

MICRORREDES EN LA RED ELÉCTRICA DEL FUTURO - CASO HUATACONDO.

Oscar Núñez Mata^{1,2†}, Diego Ortiz Villalba^{1,3*}, Rodrigo Palma-Behnke¹.

¹Centro de Energía, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Escuela de Ingeniería, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

²Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

³Departamento Eléctrica - Electrónica, Escuela Politécnica del Ejército. Latacunga, Ecuador.

Recibido 11 de abril 2013; aceptado 28 de setiembre 2013

Abstract

This paper proposes a new paradigm related to electrical power systems, known as Microgrids, with emphasis on those systems that must operate in isolated communities. It redefines the concept of supervisory control and data acquisition (SCADA) commonly used in electrical systems, in this case renamed Social SCADA. Also qualitatively analyzed is its contribution to the resilience of the system, which means to increase its flexibility and adaptability to external and internal disturbances. As a case study, the implementation of Social SCADA in Huatacondo, a small town in northern Chile, is documented. We show some results obtained with the operation of the microgrid, such as the decrease of operating costs, with the delivery of electricity and water. An important contribution discusses the management of a power system that evolves around community participation to increase its sustainability, understood as a dynamic feature, characteristic of the evolution of the system.

Resumen

El presente trabajo propone un nuevo paradigma relacionado con las redes eléctricas, conocido como *Microrredes*, con énfasis en aquellas que deben operar en comunidades aisladas. Además, se replantea el concepto de sistema SCADA comúnmente utilizado en los sistemas eléctricos, en lo que se denomina el *Social SCADA*. Igualmente, se analiza cualitativamente su contribución a la resiliencia del sistema, lo que significa aumentar su flexibilidad y adaptabilidad frente a perturbaciones exógenas y endógenas. Como caso de estudio, se documenta la aplicación del *Social SCADA* en Huatacondo, un pequeño pueblo del norte de Chile. Finalmente, se muestran algunos resultados obtenidos gracias a la operación de la microrred, como por ejemplo: la reducción en los costos operacionales, junto con la entrega de electricidad y agua. Como aportes importantes se analiza el manejo de un sistema de energía que gira en torno a la participación de la comunidad, con miras a un aumento de su sustentabilidad, entendida como una característica dinámica, propia de la evolución del sistema.

Key words: Microgrid, renewable energy, smart grid, SCADA, generation, resilience, isolated community.

Palabras clave: Microrred, energía renovable, red inteligente, SCADA, generación, resiliencia, comunidad aislada.

†Autor para correspondencia: oscarnunezmata@gmail.com

* Autor para correspondencia: ddortiz5@espe.edu.ec

I. INTRODUCCIÓN

El Banco Mundial, uno de los más importantes promotores de proyectos de electrificación rural, estima que cerca de 1,6 mil millones de personas no tienen acceso regular a la electricidad. La mayoría de ellas viven en zonas rurales, las cuales no cuentan con proyectos de electrificación debido a los altos costos y dificultades técnicas que éstos implicarían [15]. Los proyectos de electrificación que se han desarrollado en estas zonas son en su mayoría vinculados a una sola fuente de energía (por ejemplo: diesel, hidro o solar) y suministran electricidad a una vivienda o a pequeños poblados. Esta solución depende principalmente de las condiciones meteorológicas, las limitaciones de transporte y disponibilidad de recursos, con la consecuente pérdida de confiabilidad y seguridad. El Banco Mundial ha identificado que aquellos proyectos bajo esquemas del tipo *llave en mano*, con baja o ninguna participación comunal, muestran problemas técnicos debido a la falta de capacidades locales y a procedimientos de mantenimiento inadecuados, lo que finalmente redundan en operaciones parciales o abandono de los sistemas construidos, limitando sus beneficios [8]. Además, la participación de la comunidad ha sido reconocida como una potente herramienta para el mantenimiento y operación de sistemas que sirven a sus propias poblaciones.

Por otro lado, actualmente es posible combinar diferentes tecnologías de generación eléctrica uniendo las tradicionales con fuentes de energía renovables, principalmente a base de viento y sol. Lo anterior como respuesta a la creciente presión por reducir el impacto sobre el ambiente en el campo eléctrico. Estas soluciones se pueden integrar en un esquema llamado *Microrred*, entendida como un caso particular de uno más general conocido como Red Inteligente (en inglés Smart Grid). Una microrred se puede definir como una agregación de elementos eléctricos en baja tensión de generación, almacenamiento y cargas (usuarios), los cuales se encuentran agrupados en una cierta área geográfica acotada.

Una microrred tiene la ventaja de ser más *resiliente* que los sistemas eléctricos convencionales a base de energías renovables. Esto significa que pueden aumentar su flexibilidad y adaptabilidad ante eventos exógenos y endógenos perturbadores, lo que incidirá directamente en la sustentabilidad, entendida no como un estado que puede ser alcanzado, más bien, se define sustentabilidad como una característica dinámica, propia de la evolución del sistema en estudio [10].

Al unir los esfuerzos de participación comunal, con herramientas de microrredes, y los conceptos de SCADA (del inglés Supervisory Control And Data Acquisition) convergen en una solución denominada *Social SCADA*. Este concepto puede interpretarse como una extensión del sistema tradicional SCADA, pero que reconoce a la comunidad como un factor crítico en el logro de la supervisión y mantenimiento a bajo costo, lo que ayuda a incrementar la sustentabilidad en el largo plazo, por medio de un aumento de la resiliencia del sistema.

Esta propuesta es llevada a la práctica en una microrred real en el pueblo de Huatacondo ($20^{\circ} 55' 36.37''$ S $69^{\circ} 3' 8.71''$ O), en el desierto de Atacama, Chile. Las consideraciones y resultados son analizados en el presente trabajo.

