

APPLYING A SIMPLIFIED DELPHI METHOD TO IDENTIFY THE MINIMUM TECHNICAL CRITERIA TO CONSIDER IN MICRO GRIDS DESIGN

APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI SIMPLIFICADO PARA DETERMINAR LOS CRITERIOS TÉCNICOS MÍNIMOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE UNA MICRORRED

Ing. Ivonne Ruiz Maldonado¹, PhD. Javier Solano¹, PhD. Andrés I. Hernandez²
ivonne.ruiz@correo.uis.edu.co

¹ Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

² Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia
E-mail: ivonne.ruiz@correo.uis.edu.co

Abstract: This study applied a simplified Delphi method as decision support to identify the minimum technical criteria to consider in micro grids design. The panel of experts included professionals to academy and industry. The data was collected using a questionnaire distributed via e-mail and consensus was achievement in one round.

Keywords: Delphi method, micro grids, off-grid.

Resumen: En este artículo se propone el uso de un método Delphi simplificado, como un soporte para la toma de decisiones, para determinar los criterios técnicos mínimos a considerar en el diseño de microrredes. Para la aplicación del método se seleccionó un panel de expertos que incluyó profesionales de la academia y la industria. Los datos fueron recolectados usando un cuestionario distribuido vía correo electrónico y el consenso fue alcanzado en una ronda.

Palabras clave: Método Delphi, microrredes, off-grid.

1. INTRODUCCION

La energía es un recurso necesario para garantizar el bienestar social de las personas, así como el desarrollo económico de las regiones, además de aumentar el nivel de vida [1] [2]. En Colombia más de 470.000 viviendas no tienen acceso al servicio de energía eléctrica, esto significa que alrededor de 2,5 millones de personas (bajo la premisa de cada hogar esté compuesto en promedio por cuatro personas) no disponen de los medios para satisfacer buena parte de sus necesidades básicas diarias [1] [3] [4]. En la mayoría de los casos es difícil conectar a la red las VSS (viviendas sin servicio) por diferentes condiciones (costos, distancias, zonas protegidas, etc.) [1] [2] [3] [5].

Cabe mencionar que las Zonas No Interconectadas – ZNI, precisamente debido a su

aislamiento de las áreas urbanizadas cuentan que una importante riqueza de recursos naturales y pueden tener una importancia ecológica estratégica [2]. Para estos casos los recursos renovables aprovechables son la opción ideal ya que se puede lograr un desarrollo económico ambientalmente sostenible [2]. En algunos de estos territorios disponen de dichos recursos, aunque a una muy pequeña escala, lo que puede implicar insuficiencia o alto costo, que dificultaría proveer un servicio de energía con calidad y continuidad [2] [5]. No obstante, asociar coordinadamente diversos recursos por medio de una microrred aislada pueden converger en una solución económicamente sostenible considerando su flexibilidad, adaptabilidad y capacidad de gestión de generación y demanda de energía [1] [5].

Es importante anotar que en una microrred aislada puede tener un comportamiento que impactará en la calidad de un suministro de energía eléctrica debido a un alto grado de distribución de potencia en una red sin nodos dominantes y que finalmente incide también en la estabilidad del sistema [1] [5].

Como primer paso para el desarrollo de las microrredes en las ZNI, en este artículo se propone el uso de un método Delphi simplificado para determinar los criterios técnicos mínimos a considerar en el diseño de una microrred.

2. APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI

Los métodos de los expertos son ampliamente valorados para reducir la incertidumbre probabilizando las hipótesis sobre las variables, además de permitir comparar el punto de vista de un grupo, así como para adquirir consciencia de la variedad de opiniones entorno a un tema [6].

El método Delphi hace parte de los métodos de expertos y es un método de estructuración de un proceso de comunicación grupal que es efectivo a la hora de permitir a un grupo de individuos, como un todo, tratar un problema complejo [2]. Es decir, el método consiste, con la ayuda de cuestionarios sucesivos, obtener el consenso más confiable de la opinión de un grupo de expertos [2] [6] [7].

Por lo tanto, el método Delphi es adecuado para aplicaciones normativas, esto es, que permite obtener una convergencia de opiniones alrededor de unos valores centrales logrando el consenso necesario en algunas tomas de decisión [6] [7].

A. Objetivos

1. Identificar los posibles criterios técnicos para tener en cuenta en el diseño de una microrred.
2. Validar las estrategias de solución planteadas sean viables.
3. Determinar los indicadores de la tolerancia a la interrupción del servicio.

