

# MICRORREDES AISLADAS EN LA GUAJIRA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

## *Isolated microgrids in La Guajira: design and implementation*

Nicanor Quijano, Ph.D.<sup>1</sup>, Angélica Pedraza<sup>2</sup>, Miguel Velásquez, Ph.D.<sup>3</sup>, Guillermo Jiménez Estévez, Ph.D.<sup>4</sup>, Ángela Cadena, Ph.D.<sup>5</sup>, Jorge Mario Becerra<sup>6</sup> y Álvaro Ramírez<sup>7</sup>

1. Profesor titular. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Contacto: nquijano@uniandes.edu.co

2. MS, Colibri Energy SAS. Contacto: ab.pedraza1391@uniandes.edu.co

3. Investigador postdoctoral. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Contacto: ma.velasquez107@uniandes.edu.co

4. Profesor visitante. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Contacto: ga.jimenez@uniandes.edu.co

5. Investigador asociado. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Contacto: acadena@uniandes.edu.co

6. Estudiante doctoral, MS. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Contacto: jm.becerra583@uniandes.edu.co

7. MS, ISAGEN. Contacto: aaramirez@isagen.com.co

### Resumen

En este trabajo se propone el diseño e implementación de una microrred aislada en el norte de Colombia, en comunidades Wayúu que no cuentan con servicio de energía. El diseño parte de un análisis de las comunidades, el cual lleva a un diseño participativo considerando las necesidades locales. Este diseño se da a partir de una serie de visitas a las comunidades, permitiendo hacer un análisis energético. Dicho análisis es ajustado unas cuantas veces con las comunidades, para que finalmente se obtenga la ingeniería de detalle que luego será implementada, utilizando tanto tecnología solar como eólica. Una serie de lecciones aprendidas surgen dentro de este proceso, el cual podría ser replicado en diferentes comunidades siempre y cuando sus habitantes estén involucrados desde el principio y sean partícipes de la solución.

**Palabras clave:** procesos agrícolas, semillas, investigación, desarrollo, innovación, insumos agrícolas, agroindustria colombiana.

### Abstract

*This paper presents the design and implementation of an isolated microgrid developed in La Guajira, north of Colombia. It was designed through the collaboration and capacity building of the community itself. Several activities were developed by the research group in order to improve the technical design. With the objective of reaching a consensus in terms of the final design, several visits were made to the community. During the implementation, some new ideas on how to improve the design appeared. In any case, if the microgrid (that uses both solar and wind energy) would be replicated in any other location, we strongly recommend to include, from the beginning, the community needs and the ideas of its inhabitants.*

**Key words:** agricultural processes, seeds, research, development, innovation, agricultural inputs, Colombian agroindustry.

## Introducción

El departamento de La Guajira es uno de los más ricos del país en materia de recursos energéticos, entre estos, el carbón, el gas natural, la radiación solar y el viento. Pese a esta riqueza, que se complementa con los atractivos paisajísticos y turísticos de la región y la cultura ancestral de las comunidades que la habitan, el departamento sufre un representativo rezago social que se ve reflejado en sus índices de necesidades básicas insatisfechas, unos de los más altos del país [1]. Tales condiciones adversas se agudizan en las áreas rurales en las que habitan principalmente comunidades indígenas y en las que a causa de factores como las condiciones desérticas que caracterizan a la Alta y la Media Guajira, un alto grado de dispersión y una baja densidad poblacional, se dificulta la provisión de servicios básicos como el acceso al agua, la energía, la educación y la salud.

Bajo tal contexto, se espera que el futuro desarrollo de potenciales proyectos para el aprovechamiento de un recurso energético ampliamente disponible en estos territorios, como es el viento, aporte beneficios a las comunidades, lo que permitiría mejorar sustancialmente sus condiciones de vida. Lo anterior, posiblemente, a través de la participación de las comunidades como socios aportantes de los derechos de uso de las tierras, lo que le permitiría que percibieran un ingreso por la operación misma de los proyectos. Para poder entender las necesidades de las comunidades a nivel país, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) creó los Planes de Energización Rural Sostenible (PERS) [2], dentro de los cuales se desarrolló el PERS Guajira [3]. Este plan da unas bases metodológicas sobre el diagnóstico energético y socio-económico rural en tres subregiones del departamento.

Una de las soluciones que ha permitido integrar de manera exitosa diferentes tipos de generación (tanto convencional, como de fuentes renovables) es el concepto de microrredes. Una microrred se define como un grupo de cargas y recursos de energía distribuidos (DERs), por sus siglas en inglés, con fronteras eléctricas claramente definidas que actúan como una única entidad controlable con respecto a la red y puede conectarse y desconectarse de esta, de tal manera que pueda operar tanto en modo interconectado como en modo isla [4]. En otras palabras, se tiene una red que aglutina DERs (generación distribuida renovable y convencional), así

como almacenamiento (e.g., baterías) con el fin de suplir a una serie de cargas. Las microrredes están diseñadas para integrar tecnologías de generación distribuida, lidiando, a través de su control y monitoreo, con la intermitencia de la generación renovable variable, lo que garantiza una operación eficiente, confiable y segura.

Se tienen diferentes aplicaciones de microrredes (e.g., a nivel industrial, militar, institucional), pero en este caso nos interesan ejemplos de microrredes para la electrificación de zonas aisladas y rurales. Algunos ejemplos que se pueden ver a nivel mundial son, la microrred de Huatacondo, Chile [5], Punta Soldado, Valle del Cauca [6], Isla Annobon, Guinea Ecuatorial [7] y Entesopia, Kenya [8], entre otras. El común denominador de los casos presentados corresponde a la energización en poblaciones aisladas y vulnerables que no poseían acceso a la energía eléctrica. En este tipo de poblaciones, y en general para cualquier tipo de comunidad, una de las claves principales del éxito de proyectos en microrredes, es la integración de dicha población en el diseño e implementación de la solución.

