

SOSTENIBILIDAD EN LA OPERACIÓN POR MINI - REDES AISLADAS CON SERVICIOS COMPLEMENTARIOS: CASO COLOMBIA

SUSTAINABILITY IN ISOLATED MINI – GRID OPERATION WITH ANCILLARY SERVICES: COLOMBIAN CASE

A. Arango - Manrique¹, S.X. Carvajal - Quintero²

¹E3P, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación., Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, Colombia. Email: aarangoma@unal.edu.co

² E3P, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación., Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, Colombia. Email: sxcarvajalq@unal.edu.co

RECIBIDO: abril 21, 2017. ACEPTADO: junio 02, 2017. VERSIÓN FINAL: noviembre 01, 2017

RESUMEN

Las redes de distribución que integran DER y operan aisladas del sistema de potencia, tienen unos desafíos técnicos y económicos en el suministro continuo a los usuarios. Se propone un modelo sostenible que combine aspectos técnicos y de mercado (o económicos) con el fin de aprovechar los DER para garantizar una continuidad en el suministro y los beneficios económicos para incentivar la inversión en la operación por mini - red aisladas.

PALABRAS CLAVE: Control de frecuencia, Control de tensión, Mini – red, Servicios Complementarios, Recursos Energéticos Distribuidos.

ABSTRACT

Integration of DER in the distribution system with the capacity to operate isolated from electrical power system, have some technical and economic challenges to a sustainable energy supply. We propose a model that include some technical and economic impacts to integrate DERs for security of supply and economic benefit to incentive the invest in isolated mini grid operation.

KEYWORDS: Ancillary services, Distributed Energy Resources, Frequency control, Mini – Grids, Voltage control

1. INTRODUCCIÓN

La operación por mini - red aisladas presenta una serie de desafíos técnicos y de mercado, especialmente por la integración de fuentes intermitentes de generación, sistemas de control distribuidos, almacenamiento y participación activa de la demanda [1]–[4]. Las dificultades que se presentan en la actualidad por falta de especificaciones técnicas y de mercado que definen los requerimientos para la prestación de los servicios complementarios de control de tensión y de frecuencia en una mini - red aislada, desaprovechan los aportes de la conexión de los DER conectados a la mini – red [1]–[3], [5]–[13].

Encontrar la forma para combinar la prestación de servicios técnicos de soporte mediante la integración de recursos energéticos distribuidos (DER) con un esquema de mercado que garantice la sostenibilidad de la mini - red aislada, es un reto de investigación debido a

los inconvenientes e incertidumbres asociadas a la prestación de los servicios complementarios a nivel de distribución.

El objetivo del paper es utilizar las ZNI como laboratorio natural para conjugar los requerimiento técnicos y económicos que permitan prestar con continuidad el servicio a los usuarios y que sean atractivos económicamente para los inversionistas. Se analiza un modelo de dinámica de sistemas, con un enfoque holístico de la sostenibilidad propuesta a partir de la prestación de servicios complementarios en una mini - red aislada.

En la sección 2 se propone la estructura del modelo de negocio, basado en el modelo Canvas. En la siguiente sección se presenta el modelo en dinámica de sistemas que conjuga los aspectos técnicos y el modelo económico con los resultados de los escenarios planteados, y por último, se presentan las conclusiones.



2. MODELO DE NEGOCIOS

La operación de las zonas aisladas, en las que este tipo de mini - red son viables, están basadas en políticas de decisión dictadas desde el gobierno, para que se garantice la prestación del servicio con continuidad y confiabilidad. Las zonas en las que las mini - redes aisladas pueden operar, tienen consideraciones especiales que dificultan la proliferación y difusión, por estar aislada del sistema tradicional, la expansión y modernización es costosa, lo que implica retardos en la implementación [14]. Sin embargo, gracias a la innovación tecnológica, que ha traído avances tanto para la generación como para el usuario final, y el descenso de los costos de algunas tecnologías, es posible estructurar estrategias de mercado, traducidas en modelos de negocio que hacen factible la operación por mini - red aisladas [15].

