

Distribución con Nano-Redes de Corriente Continua Continua en el Hogar

Kevin Martín¹, María R. Rogina¹, Aitor Vázquez¹, Diego G. Lamar¹, Airán Francés², Rafael Asensi²,
Javier Sebastián¹, Javier Uceda²

¹Grupo de Sistemas Electrónicos de Alimentación, Campus de Viesques s/n, Universidad de Oviedo (e-mail: martinkevin@uniovi.es)

² Centro de Electrónica Industrial, c/José Gutiérrez Abascal, 2, Universidad Politécnica de Madrid.

Resumen—Los grandes cambios en las tecnologías disponibles, la evolución producida en el uso de la energía eléctrica y la mayor concienciación con el medio ambiente, han llevado a plantearse nuevas formas más eficientes de distribución de la energía eléctrica. Los hogares son un gran consumidor de energía, debido a un creciente número de electrodomésticos y dispositivos de entretenimiento, por lo que son un objetivo atractivo en el que buscar un cambio de modelo de distribución. Cuando el número de elementos conectados a la red eléctrica se vuelve insostenible, resulta lógico pensar en entidades de menor tamaño que sirvan como sub-redes o compartimentos, y que permitan un control distribuido de la red de distribución. Este cambio de paradigma, junto con el uso de convertidores como interfaz entre las sub-redes y la creciente disponibilidad de generación y almacenamiento eléctrico distribuidos, hacen atractiva la distribución en corriente continua como una posibilidad para mejorar la calidad del suministro y la eficiencia energética de nuestros hogares.

Palabras Clave—Distribución en corriente continua, Nano-redes.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la aparición de nuevas tecnologías y equipos que hacen uso de la energía eléctrica está cambiando la gestión que se hace de la red de distribución de energía eléctrica tradicional a todos los niveles.

La generación de energía eléctrica ya no se reduce únicamente a las grandes plantas de producción [1]. La posibilidad de generar electricidad de forma local, a nivel de hogar o de barrio, con la integración de fuentes renovables, resulta cada vez más sencillo y asequible.

Uno de los principales problemas de la generación con energías renovables está en su escasa predictibilidad, además de su intermitencia. Los momentos de máxima disponibilidad, no siempre coinciden con la máxima demanda energética, generando desequilibrios entre la energía producida y consumida.

Estos desequilibrios deben ser corregidos con inyección de potencia hacia la red cuando la disponibilidad es mayor que la demanda y tomándola desde la red cuando la generación local no es capaz de abastecer al consumidor con suficiente energía. Estos intercambios energéticos, al igual que la capacidad de producción distribuida, son difíciles de predecir, dificultando las tareas de operación de la red eléctrica y las estimaciones de demanda.

El uso de almacenamiento energético permite gestionar estos intercambios, sirviendo como sumidero de potencia cuando la

generación es alta y suministrando energía al consumidor cuando la demanda sobrepasa la producción.

La complejidad de la actual red de distribución y su control cuando se deben tener en cuenta gran cantidad de elementos conectados a ella pueden llegar a ser inabordables para mantener la calidad de suministro. Por esta razón se ha propuesto la sectorización de la red en sub-redes autónomas (Fig. 1). Éstas deben ser capaces de autogobernarse y presentar una única interfaz de conexión a la estructura de distribución aguas arriba (i.e. red de orden superior). De esta forma se simplifica el control de una gran red de distribución, que conceptualmente tiene únicamente que interactuar con un número reducido de grandes sub-redes.

Esta estructura jerárquica se puede repetir a menor escala hasta llegar al edificio o el hogar. Puesto que se ha incrementado el número de equipos eléctricos en las viviendas, tiene sentido considerar el hogar como una sub-red independiente que se presenta como una única entidad a las redes de orden superior.

Los edificios comerciales y residenciales, en Estados Unidos, consumen casi el 40% de la energía primaria y en torno al 70% de la energía eléctrica [2]. La eficiencia energética en la edificación es un tema de absoluta actualidad, además de ser totalmente interdisciplinar, involucrando a arquitectos e ingenieros de distintas áreas y especialidades, e incluso también implicando disciplinas como la psicología y la sociología, estudiando la comodidad de sus usuarios [3].