II. DISTINTAS VISIONES PARA LA FUTURA RED ELECTRICA.

El desarrollo social y económico en el mundo siempre ha estado acompañado por el paradigma actual del sistema eléctrico, caracterizado por tener grandes centrales de generación, largas líneas de transmisión operadas en alta tensión, y las compañías distribuidoras locales que alimentan las cargas en sistemas radiales, localmente operados y unidireccionales. La vida

moderna es imposible sin esta red eléctrica, desplegada en la mayor parte del mundo, prácticamente con la misma configuración. Sin embargo, esta red experimenta retos técnicos, sociales, ambientales y económicos que definirán su configuración futura. Muchos son los temas, que se escapan al alcance de este trabajo, solamente se plantea uno en relación al paradigma de su configuración. Para algunos autores, el futuro de la red eléctrica será en lo que llaman una *Súper Red*, mientras que otros siguen un nuevo paradigma que es la *Red Distribuida* [13].

La visión de la súper red implica el despliegue de nuevas tecnologías de generación y almacenamiento, que mejoren la calidad y confiabilidad, aunque siempre basadas en grandes complejos e instalaciones. Para los que visualizan la red como distribuida, se basan en el uso de recursos de generación distribuida, sirviendo localmente a las cargas.

El enfoque de este trabajo es hacia la red distribuida, como posible escenario para el futuro. De esta forma las microrredes jugarán un papel importante, al ser ideales para la incorporación de generación de energía distribuida.

III. INTRODUCCIÓN A LAS MICRORREDES.

Si bien el concepto de *Microrred* continúa en discusión en los círculos técnicos, ésta puede definirse como una agregación de elementos eléctricos en baja tensión de generación, de almacenamiento y cargas (usuarios), los cuales se encuentran agrupados en una cierta área geográfica acotada, que puede operar conectada a la red o en forma aislada. Respecto a los generadores, pueden ser de diversa naturaleza, entre los cuales están: micro turbinas, motores reciprocares como el caso de grupos electrógenos basados en diesel o gas, o fuentes renovables como aerogeneradores y plantas fotovoltaicas. Para efectos de la compañía eléctrica, la microrred se ve como una sola carga que puede ser controlada en magnitud [11]. Para los consumidores, la microrred puede ser diseñada para satisfacer sus necesidades particulares, tales como: aumento de la confiabilidad local, reducción de las pérdidas por transporte, soporte local de tensión, entre otras [10].

Un concepto de microrred altamente usado es el que ha dado el CERTS de EUA (del inglés Consortium for Electric Reliability Technology Solutions), que la define como una agregación de cargas y pequeñas fuentes generadoras operando como un único sistema de potencia y calor [11]. En este contexto, es necesario incluir el término: Recurso de Generación Distribuida DER (del inglés Distributed Energy Resources), definido como pequeños generadores de potencia emplazados en los mismos lugares de los usuarios finales, donde la energía, tanto eléctrica como térmica, es consumida. Estos recursos emergen como una opción prometedora para satisfacer las necesidades de energía eléctrica con un énfasis hacia la confiabilidad y la calidad. El concepto de DER abarca los siguientes elementos: generadores, almacenadores de energía, control de carga, y, en ciertos sistemas, las interfaces de electrónica de potencia entre el generador y el almacenador. Es así como las microrredes son ideales para la integración de las DER a la red eléctrica, ya que se miran como una entidad auto controlada, respondiendo a señales de control sin necesidad de conocer información adicional sobre su configuración interna, promoviendo un enfoque de control descentralizado.[5].

La arquitectura básica se muestra en la Figura 1, la cual consiste de una configuración de conexión tipo Radial, aunque es posible configuración de tipo Mallado, donde cada alimentador sigue este mismo esquema, la cual incluye las cargas, los elementos de almacenamiento y de generación. El almacenamiento ayuda a mantener el equilibrio entre oferta y demanda de potencia, dado la variabilidad de las fuentes de energía renovables, que cambian su capacidad según la hora

de día, el día de la semana y la estación del año. El concepto se extiende al uso combinado del calor y electricidad, con miras al aumento de eficiencia. En la arquitectura típica se reconocen tres componentes críticos de las microrredes, estos son:

- Controladores locales de los recursos distribuidos: con respuestas en el orden de los milisegundos; se encargan de controlar los recursos distribuidos gracias a información local.
- Optimizador del sistema: es provisto por el Sistema de Manejo de Energía EMS (del inglés Energy Management System); usa diversa información para operar.
- Protecciones: para responder ante condiciones de falla de la red eléctrica o de la microrred.

Las micro-fuentes propuestas en la Figura 1 tienen un rango del orden de fracciones hasta 200-300kW, lo que se aleja del uso tradicional de medianas o grandes centrales de generación. Estas fuentes se colocan típicamente cerca de los sitios de consumo, en las propiedades de los consumidores o áreas comunes [12].

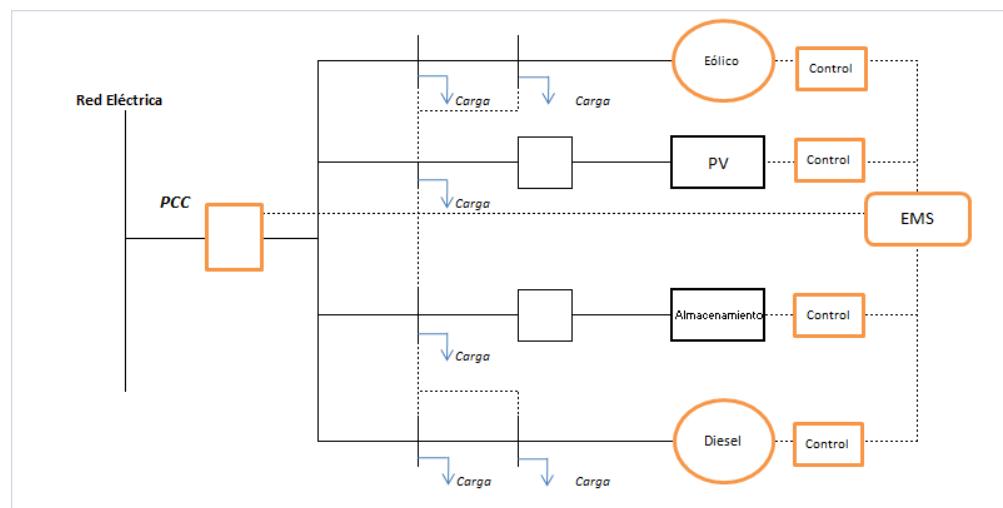


FIGURA 1. Arquitectura típica de una microrred.

