

Informe final publicable de proyecto

Rol activo de centros de datos y otros grandes consumidores de energía eléctrica: respuesta de la demanda y servicios auxiliares

Código de proyecto ANII: FSE_1_2017_1_144789

12/04/2021

NESMACHNOW, Sergio (Responsable Técnico - Científico)

MURAÑA SILVERA, Jonathan (Investigador)

BAZERQUE GIUSTO, Juan Andrés (Investigador)

BELCREDI ZAMBRA, Gonzalo (Investigador)

BELZARENA GARCIA, Pablo Javier (Investigador)

ITURRIAGA FABRA, Santiago Damian (Investigador)

MASSOBRIO, Renzo (Investigador)

MONTES DE OCA RODRIGUEZ, Sebastián Daniel (Investigador)

MONZÓN RANGELOFF, Pablo Ariel (Co-Responsable Técnico-Científico)

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE INGENIERÍA (Institución Proponente)

Resumen del proyecto

Las redes eléctricas están viviendo un proceso de cambio debido a los procesos de apertura de los mercados eléctricos, el ingreso de nuevas fuentes de energía renovable y la incorporación de tecnologías de la información a la red eléctrica. En este contexto, un gran cliente de la red con flexibilidad en su consumo puede convertirse en un agente de mercado e incorporar la participación activa en el mercado eléctrico a su plan de negocios. Varios sistemas cuentan con mecanismos para flexibilizar su consumo energético, adaptándose a requerimientos de la red y son candidatos naturales para implementar estrategias de respuesta de la demanda: sistemas en nube de autos eléctricos con capacidad de entregar energía a la red, sistemas de riego inteligente para filtrado de variaciones de los recursos renovables, edificios inteligentes, demanda de hogares agregada, centros de cómputos y datos, etc.

El objetivo general del proyecto consistió en estudiar estrategias óptimas de gestión de la energía y respuesta a la demanda en sistemas planificables. Como caso de estudio se abordó la gestión de un centro de datos, contemplando la planificación de tareas propias del servicio y los requerimientos térmicos de la infraestructura computacional, así como la posibilidad de proveer servicios auxiliares a la red eléctrica y participar como agente en el mercado eléctrico, en base al paradigma de respuesta de la demanda. Se aplicaron los resultados del estudio en el Centro Nacional de Supercomputación (Cluster-UY). El modelo que se propone para el caso de estudio es directamente aplicable a otros sistemas de relevancia a nivel nacional que admitan planificación de carga y la aplicación de técnicas de gestión y respuesta a la demanda y la provisión de servicios auxiliares. El modelo desarrollado contribuye a la propuesta de nuevas estrategias de gestión y también a la definición de normas regulatorias.

Ingeniería y Tecnología / Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Electrónica e Ingeniería de la Información / Ingeniería Eléctrica y Electrónica / Gestión óptima de sistemas eléctricos

Palabras clave: Respuesta de la demanda / Redes inteligentes / Gestión de la energía de grandes consumidores /

Introducción

La línea de investigación es redes eléctricas inteligentes y gestión de la demanda para eficiencia energética. Las redes eléctricas atraviesan un proceso de cambio, debido a tres factores: 1) la desregulación de los mercados eléctricos; se ha pasado de operadores monopólicos y verticalmente integrados, a mercados en competencia a nivel mayorista, llegando incluso a consumidores finales; 2) el ingreso de nuevas fuentes de energía renovable (eólica y solar fotovoltaica) con su incertidumbre y variabilidad temporal; 3) la incorporación a la red de tecnologías de la información, conformando las denominadas "redes inteligentes" (US-DoE, 2008; Sioshansi, 2011), permite concebir un modelo en que los grandes consumidores adopten un rol activo en la red, cambiando el paradigma tradicional de consumidores pasivos y un despacho/planificación que sólo involucra la generación de energía. En este contexto, el sistema eléctrico puede estimular a los consumidores a adaptar su perfil de consumo de acuerdo a las necesidades de la red, lo que se denomina respuesta de la demanda (US-DoE, 2016; Paterakisa et al., 2017). Los grandes consumidores con flexibilidad, como el caso de los centros de datos, los sistemas de nubes de autos eléctricos, los edificios inteligentes, los grandes sistemas de riego, etc, pueden participar en el sistema eléctrico, ajustando su consumo según consignas que vengan desde la red eléctrica, pudiendo percibir remuneraciones previamente acordadas con el operador de la red (Peng et al., 2017; Blum et al., 2017; Kim et al., 2016; Wierman et al., 2014).