Los modelos presentados en la literatura tienen un enfoque económico y regulatorio, en el que se propone la integración de las actividades de la demanda para el mayor aprovechamiento de la energía [14], [16]. No obstante, se observa que carecen de fundamentos técnicos para garantizar una sostenibilidad técnica, como el soporte de servicios complementarios para integrarlos en el análisis de mercado y que exista factibilidad técnica y económica para la implementación de mini - red aisladas.

Inicialmente, se debe realizar la propuesta de valor en la que se describan los productos o servicios que crean valor a los clientes [17]. El objetivo principal del modelo que se propone es garantizar un suministro de electricidad seguro, confiable y sostenible, a partir de la prestación de servicios complementarios por medio de la inversión en DER (generación distribuida (DG) + almacenamiento (ESS)). Conteniendo en la propuesta de valor, las características que se van a ofrecer mediante la implementación de mini - red que presten servicios complementarios, permitiendo un desarrollo en el corto y mediano plazo.

Para incluir DER en las mini - redes aisladas es necesario considerar en el modelo de negocio, incentivos o ingresos a los inversionistas y que se motiven la inversión en tecnologías fundamentadas en la prestación confiable y segura en el suministro de energía. Por tanto, se propone incluir incentivos para la prestación de servicios complementarios, que en conjunto con un apoyo a la gestión de demanda puede estar asociado con la producción productiva de la zona [14].

El modelo Canvas está dividido en 9 partes fundamentales en las que se pueden para definir el modelo de negocio Canvas:

2.1. Segmentos del mercado:

En una mini - red aislada no se cuenta con un mercado por las características de los agentes que prestan el servicio. Sin embargo, con la prestación de servicios complementarios e incentivos para esta forma de operar, la inversión en este tipo de tecnología se volverá atractivo para los inversionistas y las empresas que prestan el servicio en esas zonas.

2.2. Propuesta de valor:

La cobertura de la electrificación rural, o la de zonas aisladas, es uno de los problemas predominantes en electrificación a nivel mundial [18]. La mayoría de los países se han centrado en aumentar la cobertura de acceso al suministro de energía eléctrica sin prestar especial atención a si las soluciones que se están implementando son sostenibles en la continuidad del servicio [19].

En la Tabla 1 se presenta la propuesta técnica para la prestación de los servicios complementarios y garantizar que ante cualquier evento se eviten riesgos de desconexión total.

Tabla 1. Propuesta de la prestación de servicios complementarios por parte de los DER. Fuente: Diseño propio

Servicio complementario	DER	Técnico
Control de tensión	DG PV + ESS	Control de reactivos Reserva de potencia reactiva
Control de frecuencia	DG Demanda PV + ESS	Control de potencia activa y frecuencia Reducción y aumento en el consumo

2.3. Canales

La infraestructura de la red de distribución activa y la tecnología necesaria para la prestación del servicio en términos de control, comunicaciones, protecciones y las líneas de distribución para que la mini - red aislada opere como una mini - red inteligente. Los controles en las PCH, en el sistema PV + ESS, los medidores son canales que permiten que se presten los servicios complementarios de control de tensión y frecuencia se puedan prestar en la mini - red aislada.

2.4. Relaciones con los clientes

En la mini - red aislada se cuenta con programas de gestión de demanda (PGD) que permiten que la demanda participe ante las variaciones del recurso primario o ante oscilaciones o pérdidas de generación, la demanda debe estar disponible para desconectarse de la mini - red aislada, dependiendo del desbalance entre generación y demanda.

2.5. Fuentes de ingreso:

La fuente de ingresos está compuesta por beneficios de ley, ingresos por comercialización de la energía con DER, una fórmula especial para los usuarios por PGD e incentivos técnicos que garanticen la sostenibilidad económica en la operación de la mini - red aislada [14].

- Ingresos por beneficios dispuestos en la regulación.
- Comercialización
- Incentivos técnicos (propuesta de Servicios Complementarios).