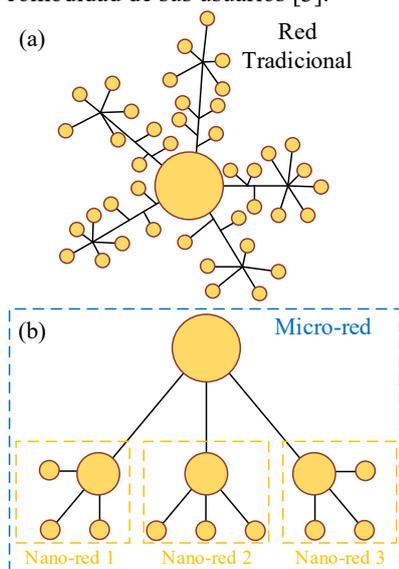


Fig. 1: Estructuras de red tradicional (a) y de sub-redes jerárquicas (b).

El uso de redes inteligentes y la eficiencia energética en la edificación tienen su máximo exponente en los edificios de energía neta cero o casi cero. En estos edificios se integran, no sólo sistemas de generación local, almacenamiento y optimización, sino también aspectos térmicos, arquitectónicos y de instalaciones, consiguiendo que el balance entre la energía producida por el edificio, compense aproximadamente la energía consumida [2]. Hay incluso quien propone el concepto de *Smart House* o “casa inteligente”, integrando la monitorización y el automatismo del edificio diseñado, y así cumplir los preceptos de diseño de la energía neta cero [3]. Si bien este concepto puede parecer una utopía, ya existen demostradores funcionales en Noruega [4] que, en algunos casos, son incluso capaces de producir más energía que la que consumen.

La implantación de sub-redes inteligentes permite usar los recursos energéticos disponibles de forma más eficiente, teniendo en cuenta no sólo la demanda y la producción, sino también otros aspectos como el precio de la energía en cada momento, la estabilidad de la red de orden superior y los patrones de consumo y comportamiento de los usuarios del edificio.

A continuación se describe la estructura de este artículo. En la sección II se analizan las características y la motivación para plantearse la distribución en corriente continua. En la sección III se profundiza en los conceptos de micro-red y nano-red, mostrando las arquitecturas más comunes que integran ambas estructuras. En la sección IV se muestran algunos ejemplos de aplicación significativos, y los problemas más comunes de estas arquitecturas se detallan en la sección V. Finalmente, en la sección VI se extraen las conclusiones del estado actual de la técnica.

II. DISTRIBUCIÓN EN CORRIENTE CONTINUA

A finales del siglo XIX, cuando la infraestructura de distribución eléctrica era aún escasa, había dos propuestas enfrentadas sobre la generación, distribución, almacenamiento y consumo de la energía eléctrica: el uso generalizado de la corriente alterna apoyada por Westinghouse y Tesla o la utilización de corriente continua propuesto por Edison [5], [6]. Empezaba entonces la llamada “Guerra de las corrientes”. Si bien ésta tuvo una fuerte componente comercial y económica, además de publicitaria, hubo una serie de desarrollos técnicos que tuvieron como consecuencia la implantación de la corriente alterna: el perfeccionamiento de los motores de inducción, la mejora e innovación en los transformadores y los sistemas de transmisión polifásicos de alta tensión para abarcar la distribución a grandes distancias.

Sin embargo, muchos cambios se han producido desde entonces en todas las etapas que conforman la distribución de energía eléctrica. La mayor parte de los dispositivos que hoy se conectan a la red en los hogares son cargas de corriente continua, con su correspondiente rectificador (convertidor CA-CC) y su sistema de conversión basado en topologías CC-CC [6]. Incluso en campos tradicionales, como la iluminación o los

motores, las cargas han evolucionado. La iluminación LED, alimentada en corriente continua, está cada vez más extendida como una forma de mejorar la eficiencia energética. Cargas con motores de tamaño medio, como lavadoras o neveras, llevan en la mayoría de los casos una lógica de control alimentada también en corriente continua, haciéndola posible con una conversión CA-CC-CA. En todos los anteriores casos, eliminando la primera conversión CA-CC se puede mejorar la eficiencia y robustez de estos equipos y simplificar su diseño, eliminando circuitos de corrección de factor de potencia y sincronización con red, lo que propicia también la reducción de su coste, tamaño y peso.

Otro factor de peso en la transición hacia la corriente continua es el uso cada vez más extendido de las fuentes de energía renovables y el almacenamiento de energía [6], [7]. La mayor parte de estos elementos trabajan en corriente continua (i.e. paneles fotovoltaicos, baterías, super-condensadores, etc.) o producen energía en formatos que necesitan una conversión del formato original para su inyección a red (eólica, cogeneración CHP¹, etc.). Por otro lado, la incipiente comercialización de vehículos de propulsión eléctrica en el mercado también juega un papel protagonista en esta transición, puesto que su almacenamiento está basado en baterías. Por lo tanto, estos vehículos, además de necesitar ser recargados para su uso, pueden servir como un aporte puntual de energía a la nano-red, funcionando como un punto más de almacenamiento local [8]. Finalmente, se puede concluir que la mayor ventaja de esta migración es el manejo de todos estos elementos en su formato nativo de energía, eliminando así conversiones innecesarias en inversores (CC/CA) y rectificadores (CA/CC), mejorando la eficiencia energética del conjunto.