En los mercados eléctricos modernos, un gran consumidor con flexibilidad en su consumo de potencia activa y reactiva, puede participar en el mercado de distintas formas. Este concepto es clave para implementar estrategias orientadas a redes inteligentes, asociando a los consumidores roles de cliente activo y agentes de mercado (Kirsi et al., 2016; LeFloch et al., 2017; Knezovic et al., 2017; Mohammadi-Hosseininejad et al., 2018). Como cliente activo, el consumidor puede adecuar su demanda a la existencia de horas pico, reduciendo su consumo en estos períodos y contribuyendo a aplanar la curva de demanda del sistema. También puede ajustarse a un esquema de tarifa multi-horaria, manejando bloques horarios donde es preferible consumir, u otras estrategias similares. Puede también implementar estrategias más avanzadas, como acuerdos del día antes, basada en anuncios de precios con anticipación. Finalmente, en algunos mercados se dispone de información del precio de la energía en tiempo real, que estimula un comportamiento dinámico de los consumidores. Como agente de mercado, el consumidor puede participar del mercado eléctrico y percibir ingresos mediante la aplicación de mecanismos que pueden estar restringidos o impulsados por la normativa vigente.

En el mercado mayorista uruguayo de energía es posible establecer contratos entre un gran consumidor y una empresa generadora a través de acuerdos bilaterales que contemplen las características propias de ambos. Otra forma de participación para agentes del mercado, que aún no está presente en nuestro país, es a través de subastas, por ejemplo en un mercado del día antes, ofertando un perfil de consumo horario y estableciendo precios máximos a pagar (Jie and Tsuji, 2016).

En este contexto, resulta necesario utilizar estrategias para planificar la demanda, la respuesta a las situaciones puntuales e histórica del mercado eléctrico, y la gestión de la energía para poder participar en el mercado en los distintos roles. Técnicas específicas son necesarias para dimensionar las actividades que consumen energía, adelantar o diferir su ejecución, analizar el impacto en la eficiencia energética global y la posible degradación de la calidad de servicio ofrecida a los usuarios. Este tipo de técnicas de planificación son imprescindibles para asegurar un correcto uso de los recursos energéticos y para garantizar la eficiencia energética de grandes consumidores flexibles. Como caso de estudio, el proyecto propuso abordar la planificación de centros de datos. Se concibe a los centros de datos como un ejemplo de sistemas planificables del tipo de los que han surgido en las sociedades modernas, vinculados con el paradigma de smart grid, incluyendo nubes de autos eléctricos, edificios inteligentes, sistemas de riego y otros sistemas planificables. En el contexto del proyecto, el caso de un centro de datos constituye un escenario que permite la experimentación directa de las estrategias de respuesta a la demanda en los entornos académico y empresarial.

En Uruguay, los centros de datos y de cómputo se han desarrollado recientemente. El Centro Nacional de Supercomputación (Cluster-UY) provee soporte para trabajos académicos con grandes requisitos de cómputo. ANTEL inauguró el Datacenter Internacional Ing. José Luis Massera, cuyo objetivo es brindar soluciones para proyectos empresariales, proveedores de servicios sobre Internet, empresas comerciales y de tecnología de la información, sector salud y sector público. Estos centros de datos nacionales tienen importantes requisitos energéticos. El proyecto estudió diversas características particulares de los centros de datos sobre flexibilidad de consumo energético y su relación con la calidad de servicio ofrecida a los usuarios, técnicas de respuesta a la demanda y su adaptación a los patrones de consumo y disponibilidad energética en Uruguay y la región, ofreciendo servicios auxiliares en el mercado eléctrico uruguayo.