Una microrred tiene la capacidad de operar *interconectada* a la red eléctrica principal, donde la necesidad adicional de potencia se suple desde ésta, y cuando tiene excedentes se pueden tranzar con la red. O bien, pueden operar en condición *aislada*, situación que se produce por: una causa obligada, como un desastre natural; por una necesidad como en comunidades alejadas; o por elección como en ciertas aplicaciones especiales, un ejemplo son los centros de datos informáticos. En este último modo, la microrred genera la potencia internamente, incluyendo las transferencias entre las unidades almacenadoras, de manera que se lo logre el balance oferta-demanda.

Comparadas con la red eléctrica tradicional las microrredes pueden traer muchos beneficios, los cuales dependen del punto de vista que se analice, a saber:

- Según el sistema eléctrico: La principal ventaja es que se toma como una sola entidad controlada, la cual se combina con una interface a base de electrónica de potencia, lo que la hace una entidad auto suficiente, que incluye control, comunicaciones y protecciones autónomas.
- Según los usuarios: El mayor beneficio es aumentar los niveles de confiabilidad y seguridad.
- Desde el punto de vista ambiental: El aporte es reducir las emisiones contaminantes, debido a que facilitan la introducción de energía renovable.

IV. ESTADO ACTUAL DE LAS MICRORREDES.

Distintos proyectos pilotos en muchos países del mundo están explorando el potencial de las microrredes para promover su incorporación a la red eléctrica, y hacer un sistema menos vulnerable a interrupciones, entre otros objetivos. Dichos proyectos buscan desarrollar una red menos centralizada, lo que requiere grandes inversiones en tecnología y entrenamiento, así como el desarrollo de políticas y estándares. Sin embargo, hoy en día las microrredes representan una muy pequeña porción de la totalidad de la red, por ejemplo en Estados Unidos de América se estima que hay 1.1GW de capacidad instalada, y para el 2017 será de 4.7GW [3].

Evidencia anecdótica en otras partes del mundo, sugieren que las microrredes están jugando un papel importante haciendo que las redes eléctricas sean más robustas frente a las perturbaciones, aumentando su resiliencia. El caso más notable fue el sucedido durante el terremoto y posterior tsunami en Japón en 2011 en la región de Tohoku, donde la microrred de la Tohoku Fukushi University de 1MW operó por 2 días en modo aislado, luego del evento sísmico, mientras la región alrededor se quedó sin servicio eléctrico. La microrred localizada se mantuvo operativa con alto nivel de desempeño supliendo a las cargas [18]. Se está gestando en el mundo una mirada hacia las oportunidades que ofrecen las microrredes en este tipo de situaciones.

Una característica clave de las microrredes es que pueden incluir una amplia variedad de medios de generación y cargas. Para desarrollar la tecnología que integre a las microrredes al sistema eléctrico son necesarios laboratorios multifuncionales, que incorporen fuentes de generación, de almacenamiento, y las cargas. Estos son proyectos de microrredes activas y operativas alrededor del mundo, que envuelven pruebas y evaluación de los conceptos que se usarán en la futura red [1], y se desarrollan actualmente en varios países.

V. PROPUESTA DEL SOCIAL SCADA PARA MICRORREDES.

El sistema SCADA tradicional se basa en la recolección, procesamiento y análisis de datos en tiempo real desde algún proceso. Este sistema requiere de personal capacitado para la operación y control de los dispositivos a través de una interfaz HMI (del inglés Human Machine Interface). Por el contrario, el Social SCADA propone implementar HMIs simplificadas para facilitar el intercambio de información entre el sistema y la comunidad donde se instale la microrred. En esta propuesta los operadores sólo necesitan formación básica para interactuar con el sistema. En la Figura 2, el concepto de Social SCADA para microrredes eléctricas se presenta como la suma del componente social (comunidad), y las tradicionales aplicaciones SCADA (técnico).

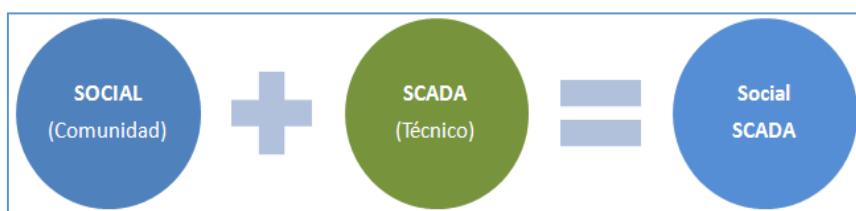


FIGURA 2. Los componentes del Social SCADA.

EL componente social

El componente Social se construye a partir de una descripción de la comunidad donde operará la microrred, en términos de las interacciones sociales y el uso de la tierra, identificando las partes interesadas y la disposición de los pobladores hacia la participación en el proyecto [2]. El análisis del componente social facilita el proceso de toma de decisiones, y trae ideas de la teoría de sistemas complejos para analizar la sustentabilidad del sistema energético, poniendo fuerte énfasis en comprender el manejo y capacidad adaptiva para la entrada exitosa de nuevas tecnologías en la comunidad.

Para implementar el Social SCADA se recomienda seguir un proceso de cinco etapas, que promueven la evolución de un sistema convencional a uno caracterizado por: resiliente, adaptado a la realidad local, es a pequeña escala, y centrado en los beneficios para la comunidad. Las cinco etapas de transición del componente social hacia un sistema Social SCADA se describen a continuación:

1. Equipo del proyecto (promotores): creación de un equipo multidisciplinario que incluye ingenieros y técnicos de diferentes áreas (electricidad, mecánica, diseño, ambiente, industria, informática) y los especialistas en ciencias sociales (antropología, sociología, derecho, entre otros).
2. Diagnóstico preliminar: el desarrollo de un diagnóstico preliminar parte con la identificación de la estructura organizacional de la comunidad, su caracterización social, y la identificación de las partes interesadas. Esta etapa es fundamental para generar confianza entre los promotores del proyecto y la comunidad.
3. Evaluación de la viabilidad: esta etapa incluye un análisis del proyecto en las dimensiones social, técnica, ecológica y financiera. Cada una de estas dimensiones requiere de un análisis detallado, por ejemplo, la dimensión financiera requiere encontrar los incentivos adecuados para involucrar a los miembros de la comunidad en el mantenimiento y otras tareas que requiere el sistema, también el diseño del modelo financiero debe permitir la sostenibilidad del proyecto en el largo plazo. Algunos de los problemas que pueden surgir en esta etapa son:
 - a. Oposición de la comunidad, poca o nula apertura a negociaciones.
 - b. Interacción con áreas protegidas de gran valor ecológico y/o cultural.
 - c. Dificultades para evaluar el grado de diferencia de visiones y habilidades de comunicación entre las partes interesadas.
4. Estrategia a largo plazo: esta etapa tiene dos componentes, la primera es la capacitación adaptada a la comunidad que introduce los conceptos básicos (sobre temas como: energía renovable, el consumo de energía y la respuesta de la demanda) en reuniones locales, y tiene en cuenta a la propia comunidad en los mecanismos de decisión. Una vez que el contexto en el que se desarrollará el proyecto se entiende, como segunda etapa, es posible crear una estrategia a largo plazo teniendo en cuenta la interacción entre los componentes sociales, ecológicos, técnicos y financieros, los resultados servirán de guía para las actividades futuras.
5. Indicadores de desempeño: en esta etapa final se reconoce que el sistema inevitablemente tendrá un impacto técnico y social. Las reacciones a estos impactos sirven como indicadores y señales de alerta temprana para evaluar la creciente toma de conciencia de la comunidad sobre los aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales del proyecto. El principal impulsor de esta etapa es la relación entre el desarrollo de la comunidad y la sostenibilidad del proyecto.

Además de promover el empoderamiento del proyecto dentro de la comunidad, el componente social tiene como objetivo abordar adecuadamente todos los conflictos y reacciones inesperadas que puedan surgir en la relación entre la comunidad y su abastecimiento energético [2]. Lo anterior toma en cuenta que la comunidad sufrirá un proceso de transformación en el sistema energético, lo cual es complejo partiendo de las visiones y prácticas concebidas a lo largo del tiempo, desde el punto de vista tecnológico, y socio-cultural. Nuevamente se pone énfasis en cómo el proyecto energético contribuye con el aumento de la resiliencia en la comunidad, no sólo como resultado de una intervención tecnológica en el tema energético, sino también en el proceso de toma de decisiones, de evaluación e implementación con una amplia mirada.

El componente técnico

Un sistema SCADA es una aplicación que permite monitorear, operar, controlar y supervisar un sistema con componentes distribuidos, cuando la adquisición de datos y el control centralizado es importante. El sistema también incluye la capacidad de análisis requeridos en un motor de cálculo, y un conjunto de interfaces hechas a la medida para que los operadores interactúen con los equipos instalados en campo. Estas interfaces implementan varios enlaces en el sistema, incluyendo:

- La conexión de las RTU's (del inglés Remote Terminal Units) instaladas en el campo, para ejercer acciones de control, obtener datos y almacenarlos para su tratamiento.
- La conexión desde el centro de procesamiento a los HMI's para interactuar con los operadores.
- La conexión desde el centro de procesamiento al campo, transmitiendo todas las acciones de control emitidas por el centro de procesamiento (de forma automática) y por los operadores (manualmente).

A pesar de que la mayoría de los principales proveedores de sistemas SCADA han basado sus esquemas en sistemas propietarios, los clientes valoran cada vez más las arquitecturas de sistemas abiertos y el uso de protocolos de comunicación estándar sobre WAN (del inglés Wide Area Network), utilizando las conexiones Ethernet.

La particularidad de esta propuesta, a diferencia de otras, es desarrollar un sistema SCADA como parte de la solución energética, comprendiendo que la sustentabilidad en el largo plazo se basa en la apropiación que haga la comunidad del sistema, para que sea ésta quien lo maneje apropiadamente, tomando ventaja de las funciones del SCADA para proveer información en tiempo real acerca del estado de la microrred. Es por esto que el sistema incluye una pantalla táctil ubicada en el centro comunal, donde la comunidad puede interactuar con el sistema energético, mostrando información de forma clara y fácil de entender (Ver apéndice).

VI. ESTUDIO DE CASO: LA MICRORRED EN HUATACONDO.

Este trabajo presenta la microrred a escala completa desarrollada en la comunidad de Huatacondo, como caso de estudio para el Social SCADA. Huatacondo es un pequeño pueblo aislado, ubicado en el desierto de Atacama, al norte de Chile, compuesto por aproximadamente 30 familias. El sistema fue diseñado por el Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

La comunidad de Huatacondo tiene una red eléctrica propia, aislada de la red tradicional. Originalmente, el suministro de electricidad llegaba a 10 horas por día usando un generador diesel, esquema muy utilizado en comunidades remotas en Chile. El proyecto consistió en construir una microrred basada en los recursos renovables particulares de la zona, junto al

generador diesel existente, y ofrecer suministro eléctrico las 24 horas del día. Además, en vista de los problemas que tenían con el sistema de abastecimiento de agua, se incluyó un componente para administrar este recurso. Finalmente, con el fin de compensar las fluctuaciones de la generación, debido a la utilización de fuentes renovables, un componente de *Control de Demanda* (en inglés Demand Response) se incluye en el sistema, para direccionar el consumo de las personas. La Figura 3 resume los componentes involucrados, incluyendo los paneles fotovoltaicos, una turbina eólica, un generador diesel, un banco de baterías, un sistema de suministro de agua, y un mecanismo de gestión de la demanda colocado en cada casa.