En instalaciones locales, como una micro-red o una nano-red, el cableado de distribución en corriente continua es lo suficientemente corto como para tener una sección equivalente a la de una instalación tradicional [6]. En largas distancias, donde la distribución en corriente alterna ha sido considerada históricamente como mejor, los principales problemas de la transmisión en corriente continua se han visto solucionados con las líneas de alta tensión (HVDC). Éstas tienen ventajas sobre la transmisión en corriente alterna como la posibilidad de interconectar redes asíncronas o el hecho de que las distancias sólo están limitadas por las pérdidas y no por la potencia reactiva del enlace [9].

No obstante, no todo son ventajas en la distribución en corriente continua. Por una parte, la integración de convertidores y protecciones en el nuevo sistema presenta un nuevo paradigma de diseño. Si bien existen interruptores comerciales de corriente continua [6], y es una tecnología madura en campos como la tracción ferroviaria, el equipamiento doméstico en corriente continua no está estandarizado a día de hoy. Por otra parte, la robustez proporcionada por la gran resistencia del equipamiento de transformación de corriente alterna es difícil y costoso de conseguir cuando se trata de convertidores de corriente continua.

¹ *Combined Heat and Power*, generación mixta de agua caliente sanitaria y energía eléctrica con calderas de gas [11].

III. CONCEPTO DE NANO-RED Y ARQUITECTURAS

A. Definición de nano-red

Se plantea una nano-red como una subdivisión de pequeño tamaño de la red de distribución eléctrica, típicamente de ámbito doméstico y de una potencia de pocas decenas de kilovatios. En su definición se tiene en cuenta tanto la infraestructura del propio sistema de distribución eléctrica, convertidores integrados en ella, los elementos de generación local (paneles fotovoltaicos, pequeñas turbinas eólicas, generadores diésel...) y sistemas de almacenamiento de energía distribuido.

Estas nano-redes pueden estar aisladas o conectadas a otras redes de orden superior, ya sea la macro-red formada por la red general de distribución eléctrica tradicional u otras sub-redes de mayor alcance [10]. Esta conexión se hace típicamente a través de un Centro de Control de Energía (CCE), que básicamente es un convertidor bidireccional que gestiona los intercambios de energía con la red de orden superior [11]. De esta forma, se consigue desacoplar la dinámica de la nano-red, ya que se puede presentar a la red de distribución como una única carga o generador. Esto simplifica el control, tanto desde el punto de vista del operador de red, que pasa a responsabilizarse de menos elementos, como desde el punto de vista de la nano-red, que es independiente de todo lo que ocurra fuera de su ámbito de actuación.

El CCE también permite a la nano-red aislarse de la red de distribución en caso de que sea necesario, trabajando en modo isla. Cuando ocurren anomalías en el suministro, la vivienda podría mantenerse funcionando completa o parcialmente utilizando energía de la generación y almacenamiento locales, volviendo a conectarse a la red eléctrica cuando ésta vuelva a estar dentro de parámetros de funcionamiento adecuados. Esta independencia permite, por ejemplo, suavizar el efecto, o incluso evitarlos completamente, de fenómenos como los grandes apagones en ciudades [10].

El concepto de nano-red va unívocamente ligado al concepto de *smart grid*. El uso del CCE facilita esta unión pudiendo integrar diversas funciones, como el control remoto de la red, dar funciones de contador inteligente, la monitorización del uso de energía y la forma en que ésta se usa, o incluso control sobre

diversos dispositivos [11]. Esto permite, tanto la programación por parte de los usuarios de ciertas actividades (recarga de coche eléctrico, puesta en marcha de ciertos electrodomésticos...), como la racionalización del uso de energía, bien por apagados de emergencia o bien por acciones de los usuarios tras analizar los datos de consumo.

Para implementar estas funciones de monitorización y control, es necesario al margen de la compatibilidad de la propia red de distribución eléctrica, que se establezca una red de comunicaciones que permita el flujo de información en el sistema. Dependiendo de las necesidades y el diseño de la nano-red, las comunicaciones pueden establecerse de distintas maneras: desde una red rígida y cableada con conexiones punto a punto entre todos los elementos, hasta una red inalámbrica y dispersa con capacidad de autoreconfiguración.