En el caso de estudio llevado adelante en este proyecto (la operativa de grandes centros de datos), en la práctica diaria, las técnicas de gestión y planificación son habitualmente utilizadas, pero en general se siguen enfoques empíricos que no involucran el modelo del sistema como problema de control y el análisis del problema desde el punto de vista estadístico y de optimización. Muchos aspectos vinculados con el problema suelen resolverse con un enfoque exclusivamente práctico, que no garantiza que los resultados obtenidos sean, o se aproximen a, las situaciones de consumo energético óptimo. Los centros de datos constituyen un muy buen candidato para explorar distintas estrategias de respuesta de la demanda y provisión de servicios auxiliares. Aprovechando las flexibilidades que brindan los modelos de participación en el mercado, los centros de datos pueden ampliar el perfil de sus negocios y las estrategias desarrolladas pueden extrapolarse a otros tipos de grandes consumidores, incluyendo edificios inteligentes, autos eléctricos, demanda de hogares agregada, etc.

Metodología/diseño del estudio

El proyecto propuso el estudio de estrategias de planificación y respuesta a la demanda de grandes consumidores de energía eléctrica, incluyendo la provisión de servicios auxiliares a la red eléctrica. Como caso de estudio se abordó la planificación de centros de datos como caso representativo de sistemas planificables de relevancia en el ámbito nacional. Las principales preguntas que guiaron la investigación del proyecto incluyen:

¿Es posible abordar de manera conjunta y óptima la gestión de las tareas a realizar por un centro de datos y la respuesta de la demanda?

¿Cómo se puede incorporar a la gestión óptima la información disponible sobre la red (estado general, congestión, precios instantáneos, precios nodales)?

¿Cómo influyen las distintas escalas de tiempo asociadas a la gestión de las tareas, la variabilidad térmica y las fuentes de incertidumbre asociadas a los servicios del mercado eléctrico?

Dado un nivel de calidad de servicio comprometido a sus usuarios, ¿es posible asegurar un cierto nivel de potencia que permita al centro participar en el mercado eléctrico?

¿Qué requisitos técnicos debe cumplir un centro de datos para proveer servicios en el mercado eléctrico y cuán alcanzables son éstos para distintos esquemas de funcionamiento?

¿Cómo impacta en las respuestas a estas preguntas la presencia de generación y/o almacenamiento de energía en el centro de datos?

El proyecto ha sido de gran relevancia para las instituciones participantes, que apoyan la propuesta. Para la Facultad de

Ingeniería, constituyó una instancia de formación de recursos humanos calificados. El proyecto viabilizó una tesis de posgrado completada en la temática. Asimismo, las investigaciones y las técnicas de planificación y gestión de centros de datos fueron verificadas e implementadas en Cluster-UY, que fue la plataforma de evaluación experimental de las propuestas y el caso de estudio de infraestructura computacional realista para aplicar las metodologías desarrolladas. Se espera que Cluster-UY pueda incorporar en el mediano plazo estrategias de respuesta a la demanda en sus mecanismos de gestión automática y pueda participar como ofertante de servicios auxiliares en el mercado eléctrico. Para ANTEL, el Data Center Massera es un emprendimiento novedoso en magnitud y potencialidad. La empresa ha manifestado su interés en investigar estrategias para la gestión de la energía, tanto en su rol de proveedor de servicios a clientes como de gran consumidor de la red eléctrica. Por su parte, UTE ha incorporado el paradigma de redes inteligentes y son de interés las iniciativas que promuevan el comportamiento inteligente de los consumidores, en particular de grandes clientes que pueden actuar de forma solidaria con el sistema. Para el sistema eléctrico, que un gran consumidor provea servicios auxiliares es una experiencia de interés, en especial si se realiza de manera controlada y acordada. La coordinación existente entre ANTEL y UTE permitiría implementar de manera coordinada estrategias de interés para el sistema eléctrico, que podrían aportar a la conceptualización de nuevos mecanismos de participación de agentes en el mercado eléctrico uruguayo.

