

SELECCIÓN DE UN PROTOCOLO DE *POWER LINE COMMUNICATIONS* APLICADO A AEROGENERADOR BAJO CONDICIONES CLIMÁTICAS SEVERAS

SELECTION OF POWER LINE COMMUNICATIONS PROTOCOL APPLIED TO A WIND TURBINE UNDER SEVERE CLIMATE CONDITIONS

A. L. Ibarreta Fañanas^{*1} y M. B. Lavorato²

¹Grupo GATHIR, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Cruz
Av. Inmigrantes 555 (9400), Santa Cruz, Argentina.

²Grupo TAMA, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo
París 532, Haedo (1706), Prov. Buenos Aires, Argentina.

Recibido: 05/12/2020 ; Aceptado: 28/02/2021

El presente artículo tiene como fin el estudio preliminar para la selección de uno o más protocolos o estándares de comunicación utilizando la técnica *Power Line Communications*, para poder generar una comunicación *full duplex* entre un aerogenerador y un centro de control alimentado por el mismo aerogenerador, con la peculiaridad de que el mencionado aerogenerador se encuentra ubicado en una zona remota de la Patagonia Austral, trabajando bajo condiciones climáticas severas.

Palabras Clave: *Power Line Communications*, protocolo, aerogenerador, condiciones climáticas severas.

The main purpose of this paper is to study the preliminary selection of one or more Power Line Communications protocols or standards, to be used in a full duplex communication between a wind turbine and a command center powered by this wind turbine. This situation considers that the wind turbine is located in an isolated area in the Patagonia Austral region, working under severe climate conditions.

Keywords: *Power Line Communications*, protocol, wind turbine, severe climate conditions.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2021.32.2.55>



ISSN 1850-1168 (online)

I. INTRODUCCIÓN

La técnica conocida como *Power Line Communication* (PLC) se basa en la utilización del mismo conductor de alimentación de energía como canal de comunicación. De esta forma, no se necesita realizar una instalación de comunicación extra si lo que se desea es enviar o recibir un mensaje.

Debe considerarse que esta técnica trae la complejidad que, dado que el canal de comunicaciones no está preparado para el envío de mensajes, se deben zanjar ciertas complicaciones que no existirían en otros tipos de comunicaciones. De la misma forma, al montar un mensaje sobre la señal de energía, puede degradar la calidad de la energía que se está transportando. A pesar de los inconvenientes que presenta, la técnica PLC está ganando cada vez más terreno en las comunicaciones, mostrando su aplicación en diferentes situaciones que otras técnicas no podrían resolver con la misma eficacia o con mayor inversión.

A lo largo de este trabajo se presentan los retos que la comunicación deseada deberá afrontar, teniendo en cuenta que la zona de emplazamiento del aerogenerador a comunicar es en la Patagonia Austral, donde deberá trabajar bajo condiciones climáticas severas que se expondrán con posterioridad.

También se tomaron por adelantado ciertas consideraciones respecto a las características del tipo de aerogenerador que se utilizará en esta comunicación.

El mensaje a comunicar, informa el estado general del aerogenerador. Estos datos serán aportados por una cierta cantidad de sensores, que también se describen en este artículo. El número de sensores a utilizar, darán noción de la cantidad de información que se desea enviar a través de la mencionada comunicación.

Por último, se presenta un relevamiento de los protocolos y estándares más utilizados en la técnica PLC, lo que llevó a la selección de aquellos de interés para la aplicación propuesta.

La técnica PLC ha sido ampliamente usada, presentado una amplia gama de aplicaciones [1], sin embargo, su empleo en la Argentina con la intención de ser utilizada en este tipo de aplicaciones no registra antecedentes. Actualmente sus usos son muy variados; en particular esta técnica se encuentra asociada al uso de *Smart Grid* (Red eléctrica Inteligente) [2], ya que no requiere una instalación específica para la comunicación entre partes, utilizando el tendido eléctrico existente. Sin embargo, sus usos se incrementan día a día, encontrando tendencias en diferentes aplicaciones. En particular existen tres ramas que van ganando terreno:

- *Power Line Communication* de acceso (*Access PLC*), proporcionado por las empresas proveedoras de energía quienes ofrecen internet a través de los cables de baja tensión, transmitiendo entre frecuencias de 1.6 y 40 MHz. De momento es una utilización poco difundida [3] pero de a poco nuevas empresas van incorpo-

* libarretaf@frsc.utn.edu.ar

rando este servicio a nivel internacional.