Uno de los casos más exitosos es el de Huatacondo, en el cual se propone el concepto de SCADA social [5, 9], utilizado en este proyecto. Este enfoque busca integrar los aspectos técnicos con los socioeconómicos, con el fin de generar conciencia en la comunidad acerca de la microrred, para que sus pobladores se apropien de su gestión y mantenimiento. En el caso de La Guajira, haciendo uso de la metodología propuesta [5], y sumando las relaciones que tiene el financiador de este proyecto con las comunidades, se logró el diseño e implementación de microrredes aisladas en dos comunidades de la región. Para ello, se partió de un diseño participativo, en el cual la comunidad local (constituida en su mayoría por población Wayúu) y los integrantes llegaban a una serie de acuerdos y compromisos que permitieron discutir en diversas ocasiones el diseño de la parte técnica. El diseño de detalle y la implementación (presentados en la Sección III) fueron desarrollados por dos empresas (Sennergysol [10] y Suncolombia [11] respectivamente), basados en la metodología que se presenta en la Sección II. Esta solución fue entregada a las comunidades en el mes de marzo de 2019, por lo que a partir de ahora surgen una serie de desafíos que se discuten en la Sección IV. Se espera que con la operación y mantenimiento prevista para este año que inicia, surjan nuevos retos y soluciones que desde la academia, en trabajo conjunto

con las empresas desarrolladoras, signifiquen nuevos desafíos por resolver, como se plantea en la Sección V.

## II. Metodología

Para poder hacer el diseño técnico, es necesario entender, en primera instancia, a las comunidades. Por lo tanto, se ha dividido la metodología en varios componentes: i) un análisis de las poblaciones; ii) un análisis energético que surge luego de una serie de visitas e iteraciones con los futuros usuarios; y finalmente, iii) un análisis operativo que lleva a la solución e implementación que serán descritas más adelante.

### A. Análisis de las comunidades

Con el objetivo de lograr un entendimiento de la situación y el contexto de las comunidades consideradas como posibles candidatas beneficiarias de la solución de energización piloto y sus posteriores réplicas, se revisaron varios documentos enfocados en la caracterización social de la cultura Wayúu y de sus pobladores.

Dentro de los documentos relevantes, se tiene un estudio [12] donde se establece cómo el diseño participativo de los sistemas reconoce que en algunas situaciones es necesario estructurar enfoques de concepción de los servicios, en los que haya una participación de todos los actores relevantes. En este marco conceptual, se encuentra que las razones sobre la pertinencia del diseño participativo se pueden resumir en: i) el marco legal del país, ya que todas las actividades que se realicen en territorio de propiedad comunal o de minorías debe ser acordado con las comunidades que lo habitan y estas deben tener participación activa en todas las decisiones que puedan afectarlos<sup>1</sup>. Por otro lado, ii) los estudios antropológicos y sociológicos realizados en estos territorios muestran características culturales, políticas y prácticas, además de usos y costumbres que deben ser tenidas en cuenta y profundizadas en su comprensión. Tener en cuenta estos elementos del diseño participativo, permite que el proyecto de una solución energética se logre y sea sostenible en el tiempo.

Una de las partes más importantes es el aprendizaje colectivo, el cual busca desarrollar capacidades de auto-organización a partir de la autonomía local (Lleras, 2002; Lleras, 2004). Por lo tanto, la solución que se propone es una que beneficie de manera directa el mayor

número de personas dentro de la comunidad. Por ello, la propuesta enfatiza en la configuración y permanencia de espacios donde se realice la construcción colectiva de los productos y servicios, su rediseño y mantenimiento [13], [14] [15]. Lo anterior sitúa la base del diseño en: i) las decisiones que la comunidad toma con el objeto de articular necesidades y servicios; y ii) los acuerdos y compromisos que se establecen en el marco de la red de apoyo, que permiten actualizar la concepción social y técnica de la comunidad frente a sus necesidades.

Para lograr la base del diseño, se comenzó la construcción de confianza por medio de una serie de visitas por parte de varios integrantes del equipo desarrollador del proyecto (Figura 1). En un primer acercamiento, se acordó la realización de un taller en las comunidades, el cual tuvo que ser postergado en varias ocasiones por diferentes problemas que acaecieron en las zonas seleccionadas. Para no perder contacto con las comunidades, se sostuvieron entrevistas con los líderes de las zonas, y se comenzaron a obtener ciertos insumos que empezaron a aportar en el direccionamiento de la solución de energización a ser provista y apropiada por la comunidad. Después de las primeras visitas y talleres, se comenzó a desarrollar el análisis energético a partir de la información que se tenía disponible. Cabe mencionar que el acceso a estas comunidades es complejo debido a las características topográficas y climatológicas de la zona. Estas comunidades se encuentran cerca de la frontera colombo-venezolana y el acceso en tiempo seco puede durar tres horas desde Maicao.

### B. Análisis energético y operativo

Partiendo de las necesidades identificadas durante el reconocimiento en campo, se construyeron curvas de carga diarias a partir de la selección de los artefactos y las cantidades que deberían ser atendidos por la solución a ser desarrollada. En este sentido, era de vital importancia tener un estimado de la cantidad de personas que hacen parte de la comunidad ya que esta cantidad está directamente relacionada con las necesidades energéticas. La estimación de la cantidad de personas es una tarea complicada debido a que las comunidades Wayúu, en su mayoría, son seminómadas. En este ejercicio, se trabajó con poblaciones que pueden ir desde las 50 hasta las 200 personas.