La estrategia de investigación utilizada se basó en la aplicación de técnicas cualitativas y cuantitativas, que se complementaron para la resolución del problema de gestión de centros de datos considerando el uso eficiente de la energía.

Cualitativamente, se trabajó sobre ideas y propuestas de la literatura relacionada para identificar aportes valiosos existentes y oportunidades para contribuir al área de conocimiento, analizando adaptar los métodos de resolución del problema a la realidad nacional. Se partió de un estudio inicial que permitió articular e integrar el conjunto de decisiones a tomar, para modelar de manera coherente la realidad y elaborar un marco para responder de manera rigurosa las preguntas de investigación y comparar las respuestas formuladas con la evidencia empírica. Cuantitativamente, se utilizaron métodos para el análisis objetivo de las variables relevantes para modelar el comportamiento y la gestión de centros de datos desde el punto de vista de la eficiencia energética. Se propusieron métodos concretos para resolver los problemas de optimización relacionados y se validaron sus resultados mediante análisis comparativos. Para crear escenarios de evaluación de las técnicas de gestión y optimización propuestas se aplicaron estrategias de registro de datos a partir de diversas fuentes disponibles, para validar los métodos de resolución sobre instancias representativas del problema. La estrategia de investigación se complementó con métodos de investigación sintética, mediante el análisis de casos de estudio relevantes para la realidad nacional, en el ámbito académico y comercial. Se contó con la colaboración de Andrei Tchernykh, del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California, México, especialista en planificación de sistemas computacionales, planificación de eficiencia energética y gestión de infraestructuras de cómputo y centros de datos. Se inició también una nueva colaboración con Leibniz Supercomputing Centre para desarrollar algoritmos de simulación.

La metodología desarrollada para alcanzar los objetivos específicos incluyó como principales actividades: 1) se realizó una revisión y análisis del estado del arte sobre las temáticas a investigar, incluyendo aplicaciones de respuesta de la demanda y provisión de servicios auxiliares por centros de datos, gestión y planificación de eficiencia energética en sistemas computacionales de gran porte y estrategias de modelado dinámico de agentes del mercado eléctrico; 2) se elaboró una formulación matemática del problema de gestión y planificación de centros de datos, considerando como objetivos la eficiencia energética y la calidad de servicio ofrecida a los usuarios; 3) se desarrollaron modelos matemáticos para representar el comportamiento de las principales variables que gobiernan el sistema, incluyendo las cargas de trabajo y los patrones de utilización por parte de los usuarios, el acondicionamiento térmico requerido, el intercambio de energía y de información con la red eléctrica, la dinámica de estos intercambios y las restricciones asociadas; 4) se plantaron los problemas de optimización y gestión involucrados, en dos etapas: i) separando la gestión de las tareas y el acondicionamiento térmico y estudiando el impacto de la efectuar el análisis de la inclusión de un perfil deseado de consumo y respuesta a la demanda en la gestión de las tareas de un centro de datos y ii) integrando al modelo todas las actividades de la operación de un centro de datos; 5) se desarrollaron e implementaron algoritmos de optimización para resolver el problema planteado, bajo las consideraciones del modelo matemático desarrollado; 6) se modeló la participación de un centro de datos en un mercado con diversos horizontes de tiempo contemplando la dinámica energética propia, con diferentes esquemas de gestión de tareas; 7) se validaron y evaluaron los algoritmos de optimización sobre escenarios realistas contruidos con información de centros de datos académicos y comerciales en Uruguay y otros países del mundo e información real sobre las capacidades de la red y mercado eléctrico en cada caso; 8) se incorporó a los estudios anteriores la presencia en el centro de datos de generación y/o almacenamiento de energía.