B. Selección de Expertos

Es una etapa importante considerando que el término experto no es lo suficientemente claro. Para obtener buenos resultados es fundamental, en primer lugar, recurrir a personas, con independencia de sus títulos, su función o su nivel jerárquico, con la competencia suficiente para responder a las preguntas planteadas y, en

segundo lugar, que realmente la opinión del grupo sea un mejor indicador que la de un solo experto [2] [6] [8]. Para definir el perfil de los expertos a considerar, se determinó que estos debían hacer parte de uno de los siguientes grupos:

- Sector académico
- Sector productivo comercial u operativo

Adicionalmente, con el fin de obtener una mirada heterogénea al respecto, se buscó que los expertos provinieran de diferentes contextos [8].

Bajo estos criterios se estableció contacto con 15 expertos de diversas entidades e instituciones, de los cuales 10 respondieron el cuestionario. En la TABLA I se presenta la clasificación de los expertos de acuerdo con el sector que pertenecen:

TABLA I. Clasificación de los expertos que participaron en la aplicación del método Delphi.

Clasificación	Porcentaje
Sector académico	50%
Sector productivo comercial u operativo	50%

C. Diseño del cuestionario

Considerando las recomendaciones para la aplicación del método el cuestionario se elaboró de manera que se facilitara, en la medida de lo posible, la respuesta por parte de los expertos [2].

Ya que las respuestas preferiblemente deben ser cuantificadas y ponderadas, cada pregunta se construyó orientada a obtener respuestas dicotómicas, esto es que se puedan responder con un Sí o con un No, o en su defecto No responde [2] [9]. Lo anterior, con el fin de simplificar la aplicación del método Delphi original donde se realizan tres o más rondas de revisión, pero que se convierte en una operación, larga, costosa, engorrosa y muchas veces arriesgada, porque en cada iteración algunos expertos pueden abandonar el ejercicio [6] [8].

Por lo tanto, este ejercicio se definió con un máximo de dos rondas, siendo la aplicación de la segunda de ellas dependiente de los resultados de consenso logrados. Adicionalmente, el cuestionario fue diseñado de forma más participativa al incluir la posibilidad de realizar comentarios y apreciaciones a cada una de las preguntas enriqueciendo las respuestas y lograr una mayor validez de estas [8].

Finalmente, los temas a abordar en el cuestionario se eligieron en un debate entre el

grupo que hace parte del proyecto “Estudio de impacto de la implementación de las smart-grids en microrredes inteligentes”, donde cada uno, de acuerdo con su área de conocimiento, realizó aportes para tener una primera identificación de los posibles criterios técnicos que inciden en el funcionamiento de una microrred. Los criterios considerados para la elaboración de las preguntas fueron los siguientes:

- Variables climáticas
- Operación de una microrred
- Estabilidad del sistema
- Costo de operación
- Metodología para el dimensionamiento y diseño

3. RESULTADOS

A. Primera fase

Una vez seleccionados los expertos y elaborado el cuestionario de acuerdo con los criterios previamente establecidos, se distribuyó el cuestionario [8]. Después de recopilada la información se procedió con el análisis de esta, tomando como criterio de convergencia el 70% de consenso en la opinión de los expertos participantes. Bajo la premisa que los expertos solo deben responder a las preguntas en cuyo tema son más competentes, en los casos donde uno o varios participantes decidan no responder, el porcentaje de convergencia se calcula con base en la cantidad de respuestas válidas [6].

En la TABLA II se presenta un cuadro resumen que incluye las preguntas del cuestionario, la respuesta con mayor consenso, y la convergencia presentada en forma tanto porcentual como en fraccionarios, esto último con el fin de identificar la cantidad de respuestas válidas para cada una de las preguntas.

- Premisa del cuestionario:

A continuación, se realizará un cuestionario con el fin de identificar las variables claves que deben ser tenidas en cuenta para el dimensionamiento, diseño, gestión y operación de una microrred eléctrica aislada.

Por favor, responda las preguntas de acuerdo con su área de conocimiento y experiencia, considerando una microrred aislada de una potencia máxima de 2 MW y con una canasta

energética conformada por fuentes no convencionales.