Una vez determinado el tipo y número de cargas que se establezca deberán ser alimentadas por la solución a ser

1. Se soporta en los artículos 7, 10, 63, 68, 72, 171, 176, 246, 286, 329, 330 y 356 de la Constitución Política de 1991, La sentencia T-567 de 1992 de la Corte Constitucional, solo para nombrar algunas de primer nivel.

desarrollada, se busca obtener una curva de la demanda diaria de energía (E) en unidades de potencia (P) vs tiempo (t), como lo ilustra la Figura 2. En este caso, se tuvieron en cuenta parámetros como el tipo de electrodoméstico (luz, cargador, radio, TV, etc.)  $I$ , el tipo de usuario (hogar, escuela, tienda, puesto de salud, etc.)  $J$ , el número de usuarios en cada tipo (e.g., número de hogares en la comunidad)  $N_j$ , el número de electrodomésticos  $i$  del tipo de usuario  $j$  (e.g., número de TVs en un hogar)  $n_{ij}$ , la Potencia nominal [W] del electrodoméstico  $i$  en la clase  $j$  (e.g., la potencia nominal del TV en el hogar)  $P_{ij}$ , el tiempo de funcionamiento de cada electrodoméstico  $i$  del tipo de usuario  $j$  (e.g., tiempo de uso diario del TV del hogar)  $h_{ij}$ , la ventana de funcionamiento de cada electrodoméstico  $i$  del tipo de usuario  $j$  (e.g., periodo del día donde el TV del hogar puede encontrarse encendido)  $w_{F,ij}$ . Teniendo en cuenta que el tiempo de funcionamiento de una determinada carga puede ser menor a su ventana de funcionamiento (siendo esta última el rango de tiempo en el que esta puede llegar a operar), se cuenta con que  $\sum \text{duración } w_{F,ij} > h_{ij}$ . De esta manera, la contribución de cada carga o electrodoméstico al perfil de carga viene a estar dado de la siguiente manera:

$$E_{ij} = P_{ij} * h_{ij} \text{ y } P_{av,ij} = \frac{E_{ij}}{\sum \text{duración } w_{F,ij}}$$

Así, la contribución en potencia (y energía) de cada electrodoméstico viene a estar dado por un promedio de P, calculado a partir de la distribución de la energía consumida a lo largo de la duración total de las ventanas de funcionamiento. Con esto, se obtiene como resultado

$P_{av,ij}$  es decir, la potencia promedio utilizada en cada tipo de usuario por concepto de un electrodoméstico, por hora, como podría ser, por ejemplo, la potencia promedio utilizada por un universo de 10 hogares por concepto del uso de la TV, por una hora. A partir de este resultado, y pasando de valores de potencia a energía en intervalos horarios, se obtiene la energía consumida hora a hora, para así estimar la curva de demanda diaria correspondiente. En cuanto al consumo, existen varias referencias relevantes en las cuales se podría uno basar para determinar los límites de potencia para cada una de las posibles cargas (e.g., ver [16] [17] [18] entre otros).

En cuanto al análisis operativo, se diseñaron algoritmos de despacho y manejo de recursos para identificar posibles costos de la energía. El despacho económico es vital en una red que cuenta con distintos recursos de generación, cada uno con diferentes costos y características, ya que se utiliza para minimizar los costos de operación a la vez que se satisfacen las restricciones de seguridad del sistema. El despacho económico se puede realizar de forma estática o dinámica, siendo esta última más compleja pero más conveniente por la existencia de fuentes de generación con incertidumbre. El problema del despacho económico busca minimizar los costos de operación del sistema, encontrando la asignación de potencia de cada generador para cada instante de operación. En este sentido, se consideran las funciones de costo de las distintas tecnologías de generación y sus restricciones técnicas. Además, en el despacho económico se incluye una restricción de balance



Figura 1. Imágenes de los talleres realizados con las comunidades.

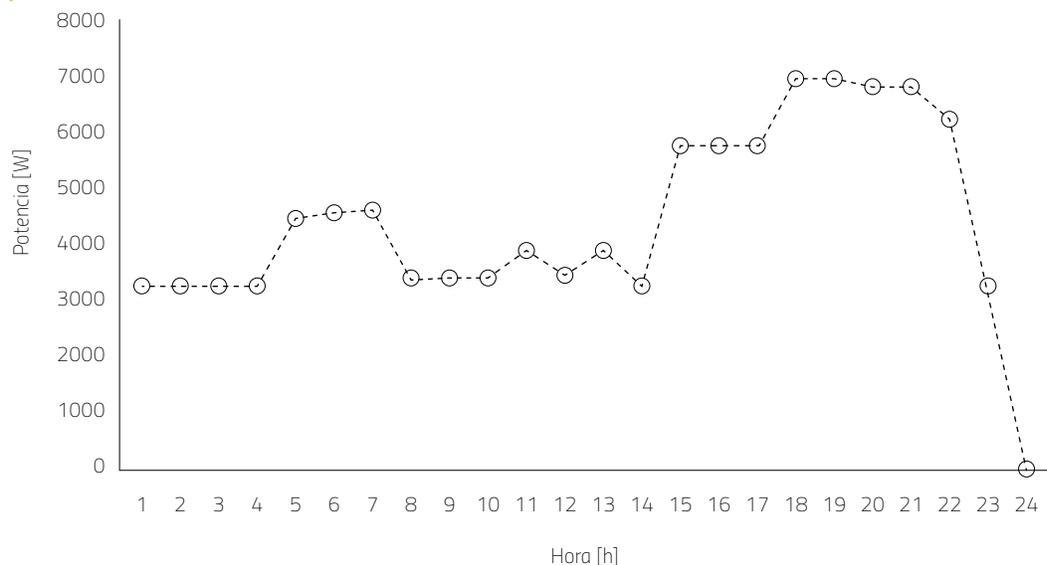
que asegura que la generación es igual a la demanda y por lo tanto no hay déficit. Morales et al. [19] han mostrado el efecto de no incluir este tipo de variables en el despacho, y propone incluir los costos esperados de balancear el sistema en el despacho por orden de mérito [19]. Lo anterior, con el fin de mantener una entrega de energía eficiente. En la literatura se han propuesto distintas herramientas para incluir variables aleatorias dentro del problema de despacho económico, entre las cuales se destacan, el método de estimación de punto [20], despacho multiobjetivo [21] y [22], algoritmos de descomposición [23], programación dinámica [24], algoritmos de descomposición para deslastre de carga y la respuesta de la demanda [25] y [26], y control predictivo basado en modelo, (MPC) [27], [28] y [29]. En este proyecto se utiliza el MPC ya que tiene algunas características apropiadas e interesantes para resolver problemas de despacho. Como características, se tiene que estos algoritmos permiten al operador considerar los posibles eventos futuros y la evolución del sistema en un problema de optimización. Para este fin, es necesario contar con un modelo del sistema que represente fielmente el estado actual de la red y su evolución en términos de generación y demanda. Adicionalmente, una de las principales ventajas del MPC es la posibilidad de incluir distintos tipos de restricciones en el problema de optimización. El despacho de la generación eléctrica se realiza por medio de un control MPC distribuido, en el cual se resuelve un problema de optimización para