- *Power Line Communication* para control y transmisión de datos (*Control PLC*), lo que posteriormente dio lugar a la domótica [4], utilizada principalmente para lectura de sensores y realización de acciones de control dentro de hogares.
- *Power Line Communication* para administrar una *Local Area Network* (LAN) dentro de edificios (*in-home PLC*) [5]. Creada originalmente en Estados Unidos y muy utilizada en Japón, esta tecnología se utiliza para crear una red de alta velocidad dentro de un edificio, de extrema seguridad ya que sólo se puede acceder desde alguna de las terminales de la red. En los últimos tiempos esta tecnología ha tendido a ser aplicada en otros recintos cerrados, como vehículos [6], aplicaciones navales [7], aeronaves [8] y trenes [9].

Sin embargo, existen otros usos que aún no han sido masivos para esta técnica como lo es la aplicación de PLC para áreas rurales o zonas remotas. Dado que en estas áreas generalmente las compañías telefónicas o de cable no poseen proyecciones de tendido eléctrico, las señales de radio son pobres y la comunicación satelital es extremadamente costosa. Esta técnica puede llegar a ser una gran solución, especialmente en lo que se refiere a mediciones y recopilación de información de sensores.

El objetivo de este estudio es establecer posibles protocolos de envío de datos por medio de la técnica PLC, para la medición de parámetros de un aerogenerador de 100 kW de eje vertical, con la intención de monitorear su funcionamiento bajo condiciones climáticas severas.

El fin de la comunicación es establecer un envío constante de mensajes en tiempo real, del estado del aerogenerador para poder realizar una detención del funcionamiento en caso de emergencia, comandado desde el centro de control.

En la Fig. 1 se muestra un esquema de la comunicación tipo *Power Line Communication* propuesta.

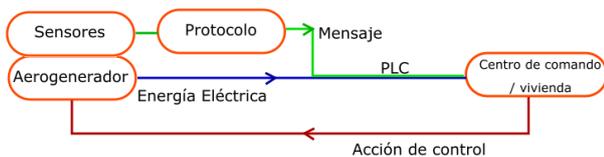


FIG. 1: Esquema de la comunicación bidireccional tipo PLC entre un aerogenerador y una vivienda o centro de comando.

II. CONDICIONES GEOGRÁFICAS Y CLIMÁTICAS

Condiciones climáticas severas

La comunicación propuesta debe realizarse entre un aerogenerador y una vivienda o centro de comando, con la peculiaridad de que dicho aerogenerador estará trabajando en alguna zona remota y aislada, donde los vientos son muy fuertes, aumentando la potencia eléctrica generada y por ende la eficiencia del aerogenerador. Es decir, que va a operar bajo las exigencias climáticas presentes en la Patagonia Austral.

Estas condiciones hostiles, contemplan bajas temperaturas, con presencia de escarcha desde el otoño. Los constantes vientos fuertes [10], de dirección cambiante, capaces de arrastrar pequeños objetos, que pueden dañar las condiciones físicas del aerogenerador de manera simple. Agregado a esto, debe considerarse que, en épocas invernales, las grandes nevadas bloquean las rutas de acceso, de modo que, si surge una avería en el aerogenerador, no podrá repararse hasta la primavera. La finalidad de la comunicación es monitorear el estado general del aerogenerador para evitar que se llegue a este caso.

Teniendo esto en cuenta, es importante contar con un número de sensores, capaces de soportar tanto las bajas temperaturas, como la acumulación de escarcha, ya que estos se verán tan afectados como la estructura propia del aerogenerador.

Cabe aclarar que, para plantear un panorama más específico, que los aerogeneradores de eje horizontal comerciales no están preparados para trabajar bajo estas condiciones dado que la tendencia es que produzcan mayor energía con menor velocidad de viento, tendiendo a detener su marcha a velocidades (velocidad m/s) similares a la media presente a 30 m de altura en la Patagonia Austral, en particular puede nombrarse como sitio de emplazamiento, la Escuela Rural N°26 “Las Vegas”, ubicada a 90 km de la ciudad de Río Gallegos en la provincia de Santa Cruz. Se seleccionó para esta aplicación un aerogenerador de eje vertical, de baja potencia [11, 12] (100 kW) tipo H-rotor, similar al diseñado y construido por la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Santa Cruz [13] que se muestra en la Fig. 2. Esta potencia es suficiente teniendo en cuenta las necesidades básicas de un puesto vial aislado, o una vivienda tipo dentro de un casco de estancia.



FIG. 2: Ejemplo de aerogenerador considerado para la aplicación propuesta

Sensores

Para tener una idea de la cantidad de información que se desea enviar en la comunicación propuesta, se realizó un estudio basado en los posibles sensores que podían llegar a utilizarse para tener información del estado general del aerogenerador. Entre los sensores seleccionados se encuentran: sensor de temperatura, humedad, presión, galgas extensiométricas (deformación), velocidad (para ser colocados en palas), velocidad de rotación de eje y vibraciones. Además, se contempla la medición de parámetros eléctricos, como ha de ser la potencia activa, tensión y corriente, para monitorear la señal de salida que el aerogenerador entrega.