B. Arquitecturas de la nano-red

Hay dos aspectos esenciales en la definición de la arquitectura de la nano-red de continua: el número de buses y sus características eléctricas. La opción más inmediata es utilizar un único bus de 380 ó 400 V de corriente continua. De esta forma los cambios respecto a la red actual serían mínimos, y la mayor parte de equipos podrían seguir funcionando, obviando la rectificación de las actuales fuentes de alimentación CA/CC+CC/CC.

Esta solución, no obstante, no aprovecha plenamente las ventajas de la distribución en corriente continua, ni cubre toda la electrónica de consumo que se usa en el hogar. Redefinir completamente la arquitectura del sistema de distribución del hogar permite adaptar ésta a su uso, optimizando las características eléctricas de los equipos que se conectarán a ella.

Sin embargo, los equipos tienen diversas especificaciones de tensión y corriente, además de comportamientos y modos de uso distintos. Por otro lado, el número de buses ha de ser limitado por una serie de razones prácticas. Puesto que un hogar es un entorno flexible y que puede ser configurado de múltiples formas, se tiende a sobredimensionar el número de tomas y el cableado de cada estancia para cubrir todos los posibles usos. Si ese proceso se debe repetir para una cantidad significativa de buses, el número de tomas y convertidores de interfaz sería inmanejable.

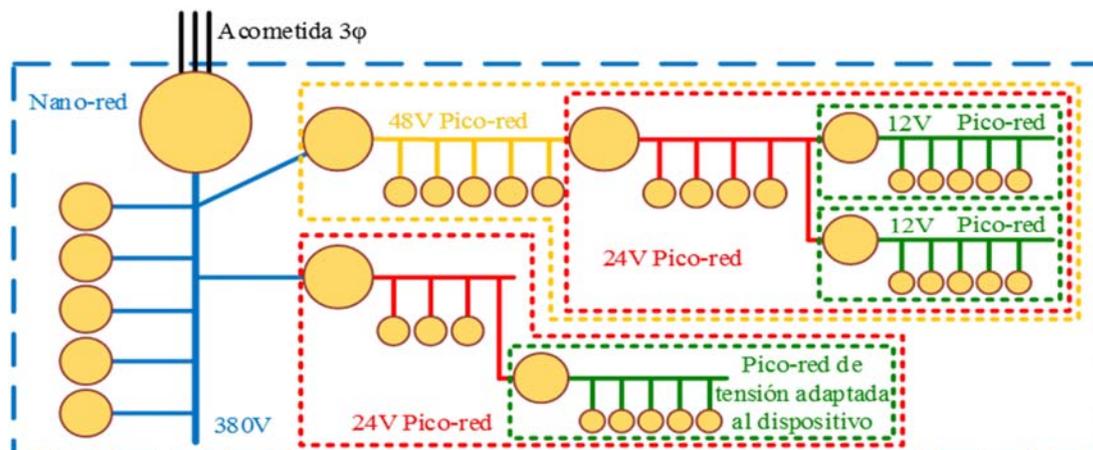


Fig. 2: Posible arquitectura para una nano-red doméstica con múltiples niveles de tensión.

Se debe, por tanto, adoptar una solución de compromiso. Típicamente, se propone un bus de alta tensión y uno o más buses de baja tensión. El primero, en general de 380 V [10],[14], se usa tanto para la distribución general, como para los equipos de alta potencia, ya que la distribución en tensiones relativamente altas permite manejo de mayores potencias con pérdidas más reducidas en los cables.

Los buses de baja tensión resultan más problemáticos. En primer lugar se debe escoger su número, puesto que las propuestas varían desde más de tres, con algunos adaptados al equipo a conectar [12], (Fig. 2), hasta uno sólo [11], [13].

Un único bus de baja tensión, si bien añade complejidad al sistema, permite disponer de una tensión intermedia que hace la transformación a las tensiones de funcionamiento de ciertos equipos más sencilla. Los equipos que se pueden beneficiar de este bus intermedio, están muy presentes en nuestra vida diaria: los ordenadores, la electrónica de consumo o la iluminación LED son ejemplos de ello. Todos éstos son equipos que trabajan a bajas tensiones y potencias reducidas, y cuyas fuentes de alimentación pueden ser más simples y compactas, haciéndose más sencillo su diseño en comparación con una alimentación desde 380 V.

Si bien la tensión del primer bus está basada en el estándar industrial de tensiones intermedias en rectificadores (i.e. 380 V), para el bus de baja tensión se proponen diversas posibilidades: típicamente 48 V, 24 V y 12 V [11]-[15].