Resultados, análisis y discusión

Los principales resultados del proyecto se resumen a continuación:

- 1) se realizó un relevamiento del estado del arte en modelo de gestión energética en centros de datos;
- 2) se desarrollaron modelos matemáticos para la optimización de consumo energético considerando restricciones de servicio y brindando servicios auxiliares a la red, permitiendo al centro de datos participar en el mercado eléctrico como agente de respuesta a la demanda;
- 3) se realizaron aportes para una normativa de participación de grandes consumidores en un mercado de respuesta de la demanda en Uruguay.
- 4) se desarrollaron e implementaron algoritmos de optimización basados en modelos de negociación, estrategias heurísticas y computación evolutiva para la resolución de diferentes variantes del problema, incluyendo la utilización de información local (modelo distribuido) y global (modelo centralizado)
- 5) se validaron los enfoques propuestos y los algoritmos desarrollados sobre casos de estudio realistas, considerando la infraestructura del Centro Nacional de Supercomputación (Cluster-UY) sobre el Datacenter Massera de ANTEL.

El modelo aplicado para el caso de estudio sobre centros de datos es también directamente aplicable a otros sistemas de relevancia a nivel nacional que admitan planificación de carga y la aplicación de técnicas de gestión y respuesta a la demanda y la provisión de servicios auxiliares, incluyendo sistemas en nube de autos eléctricos con capacidad de entregar energía a la red, sistemas de riego inteligente para filtrado de variaciones de los recursos renovables, edificios inteligentes, demanda de hogares agregada y otros.

Conclusiones y recomendaciones

Las principales conclusiones del proyecto están vinculadas a la viabilidad de la aplicación de técnicas de planificación inteligente del consumo energético en centros de datos y otros grandes consumidores con cargas planificables, permitiendo su participación en el mercado eléctrico como agentes activos en mecanismos de respuesta a la demanda y servicios auxiliares. En este aspecto, los resultados alcanzados en el proyecto permitieron comprobar la precisión de los modelos y formulaciones matemáticas desarrolladas para modelar la realidad de un centro de datos participando en una red eléctrica inteligente y la eficacia de los enfoques algorítmicos desarrollados para proveer soluciones prácticas que permitan mejorar la operativa tradicional ('Business as Usual') de centros de datos y también a enfoques previos basados en teoría de juegos que realizan suposiciones fuertes respecto a los modelos de consumo energético.

Las estrategias desarrolladas constituyen un excelente punto de partida para implementar métodos inteligentes de planificación en centros de datos y otros sistemas planificables reales.

Referencias bibliográficas

- A. Andrae, T. Edler (2015). On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. *Journal of Challenges* 6(1), 117-157.
- D. Aikema, R. Simmonds, and H. Zareipour (2012), Data centres in the ancillary services market, *IEEE Green Computing Conference*, 1-10.
- N. Akhter, M. Othman (2016). Energy aware resource allocation of cloud data center: review and open issues. *Cluster Computing* 19(3), 1163-1182.
- L. Barroso, J. Clidaras, U. Höelzle (2013). *The Datacenter as a Computer: An Introduction to the Design of Warehouse-Scale Machines*, Morgan and Claypool Publishers.
- R. Bianchini (2012). Leveraging renewable energy in data centers: present and future. *Proceedings of the 21st international symposium on High-Performance Parallel and Distributed Computing*, 135-136.
- D.H. Blum, T. Zakula, L.K. Norford Opportunity (2017) Cost Quantification for Ancillary Services Provided by Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems *IEEE Trans. on Smart Grids*, 3, pp. 1264 - 1273.
- P. Cappers, C. Goldman, and D. Kathan (2010). Demand response in US electricity markets: Empirical evidence. *Energy*, 35(4), 1526–1535.
- T. Cioara, I. Anghel, M. Bertocini, I. Salomie, D. Arnoneb, M. Mamminab, T. Velivassaki, M. Antal (2018). Optimized flexibility management enacting Data Centres participation in Smart Demand Response programs. *Future Generation Computer Systems* 78, 330–342.
- L. Cupelli, P. Jahangiri, A. Monti, D. Müller (2016). Ancillary Services from Data Center HVAC Systems and Back-up Generator Sets. *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 5579-5584.
- M. Dabbagh, A. Rayes, B. Hamdaoui, M. Guizani (2016). Peak shaving through optimal energy storage control for data centers. *Proceedings of IEEE International Conference on Communication*, 1-6.
- US Department of Energy (2005). Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them". Disponible en <http://energy.gov/>. Consultado octubre de 2016.
- US Department of Energy (2008). The smart grid: An introduction. Disponible en <http://energy.gov/>. Consultado octubre de 2016.
- US Department of Energy (2016). Demand Response and Energy Storage Integration Study. Disponible en <http://energy.gov/>. Consultado octubre de 2016.
- B. Dorronsoro, S. Nesmachnow, J. Taheri, A. Zomaya, E-G. Talbi, P. Bouvry (2014). A hierarchical approach for energy-efficient scheduling of large workloads in multicore distributed systems. *Sustainable Computing: Informatics and Systems* 4(4), 252-261.
- M. Ghamkhari, H. Mohsenian-Rad (2012). Data Centers to Offer Ancillary Services, *Proceedings of IEEE 3rd International Conference on Smart Grid Communications*, 436–441.
- M. Ghamkhari, A. Wierman, H. Mohsenian-Rad (2016). Energy Portfolio Optimization of Data Centers, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1-12.