Además, si la zona donde se instalará el aerogenerador lo permite, se podrá instalar una estación meteorológica que soporte clima extremo. De esta manera se podrán conocer las condiciones climáticas in situ y en tiempo real, transmitiendo por la misma línea la información de los parámetros atmosféricos, así se podrán conocer todas las variables meteorológicas.

Las condiciones que los sensores deben soportar son las condiciones climáticas severas presentadas en la sección anterior. Estas condiciones pueden variar a lo largo del año dependiendo de si se considera la zona cordillerana o costera del país, la zona costera presentará mayores días de viento como pueden ser las estancias alrededor de la ciudad de Río de Gallegos donde, por ejemplo, podemos encontrar la escuela rural Las Vegas, que carece de tendido eléctrico; mientras que la zona cordillerana presentará mayores precipitaciones, especialmente en invierno con grandes nevadas. Sin embargo, las exigencias propuestas se presentan a lo largo de la Patagonia Austral.

Con esto en mente, se deben tener ciertas consideraciones respecto a la elección de los sensores a utilizar. En particular, los sensores de temperatura y humedad suelen conseguirse comercialmente como un solo encapsulado. Sin embargo, para esta aplicación, dado que el rango de temperatura de trabajo del sensor será entre los -30°C y 30°C se prefiere optar por sensores separados. Considérese que ambos deben cumplir con las especificaciones de empaque solicitadas para trabajar al exterior, ya que estará expuesto a las condiciones climáticas mencionadas previamente.

También se contará con un segundo sensor de temperatura, de diferentes características, que se alojará en el rotor para controlar su temperatura. Este sensor tendrá menor rango de temperaturas de trabajo y menos exigencias respecto al empaque, pero mayor exactitud que el presentado anteriormente. De este modo, ante una irregularidad, se debe poder captar en tiempo real el incremento de temperatura en el rotor, antes que alcance un valor que ponga en peligro su funcionamiento.

Respecto a la exactitud, otros sensores a tener en cuenta cuya performance debe ser notoria, son los sensores de presión y de deformación. Esto se debe a que los fuertes vientos tenderán, en principio, a aplicar grandes exigencias a la estructura general del aerogenerador, y en particular en las palas. Allí es donde se verán los primeros signos de agotamiento ante los cuales se deberá ordenar el detenimiento del aerogenerador desde la central de comando.

Las mismas consideraciones deben tenerse en cuenta para los sensores de vibración, ya que su lectura en conjunto con la presión, y deformación, darán información del estado físico del aerogenerador.

Por último, respecto a la medición de los parámetros eléctricos que caracterizan la energía entregada por el aerogenerador servirán no sólo para tener noción del funcionamiento del generador, sino para realizar un posterior relevamiento de la capacidad del mismo para trabajar bajo condiciones climáticas severas.

III. MÉTODOS

La técnica de comunicación conocida como PLC cuenta con diferentes protocolos y estándares propuestos en diferentes países según la aplicación que se requiera. Sin embargo, no existe actualmente una estandarización o un criterio de normalización que sea adoptado mundialmente relacionado con esta técnica. En particular, en Argentina, no hay antecedentes respecto a ningún protocolo o estándar relacionado a PLC a nivel nacional.

En general, los protocolos y estándares para PLC muestran tendencias marcadas, enfocándose en comunicaciones múltiples, intentando abarcar cada vez más puntos de conexión con otros sistemas de comunicación u otros elementos, interconectándolos en vista de grandes proyectos, como es el uso de *Smart Grid*. Este escenario puede verse con claridad en lo que respecta en particular a comunicaciones del tipo *Narrowband PLC* o PLC de banda estrecha.

Otros tienden a aumentar la seguridad de envío de paquetes, a gran velocidad, como es a lo que apuntan las comunicaciones del tipo *Broadband PLC* o PLC de banda ancha. *Broadband PLCs* fue diseñado para redes de área hogareña o *Home Area Networks* (HANs), que operan en el rango de frecuencias de 1.8 a 250 MHz y posee la posibilidad de manejar paquetes de información a gran velocidad, del orden de varios cientos de megabits por segundo.

Por el contrario, *Narrowband PLCs* fue diseñado para redes de área de mayor tamaño conocidas como Redes de Área de Vecindario o *Neighbor Area Networks* (NANs). Opera en un rango de frecuencias que abarca hasta los 500 kHz, con una velocidad nominal de datos o *Data Rate* del orden de los kbit por segundo. Pudiendo soportar hasta una velocidad de 500 kbps para cubrir grandes distancias sin necesidad de repetidoras.