El uso de buses de 48 V tiene como principal ventaja las menores pérdidas en los cables para la transmisión de la misma potencia en comparación con menores niveles de tensión en la distribución. Sin embargo, las tensiones por encima de 30 V de corriente continua son consideradas como no seguras al contacto [15], lo que presenta inconvenientes como un mayor coste de la instalación por las protecciones a introducir.

El bus de 24 V representa un compromiso entre la potencia que se puede transmitir, la distancia y la seguridad del suministro. Además se corresponde con el estándar de EMerge Alliance para espacios ocupados [15] y está orientado a los mismos equipos que se han propuesto en el presente artículo para el bus de baja tensión. En dicho estándar, se fijan canales de 24 V nominales y una potencia máxima de 100 W para distribución desde fuentes de alimentación en el ámbito de una oficina pequeña o una habitación. Las longitudes máximas de cables son de unos 10 m con calibre AWG 12 [16]. Si se utilizan cables más gruesos o más cortos, es posible la transmisión de mayor potencia, llegando a proponerse en algunos casos hasta 500 W por canal [13].

IV. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

La distribución en corriente continua es ampliamente utilizada en un sinnúmero de aplicaciones hoy en día, desde instalaciones completas en aviones “más eléctricos” [17] o barcos [18], a pequeños dispositivos como teléfonos móviles u ordenadores [11]. Si bien algunos de ellos no cumplen estrictamente con los requisitos establecidos anteriormente para ser considerados como nano-red, siguen una filosofía muy semejante. Se basan en uno o más buses de corriente continua

interconectados por convertidores, con una mayor o menor integración de almacenamiento y/o generación local.

A. Centros de procesamiento de datos

Una de las aplicaciones donde es mayor la implantación de la distribución en corriente continua son los sistemas de alimentación de centros de procesamiento de datos y grandes equipos de telecomunicaciones. Hoy en día hay varios estándares y recomendaciones (esencialmente equivalentes) publicados por entidades como ETSI [19] [20], ITU-T [21]-[23] o EMerge Alliance [24]. Todos ellos proponen un único bus de 380 V de corriente continua para la alimentación de los equipos.

Esta arquitectura está demostrado que mejora un 28% la eficiencia total del sistema de distribución en comparación a la tradicional, al tiempo que reduce los costes de operación y el capital necesario para su instalación [26].

B. Vehículos eléctricos

Los vehículos eléctricos, junto con su sistema de recarga de baterías, se puede considerar como una pico-red, esto es, una nano-red de orden inferior [11]. El cargador de baterías, a día de hoy, únicamente actúa como un rectificador que carga de forma controlada la batería del vehículo. Sin embargo, se espera que en un futuro cercano pueda comportarse como un CCE, y por tanto, ser bidireccional. Así gestionaría de forma inteligente el vehículo y su batería, dándole la funcionalidad de una pico-red dentro de una nano-red.

Internamente, al igual que barcos y aviones, el automóvil lleva un sistema de buses e interfaces alimentados por la batería principal y, en casos con tecnologías híbridas, incorporan otras fuentes de energía como un alternador o una pila de combustible. Es por esto que se puede ver el vehículo como una nano-red o pico-red, capaz de operar en modo isla durante su funcionamiento normal, y de conectarse a una nano-red de orden superior para la gestión de sus baterías.

C. Espacios de oficinas

EMerge Alliance dispone de un estándar de distribución en muy baja tensión para espacios ocupados, esto es, entornos de oficinas [15]. Éste está orientado esencialmente a canales de 24 VDC limitados a 100 W para iluminación, informática y dispositivos domóticos. Cabe destacar que ya se ha implantado con éxito en varias oficinas en Estados Unidos.

Debido a la potencia limitada de sus tomas, no es capaz de proporcionar una solución integral para un hogar. Los electrodomésticos de gran consumo de potencia o los equipos de entretenimiento de altas prestaciones no tendrían una toma capaz de suministrar suficiente potencia.

D. Aplicación en países en vías de desarrollo

En ciertos países en vías de desarrollo, especialmente aquellos con un medio rural extenso, disperso o con una orografía muy accidentada, la electrificación resulta difícil. Esto hace que el suministro eléctrico a zonas alejadas de las grandes ciudades presente muchas carencias o sea inexistente, haciendo que en torno a 1300 millones de personas vivan sin acceso fiable a la red [27].