- G. Ghatikar, M. Piette, S. Fujita, A. McKane, J. Dudley, A. Radspieler, K. Mares, D. Shroyer (2010), Demand Response and Open Automated Demand Response Opportunities for Data Centers, Lawrence Berkeley National Laboratory Tech. Rep. LBNL-3047E.
- R. Gandhi, H.H. Liu, Y.C. Hu, G. Lu, J. Padhye, L. Yuan, M. Zhang (2014). Duet: cloud scale load balancing with hardware and software. *SIGCOMM Computer Communication Review* 44(4), 27-38.
- E. González-Romera, F. Barrero-González, E. Romero-Cadaval, M.I. Milanés-Montero (2015) Overview of plug-in electric vehicles as providers of ancillary services. 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE), 516-521.
- N. Horner, I. Azevedo, D. Sicker, Y. Agarwal (2016). Dynamic Data Center Load Response to Variability in Private and Public Electricity Costs
IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), pp. 80-85.
- S. Iturriaga, S. Nesmachnow, B. Dorransorro, P. Bouvry (2013). Energy efficient scheduling in heterogeneous systems with a parallel multiobjective local search. *Computing and Informatics* 32 (2), 273-294
- S. Iturriaga, B. Dorransoro, S. Nesmachnow (2016). Multiobjective evolutionary algorithms for energy and service level scheduling in a federation of distributed datacenters. *International Transactions in Operational Research* 24, 199–228.
- B. Jie, T. Tsuji (2016). An Analysis of Market Mechanism and Bidding Strategy for Power Balancing Market in Micro-grid, China International Conference on Electricity Distribution, 1-5.
- Y. Kim, D.H. Blum, N. Xu, L. Su, L.K. Norford (2016). Technologies and Magnitude of Ancillary Services Provided by Commercial Buildings. *Proceedings of the IEEE*. 104(4), 758-779.
- K. Kirsí, S. Mäkinen, J. Pertti, R. Antti and M. Joni (2016). The role of residential prosumers initiating the energy innovation ecosystem to future flexible energy system. *Proceedings of 13th International Conference on the European Energy Market*, 1-5.
- K. Knezović, S. Martinenas, P.B. Andersen, A. Zecchino, M. Marinelli (2017) Enhancing the Role of Electric Vehicles in the Power Grid: Field Validation of Multiple Ancillary Services. *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 3(1), 201-209.
- P. Kotsampopoulos, N. Hatziaargyriou, B. Bletterie, G. Lauss (2013). Review, analysis and recommendations on recent guidelines for the provision of ancillary services by Distributed Generation. *Proceedings of IEEE International Workshop on Intelligent Energy Systems*.
- C. Le Floch, E. Kara, S. Moura (2017) PDE Modeling and Control of Electric Vehicle Fleets for Ancillary Services: A Discrete Charging Case. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1-9.
- D. Marinescu (2013). *Cloud Computing: Theory and Practice*. Morgan Kaufmann. ISBN 9780124046276.
- S.M. Mohammadi-Hosseininejad, A. Fereidunian, H. Lesani (2018) Reliability improvement considering plug-in hybrid electric vehicles parking lots ancillary services: a stochastic multi-criteria approach. *IET Generation, Transmission & Distribution* 12(4), 824-833.
- J. Momoh (2012). *Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis*. Wiley-IEEE Press.
- S. Montes de Oca, P. Belzarena, P. Monzón (2015). Optimal Demand Response based on time-correlated utility in forward power markets, *Proceeding of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America*, 597-602.
- S. Montes de Oca, P. Belzarena, P. Monzón (2016). Optimal demand response in distribution networks with several energy