cada generador en tiempo real, similar a un despacho económico clásico. Sin embargo, este controlador también calcula la generación para instantes futuros de tiempo, de acuerdo con la información de demanda disponible y la disponibilidad del recurso, para el caso de las fuentes de energía renovables. La cantidad de información pronosticada considerada depende del horizonte de predicción y del tiempo de muestreo configurados en el controlador. Los trabajos en [30], [31] y [32] resumen las estrategias utilizadas.

Con el fin de verificar el correcto funcionamiento de las soluciones propuestas y asegurar que sean factibles en su implementación, se realizan simulaciones de estado estable, para obtener los valores de corriente y voltaje del sistema utilizando la solución del despacho horario con horizonte de predicción igual a 24 horas. Los valores obtenidos se comparan con las restricciones del código de redes (Resolución CREG 025 de 1995), el reglamento de distribución de energía eléctrica (Resolución 070 de 1998), y el estándar de interconexión de recursos distribuidos IEEE 1547. Básicamente, se verifica que el nivel de tensión se encuentra entre 0.9 p.u. y 1.1 p.u., que la cargabilidad de las líneas no sobrepasa el 100%, y además se analiza el comportamiento de las pérdidas de potencia activa.

Para la solución de energización del módulo, en primer lugar, es necesario tener información dinámica de la demanda

Figura 2. Ejemplo de curva de carga diaria.



del sistema (específicamente de cada uno de los circuitos a implementar). Igualmente, es necesario contar con la estimación (o los datos históricos) del recurso solar y eólico para realizar el despacho y operación eficiente del sistema. En la Figura 3 se puede observar el comportamiento de la

demanda para las 24 horas de un día típico. De acuerdo con los resultados de despacho para cada uno de los escenarios y del comportamiento de la demanda, se realizaron simulaciones de flujo horarias para un día típico. El diagrama unifilar del sistema propuesto se muestra en la Figura 4.

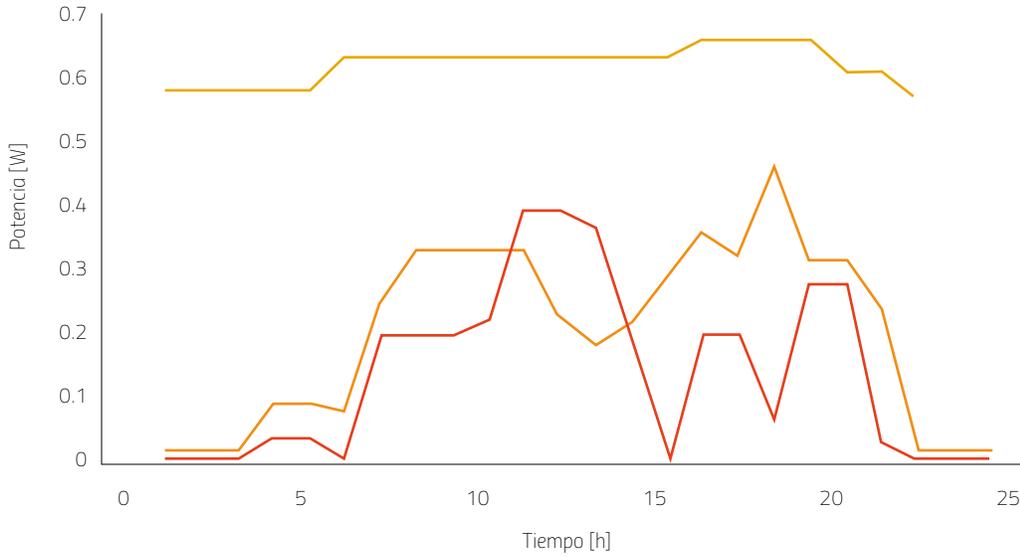


Figura 3. Demanda de cada circuito.