Estos núcleos de población suelen depender de generadores

basados en combustibles fósiles, no sólo para iluminación y suministro eléctrico en hogares, sino también para funciones vitales primarias como las bombas de suministro de agua [28]. A medida que la demanda energética aumenta en estas zonas, se hace más problemático conseguir un suministro de calidad, tanto desde el punto de vista económico, como medioambiental.

Estos casos son una gran oportunidad para planearse la sustitución de la red tradicional, dependiente de los generadores, por una micro-red o nano-red con generación solar fotovoltaica y baterías, para disponer de energía también durante la noche. El esquema sería semejante al mostrado en la Fig. 3.

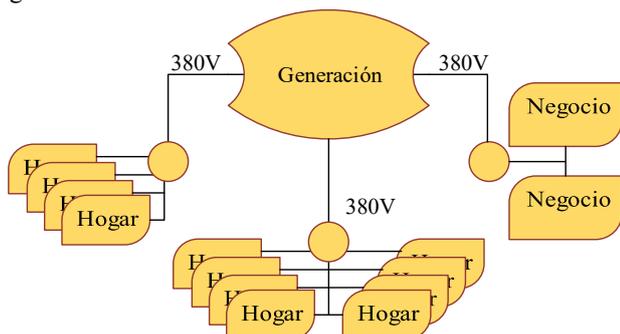


Fig. 3: Estructura propuesta para distribución en corriente continua en entornos rurales aislados [27].

Puesto que la generación solar fotovoltaica proporciona corriente continua y las distancias del cableado son típicamente reducidas, es posible hacer la distribución en continua a una tensión relativamente baja, eliminando conversiones innecesarias.

V. RETOS DE LAS NANO-REDES

A. Control de la nano-red

Uno de los retos al que se deben enfrentar las redes inteligentes, es el control de un gran número de elementos independientes. A este problema hay que sumarle la complejidad que supone la gestión de sistemas poco predecibles, como la disponibilidad de energías renovables o el uso de los equipos eléctricos por parte de los usuarios.

Una aproximación bastante aceptada es la expuesta en [29]. Se trata de una estrategia de control basada en tres niveles jerárquicos. El primer nivel se encarga de asegurar el funcionamiento de los diferentes equipos conectados al bus, actuando directamente sobre ellos. El segundo nivel se encarga de armonizar las variables de control de cada uno de los equipos a las condiciones del bus común. Finalmente, el tercer nivel maneja el intercambio de energía con la sub-red de orden superior.

Para dar flexibilidad al control, se suele apostar por un sistema de control distribuido con comunicación entre los convertidores usados como interfaz con el bus común [30]-[33]. Esta comunicación puede establecer la señalización exclusivamente a través de las variables eléctricas del bus, o se puede establecer a partir de protocolos más complejos que permitan una mayor capacidad de comunicación [33].

La complejidad de estos tipos de controles se une a la

dificultad de predicción del comportamiento de los usuarios y la ausencia de un estándar a usar como referencia en los diseños. Es necesario, por lo tanto, trabajar en un control estandarizado que permita la interoperabilidad de los equipos instalados en un hogar. En la medida en que las nano-redes domésticas estén estandarizadas, será mucho más sencillo el diseño, implementación e interconexión de las mismas.

B. Interoperabilidad y estabilidad

Típicamente los convertidores se diseñan para asegurar su funcionamiento aislado con una carga genérica o muy bien caracterizada (motores, iluminación, etc.). Sin embargo, su buen funcionamiento no se garantiza cuando éstos se conectan en paralelo o en cascada entre sí, sin conocer cada uno las características del resto de equipos o el bus común. Éste es el escenario que se plantea al concretar varios convertidores a un bus, o interconectar varios buses. Es en estos casos donde, independientemente de que el convertidor esté bien diseñado en relación a la carga que tiene que gestionar, se pueden producir inestabilidades en el sistema debido a la interconexión con el/los bus/es, que pueden llegar a dañar los elementos conectados al mismo.

Este comportamiento inestable a nivel de interconexión de convertidores se debe a la interacción de sus impedancias con el/los bus/es. Cuando la regulación a la salida es muy estricta, el convertidor es visto desde el bus como una carga o fuente de potencia constante, que presenta una impedancia con parte real negativa a bajas frecuencias.

Los análisis de estabilidad típicamente se basan en el criterio de Middlebrook, que relaciona las impedancias vistas desde el bus de los convertidores conectados a él con la estabilidad del mismo [34]. Éste es una versión reducida del criterio de Nyquist [35], que ofrece una condición suficiente pero no necesaria.

