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 525–530.

Capovilla, C. E., Casella, I. R. S., Filho, A. J. S., Azcue, J. L., Jacomini, R. V., Ruppert, E., December 2014. A wind energy generator for smart grid applications using wireless-coded neuro-fuzzy power control. Computers & Mathematics with Applications 68 (12), 2112–2123.

- Capovilla, C. E., Casella, I. R. S., Filho, A. J. S., dos Santos Barros, T. A., Filho, E. R., Jan 2015. Performance of a direct power control system using coded wireless ofdm power reference transmissions for switched reluctance aerogenerators in a smart grid scenario. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 62 (1), 52–61.
- Cardoso, J. G., Casella, I. R. S., Capovilla, C. E., Sguarezi Filho, A. J., 2016. Comparison of wireless power controllers for induction aerogenerators connected to a smart grid based on gprs and egprs standards. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems* 27 (3), 328–338.
- Casella, I. R., 2007. Analysis of turbo coded ofdm systems employing space-frequency block code in double selective fading channels. In: *Microwave and Optoelectronics Conference, 2007. IMOC 2007. SBMO/IEEE MTT-S International*. IEEE, pp. 516–520.
- Charni, R., Maier, M., 2014. Total cost of ownership and risk analysis of collaborative implementation models for integrated fiber-wireless smart grid communications infrastructures. *IEEE Transactions on Smart Grid* 5 (5), 2264–2272.
- Costa, F. F., Filho, A. J. S., Capovilla, C. E., Casella, I. R. S., Feb. 2014. Morphological filter applied in a wireless deadbeat control scheme within the context of smart grids. *Electr. Power Syst. Res.* 107, 175–182.
- COUNCIL, G. W. E., 2016. *Global Wind Report Annual Market Update 2015*.
- Deepa, T., Bartalwar, S., 2016. Performance analysis of coded ofdm for optical wireless communication system. *Indian Journal of Science and Technology* 9 (38).
- Dinoi, L., Sottile, F., Benedetto, S., 2008. Design of versatile eira codes for parallel decoders. *IEEE Transactions on Communications* 56 (12), 2060–2070.
- El Chall, R., Nouvel, F., Héland, M., Liu, M., 2016. Performance and complexity evaluation of iterative receiver for coded mimo-ofdm systems. *Mobile Information Systems* 2016.
- Fang, X., Misra, S., Xue, G., Yang, D., 2012. Smart grid the new and improved power grid: A survey. *IEEE communications surveys & tutorials* 14 (4), 944–980.
- Gallager, R., 1963. *Low density parity check codes, research monograph series*.
- García-Sanz, M., Torres, E., 2010. Control y experimentación del aerogenerador síncrono multipolar de velocidad variable twt1650. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 1 (3), 53–62.
- Gentile, C., Griffith, D., Souryal, M., 2012. Wireless network deployment in the smart grid: design and evaluation issues. *IEEE Network* 26 (6), 48–53.
- Hashmi, M., Hanninen, S., Maki, K., 2011. Survey of smart grid concepts, architectures, and technological demonstrations worldwide. In: *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America), 2011 IEEE PES Conference on*. IEEE, pp. 1–7.
- Hernandez Navas, M. A., Azcue Puma, J. L., Sguarezi Filho, A. J., 2015. Direct torque control for squirrel cage induction generator based on wind energy conversion system with battery energy storage system. In: *Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA), 2015 IEEE Workshop on*. IEEE, pp. 1–6.
- Hung, H.-L., 2016. Adaptive resource allocation algorithm based on minimize average bit-error-rate for ofdm systems. *Wireless Personal Communications*, 1–22.