2.6. Recursos claves:

Los recursos claves necesarios para la operación de la mini - red aislada están clasificados como la infraestructura necesaria para la prestación del servicio desde el punto de vista del control y la automatización de los DER, que permite la prestación de servicios complementarios en la mini – red aislada. A su vez, es necesaria una infraestructura de comunicaciones que permita la interoperabilidad [20] de los DER en la prestación de los servicios complementarios.

2.7. Actividades claves:

Estas actividades contienen lo que se debe realizar para que el modelo de negocio tenga éxito, al igual que los recursos claves, están relacionadas con el diseño de la propuesta de valor y son necesarias para mantener las relaciones con los clientes y generar ingresos [17]. Las actividades clave para la prestación del control de tensión y control de frecuencia como servicios complementarios implican considerar lo que se presenta en la *Tabla 2*.

Tabla 2. Actividades claves definidas para el modelo Canvas. Fuente: Diseño propio

Actividad clave	DG	PV + ESS	Demanda
Control de reactivos	X	X	
Reserva de potencia reactiva	X	X	
Control de potencia activa y frecuencia	X	X	X

2.8. Socios claves:

Las sociedades constituyen la piedra angular en el éxito de los modelos de negocios, puesto que permiten optimizar los recursos, reducir los riesgos y adquirir [17], [21]

- Comunidad
- Regulación

Para la operación de las mini – redes aisladas uno de los socios claves es la regulación, que define claramente quienes pueden participar en la inversión y cuáles son los beneficios. Para que la comunidad participe dentro del modelo Canvas como un socio clave, es necesario realizar análisis estadísticos y descriptivos que definan

las necesidades más cercanas de la comunidad y permitan atraer su participación [22].

2.9. Estructura de costos:

2.9.1. CAPEX:

El comportamiento del CAPEX está basado en las curvas de aprendizaje, es decir que los costos se reducen en el tiempo a través del aprendizaje, la difusión de las tecnologías y de la operación por mini - red aisladas que incluyen los servicios complementarios de control de tensión y frecuencia.

2.9.2. OPEX:

Los OPEX son los costos anuales recurrentes y están conformados por los gastos de Operación y Mantenimientos (O&M). Adicionalmente, se deben considerar los costos asociados a la vida útil de los equipos. Tradicionalmente, los costos de operación y mantenimiento en las soluciones para mini – redes aisladas son más altos que las mini – redes conectadas al EPS.

3. MODELO DE SOSTENIBILIDAD

Dentro de los modelos de dinámica de sistemas (DS), existe el modelo de difusión de Bass que permite evaluar la difusión de nuevas tecnologías o innovaciones. El comportamiento del modelo de sostenibilidad de las mini – redes aisladas que conjuga aspectos técnicos con esquemas de mercado, se puede comparar con un modelo de difusión de innovaciones de Frank Bass. Es utilizado para analizar el crecimiento de nuevos productos, estrategias, manejo de tecnología [23].

En la siguiente figura se presenta el modelo causal de para evaluar la rentabilidad de los inversionistas a partir de incluir incentivos de por prestación de control de tensión y control de frecuencia.