El análisis basado en las impedancias de los convertidores conlleva múltiples dificultades. Por un lado, la flexibilidad del sistema propuesto exige el estudio de multitud de escenarios diferentes y la identificación del caso peor. Por otra parte, los convertidores comerciales típicamente proporcionan poca información sobre sus características internas, requiriendo el uso de modelados en “caja negra” basados en medidas experimentales [36], [37] para garantizar la estabilidad del sistema.

VI. CONCLUSIÓN

Los cambios producidos en los últimos años en la generación, almacenamiento y consumo de la energía eléctrica, tanto a nivel global como en los hogares, han propiciado un cambio de mentalidad con respecto al sistema más adecuado para la distribución de energía eléctrica. Este hecho unido a la relativamente reciente preocupación por la reducción del consumo energético, hace que se esté en un momento propicio para empezar a proponer alternativas al sistema actual, el cual hay que recordar que está basado en razonamientos en base a realidades de hace 100 años.

Si bien presenta una gran cantidad de retos que han de ser superados, la distribución en corriente continua ofrece también una serie de ventajas. Éstas podrían, en algunas aplicaciones,

ser atractivas para nuevas instalaciones, o suficientemente rentables a largo plazo como para motivar la sustitución de los sistemas tradicionales. Ejemplos de ello son los centros de procesamiento de datos, donde estas tecnologías están disponibles de forma comercial, o los vehículos militares de gran tamaño, que tienden cada vez más a la electrificación de sus sistemas en corriente continua.

Además, se debe tener en cuenta la constante aparición de nuevos desarrollos. Algunos ejemplos son los dispositivos semiconductores de banda prohibida ancha, la mayor capacidad de integración de elementos y sistemas embebidos, o el despliegue de nuevas tecnologías de comunicación que pueden propiciar ventajas aún mayores en el uso de nano-redes. Estamos, por tanto, presenciando el inicio de todo un mundo de posibilidades.

VII. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado mediante la financiación del Gobierno de España a través de los proyectos DPI2013-47176-C2-2-R y DPI2013-47176-C2-1-R y las becas FPI BES-2014-070785 y BES-2014-068096 y mediante la financiación del Gobierno del Principado de Asturias a través del proyecto FC-15-GRUPIN14-143, la beca "Severo Ochoa"BP14-085" y los fondos FEDER.