Las técnicas y los procedimientos varían, pero todos los protocolos y estándares presentados apuntan a lograr un envío y recepción de paquetes exitosos, garantizando una buena Relación Señal Ruido o *Signal to Noise Ratio* (SNR) y baja Tasa de Error de Bit o *Bit Error Rate*.

Basado en las diferentes técnicas utilizadas en los mencionados protocolos y estándares, es que se realizó el estudio y análisis de los protocolos disponibles en la bibliografía internacional, que pretenden ser lo más adecuados para la situación propuesta. Esta es una comunicación bidireccional entre un aerogenerador, que trabaja bajo condiciones climáticas severas, y una vivienda/centro de control, capaz de accionar una parada o marcha de emergencia en caso de que la información recibida lo advierta.

Protocolos y estándares más utilizados

En la presente sección se muestra un resumen de los protocolos y estándares tenidos en cuenta para llegar a la selección final de uno o varios protocolos que pueden ajustarse a la comunicación propuesta en este artículo. Se tomaron en cuenta tanto protocolos como estándares, ya que en diferentes bibliografías ciertos estándares se presentan como protocolos y viceversa. Para evitar esta distinción, se consideraron ambos, dado que el objetivo del presente trabajo es determinar y seleccionar el mejor modelo de comunicación, sin importar a cuál corresponda. A continuación, se brinda una breve descripción de los protocolos y estándares más utilizados.

- **PRIME [14]** (*Power Line Intelligent Metering Evolution*): Este protocolo es uno de los más populares para PLC de banda estrecha o *Narrowband PLC*. Originalmente se creó para cumplir con las necesidades de normalización en aplicaciones de Medición Avanzada de Infraestructuras o *Advanced Metering Infrastructure* (AMI), en particular orientado a la medición de consumo de energía. Este protocolo, diseñado para cubrir grandes distancias, se suele aplicar como una comunicación bidireccional entre los medidores de energía, ubicados en la vivienda de los consumidores, y las compañías que aplican las tarifas de consumo eléctrico.
- **G3 PLC [15]**: Es un protocolo de PLC de banda estrecha o *Narrowband PLC*, diseñado por la Alianza G3-PLC (*G3-PLC Alliance*), cuyo fin se basa en aumentar la robustez de la comunicación, en particular haciendo modificaciones en la capa física de la comunicación y la codificación del canal. Esta modificación lleva a su vez a disminuir la velocidad de transmisión.
- **ITU-T [16]**: Protocolo establecido por *Smart Grid Focus Grup*, con el fin de desarrollar, en cooperación con las normas ISO/IEC, un grupo de recomendaciones para ser aplicadas a la hora de realizar comunicaciones del tipo: *Smart Grid*, aplicaciones inteligentes, AMI, entre dispositivos de manejo de energía, sistemas de gestión de energía, carga de vehículos eléctricos y aplicaciones de automatización hogareña.

El principal objetivo de este protocolo es poder obtener una mayor área de cobertura, rendimiento y fiabilidad, disminuir el ruido impulsivo propio del canal, y aumentar la inmunidad a cambios producidos por el canal de comunicación. Todo esto se desea alcanzar manteniendo una baja complejidad y bajo consumo de potencia.

En comparación con los demás protocolos, este es el menos probado en campo.

- **IEEE 1901.2 [17]**: Este estándar fue diseñado para soportar aplicaciones de *Smart Grid*, como medidores de energía inteligente, estaciones de carga de vehículos eléctricos, redes para áreas hogareñas en *Broadband PLC* y comunicaciones con paneles solares. Comparado con los demás protocolos, IEEE 1901.2 ofrece mayor velocidad de comunicación (hasta 500

kbps). Originalmente fue concebido para trabajar con media y baja tensión, siendo capaz de soportar comunicaciones a través de transformadores. Este estándar está basado en el protocolo antes mencionado G3-PLC.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de las principales características de los mencionados protocolos y estándares.

TABLA 1: Tabla de principales características de protocolos y estándares más utilizados en PLC.

Protocolo	Banda de frecuencias [kHz]	Tasa máxima de transmisión [kbps]	Técnicas de modulación [17]
PRIME	3 a 500	128.6	DBPSK DQPSK
G3 PLC	10 a 490	207.6	DBPSK DQPSK D8PSK Robust DBPSK Super Robust DBPSK
ITU-T	5 a 143	100	16 QAM QPSK BPSK
IEEE 1901.2	10 a 490	500	DBPSK DQPSK D8PSK Robust DBPSK Super Robust DBPSK

Dentro de los protocolos y estándares más conocidos, hay dos en particular que se repiten ampliamente en la bibliografía; estos son PRIME y G3-PLC [18]. Sin embargo, pueden también encontrarse comparaciones entre IEEE 1901.2 y G3 PLC [19] ya que uno está basado en el otro, y con menores resultados, las comparaciones entre ITU-T y IEEE 1901.2 [20].