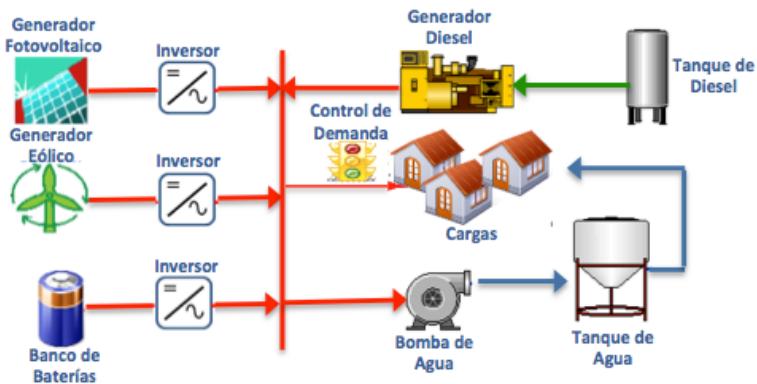


FIGURA3. Diagrama de la Microrred de Huatacondo

Desde la mirada social, las actividades económicas de la comunidad son en su mayoría de subsistencia, sin importantes diferencias socio-económicas entre los hogares. Las organizaciones sociales más relevantes que sustentan la vida en comunidad se identificaron y se muestran en la Figura 4.



FIGURA 4. Organización social en la comunidad de Huatacondo

En Huatacondo se realizó un trabajo para caracterizar la comunidad y definir el sistema de energía que requería. Además, este proceso seleccionó la información pertinente entregada por los habitantes. Esto busca promover la participación y aceptación del proyecto en la comunidad [3].

Seguidamente, se desarrolló una herramienta computacional para la supervisión del sistema, mantenimiento y supervisión de las unidades de generación, lo que permite a los habitantes tener en cuenta el estado actual del sistema energético, y proporcionar información útil para la toma de decisiones, ubicada en el centro comunal, visualizando variables por medio de una pantalla táctil. Las funcionalidades siguientes fueron identificadas como relevantes para la comunidad:

- Sistema de vigilancia para unidades de generación, incluyendo la energía suministrada por cada unidad.
- Indicadores de sustentabilidad.

- Gestión del mantenimiento.
- Consumo de energía por hogar.
- Respuesta de la demanda.
- Sistema de alarmas.

Los indicadores de sustentabilidad son un conjunto de parámetros que se han creado como una manera de monitorear el desarrollo de la comunidad en el tiempo, y proporcionar información útil, entre los cuales están: reducción de emisiones de gases contaminantes, ahorro de combustible, el ingreso promedio por familia, y el rendimiento escolar, entre otros [19] (Ver apéndice).

La Figura 5 presenta la arquitectura de comunicación desarrollada para Huatacondo, donde el servidor OPC (del inglés OLE forProcess Control) se encuentra en el PC-1 y maneja las comunicaciones entre los dispositivos de campo (controladores) y las aplicaciones. Los protocolos de comunicación de los dispositivos de campo son Modbus serial y Modbus Ethernet. La comunicación se llevó a cabo mediante un bus RS-485 serial para la red de campo. Además, el PC-1 contiene la base de datos con todas las variables requeridas y el optimizador. Por último, el PC-2 supervisa el sistema, y se comunica con el PC-1 a través de una red Ethernet (LAN del inglés Local Area Network).

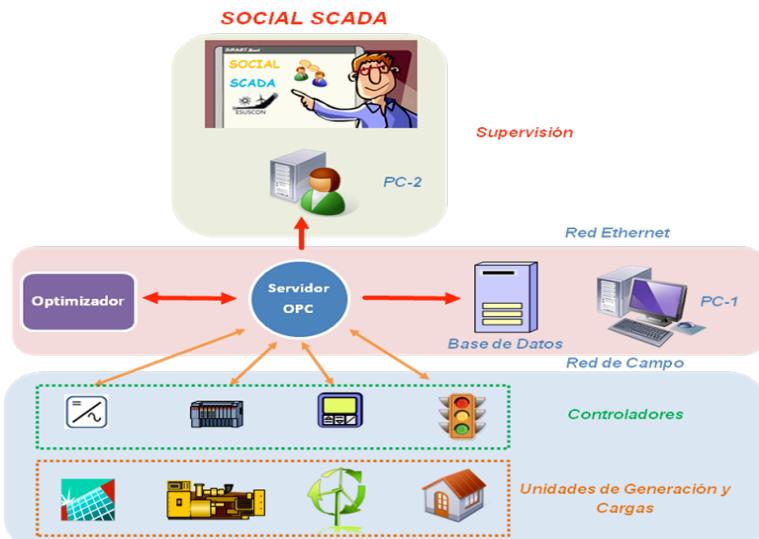


FIGURA 5. Arquitectura de la microrred de Huatacondo.

El concepto Social SCADA integra a la comunidad con el mundo de la energía, a partir de la identificación de sus necesidades energéticas, y reconoce que el sistema depende de ella para su mantenimiento y operación. Además, posee un conjunto de herramientas e interfaces que admiten la interacción con la comunidad en la gestión y operación de la microrred. El sistema incluye tres módulos que lo diferencian del SCADA tradicional en su interacción con la comunidad, estos son:

1. Módulo de supervisión: este controla y supervisa el desempeño de la microrred. Esta información es entonces compartida con la comunidad, lo que le permite participar en el funcionamiento del sistema, y también muestra información sobre el estado del mismo. Esta información incluye alarmas y alertas en caso de mantenimiento preventivo necesario, o cuando las unidades de generación requieren acciones correctivas.
2. Módulo de apoyo a las decisiones: este módulo proporciona apoyo a los habitantes con respecto al desarrollo y expansión del sistema.

3. Módulo de despacho óptimo: este módulo ajusta los puntos de operación de las unidades de generación mediante el despacho económico considerando la disponibilidad de recursos para generación y envía consignas a los controladores locales, con el objetivo de maximizar el aprovechamiento del uso de los recursos disponibles [4].

Arquitectura de comunicación.

La Figura 6 muestra la arquitectura de comunicación propuesta para la microrred como parte de un sistema local. Esto puede ampliarse a un sistema de energía eléctrica mayor o área SEP (Sistema Eléctrico de Potencia), por medio del Punto de Conexión Común PCC (del inglés Point Common Couple) el cual tiene un controlador que permite operar la conexión o desconexión del sistema local con el SEP. Esto significa que hay dos posibles modos de operación, estos son: interconectado o aislado. En el primer modo, la microrred está conectada al sistema de distribución, importando o exportando energía y servicios auxiliares, y opera en coordinación con la red. En el modo aislado, la microrred opera como una entidad independiente.