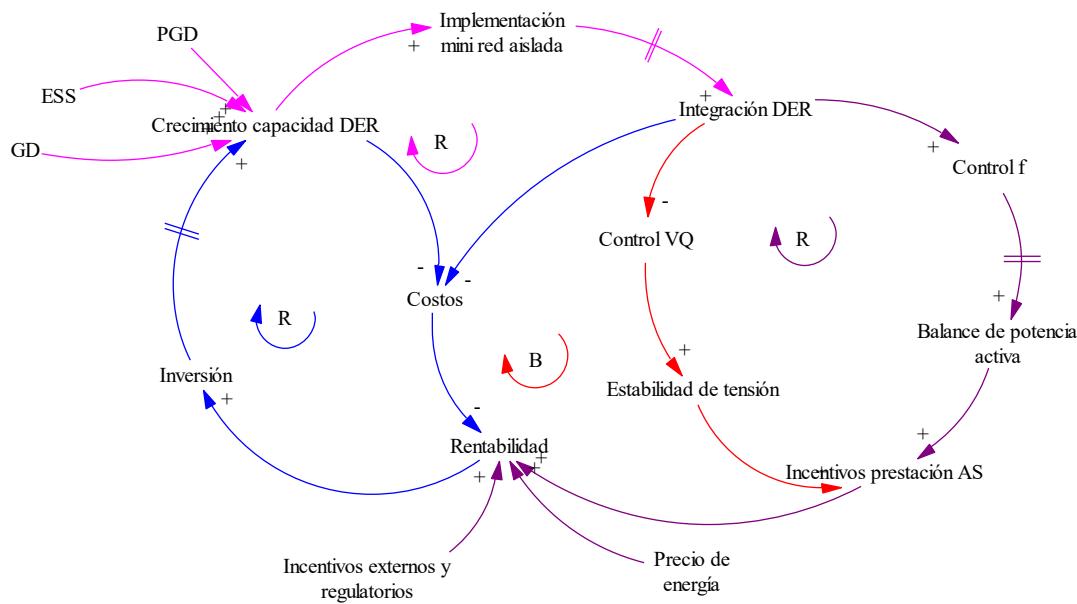


Figura 1. Diagrama Causal. Fuente: Diseño propio

El modelo en dinámica de sistemas (DS) cuenta con cuatro ciclos, tres ciclos de refuerzo y un ciclo de balance. Los ciclos de refuerzo o positivos ocasionan un comportamiento de crecimiento exponencial, mientras que los ciclos de balance, como su nombre lo indica, hacen que el modelo se estabilice en el punto de equilibrio.

Los dos ciclos de refuerzo del diagrama causal, asociados a los costos, muestran que tanto la integración como la instalación o crecimiento de capacidad de DER disminuirán los costos (inversión, operación y mantenimiento), a medida que el sistema asimila la conexión de nuevos elementos a la mini - red aislada, debido a la tasa de aprendizaje.

El tercer ciclo de refuerzo considera la prestación del control de frecuencia como servicio complementario, justificado en mantener un balance de potencia activa en la operación normal de la mini - red aislada y ante contingencias o disturbios. Esto significa que a medida que se integran un mayor número de DER en la mini - red aislada, se cuenta con más recursos que aportan potencia activa y se mantiene el balance constante de generación y demanda. Por otro lado, el incentivo por prestación de control de tensión y reactivos en la mini - red aislada corresponde específicamente al ciclo de balance del sistema en DS. Al remunerar económicamente a los DER por mantener niveles de tensión y reactivos dentro de los límites, se puede saturar la mini - red aislada con reactivos provenientes de los DER, llevando la mini - red aislada a una operación inestable, y afectar la remuneración ante la conexión descontrolada de DER.

Adicionalmente, el modelo cuenta con unos incentivos externos y regulatorios representados en exoneraciones o incentivos indirectos, que se relacionan con exenciones tributarias por invertir en este tipo de proyectos e iniciativas [24] Además, se incluye el precio de la energía por comercialización en la mini - red aislada.

4. RESULTADOS

Para la evaluación del modelo, se plantea analizar los ingresos por escenarios que permitan definir las políticas de decisión. Se describe el comportamiento de la integración de los DER y la rentabilidad en cada uno de los escenarios planteados. En la Tabla 3 se presenta el resumen de los casos a los que se realizaron las pruebas

Tabla 3. Escenarios de simulación

Caso	Descripción
Base	Incentivos Ley 1715 de 2014 + Recursos FAZNI
1	Caso Base + Incentivos técnicos por capacidad para el control de frecuencia
2	Caso Base + Incentivos técnicos por capacidad para el control de tensión
3	Caso Base + Incentivos técnicos por disponibilidad