B. Análisis de resultados

De la TABLA II resaltan dos resultados. El primero es que en 23 de las 25 preguntas se alcanzó o superó el porcentaje de convergencia deseado, definido como mayor o igual al 70%, por lo tanto, se considera innecesario el lanzamiento de una segunda ronda, de acuerdo con los parámetros definidos para el ejercicio.

Segundo, se deben analizar con especial cuidado los planteamientos de las preguntas 13 y 14, para determinar una posición respecto a los temas que se abordan en ellas y las razones por las cuales en estas no se alcanzó un consenso.

La pregunta 13 se refiere a la utilización de un control con sistemas complejos desde un punto central de la microrred. La falta de consenso en torno a la pregunta puede deberse a qué no hay claridad sobre qué es un sistema complejo, entendido como un conjunto de elementos o subsistemas que interactúan entre sí con el fin de alcanzar un objetivo común y donde existe una influencia mutua entre dichos elementos [10]. Sin embargo, con base en las respuestas a las preguntas relacionadas (de la 12 a la 16) se concluye que su uso puede ser una opción viable.

La pregunta 14 está orientada a establecer si el sistema de potencia de la microrred es dependiente de los componentes principales de control, al punto que pueda producirse una caída completa del sistema ante la falla de uno de estos.

Sin embargo, esto no es relevante para el desarrollo del modelo y puede determinarse con un análisis de riesgos, en caso de que el análisis arroje que existe un riesgo alto para el sistema por la falla de un componente de control, esto puede mitigarse con la instalación de equipos que garanticen la redundancia del sistema.

C. Esquema de aplicación del método Delphi simplificado

En la Fig. 1 se presenta el esquema del método Delphi aplicado, considerando una sola ronda de preguntas por la convergencia de resultados obtenida.

TABLA II. Resultados de primera ronda.

Numeración	Pregunta	Consenso	Convergencia	
			Fracción	[%]
1	¿Considera usted que es adecuado incluir en el modelo la información climática de las zonas susceptibles alojar microrredes?	Sí	10/10	100%
2	¿Considera usted que puede verse la estabilidad del sistema eléctrico comprometida por las variaciones del clima?	Sí	9/10	90%
3	¿Considera usted que se deben incluir en las microrredes aisladas fuentes no convencionales de energía con generación intermitente?	Sí	10/10	100%
4	¿Considera usted que la intermitencia en la generación de energía de algunas fuentes no convencionales de energía, afectan la estabilidad y confiabilidad del sistema?	Sí	9/10	90%
5	¿Considera usted que es posible garantizar calidad y continuidad del servicio de energía en zonas no interconectadas (ZNI) por medio de una microrred aislada que integre diferentes fuentes no convencionales de energía?	Sí	9/10	90%
6	¿Consideraría la variación de la potencia instantánea en la microrred es un factor determinante que pueda afectar su comportamiento?	Sí	8/8	100%
7	¿Considera usted que es posible realizar una gestión adecuada de la microrred donde se controlen las fluctuaciones de potencia?	Sí	10/10	100%
8	¿Considera usted que afectan los parpadeos (flickers) la calidad de energía esperada en la microrred?	Sí	5/7	71,4%
9	¿Cuál considera usted que sería el máximo número de apagones (blackout) que podrían tolerarse en la microrred en un día?	Menos de 5	9/10	90%
10	¿Considera usted que en una microrred aislada es posible asegurar un control de armónicos donde la distorsión no supere el 5%?	Sí	9/9	100%
11	¿Considera usted que teniendo en cuenta la dificultad técnica de controlar una microrred, una solución utilizando sensores de respuesta rápida sería adecuada?	Sí	7/8	87,5%
12	¿Considera usted que es conveniente para una microrred realizar un control centralizado, donde se tengan nodos dominantes?	Sí	9/9	100%
13	¿Considera usted que es conveniente utilizar un control con sistemas complejos desde un punto central en una microrred?	No	4/7	57,1%
14	¿Considera usted que si se produce una falla en un componente principal de control de la microrred puede producirse una caída completa del sistema?	Sí	5/9	55%
15	¿Considera usted que es conveniente para una microrred realizar un control descentralizado, donde todos los nodos se comportan como iguales entre sí?	No	5/7	71,4%
16	¿Considera usted que la estabilidad de la microrred puede verse comprometida si no se tienen nodos dominantes en el sistema de potencia?	Sí	6/8	75%
17	¿Considera usted que el costo de las materias primas para producir energía en las microrredes debería ser un factor determinante para su diseño, gestión y operación?	Sí	9/10	90%
18	¿Considera usted que debería determinarse un costo máximo aceptable de energía para garantizar la operación de la microrred?	Sí	9/10	90%
19	¿Considera usted que el precio de la energía en la microrred aislada puede determinar la gestión de la demanda?	Sí	7/8	87,5%
20	¿Considera usted que la demanda no gestionada de la red puede dificultar la gestión y operación de la microrred?	Sí	7/10	70%
21	¿Considera usted que se debe adoptar una política de gestión de la demanda y control de cargas para las microrredes aisladas que garantice un equilibrio generación-demanda?	Sí	9/9	100%
22	¿Considera usted que es adecuada una estrategia de Demanda Desconectable Voluntaria (DDV) regulada por precio para asegurar la estabilidad de la microrred?	Sí	8/9	88,9%
23	¿Considera usted que es adecuada una estrategia de gestión de la demanda regulada por la criticidad de las cargas para asegurar la estabilidad de la microrred?	Sí	10/10	100%
24	¿Considera usted que se debe diseñar la microrred para que sus máquinas siempre operen en un punto óptimo de trabajo?	Sí	8/9	88,9%
25	¿Considera usted que es conveniente realizar el control, gestión y operación de la microrred a partir de un sistema de soporte a la decisión utilizando herramientas computacionales?	Sí	9/9	100%