Además, se incluyen las unidades de generación distribuida (GD), donde cada una tiene su propio controlador local para manejar las variables eléctricas pertinentes. Cada control local recibe la consigna de operación cuando su unidad de generación está en marcha, y recibe las consignas necesarias para ponerse en marcha o apagarse, según corresponda. La Figura 6 también muestra la carga, que posee un control para garantizar una gestión eficiente de la energía, y el equipo de comunicaciones para enviar señales a los usuarios con el fin de promover el ahorro de energía y el uso eficiente de los recursos [20].

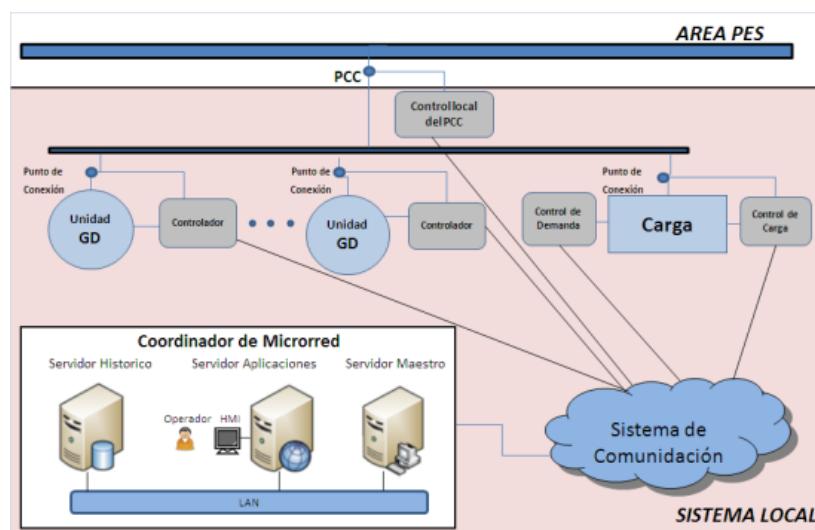


FIGURA 6. Arquitectura de comunicaciones de la Microrred

Por su parte, el sistema de comunicaciones conecta los controladores locales con el servidor. Este servidor se encarga de las comunicaciones entre todos los componentes de la microrred y monitorea las variables de control para cada controlador.

Con el fin de gestionar las conexiones de todos los dispositivos de campo, el sistema utiliza un servidor OPC, con una arquitectura abierta cliente-servidor.. El servidor OPC se ejecuta en el servidor principal y se comunica con los dispositivos de campo mediante un protocolo de comunicación estándar [18]. El sistema también tiene un servidor de historización, para almacenar datos como variables de control, alarmas y eventos.

El Sistema de Gestión de Energía o EMS está alojado en el servidor de aplicaciones y proporciona puntos de ajuste de las unidades de generación. El EMS tiene los siguientes objetivos:

- Reducir al mínimo el uso de combustible diesel.
- Cálculo de las consignas para la generación de potencia activa y reactiva en las fuentes de generación, incluyendo el banco de baterías.
- Determinación de la operación de la bomba para agua con el fin de mantener el depósito dentro de los límites predefinidos.
- Envío de señales a los consumidores que promueven cambios de comportamiento en el consumo (en inglés Demand Response) [4].
- El sistema tiene la capacidad de informar a los miembros de la comunidad a cargo del mantenimiento sobre las tareas pendientes por medio de mensajes de texto. La arquitectura de comunicación para el módulo de mantenimiento se muestra en la Figura 7.

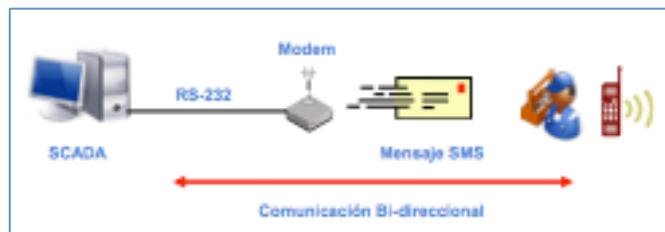


FIGURA 7. Arquitectura de comunicación para la gestión del mantenimiento de la Microrred.

El diseño final de la microrred en Huatacondo lo muestra la Figura 8, donde se evidencian los distintos recursos de generación, almacenamiento y consumos. En el caso de consumos residenciales, se ilustra un semáforo como medio para el control de demanda, el cual entrega señales que direccionan el consumo. Además, se incluye el sistema SCADA, para monitoreo y control de la microrred.

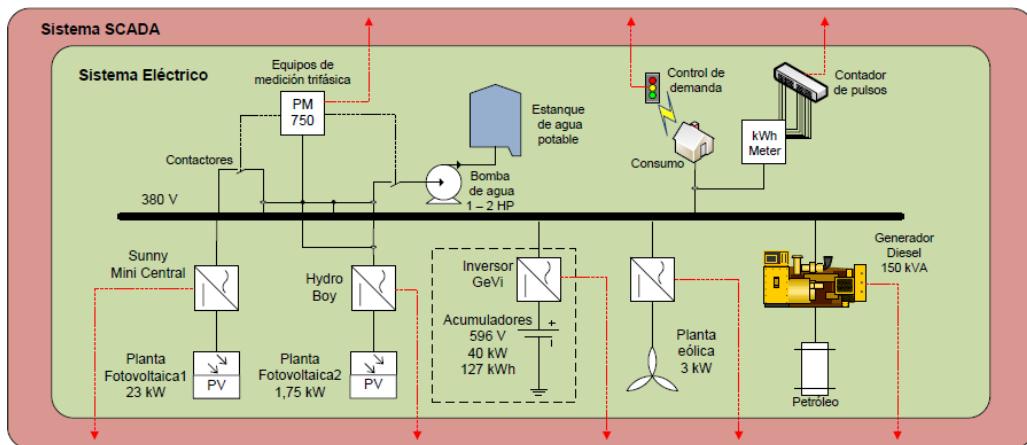


FIGURA 8. Arquitectura de la microrred de Huatacondo.