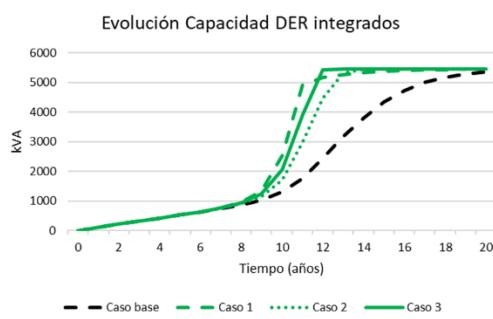


Figura 2. Evolución capacidad DER integrados

El crecimiento de los DER muestra que es posible incentivar los servicios complementarios de control de tensión y de frecuencia a los DER que estén disponibles y que la operación por mini - red aislada puede ser sostenible en el corto y mediano plazo. La ventaja de esta propuesta es que se remunera a los DER que están operativos y que generando. La demanda (PGD) son los únicos que tendrán el beneficio por estar disponibles ante cualquier necesidad de desconexión.

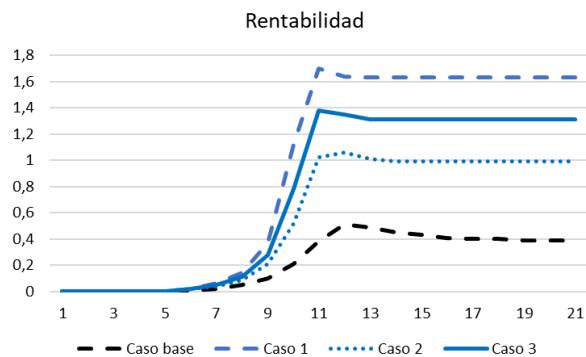


Figura 3. Rentabilidad del inversionista

La rentabilidad, mostrada en la Figura 3 muestra que el balance entre remunerar por capacidad instalada ya sea frecuencia o tensión, es la remuneración por disponibilidad de los DER que salgan despachados. Los ingresos son mayores que los costos y se está remunerando a los DER que se encuentran operativos y que ante el evento pueden responder de acuerdo con los requerimientos.

5. CONCLUSIONES

La combinación de DER dentro de la mini - red aislada resulta en una operación con incertidumbres y características dinámicas, que requiere una planeación y especificación técnica específica y propia (sin considerar patrones de los SEP tradicionales) para garantizar una prestación confiable, segura y sostenible de energía eléctrica.

Es necesario contar con incentivos para que esta operación sea atractiva para los inversionistas, con el fin

de hacer viable económicamente la inversión en nuevas tecnologías y tener la capacidad de contar con elementos para la prestación de servicios técnicos de control de tensión y frecuencia.

La mini - red aislada se puede considerar como un monopolio natural y la sostenibilidad y operación a largo plazo no está justificada, la propuesta es incluir incentivos técnicos para la prestación de servicios de soporte para garantizar la sostenibilidad.

El esquema de incentivos por prestación de los servicios complementarios puede tener dos opciones una compensación a los DER disponibles en cada momento (despacho) o un cargo por conexión ante eventuales desbalances. En caso de que se quiera pagar por disponibilidad a los DER, la compensación debe ser tanto de control de tensión como de control de frecuencia. Sin embargo, el incentivo por conexión solamente permitiría que los DER presten solamente uno de los dos servicios complementarios.

6. REFERENCIAS

- [1] Q. Wang, C. Zhang, Y. Ding, G. Xydis, J. Wang, and J. Østergaard, "Review of real-time electricity markets for integrating Distributed Energy Resources and Demand Response," *Appl. Energy*, vol. 138, pp. 695–706, 2015.
- [2] C. Eid, P. Codani, Y. Perez, J. Reneses, and R. Hakvoort, "Managing electric flexibility from Distributed Energy Resources: A review of incentives for market design," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 64, pp. 237–247, 2016.
- [3] D. Neves, M. C. Brito, and C. A. Silva, "Impact of solar and wind forecast uncertainties on demand response of isolated microgrids," *Renew. Energy*, 2015.
- [4] F. Martin-Martínez, A. Sánchez-Miralles, and M. Rivier, "A literature review of Microgrids: A functional layer based classification," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 1133–1153, 2016.
- [5] S. M. Nosratabadi, R. Hooshmand, and E. Gholipour, "A comprehensive review on microgrid and virtual power plant concepts employed for distributed energy resources scheduling in power systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 341–363, 2017.
- [6] F. Adinolfi, G. M. Burt, P. Crolla, F. D. Agostino, M. Saviozzi, and F. Silvestro, "Distributed Energy Resources Management in a Low-Voltage Test Facility," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 4, pp. 2593–2603, 2015.
- [7] P. Faria, Z. Vale, and J. Baptista, "Constrained consumption shifting management in the distributed energy resources scheduling considering demand response," *Energy Convers. Manag.*, vol. 93, pp. 309–320, 2015.