Circuito 1  
Circuito 2  
Circuito 3

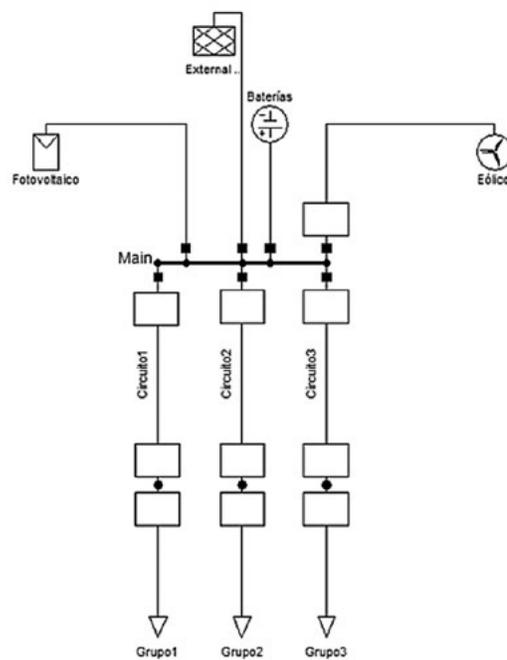


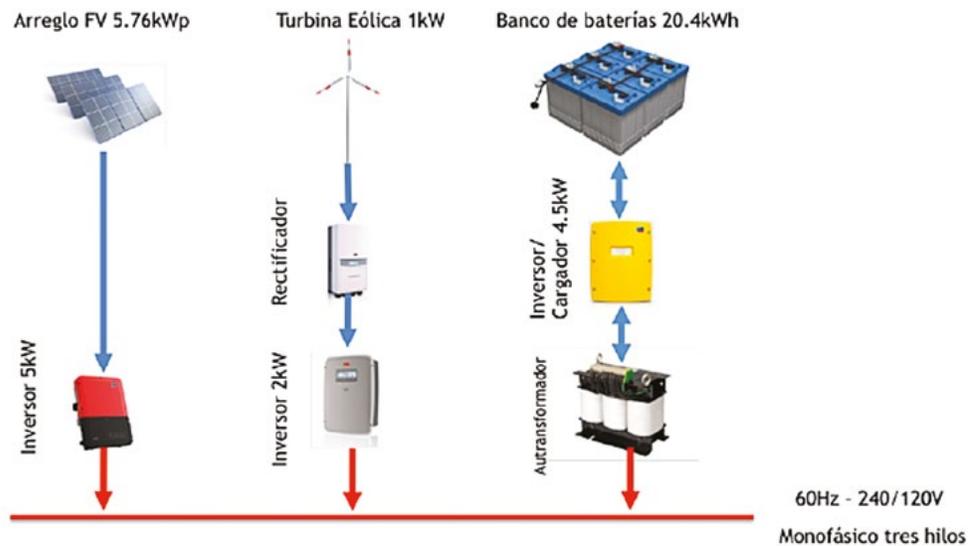
Figura 4. Diagrama unifilar de la propuesta.

### III. Soluciones propuestas e implementación

El diseño que se planteó para una de las comunidades tenía en cuenta las necesidades energéticas identificadas para la misma. Con el fin de minimizar los costos de inversión, se consideró que dependiendo de la disponibilidad de recurso, se podría tener un déficit de energía de 20%. Esta solución cuenta con un generador eólico de 1kW (con un inversor de 2 kVA), un conjunto de paneles fotovoltaicos de 5.76 kWp (dos strings de 9 paneles en serie, de 320 Wp y un inversor de 5 kVA) y un banco de baterías de 20.4 kWh (24 baterías de 425 Ah a 2V, conectadas en serie) manejado por medio de

un inversor/cargador de 4.5 kVA, como se ilustra en la Figura 5. Dentro de las cargas a proveer por medio de la solución, se encuentran iluminación, aire acondicionado, refrigerador, congelador, celulares, lámparas, televisor, módem, ventilador, tabletas, entre otros. La enramada (lugar de encuentro social de la comunidad) solar tendrá una potencia total de 4,5 kW y un consumo energético de 22,7 kWh. De acuerdo con la demanda de energía de la comunidad y la disposición de la misma, se definió una topología eléctrica de la microrred en AC sea monofásica a tres hilos o también conocida como Split-phase 120/240V 60Hz, con el balance de cargas propuesto para las dos líneas.

Figura 5. Arquitectura del sistema de generación Planta Piloto 1.



Por otro lado, el sistema de control deberá estar eléctricamente acoplado en AC con el fin de realizar el control sobre ese lado del sistema, de acuerdo con los siguientes criterios. El banco de baterías actúa como regulador de frecuencia, i.e., que la generación solar y la generación eólica sólo entrarán a generar cuando haya un voltaje y frecuencia presentes en la barra a la cual se conectan. La medición de variables eléctricas y la

medición de los recursos renovables (radiación y viento) son las señales de entrada al sistema y por otro lado las consignas de potencia y la desconexión/conexión de la demanda corresponden a las salidas del sistema. La comunicación requerida por el sistema de control se da sobre una Ethernet/WLAN, cuyos protocolos de comunicación son implementados en Modbus. La arquitectura propuesta se muestra en la Figura 6.