Aporte del social SCADA a la resiliencia de la microrred.

El proyecto del Social SCADA se enfoca en estudiar el impacto que tiene sobre la resiliencia de la microrred, entendida como la persistencia ante eventos perturbadores. Lo anterior es importante porque cuando se diseña y opera un sistema de distribución eléctrica, tradicionalmente se ha puesto especial atención en alcanzar estabilidad y predictibilidad de las funciones y

operaciones del mismo. Sin embargo, una microrred es un sistema complejo, compuesto de elementos de diversa naturaleza, lo que aumenta la incertidumbre provocada por elementos externos y perturbaciones, de ahí que el establecimiento del estado de equilibrio es menos importante que las consideraciones de persistencia y supervivencia. Con este argumento el concepto de resiliencia cobra mayor importancia para la microrred, ya que toma ventaja de propiedades fundamentales de éste, tales como: diversidad, eficiencia, adaptabilidad, y cohesión [16].

El término resiliencia fue estudiado en primera instancia en los campos de la ecología y la psicología. En ecología se hacía énfasis a la disyuntiva entre eficiencia por un lado y persistencia por otro, o entre constancia y cambio, entre predecir y no predecir. El concepto se ha extendido a sistemas de ingeniería, economía, negocios, seguridad, redes y otros. Es así como se están incorporando métodos prácticos y cuantitativos, no solo cualitativos, que incluyan la resiliencia en el diseño y operación de sistemas de ingeniería, como originalmente se aplicó en el contexto ecológico. La Figura 9 muestra las diferentes facetas de la resiliencia [16].



FIGURA9. Facetas de la Resiliencia

Se define resiliencia como la capacidad de recuperarse ante una perturbación, es así que incorporar este término al estudio de microrredes, en su diseño y análisis, es válido dada la capacidad multi facética que tiene, al incorporar diversos atributos del sistema, a saber: técnicos, ambientales, sociales, y económicos [6]. En este sentido, el Social SCADA contribuye al incremento de la resiliencia, como parte de un proyecto energético dentro de la comunidad, al mejorar su capacidad para soportar cambios y perturbaciones, ya que incorpora temas diversos como: procesos de evaluación, de toma de decisiones e implementación, y aspectos técnicos. Además, el Social SCADA se enfoca fuertemente en la sustentabilidad (ecológica, social, económica) por medio del monitoreo de indicadores, en comunicación permanente con la comunidad.

Percepción de la microrred por parte de la comunidad

Cuando el sistema tenía 1 año de operación, se realizó un estudio de percepción sobre su impacto a nivel de la comunidad, y se encuestó a un 95 % de los hogares. Los principales resultados indican, en general, que el sistema tiene gran aceptación dentro de la comunidad. A continuación se revisan los aspectos más relevantes:

1. Impactos sobre la comunidad:

73 % de la gente dice que el proyecto tiene un efecto positivo en su vida diaria, ya que pueden realizar más actividades recreativas y económicas que requieren electricidad; un 20 % considera que trae efectos neutros, esto es ni positivos ni negativos. Por último, el 7 % cree que el tener electricidad las 24 horas del día podría tener efectos negativos en la comunidad.

2. Impactos sobre el medio físico y el paisaje:

57,5 % de la población considera que la microrred no tiene ningún efecto sobre la fauna; mientras que el 42,5 % expresó su preocupación por las posibles colisiones de las aves, como los cóndores que vuelan regularmente en la zona y cerca al generador eólico.

3. Impactos en las actividades productivas:

La mayoría de la gente dice que ahora es posible llevar a cabo nuevas actividades económicas o mejorar las existentes. En concreto, el 27 % cree que el proyecto es beneficioso para el desarrollo del turismo y los servicios asociados; el 23 % dijo que va a beneficiar a la agricultura a través de la tecnología de riego; el 18 % sugirió que el proyecto beneficiaría a las actividades de construcción, ya que el período diario en el que se puede utilizar herramientas eléctricas se ha ampliado.

Durante el período de funcionamiento de la microrred con el sistema Social SCADA, la operación se ha caracterizado por:

- Baja tasa de fallas.
- Alto nivel de compromiso de la comunidad en las actividades de mantenimiento y programas de respuesta a la demanda.
- Alto interés de los responsables de actividades de operación y mantenimiento, demostrado por baja rotación en la composición del equipo de mantenimiento.
- No hay accidentes que involucran a personas o animales silvestres.

Finalmente, algunos resultados que ha conseguido la microrred, en comparación con el esquema anterior son los siguientes:

- El consumo de diesel ha disminuido, reduciéndolo en un 50 %.
- Los niveles de confiabilidad aumentaron.
- Los niveles de calidad de energía aumentaron.

VII. REFERENCIAS

- [1] Agrawal, M; Mittal, A., Micro Grid Technological Activities Across the Globe: A Review, *International Journal of Research & Reviews in Applied Sciences*, 2011, Vol. 7 Issue 2, pp. 147–152.
- [2] Alvial, C.; Garrido, N; Jiménez, G.; Reyes, L.; Palma, R., A methodology for community engagement in the introduction of renewable based smart microgrid, *Energy for Sustainable Development*, 2011, vol. 15, no. 3, pp. 314-323.
- [3] Asmus, P.; Lauderbaugh, A., Executive Summary : Microgrid Deployment Tracker 4Q12 and Community - Utility Microgrids : Project Tracking and Capacity Growth, 2012. Descargada: 20 Enero 2013. <http://www.navigantresearch.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/11/MGDT-4Q12-Executive-Summary.pdf>
- [4] Benavides, C., Aranda, E., Llanos, J., Sáez, D., Energy Management System for a Renewable based Microgrid with a Demand Side Management Mechanism, *Symposium on Computational Intelligence Applications In Smart Grid (CIASG) IEEE*, 2011, pp 1-3.
- [5] Etemadi, A.; Olivares, D.; Iravani, R; Kazerani, M; Hatziaargyriou, N; Palma, R., Trends in Microgrid Control, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, pp. 1-14.
- [6] Erol, O.; Henry, D.; Sauser, B.; Mansouri, M., Perspectives on measuring enterprise resilience, *4th Annual IEEE Systems Conference*, 2010 , pp. 587-592.
- [7] Fiskel, J., Designing resilient, sustainable systems, *Environmental Science and Technology*, 2003, vol. 37, no. 23, pp. 5330-5339.
- [8] Independent Evaluation Group World Bank - The Welfare Impact of Rural Electrification: A Reassessment of the Costs and Benefits, 2008, Washington D.C., EUA. Descargada: 10 noviembre 2012.
<http://lnweb90.worldbank.org/oed/oeddoclib.nsf/DocUNIDViewForJavaSearch/EDCCC33082FF8BE>