Fig. 1. Esquema global del proceso Delphi aplicado [2].

4. RECONOCIMIENTO

Este proyecto se realiza en el marco del proyecto de investigación titulado: “Estudio de impacto de la implementación de las smart-grids en microrredes inteligentes”, financiado por Colciencias en la Convocatoria 745-2016- “Convocatoria para proyectos de ciencia, tecnología e innovación y su contribución a los retos de país – 2016”.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo con la información obtenida se determinan las variables relevantes y premisas para el dimensionamiento, diseño, gestión y operación de una microrred eléctrica aislada:

- El diseño de microrredes aisladas debe incluir fuentes no convencionales de energía, incluso si estas presentan un comportamiento de generación intermitente.
- El modelo debe incluir información climática de las zonas, ya que la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico se puede ver comprometida por las variaciones del clima al incluir fuentes de generación intermitente como hidráulica a pequeña escala, solar fotovoltaica y eólica.
- Con la información climática se puede obtener el potencial energético y el dimensionamiento del sistema de generación y permite determinar el LCOE óptimo de cada sistema en particular. Adicionalmente, el comportamiento de una microrred será diferente de acuerdo con la zona en que se desarrolle y sus condiciones climáticas.
- Cabe mencionar que existen otras fuentes no convencionales de energía a pequeña escala que no dependen del clima, como la generación de energía producida por biodigestores.
- Se considera alcanzable mitigar los posibles impactos de la intermitencia de las fuentes energéticas, logrando garantizar calidad y continuidad del servicio en las ZNI siempre que se integre y diversifique la canasta energética de la microrred, así como contar con respaldos o almacenamiento de energía.

- La variación de potencia instantánea es un factor determinante en el comportamiento de una microrred, por lo tanto, estas fluctuaciones de potencia deben controlarse realizando una gestión y operación adecuada.
- Respecto a las ventanas de operación de la microrred, estas deberán ser más cortas que las típicas, en promedio entre 10 a 15 minutos, en lugar de 1 hora, teniendo así una mayor certeza sobre la energía disponible.
- La mejor forma de operar la microrred es como una Central Eléctrica Virtual o VPP, redireccionando la energía a través de un sistema de control que equilibra la generación y la demanda. El sistema se debe configurar utilizando la mayor cantidad de energía renovable, dando prioridad a las plantas que produzcan el menor volumen de CO₂ [11].
- A pesar de que la microrred aislada atenderá ZNI rurales, el diseño de esta debe garantizar la calidad de energía entregados. Los parámetros de calidad mínima deben considerar los parpadeos o *flickers* como indeseables en el comportamiento de la red (cero), así como los apagones tolerables, en el peor de los casos, no deben superar la tasa de cinco diarios, siendo el óptimo una tasa máxima de uno.
- La microrred debe diseñarse con un fuerte control de armónicos que garantice una distorsión menor al 5%.
- Una solución factible para realizar el control de la microrred, considerado una dificultad técnica, es el uso de sensores de respuesta rápida.
- Se prefiere el control centralizado con nodos dominantes, sobre el control descentralizado, donde todos los nodos se comportan como iguales entre sí, ya que la estabilidad del sistema puede verse comprometida con la ausencia de nodos dominantes.
- Una opción viable el uso de un control de la microrred basado en sistemas complejos, con base en las respuestas a las preguntas 12 a la 16, las cuales se encuentra interrelacionadas.
- Durante el desarrollo del modelo de la microrred se deberá verificar si existe riesgo de que se produzca una caída completa del sistema ante la falla de un componente principal del sistema de control y en dado caso proponer formas de mitigarlo.
- Respecto al costo de la energía se tienen una convergencia clara en todos los aspectos abordados. El costo de las materias primas para producir energía debe ser un factor determinante en su diseño, gestión y operación, donde el despacho de las diferentes fuentes debe realizarse con el costo óptimo. Adicionalmente, debe calcularse el costo nivelado de energía – LCOE, de cada fuente y establecer el costo máximo aceptable para el funcionamiento de la red.