- [8] M. Bayat, K. Sheshyekani, M. Hamzeh, and A. Rezazadeh, "Coordination of Distributed Energy Resources and Demand Response for Voltage and Frequency Support of MV Microgrids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–11, 2015.
- [9] L. Montuori, M. Alcázar-Ortega, C. Álvarez-Bel, and A. Domíjan, "Integration of renewable energy in microgrids coordinated with demand response resources: Economic evaluation of a biomass gasification plant by Homer Simulator," *Appl. Energy*, vol. 132, pp. 15–22, 2014.
- [10] Z. Bie, P. Zhang, G. Li, B. Hua, M. Meehan, and X. Wang, "Reliability evaluation of active distribution systems including microgrids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 4, pp. 2342–2350, 2012.
- [11] C. Greacen, R. Engel, T. Quetchenbach, and Lawrence Berkeley National Laboratory, "A Guidebook on Grid Interconnection and Islanded Operation of Mini-Grid Power Systems Up to 200 kW," *Lawrence Berkeley Natl. Lab.*, no. April, pp. 1–80, 2013.
- [12] K. M. Muttaqi, J. Aghaei, V. Ganapathy, and A. E. Nezhad, "Technical challenges for electric power industries with implementation of distribution system automation in smart grids," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 46, pp. 129–142, 2015.
- [13] J. A. P. Lopes, A. G. Madureira, and C. C. L. M. Moreira, "A view of microgrids," *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ.*, vol. 2, no. 1, pp. 86–103, 2013.
- [14] S. C. Bhattacharyya and D. Palit, "Mini-grid based off-grid electrification to enhance electricity access in developing countries: What policies may be required?," *Energy Policy*, vol. 94, pp. 166–178, 2016.
- [15] Alliance for Rural Electrification, "Hybrid Mini-Grids for Rural Electrification: Lessons Learned," pp. 1–72, 2011.
- [16] J. Knuckles, "Business models for mini-grid electricity in base of the pyramid markets," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 31, pp. 67–82, 2016.
- [17] A. Osterwalder, Y. Pigneur, A. Smith, and T. Meienberg, "Business Model Generation," *Bus. Model Gener.*, p. 72, 2009.
- [18] IEA, "Energy for All: Financing access for the poor (Special early excerpt of the World Energy Outlook 2011)," *World Energy Outlook 2011*, no. October, p. 52, 2011.
- [19] S. C. Bhattacharyya, "Energy for Sustainable Development Energy access programmes and sustainable development: A critical review and analysis," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 16, no. 3, pp. 260–271, 2012.
- [20] N. W. a. Lidula and a. D. Rajapakse, "Voltage balancing and synchronization of microgrids with highly unbalanced loads," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 907–920, Mar. 2014.
- [21] M. Chamoch and R. Bernad, "DESARROLLO DE UN MODELO DE ELECTRIFICACIÓN PARA COMUNIDADES RURALES Y ZONAS AISLADAS," 2016.
- [22] J. (Universidad de N. Melo, M (Universidad de Nariño), Barco, "Estudio Socio-Económico Proyecto El Naranjo y Bocagrande," 2016.
- [23] J. D. Sterman, *Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, no. December 1999. 2000.
- [24] Congreso de Colombia, C. de Colombia, and Gobierno de Colombia, *Ley 1715 de 2014 por la cual se Regula la Integración de las Energías Renovables no Convencionales al Sistema Energético Nacional*. 2014, p. 16.