- [E852574EF006E5539/\\$file/rural_elec_full_eval.pdf](#)
- [9] IEEE Power Engineering Society, IEEE Standard for SCADA and Automation Systems, New York, EUA, 2008.
 - [10] Karady, G.; Zhang, X., Sustainability and resilience of electric supply in urban environment, *Power Systems Conference and Exposition (PSCE) IEEE/PES*, 2011, pp 1-3.
 - [11] Lasseter, R., MicroGrids, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting Conference Proceedings*, 2002, vol. 1, pp. 305–308.
 - [12] Lasseter, R., CERTS Microgrid, *International Conference on System of Systems Engineering 2007 SoSE IEEE*, 2007, pp 1-5.
 - [13] Marnay, C., Microgrids and Heterogeneous Power Quality and Reliability, *International Journal of Distributed Energy Resources*, 2008, Vol 1., pp. 13-19.
 - [14] Madni, A.; Jackson, S., Towards a conceptual framework for resilience engineering, *IEEE Systems Journal*, 2009, vol. 3, no. 2, pp. 181-191.
 - [15] Podmore, R; Larsen, R; Fellow, L; Louie, H., Affordable Energy Solutions for Developing Communities, *Power and Energy Society General Meeting IEEE*, 2011, pp. 1-8.
 - [16] Park, J.; Thompson, S.; Seager, T.; Zhao, F.; Beigzadeh, S.; Wu, R; Rao, P, Design for resilience in coupled industrial ecological systems: biofuels industry as a case study, *IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST)*, 2011.
 - [17] Raven, R.; Mourik, R.; Feenstra, C.; Heiskanen, E.; Modulating societal acceptance in new energy projects: Towards a toolkit methodology for project managers, *Energy*, 2009, vol. 34, no. 5, pp. 564-574.
 - [18] Suryanarayanan, S.; Rietz, S.; Mitra, J.; America, N., A Framework for Energy Management in Customer-Driven Microgrids, *Power and Energy Society General Meeting IEEE*, 2010, pp. 10–13.
 - [19] United Nations, Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies Indicators of Sustainable Development, 2007, New York, EUA. Descargada: 20 Noviembre 2012. <http://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=400&nr=107&menu=35>
 - [20] Weber, P., Diseño e implementación de plataforma SCADA para sistema de electrificación sustentable en Huatacondo, *Tesis en Ingeniería Civil Eléctrica*, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2011.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo fue soportado en parte por la empresa Minera Doña Inés de Collahuasi, Chile.

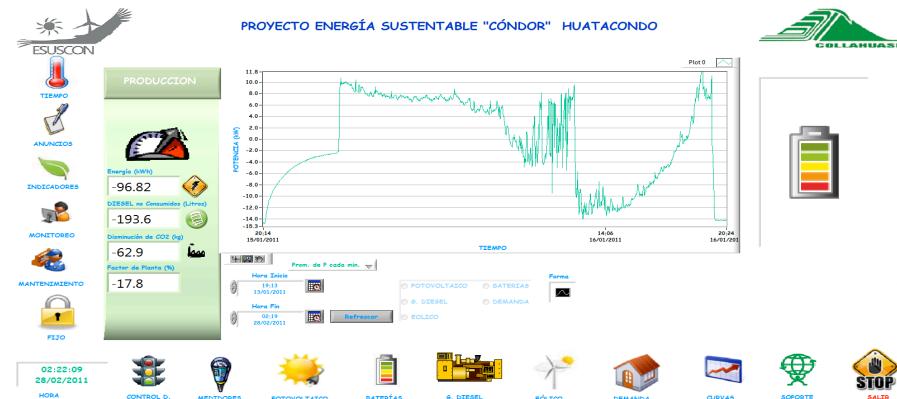
APÉNDICE



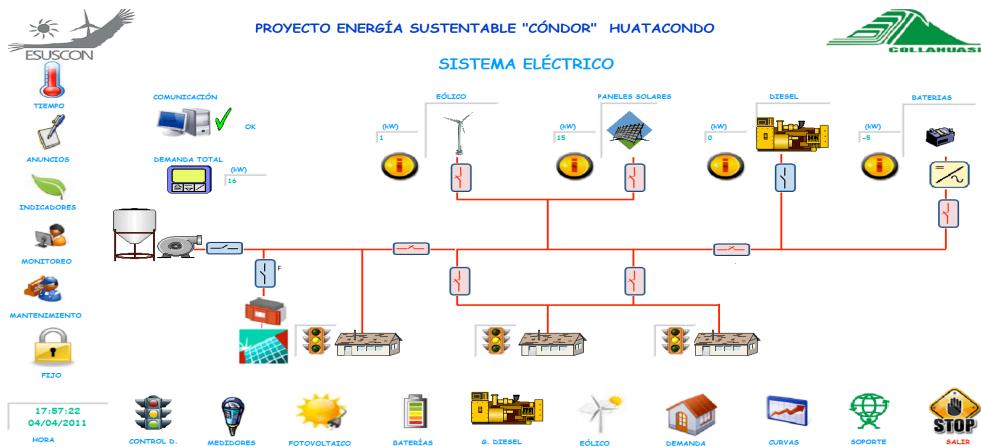
Pantalla mostrando pronóstico del tiempo del dia.



Pantalla mostrando indicadores sociales.



Pantalla mostrando la producción de unidad de generación.



Pantalla mostrando diagrama del sistema eléctrico.



Vista nocturna del pueblo de Huatacondo.



Vista del pueblo y la planta fotovoltaica.