REFERENCES

- [1] F. Blaabjerg, C. Zhe y S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 19, n° 5, pp. 1184-1194, 2004.
- [2] P. Torcellini, S. Pless, M. Deru y D. Crawley, "Zero Energy Buildings: A critical look at the definition," de *ACEEE Summer Study, Pacific Grove, CA*, 2006.
- [3] E. K. Hansen, G. G. Hammershoj Olesen y M. Mullins, "Home Smart Home: A Danish Energy-Positive Home Designed With Daylight," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, n° 11, pp. 2436-2449, 2013.
- [4] The Research Centre on Zero Emission Buildings, "Pilot Projects," [En línea]. Available: <http://www.zeb.no/index.php/pilot-projects>. [Último acceso: 14 Enero 2016].
- [5] C. L. Sulzberger, "Triumph of AC. 2. The battle of the currents," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 1, n° 4, pp. 70-73, 2003.
- [6] D. J. Hammerstrom, "AC Versus DC Distribution Systems - Did We Get it Right?" *Power Engineering Society General Meeting*, pp. 24-28, 2007.
- [7] H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise y H. Hayakawa, "Fundamental characteristics of DC microgrid for residential houses with cogeneration system in each house," *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, Pittsburgh, PA, 2008.
- [8] P. B. Evans, S. Kuloor y B. Kroposki, "Impacts of plug-in vehicles and distributed storage on electric power delivery networks," de *Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '09. IEEE*, Dearborn, MI, 2009.
- [9] B. R. Andersen, "HVDC transmission-opportunities and challenges," *AC and DC Power Transmission, 8th IEE International Conference on*, 2006.
- [10] B. T. Patterson, "DC, Come Home: DC Microgrids and the Birth of the "Enernet"," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 10, n° 6, 2012.
- [11] D. Boroyevich, I. Cvetkovic, D. Dong, R. Burgos, F. Wang y F. Lee, "Future Electronic Power Distribution Systems - A contemplative view -," *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2010 12th International Conference on*, Basov, 2010.
- [12] J. Kato y H. Takada, "Power Feeding Interfaces between Household Direct Current Power Feeding System and Household Telecommunication Equipment," *NTT Technical Review*, vol. 10, 2012.
- [13] M. Rodríguez, G. Stahl, L. Corradini y D. Maksimovic, "Smart DC Power Management System Based on Software-Configurable Power Modules," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 28, n° 4, 2013.
- [14] T. Dragicevic, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero y D. Skrlec, "Advanced LVDC Electrical Power Architectures and Microgrids: A step toward a new generation of power distribution networks," *Electrification Magazine, IEEE*, vol. 2, n° 1, pp. 54-65, 2014.
- [15] EMerge Alliance, "Occupied Space Standard Version 1.1".
- [16] EMerge Alliance, "NEC Chapter 3: Wiring Methods and Materials. Low-voltage Suspended Ceiling Power Distributions Systems," 2014.
- [17] D. Izquierdo, R. Azcona, F. del Cerro, C. Fernández y B. Delicado, "Electrical power distribution system (HV270DC), for application in more electric aircraft," de *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Twenty-Fifth Annual IEEE*, Palm Springs, CA, 2010.
- [18] J. G. Ciezki y R. W. Ashton, "Selection and stability issues associated with a navy shipboard DC zonal electric distribution system," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 15, n° 2, pp. 665-669, 2000.
- [19] ETSI, "ETSI EN 300 132-3-1 V2.1.1. Power supply interface at the input to telecommunications and datacom (ICT) equipment; Part 3: Operated by rectified current source, alternating current source or direct current source up to 400 V; Sub-part 1," 2012.
- [20] ETSI, "ETSI EN 301 605 V1.1.1. Earthing and bonding of 400 VDC data and telecom (ICT) equipment," 2013.
- [21] ITU-T, "L.1001. External universal power adapter solutions for stationary information and communication technology devices," 2012.
- [22] ITU-T, "L.1200. Direct current power feeding interface up to 400 V at the input to telecommunication and ICT equipment," 2012.
- [23] ITU-T, "L.1201. Architecture of power feeding systems of up to 400 VDC," 2014.
- [24] EMerge Alliance, "Data/Telecom Center Standard Version 1.0".
- [25] D. E. Geary, D. P. Mohr, D. Owen, M. Salato y B. J. Sonnenberg, "380V DC Eco-system Development Present Status and Future Challenges," *Intelec*, Berlin, 2013.
- [26] ALee, G.; Tschudi, W., "Edison Redux: 380 Vdc Brings Reliability and Efficiency to Sustainable Data Centers," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol.10, no.6, pp.50-59, 2012
- [27] P. Maduri, J. Rosa, S. Sanders, E. Brewer y M. Podolsky, "Design and Verification of Smart and Scalable DC Microgrids for Emerging Regions," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE*, Denver, CO, 2013.
- [28] M. R. Khan y E. D. Brown, "DC nanogrids: A low cost PV based solution for livelihood enhancement for rural Bangladesh," de *Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET), 2014 3rd International Conference on the*, Dhaka, Bangladesh, 2014.
- [29] J. Guerrero, J. Vasquez, J. Matas, L. de Vicuña y M. Castilla, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids; A General Approach Toward Standardization," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, n° 1, pp. 158-172, 2011.
- [30] P. Karlsson y J. Svensson, "DC bus voltage control for a distributed power system," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 18, n° 6, 2003.
- [31] J. Schonberger, R. Duke y S. Round, "DC-Bus Signaling: A Distributed Control Strategy for a Hybrid Renewable Nanogrid," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 53, n° 5, pp. 1453-1460, 2006.
- [32] J. Schonberger, S. Round y R. Duke, "Autonomous Load Shedding in a Nanogrid using DC Bus Signalling," de *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on*, 2006.
- [33] X. Lu, J. Guerrero, K. Sun y J. Vasquez, "An Improved Droop Control Method for DC Microgrids Based on Low Bandwidth Communication With DC Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 29, n° 4, 2014.
- [34] R. D. Middlebrook, "Input filter considerations in design and application of switching regulators," *Industry Applications Society annual Meeting*, 1976.
- [35] C. Wildrick, F. Lee, B. Cho y B. Choi, "A method of defining the load impedance specification for a stable distributed power system," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 10, n° 3, pp. 280-285, 1995.
- [36] I. Cvetkovic, D. Boroyevich, P. Mattavelli, F. Lee y D. Dong, "Un-terminated, low-frequency terminal behavioral model of dc-dc converters," *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE*, 2011.
- [37] L. Arnedo, D. Boroyevich, R. Burgos y F. Wang, "Un-terminated frequency response measurements and model order reduction for black-box terminal characterization models," de *Applied Power Electronics Conference and Exposition, (APEC). Twenty-Third Annual IEEE*, 2008.