Otros protocolos y estándares

Dada la aplicación que se quiere implementar en base a una comunicación/enlace para una vivienda, también se tuvieron en cuenta los protocolos y estándares más utilizados en automatización de hogares.

- **X10[21]**: La tecnología X10 es uno de los protocolos más antiguos de PLC. Usa una modulación de pulsos cortos similar a *Amplitud Shift Keying* (ASK) para transmitir la información. Diseñado para cubrir grandes distancias, originalmente era sólo unidireccional, pero con el tiempo se fue adaptando a una comunicación bidireccional. Sin embargo, su velocidad de envío o tasa de transmisión sigue siendo muy baja, del orden de los 60 kbps. Su uso principal es en control de iluminación.
- **CEBus[22]**: Este protocolo usa un modelo de comunicación de punto a punto para que cada nodo en la red pueda tener acceso cada vez que lo necesite. La capa física de este protocolo utiliza una tecnología de modulación de espectro ensanchado o *Spread spectrum* (SS) patentada por *Intellon Corporation*, que a diferencia de las otras técnicas de espectro ensanchando, cambia el valor de la frecuencia dentro de la banda de frecuencias

mientras se está realizando la transmisión de información. Este protocolo suele utilizarse para aplicaciones de control de iluminación en oficinas y hogares.

- KNX [23]: Conocido como estándar ISO/IEC 14543-3 EIB/KNX, este es un estándar abierto para automatización y comunicación dentro de edificios. Está optimizado para aplicaciones de control de baja velocidad como sistemas de iluminación. Cabe destacar que comparado con X10 este protocolo es más costoso de aplicar.
- LONWorks[24]: Protocolo de comunicación punto a punto desarrollado por CENELEC. Utiliza técnicas de espectro ensanchado para evitar las interferencias causadas por el ruido. Tiene la peculiaridad de utilizar un correlacionador multi-bit para preservar los datos en presencia de ruido, con una técnica de cancelación de ruido impulsivo patentada. Su mayor uso es en automatización de hogares.
- ISO 10368:2006 (E) [25]: Originado principalmente para control de refrigeración en containers dentro de barcos. Posee baja tasa de transmisión y se basa en un mensaje de 8 bits con un bloque de corrección de errores.
- AMIS CX1-Profile [26]: Conocido como protocolo AMIS PLC de Siemens, este protocolo es utilizado para distribución de energía de baja tensión entre nodos y medidores de energía. La transmisión en la capa física se basa en saltos de frecuencia con tecnología de espectro ensanchado; como desventaja respecto a los demás protocolos es que la influencia de la red eléctrica puede causar pérdida de paquetes.
- Digital STROM [27]: Diseñado principalmente para uso hogareño, puede utilizarse de forma simultánea para múltiples departamentos en un edificio de modo que cada departamento tenga su conexión independiente. Posee modulación del tipo *switch On/Off* por lo que la instalación a utilizar como canal de comunicación no necesita acoplamiento capacitivos ni aislación galvánica. Utiliza una arquitectura de tipo maestro/esclavo.

En la Tabla 2 se muestran las principales características de los mencionados protocolos y estándares.

TABLA 2: Características principales de los protocolos y estándares más utilizados en automatización hogareña

Protocolo	Banda de frecuencias [kHz]	Tasa máxima de transmisión [kbps]	Técnicas de modulación
X10	95 a 125	60	Pulsos cortos de 120 kHz
CEBus	100 a 400	10	SS
KNX	110	1,2	BFSK
LONWorks	125 a 140	5,4	BPSK
ISO 10368:2006 (E)	53,9 a 56,1	1,2	FSK BPSK
AMIS CX1-Profile	39 a 90	30	DPSK
Digital STROM	10 a 120	N.A.	On/Off switching

Consideraciones a tomar para la elección de protocolos y estándares a utilizar

En gran parte de la bibliografía se han realizado comparaciones de protocolos, sobre todo entre los que tienden a cubrir las mismas necesidades. En estos escritos, un punto de interés recurrente es la seguridad. En aplicaciones de *Broadband PLC* se recalca la seguridad respecto a instrucciones externas, mientras que en *Narrowband PLC* se menciona por capa del modelo OSI donde se encuentran las medidas de seguridad correspondientes, que generalmente se corresponden con la capa de acceso al medio (MAC).