- Se concluye que la demanda no gestionada puede dificultar la gestión y operación de la microrred, por lo tanto, se deben adoptar políticas de gestión de la demanda, así como control de cargas que garanticen un equilibrio generación-demanda.
- Como estrategias por considerar para asegurar la estabilidad del sistema están tanto el uso de Demanda Desconectable Voluntaria (DDV) regulada por precio donde se garantiza la estabilidad del sistema y un LCOE promedio aceptable, así como una gestión de demanda regulada por la criticidad de las cargas.
- La microrred debe diseñarse y administrarse para que sus máquinas, en la medida de lo posible, operen en su punto óptimo de trabajo o máxima eficiencia energética, disminuyendo el LCOE.
- Por último, se considera pertinente realizar el control, gestión y operación de la microrred a partir de un sistema de soporte de la decisión utilizando herramientas computacionales, siendo la función objetivo el LCOE. Sin embargo, siempre se debe contar con la posibilidad de realizar una operación manual ante condiciones de emergencia.

REFERENCIAS

- [1] Y. A. Muñoz, Optimización de recursos energéticos en zonas aisladas mediante estrategias de suministro y consumo, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2012.
- [2] M. C. Monsalve Camargo y M. A. Nobza Villareal, Aplicación del método Delphi con enfoque difuso para seleccionar alternativas de generación de energía - estudio de caso de seis municipios no interconectados de Colombia, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016.
- [3] UPME, Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica 2013 -2017 - PIEC, Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, 2014.
- [4] J. Sáenz V., «En penumbras: 2,5 millones de colombianos no tienen energía eléctrica,» *El Espectador*, p. Economía, 7 Agosto 2017.
- [5] A. I. Hernández, «Proyecto: Estudio de impacto de la implementación de las smart-grids en microredes inteligentes,» Sistema Integral de Gestión de Proyectos de Colciencias, Bogotá, 2016.
- [6] M. Godet, De la anticipación a la acción, Barcelona: Marcombo, S.A., 1993.
- [7] M. Cruz Ramírez y J. A. Rúa Vásquez, «Surgimiento y desarrollo del método Delphi: una perspectiva cuantitativa,» *Biblios*, n° 71, pp. 90-107, 2018.
- [8] C. E. George Reyes y L. Trujillo Liñan, «Aplicación del Método Delphi Modificado para la Validación de un Cuestionario de Incorporación de las TIC en la Práctica Docente,» *Revistas Iberoamericana de Evaluación Educativa*, vol. 11, n° 1, pp. 113-135, 2018.
- [9] e-encuesta.com, «Tipos de pregunta en la encuesta,» 22 Abril 2015. [En línea]. Available: <https://www.e-encuesta.com/tipos-de-pregunta-en-la-encuesta/>. [Último acceso: 24 Agosto 2019].
- [10] S. A. Moriello, «Investigación: Sistemas Complejos,» Fernando Sancho Caparrini, 28 Junio 2018. [En línea]. Available: <http://www.cs.us.es/~fsancho/?p=sistemas-complejos-2>. [Último acceso: 23 Agosto 2019].
- [11] T. Demcak, «Why virtual power plants are the future of solar energy,» Solar Power World, 10 Abril 2019. [En línea]. Available: <https://www.solarpowerworldonline.com/2019/04/virtual-power-plants-vpps-future-of-solar-energy/>. [Último acceso: 22 Agosto 2019].