- Janekova, J., Fabianova, J., Rosova, A., et al., 2016. Environmental and economic aspects in decision making of the investment project wind park 13 (1), 90–100.
- Jin, H., Khandekar, A., McEliece, R., 2000. Irregular repeat-accumulate codes. In: *Proc. 2nd Int. Symp. Turbo codes and related topics*. Citeseer, pp. 1–8.
- Lin, S., Costello, D. J., 2004. *Error control coding*. Pearson Education India.
- Liu, H., Huang, Q., Deng, G., Chen, J., 2015. Quasi-cyclic representation and vector representation of rs-ldpc codes. *IEEE Transactions on Communications* 63 (4), 1033–1042.
- Liu, N., Chen, J., Zhu, L., Zhang, J., He, Y., 2013. A key management scheme for secure communications of advanced metering infrastructure in smart grid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 60 (10), 4746–4756.
- Manzoor, M., Kansal, L., 2016. Performance assessment of wimax using diverse fec schemes over fading channels. *Indian Journal of Science and Technology* 9 (33).
- Pereira, S. C., Caporali, A. S., Casella, I. R., 2015. Power line communication technology in industrial networks. In: *Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 2015 International Symposium on*. IEEE, pp. 216–221.
- Proakis, J. G., 2008. *Digital communications*. McGraw-Hill, New York.
- Richardson, T. J., Shokrollahi, M. A., Urbanke, R. L., 2001. Design of capacity approaching irregular low-density parity-check codes. *IEEE transactions on information theory* 47 (2), 619–637.
- Rodríguez, J., Pontt, J., Silva, C., Kouro, S., Miranda, H., 2004. A novel direct torque control scheme for induction machines with space vector modulation. In: *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*. Vol. 2. IEEE, pp. 1392–1397.
- Shuval, B., Sason, I., 2010. On the universality of ldpc code ensembles under belief propagation and ml decoding. In: *Electrical and Electronics Engineers in Israel (IEEEI), 2010 IEEE 26th Convention of*. IEEE, pp. 000355–000359.
- Takahashi, I., Noguchi, T., 1986. A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor. *IEEE Transactions on Industry Applications* (5), 820–827.
- Tanner, R., 1981. A recursive approach to low complexity codes. *IEEE Transactions on information theory* 27 (5), 533–547.
- Trapp, J., Farret, F., Fernandes, F., Correa, L., Wechenfelder, C., 2012. Variable speed wind turbine using the squirrel cage induction generator with reduced converter power rating for stand-alone energy systems. In: *Industry Applications (INDUSCON), 2012 10th IEEE/IAS International Conference on*. IEEE, pp. 1–8.
- Wang, X., Ge, T., Wang, Y., Li, Z., Sarkar, N. I., 2016. Qc-ldpc encoder structure for ieee 802.16 e/802.11 n standard. *International Journal of Control and Automation* 9 (7), 273–280.
- Wu, B., Lang, Y., Zargari, N., Kouro, S., 2011. Power conversion and control of wind energy systems. *John Wiley & Sons*.
- Zhang, Y., Ryan, W. E., 2009. Toward low ldpc-code floors: a case study. *IEEE Transactions on Communications* 57 (6), 1566–1573.
- Zhang, Y., Ryan, W. E., Li, Y., 2005. Structured eira codes with low floors. In: *Proceedings. International Symposium on Information Theory, 2005. ISIT 2005*. IEEE, pp. 174–178.

Apéndice A. Parámetros del SCIG y de la Red

Tabla A.4: Parámetros del SCIG.

Parámetros	Valor	Unidad
P	3000	[W]
V	380	[V]
Velocidad	1750	[rpm]
Torque Nominal	16	[Nm]
Flujo Nominal	0,8	[Wb/esp]
Número de Polos	4	[-]
f	60	[Hz]
R_1	1,115	[Ω]
L_1	209,7	[mL]
R_2	1,083	[Ω]
L_2	209,7	[mL]
Lm	203,7	[mL]
J	0,05	[kgm ²]
f_o	12	[kHz]

Tabla A.5: Parámetros de la Red.

Parámetros	Valor	Unidad
P	3000	[Wh]
V_{RMS}	220	[V]
L_g	22	[mL]
C	2040	[μF]
f_o	12	[kHz]