Otra consideración de interés que se suele tener es la dedicación de una parte del protocolo a evitar que otro tipo de señales, como pueden ser de radio frecuencia o de WIFI, afecte las condiciones de canal, más allá de las dificultades con las que ya cuenta. Sin embargo, en el caso presentado, dado que se trata de una zona aislada tanto de población, como ser señales externas o posibles intrusiones, no se tomaron en cuenta ninguna de estas consideraciones mencionadas anteriormente, centralizando el interés en otros elementos ofrecidos por los protocolos.

La distancia que debe recorrer el mensaje queda representada por la distancia entre la ubicación de la central de control y el aerogenerador. Considerando que el aerogenerador escogido no precisa estar ubicado a gran altura para funcionar y no resulta invasivo visual ni sonoramente, no es necesario que exista una gran distancia ente el aerogenerador y la central de control. De modo que dentro de la selección no es necesario contar con un protocolo que se oriente principalmente a cubrir grandes distancias.

Lo primero que se tomó en cuenta es la robustez que presenta el protocolo. Dado que en la situación propuesta tanto el aerogenerador como la vivienda no cuentan con la posibilidad de mantenimiento durante los meses del invierno, tampoco puede contarse con mantenimiento para el sistema de comunicación, debiendo ser robusto y fiable.

Por otro lado, no debe perderse de vista que la propuesta es una comunicación tipo PLC por lo que, el modo en que el protocolo asegura el estado del mensaje, para evitar la pérdida de paquetes es de suma importancia. De la misma forma, dado que se desea que la comunicación sea bidireccional y en tiempo real, se tuvo en cuenta que el protocolo debe asegurar ambas características de la comunicación.

Por último, si bien la velocidad de envío es algo a tener en cuenta, no es la principal característica en la que se basó la búsqueda del protocolo más adecuado. Sin embargo, una vez realizada la primera preselección, se consideraron otras prioridades cuyos factores resultaron de mayor interés.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se mencionó anteriormente, aquellos protocolos que presenten problemas como pérdida de paquetes o que deban contar con mayor mantenimiento quedaron descartados debido a que se necesita que la comunicación sea robusta. En este caso, se desechó la idea de aplicar AMIS CX1-Profile al igual que Digital STROM.

Por otro lado, ISO 10368:2006 (E) limita el largo del mensaje, y considerando que nuestro mensaje será extenso, teniendo en cuenta el número de sensores que se consideran

en el aerogenerador, se descartó este protocolo.

Se mencionó que la velocidad de transmisión de datos no fue una razón de descarte del protocolo, sin embargo, si lo que se desea es tener una comunicación en tiempo real existen ciertos protocolos que se debieron considerar como últimos en prioridad, dado que la tasa de envío de datos está muy por debajo de los demás protocolos. Estos son KNX, LONWorks e ISO 10368:2006 (E) que ya había sido descartado por limitar el tamaño de paquete.

Comparando el rendimiento de X10 con CEBus, se encontró que para la aplicación solicitada X10 se desempeña de mejor manera que CEBus, el cual está pensado para otro tipo de aplicaciones, por lo que se descartó CEBus y se reservó para su posterior evaluación el protocolo X10.

Cabe destacar que en la selección de los protocolos a aplicar no se habla del costo asociado. Con respecto a la parte económica, los mayores costos se reparten entre el aerogenerador, el inversor y el tendido de cables. Siendo el costo del sistema de comunicación asociado al protocolo seleccionado muy inferior respecto del monto total. En particular la técnica PLC suele representar poco costo debido a que se reduce a una sola conexión entre la fuente de alimentación y el sitio de consumo, cuando otras técnicas demandan instalar separadamente el cableado de energía y el de datos. Sin embargo, considerando que la aplicación que se presenta en este artículo está orientado a dar energía en zonas aisladas, cualquier instalación, incluyendo la colocación del aerogenerador, es inferior al costo que representaría trazar el tendido eléctrico existente hasta los sitios de interés. Por esta razón es que no se realizó un estudio económico a la hora de elegir el protocolo a seleccionar.

Considerando los protocolos más utilizados, ITU-T es el de menor rendimiento comparado con los demás, por lo que no se consideró en la selección.

El protocolo IEEE 1901.2 muestra características muy similares al G3 PLC, esto se debe a que el primero está basado en el segundo. Dado que se escogieron protocolos que pueden acabar siendo modificados para su aplicación, y considerando que la aplicación original a la que se orienta el protocolo IEEE 1901.2 no concuerda con la que se le pretende dar a la comunicación propuesta, se escogió el protocolo G3 PLC quedando descartado el IEEE 1901.2.

Finalmente, los protocolos escogidos para la comunicación bidireccional entre un aerogenerador que trabaja bajo condiciones climáticas severas y un centro de comando son: X10, PRIME y G3 PLC.