retail companies, Proceedings of IEEE Multi-Conference on Systems and Control.

S. Nesmachnow, B. Dorransoro, J. Pecero, P. Bouvry (2013). Energy-aware scheduling on multicore heterogeneous grid computing systems, *Journal of Grid Computing* 11(4), 653-680.

S. Nesmachnow, C. Perfumo, Í. Goiri (2014). Controlling datacenter power consumption while maintaining temperature and QoS levels. *IEEE 3rd International Conference on Cloud Networking*, 242-247.

S. Nesmachnow, C. Perfumo, Í. Goiri (2015). Holistic multiobjective planning of datacenters powered by renewable energy. *Cluster Computing* 18 (4), 1379-1397.

F. Paganini, P. Belzarena, P. Monzón (2014), Decision making in forward power markets with supply and demand uncertainty, *International Conference on Information Sciences and Systems (invited paper)*, Princeton.

N.G. Paterakisa, O. Erdinc, J.P.S. Catalão (2017) . An overview of Demand Response: Key-elements and international experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69, pp.871–891, 2017.

Z. Peng, L. Hao (2017) Decentralized Coordination of Electric Vehicle Charging Stations for Active Power Compensation. *IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, 1-5.

F. Rahimi, A. Ipakchi (2016). Using a Transactive Energy Framework: Providing Grid Services from Smart Buildings. *IEEE Electrification Magazine* 4(4), 23-29.

N. Shaukata, S.M. Alia, C.A. Mehmooda, B. Khana, M. Jawadb, U. Farida, Z. Ullaha, S.M. Anwar, M. Majidd (2017). A survey on consumers empowerment, communication technologies, and renewable generation penetration within Smart Grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

F. Sioshansi (2011). *Smart Grid, Integrating Renewable, Distributed and Efficient Energy*. Academic Press.

A. Tchernykh, L. Lozano, U. Schwiegelshohn, P. Bouvry, J. Pecero, S. Nesmachnow, A. Yu. Drozdov (2016). Online bi-objective scheduling for IaaS clouds ensuring quality of service. *Journal of Grid Computing* 14 (1), 5-22.

D. Wang, C. Ren, A. Sivasubramaniam, B. Urgaonkar, and H. Fathy (2012). Energy Storage in Datacenters: What, Where, and How much?, *Proceedings of the 12th ACM SIGMETRICS/PERFORMANCE Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*, 187-198.

X. Wang, Y. Zhang, X. Liu, T. Cao (2015). Exploiting the potential of data centers in smart grids. *Proceedings of the 2015 International Conference on Applied Mechanics, Mechatronics and Intelligent Systems*, 403-409.

A. Wierman, Z. Liu, I. Liu, H. Mohsenian-Rad (2014). Opportunities and Challenges for Data Center Demand Response, *Proceedings of IEEE International Green Computing Conference*.

H. Zhang, S. Shao, H. Xu, H. Zou, C. Tian (2014). Free cooling of data centers: A review, *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews* 35, 171-182.

W. Zheng, K. Ma, X. Wang (2014). Exploiting thermal energy storage to reduce data center capital and operating expenses, *Proceedings of IEEE 20th International Symposium on High Performance Computer Architecture*.

Licenciamiento

Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. (CC BY-NC-ND)