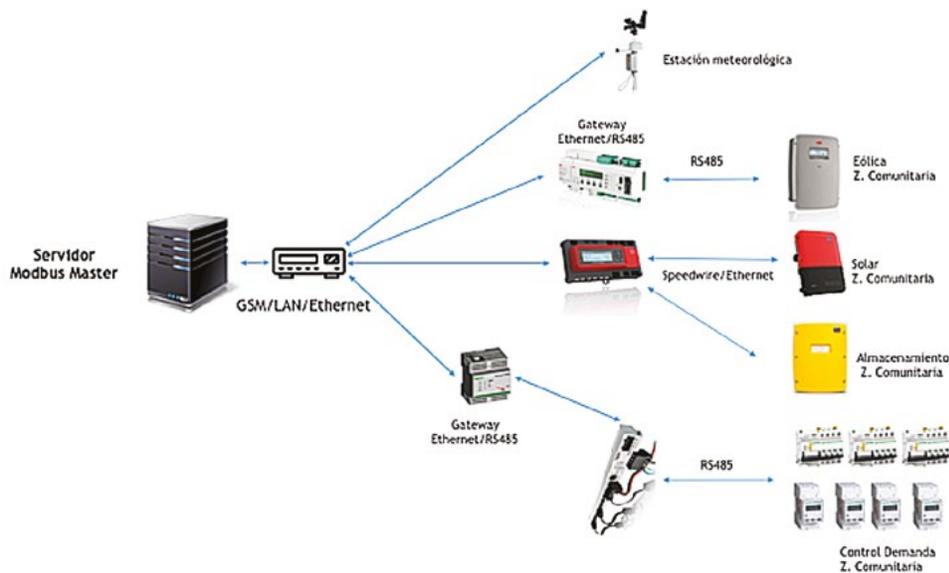


Figura 6. Arquitectura propuesta para el sistema de control y comunicaciones.

El sistema de control deberá poder manejar y solucionar los siguientes escenarios límite de operación: i) *black-start*, el cual busca que en caso de *black out*, el sistema de control será capaz de energizar el sistema desde cero a través del banco de baterías para permitir que se puedan sincronizar las fuentes de generación solar y eólica; ii) cambios en la demanda: los cambios en la demanda no deberían generar inestabilidad en el voltaje y la frecuencia de la microrred. La regulación primaria de los inversores del sistema controlarán este escenario sin ayuda del sistema de control secundario; iii) fallas en la demanda: en caso de fallas en el lado de la demanda, estas deberán ser controladas por las protecciones primarias de los circuitos de distribución. Una vez despejadas las fallas el sistema de controlar deberá

estar en capacidad de realizar la reconexión de manera remota; iv) fallas en generación: en caso de fallas en la generación solar y/o eólica, el sistema de control estará en capacidad de realizar un redespacho de las fuentes de energía disponible y también de controlar la demanda a través de deslastres de carga en caso de que sea necesario mientras la falla es solucionada. Lo mismo deberá ser realizado por el sistema de control cuando el generador en falla se encuentre nuevamente disponible; v) priorización de la demanda en caso de deslastre: en este caso, se asigna el orden de prioridad de la Figura 7 de deslastre para cada zona de la planta. Para cada uno de los grupos de carga de cada zona existirá un circuito de distribución independiente que permitirá conectar y desconectar de acuerdo con las prioridades establecidas.

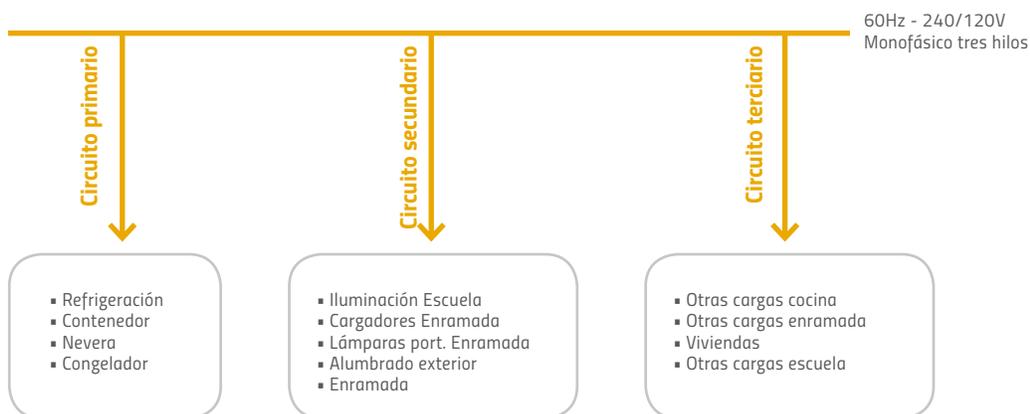


Figura 7. Prioridad de las cargas en el módulo comunitario.

Figura 8. Sistema híbrido (solar fotovoltaico, eólico y baterías).



La implementación del sistema se puede ver en la Figura 8, donde se ve el aerogenerador, la enramada con los paneles solares, nevera y refrigerador, así como una visión de dónde y cómo llega la información de los elementos.

#### IV. Discusión

El proyecto que fue entregado recientemente ha comenzado a tener un alto impacto en la comunidad. Durante la entrega de la solución, los habitantes se mostraban altamente complacidos por el sistema y se percibe una cierta apropiación del mismo. Durante la implementación física, los habitantes recibieron una serie de capacitaciones para la operación del sistema, y se dieron varias lecciones asociadas al uso racional de la energía. Sin embargo, en este tipo de soluciones varios problemas comienzan a emerger. En primer lugar, es claro que en múltiples ocasiones se colocarán más cargas de

las que el sistema había contemplado originalmente. Si bien se dejó una cierta holgura para que los habitantes pudiesen conectar unas cargas de más de las que se previeron originalmente, al encontrarse con esta nueva solución los habitantes tratarán de conectar elementos que pueden llegar a consumir toda la energía que pueda lograrse almacenar en las baterías (e.g., taladros, parlantes en las iglesias evangélicas, etc). Por lo tanto, una de las lecciones que hemos sacado del diseño es que éste tiene que sobredimensionarse, para poder lograr en la medida de lo posible abarcar más cargas de las diseñadas. Sin embargo, esto tiene un costo elevado que limitó en esta ocasión haberlo hecho desde un principio.