Discusión

Antes que nada, lo que se debe tener en cuenta es que la elección realizada en el punto anterior se basó en la información recopilada a través de una exhaustiva búsqueda bibliográfica. En particular, considerando que era necesario realizar un relevamiento de los protocolos disponibles, nos permitió acercarnos a la selección final. Sin embargo, a esta decisión final se le debe sumar algún otro tipo de comprobación, como una propuesta de simulación [28] o prueba en campo [29] para poder obtener resultados concretos y reales que son cruciales y de mayor utilidad antes de seleccionar el protocolo final.

La elección realizada tampoco asegura una decisión fi-

nal, ya que puede que estos protocolos se utilicen de base, sabiendo que han sido aplicados, y que su rendimiento es bueno, para posteriormente diseñar uno que se ajuste de mejor manera a la aplicación propuesta en este artículo.

Cabe aclarar que en la búsqueda bibliográfica se encontraron más protocolos que los presentados, como por ejemplo el uso de protocolos que no pertenecen exclusivamente a PLC [30], o combinación de tecnologías. No obstante, sólo se consideraron los presentes debido a que no siempre se encontró suficiente información como para poder realizar una comparación entre ellos. De la misma forma, otros no tenían antecedentes de haber sido aplicados en la práctica, por lo que sus resultados eran puramente teóricos. Pese a lo expuesto, cabe la posibilidad que alguno de ellos haya podido ser seleccionado, de existir más material disponible al respecto, por lo que se recalca que la selección final a la que se llegó es basada en los protocolos presentados en este artículo.

V. CONCLUSIÓN

Se redujo la selección a tres protocolos que pueden ser utilizados para realizar una comunicación tipo *Power Line Communication* entre un aerogenerador de eje vertical, que funciona bajo condiciones climáticas severas y un centro de comando o vivienda, que es alimentado con la energía generada por dicho aerogenerador. Como resultado y basado en las características presentadas en diferente material bibliográfico, se escogieron los protocolos X10, protocolo utilizado en automatización de hogares, PRIME, protocolo muy utilizado en Narrowband PLC y el protocolo G3 PLC cuya característica principal es la robustez que presenta.

A partir de esta selección, como trabajo a futuro se propone realizar estudios que consten en otro tipo de corroboración, que no sea basado en búsqueda bibliográfica, para poder conocer cuál de estos protocolos se ajusta mejor a las necesidades de la aplicación propuesta, o si es conveniente modificarlos en búsqueda de un mejor rendimiento para esta aplicación, lo que daría como resultado un nuevo protocolo de comunicación destinado a alimentar un aerogenerador para regiones aisladas de la Patagonia Austral.

REFERENCIAS

- [1] K. M. Rabie, B. Adebisi, A. M. Tonello y G. Nauryzbayev. For More Energy-Efficient Dual-Hop DF Relaying Power-Line Communication Systems. *IEEE Syst. J.* **12**, 2005-2016 (2018).
- [2] G. Lopez, J. Matanza, D. D. L. Vega, M. Castro, A. Arrinda, J. I. Moreno y A. Sendin. The Role of Power Line Communications in the Smart Grid Revisited: Applications, Challenges, and Research Initiatives. *IEEE Access* **7**, 117346-117368 (2019).
- [3] S.-G. Yoon, S. Jang, Y.-H. Kim y S. Bahk. Opportunistic Routing for Smart Grid With Power Line Communication Access Networks. *IEEE Trans. Smart Grid* **5**, 303-311 (2014).
- [4] A. A. Zhilenkov, D. D. Gilyazov, I. I. Matveev e Y. V. Krishtal. Power line communication technologies in automated control systems. *IEEE EIConRus* (2017).

- [5] A. M. Tonello, F. Versolatto y A. Pittolo. In-Home Power Line Communication Channel: Statistical Characterization. *IEEE Trans. Commun.* **62**, 2096-2106 (2014).
- [6] Z. Xu, C. Yang, Z. Tan y Z. Sheng. Raptor Code-Enabled Reliable Data Transmission for In-Vehicle Power Line Communication Systems With Impulsive Noise. *IEEE Commun. Lett.* **21**, 2154-2157 (2017).
- [7] M. Antoniali, A. M. Tonello, M. Lenardon y A. Qualizza. Measurements and analysis of PLC channels in a cruise ship. *2011 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 102-107 (2011).
- [8] V. Degardin, E. Simon, M. Morelle, M. Lienard, P. Degauque, I. Junqua y S. Bertuol. On the possibility of using PLC in aircraft. *IEEE ISPLC2010*, 337-340 (2010).
- [9] G. Artale, A. Cataliotti, V. Cosentino, D. D. Cara, R. Fiorelli, P. Russotto y G. Tine. Medium Voltage Smart Grid: Experimental Analysis of Secondary Substation Narrow Band Power Line Communication. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **62**, 2391-2398 (2013).
- [10] P. J. Bahamonde, A. M. Samela, O. Szewczuk y A. L. Ibarreta Fañanas. *Estudio del Régimen de Vientos en la Localidad de Gobernador Gregores en Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente* (2013), 131-137.
- [11] L. C. Barragán, I. Sagardoy, M. P. Cristófalo, J. I. Somoza, M. H. Orbez, M. V. D' Atri y H. J. Fasoli. *Proyecto HACHE. Parte III: Diseño de un generador eléctrico para sistemas eólicos de baja potencia en Actas del III Congreso Argentino y II Iberoamericano "Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía" HYFUSEN* (Bariloche, 2009), 10-112.
- [12] G. D. Ahrtz, R. D. Fernández y A. Munnemann. *Diseño de una turbina eólica de baja potencia adecuada a la agresividad del clima patagónico en Cuarto Congreso Nacional-Tercer Congreso Iberoamericano Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía-HYFUSEN* (Mar del Plata, 2011).
- [13] A. M. Samela, A. L. Ibarreta Fañanas, C. N. Tommasi y P. J. Bahamonde. *Diseño y Construcción de un Generador Eoloeléctrico de Baja Potencia Adaptado a Condiciones Climáticas de la Patagonia Austral en III Congreso Argentino de Energías Sustentables* (Bahía Blanca, 2018).
- [14] J. Larranaga, J. Legarda, I. Urrutia y A. Sendin. An experimentally validated PRIME subnetwork simulation model for utility applications. *2015 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 95-100 (2015).
- [15] L. D. Bert, S. D'Alessandro y A. M. Tonello. A G3-PLC simulator for access networks. *18th IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 99-104 (2014).
- [16] B. Masood y S. Baig. Standardization and deployment scenario of next generation NB-PLC technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **65**, 1033-1047 (2016).
- [17] S. Galli y O. Logvinov. Recent Developments in the Standardization of Power Line Communications within the IEEE. *IEEE Commun. Mag.* **46**, 64-71 (2008).
- [18] P. Mlynek, M. Koutny, J. Misurec y Z. Kolka. Measurements and evaluation of PLC modem with G3 and PRIME standards for Street Lighting Control. *18th IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 238-243 (2014).
- [19] A. W. Kabore, V. Meghdadi, J.-P. Cances, P. Gaborit y O. Ruatta. Performance of Gabidulin codes for narrowband PLC smart grid networks. *2015 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 262-267 (2015).
- [20] S. G. Hoffmann. Layer-2 security for PLC - a comparison between ITU-T G.9903 and IEEE 1901.2. *2016 International Symposium on Power Line Communications and its Applications*, 173-178 (2016).
- [21] R. P. Joshi, S. Bhosale y P. H. Patil. Analysis and Simulation of Noise in Power Line Communication Systems. *2008 First International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology*, 1287-1292 (2008).
- [22] M. Yigit, V. C. Gungor, G. Tuna, M. Rangoussi y E. Fadel. Power line communication technologies for smart grid applications: A review of advances and challenges. *Computer Networks* **70**, 366-383 (2014).
- [23] S. Marksteiner, V. J. E. Jimenez, H. Valiant y H. Zeiner. An overview of wireless IoT protocol security in the smart home domain. *2017 Internet of Things Business Models, Users, and Networks*, 1-8 (2017).
- [24] S. Cho y V. Dhingra. Street lighting control based on LonWorks power line communication. *2008 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 396-398 (2008).
- [25] F. Nouvel y L. Lampe. *Power Line Communications: Principles, Standards and Applications from Multimedia to Smart Grid* (Wiley, Malaysia, 2014).
- [26] B. Sivaneasan, P. L. So y E. Gunawan. A New Routing Protocol for PLC-Based AMR Systems. *IEEE Trans. Power Deliv.* **26**, 2613-2620 (2011).
- [27] G. Dickmann. DigitalSTROM®: A centralized PLC topology for home automation and energy management. *2011 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 352-357 (2011).
- [28] F. Aalamifar, A. Schlögl, D. Harris y L. Lampe. Modelling power line communication using network simulator-3. *2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2969-2974 (2013).
- [29] A. F. Olivera, A. Escalona, I. U. Galdos, J. Arenas, P. A. Buceta y J. J. F. Vázquez. Analysis of PRIME PLC Smart Metering Networks Performance. *Renewable energy & power quality journal*, 613-618 (2013).
- [30] M. Rafiei y S. Eftekhari. A practical smart metering using combination of power line communication (PLC) and WiFi protocols. *2012 Proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution*, 1-5 (2012).