Otra de las lecciones aprendidas en esta implementación es la complejidad asociada con los sistemas de comunicaciones disponibles. En la zona no se dispone de señal de GPRS, por lo que los datos que se han

comenzado a tener no han podido ser enviados para un monitoreo remoto. Actualmente, se está resolviendo este inconveniente gracias a soluciones de internet satelital. Esta posible solución nos permitirá comenzar a entender que tan bien se están comportando las acciones de control del sistema, y cómo podría llegar a hacer una sintonización más fina de los equipos. Lastimosamente, como el sistema solo lleva un mes de operación, aún no tenemos datos del comportamiento de equipos claves, como lo son las baterías. Es importante poder lograr en el corto plazo un monitoreo remoto de estas, ya que el tipo de climatización que se tiene para este equipamiento no limita por completo la aparición de temperaturas más altas que estarían afectando la eficiencia de las baterías.

Finalmente, es claro que para poder replicar este tipo de proyectos en diferentes comunidades a lo largo del país, es menester contar con la comunidad y tener un diálogo permanente y fluido con ella. La implementación de estas soluciones depende de qué tanto están involucrados todos los actores en el desarrollo del proyecto. El país podría pensar en tener soluciones como este tipo de iniciativas, las cuales deberían contar como uno de los factores de entrada de las necesidades locales. La parte técnica puede estandarizarse, pero la viabilidad de la solución dependerá de qué tan involucrada esté la comunidad en el desarrollo del proyecto. El tener proyectos de este tipo, agilizaría, en muchos casos, la implementación de la solución en diferentes zonas aisladas del país.

## V. Conclusiones

Este proyecto tuvo el chance de diseñar e implementar una microrred en una región aislada del país. El proceso, que tomó más de tres años, desarrolló desde la ingeniería básica hasta la de detalle y su posterior implementación, gracias a recursos que se obtuvieron por el tridente empresa-universidad-estado, lo que demuestra los beneficios de las asociaciones estratégicas. La solución propuesta contó con un diseño participativo, en el cual la comunidad explicó claramente cuáles eran sus necesidades comunes más importantes, y a partir de ello se modificó, en diversas ocasiones, el diseño. Gracias a una buena implementación acompañada de diálogo permanente con la comunidad, los habitantes disponen hoy de un conocimiento ligado al uso racional de la energía. El propósito era que los habitantes tuviesen

más holgura en la solución, pero limitantes económicas impidieron que esto se lograra.

Ahora, el reto está en la operación y mantenimiento del sistema. Se espera que en este año que se tiene la oportunidad de hacer el seguimiento al proyecto, se puedan incluir otros detalles como la parte de monitoreo remoto y sintonización de parámetros para un mejor funcionamiento del sistema. A su vez, es menester comenzar a crear más lazos con actores locales para que exista una red de apoyo con determinada misionalidad social y cultural, como puede ser, por ejemplo, la academia local, quienes cuentan además con capacidades técnicas para apoyar la sostenibilidad futura de aquellas soluciones técnicas implementadas. Esta red de apoyo conformada por academia, sector público y empresa privada podría implicar una reflexión sobre el papel que cumplen los actores relevantes que la llegasen a conformar, y cómo desde su rol se configuran sus intereses, sus acuerdos y compromisos.

Finalmente, sería importante que el país se concientizara del valor que tienen la unión entre el estado, la academia y la industria para poder generar más soluciones que puedan permitir que ciertas zonas olvidadas del país puedan mejorar gracias a la generación de energía, la cual podría, por el valor que tiene al ser un servicio transversal, servir incluso para soluciones como agua potable, vital para mejorar la calidad de vida de nuestros conciudadanos.

## VI. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por ISAGEN, Acuerdo Específico 3, Solución Energética Piloto, La Guajira. En el marco de este trabajo, además de los autores, varias personas colaboraron en diferentes aspectos durante el desarrollo del proyecto. A ellos, es pertinente agradecer el trabajo realizado: J.Rodríguez, D.Calpa, A.Gutiérrez, J.Jiménez, J.Rojas, A.González, P.Duarte, A.Pinilla, J.Chitiva, R.Bustamante, V.Castro, J.Méndez, L.Posada, C.Silva (Senergysol), P.Martínez, J.González (SunColombia). Finalmente, los autores quisieran agradecer a A.García por la invitación a participar en el evento, así como a A.Pinilla y los revisores por los comentarios otorgados que enriquecieron la redacción y presentación del documento. ●

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PNUD-ANH, «Estrategia Territorial para la Gestión Equitativa y Sostenible del Sector Hidrocarburos: Diagnóstico Socioeconómico del Departamento de La Guajira,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.anh.gov.co/Seguridad-comunidades-y-medio-ambiente/SitioETH-ANH29102015/como-lo-hacemos/ETHtemporal/DocumentosDescargarPDF/1.1.2%20%20DIAGNOSTICO%20GUAJIRA.pdf>
- [2] IPSE, «Plan de Energización Rural Sostenible (PERS),» [En línea]. Available: [http://www.ipse.gov.co/pages/ipse/Informe\\_PERS\\_Dirección1.pdf](http://www.ipse.gov.co/pages/ipse/Informe_PERS_Dirección1.pdf).
- [3] PERS Guajira, «PERS Guajira,» [En línea]. Available: <http://persguajira.corguajira.gov.co>
- [4] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei y S. Bahramirad, «State of the Art in Research on Microgrids: A Review,» IEEE Access, pp. 890-925, 2015.
- [5] G. A. Jiménez-Estévez, R. Palma-Benhke, D. Ortiz-Villalba, O. N. Mata y C. S. Montes, «It takes a village: social SCADA and approaches to community engagement in isolated microgrids,» IEEE Power and Energy Magazine, pp. 60-69, 2014.
- [6] Agencia de los Estados Unidos para el desarrollo internacional (USAID), «Experiencias para construir futuro. Programa de energía limpia para Colombia 2012-2017,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.ccep.co/attachments/article/463/USAID%20CCEP%201-%20Experiencias%20para%20construir%20futuros.pdf>.
- [7] Princeton Power Systems, «Annobon Island Microgrid,» Septiembre 2015. [En línea]. Available: [http://www.princetonpower.com/images/casestudies/pdfs/Annobon\\_CaseStudy\\_Septembert2015.pdf](http://www.princetonpower.com/images/casestudies/pdfs/Annobon_CaseStudy_Septembert2015.pdf).
- [8] The Beam, «In Africa, microgrids are changing people's lives. Medium,» 2017. [En línea]. Available: <https://medium.com/thebeammagazine/microgrids-are-building-a-better-future-for-populations-in-remote-areas-46d06b0c9966>.
- [9] C. Alvial-Palavicino, N. Garrido-Echeverría, G. Jiménez-Estévez, L. Reyes y R. Palma Behnke, «A methodology for community engagement in the introduction of renewable based smart microgrid,» Energy for Sustainable Development, pp. 314-323, 2011.
- [10] Senergysol, [En línea]. Available: <http://senergysol.com.co>
- [11] SunColombia, [En línea]. Available: <http://www.suncolombia.com>
- [12] ASOPAGUA, «Estudio de caracterización social de las zonas de interés G (Maicao) e I (Manaure) para el desarrollo de proyectos de generación eólica por parte de ISAGEN en el departamento de La Guajira,» 2010.
- [13] Akrich, M., Callon, M., Latour, B., & Monaghan, A., «The Key to Success in Innovation Part I: The Art of Interesement,» de International Journal of Innovation Management, 2002a, p. 187-206.
- [14] Akrich, M., Callon, M., Latour, B., & Monaghan, A., «The Key to Success in Innovation Part II: The Art of Interesement,» de International Journal of Innovation Management, 6(2), 2002b, p. 207-225.
- [15] Avelino, F., «Empowerment and the challenge of applying transition management to ongoing projects,» de Policy Sciences, 42(4), 2009, p. 369-390.
- [16] Debnath, K.B. Mourshed, M. Kheong Chew, S.P, «Modelling and forecasting energy demand in rural households of Bangladesh,» School of Engineering, Cardiff University., 2015.
- [17] Mandelli, S. Merlo, M. Colombo, E., «Novel procedure to formulate load profiles for off-grid rural areas,» Department of Energy, Politecnico di Milano, 2015.
- [18] Centre for Sustainable Energy, United Kingdom, «How much electricity am I using?,» [En línea]. Available: <https://www.cse.org.uk/advice/advice-and-support/how-much-electricity-am-i-using>
- [19] J. M. Morales, M. Zugno, S. Pineda y P. Pinson, «Redefining the merit order of stochastic generation in forward markets,» IEEE Transactions on Power Systems, vol. 29, n° 2, pp. 992-993, 2014.
- [20] M. Zhou, S. Xia, G. Li y X. Han, «Interval optimization combined with point estimate method for stochastic security-constrained unit commitment,» International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 63, p. 276-284, 2014.
- [21] A. Kargarian y Y. Fu, «Spider area-based multi-objective stochastic energy and ancillary services dispatch,» in Proceedings of the 2014 Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), p. 1-5, 2014.
- [22] A. Kargarian, B. Falahati y Y. Fu, «Stochastic active and reactive power dispatch in electricity markets with wind power volatility,» in Proceedings of the 2012 Power and Energy Society General Meeting, p. 1-7, 2012.
- [23] Y.-Y. Lee y R. Baldick, «A frequency-constrained stochastic economic dispatch model,» IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, n° 3, p. 2301-2312, 2013.
- [24] J. J. Hargreaves y B. F. Hobbs, «Commitment and dispatch with uncertain wind generation by dynamic programming,» IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 3, n° 4, pp. 724-734, 2012.
- [25] A. Zakariazadeh, S. Jadid y P. Siano, «Smart microgrid energy and reserve scheduling with demand response using stochastic optimization,» International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 63, p. 523-533, 2014.
- [26] C. E. Murillo-Sánchez, R. D. Zimmerman, C. L. Anderson y R. J. Thomas, «Secure planning and operations of systems with stochastic sources, energy storage, and active demand,» IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, n° 4, pp. 2220-2229, 2013.
- [27] M. D. Ilic, L. Xie y J. Y. Joo, «Efficient coordination of wind power and price-responsive demand part I: Theoretical foundations,» IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, n° 4, pp. 1875-1884, 2011.
- [28] C. Kim, Y. Gui, C. C. Chung y Y. C. Kang, «Model predictive control in dynamic economic dispatch using weibull distribution,» in Proceedings of the 2013 IEEE Power Energy Society General Meeting, pp. 1-5, 2013.
- [29] J. P. Torreglosa, P. García, L. M. Fernández y F. Jurado, «Energy dispatching based on predictive controller of an off-grid wind turbine/photovoltaic/hydrogen/battery hybrid system,» Renewable Energy, vol. 74, pp. 326-336, 2015.
- [30] M. A. Velásquez, O. Torres-Pérez, N. Quijano y A. Cadena, «Hierarchical dispatch of multiple microgrids by using nodal,» To appear Journal of Modern Power and Clean Energy, 2019.
- [31] M. A. Velásquez, J. Barreiro, N. Quijano, A. Cadena y M. Shahidehpour, «Distributed Model Predictive Control for Economic Dispatch of Power Systems,» To appear International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019.
- [32] M. A. Velásquez, J. Barreiro, N. Quijano, A. Cadena y M. Shahidehpour, «Intra-Hour Microgrid Economic Dispatch Based on Model Predictive Control,» To appear IEEE Transactions on Smart Grid, 2019.



Foto: CCEP/USAID. Fotógrafo: Hanz Rippe.