

Diseño de una micro-red CC para el campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Designing a DC Microgrid for the campus of Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

PAULA XIMENA RÍOS REYES¹, DANIEL JOSÉ GONZÁLEZ TRISTANCHO¹, RICARDO MORENO CHUQUEN¹, JAVIER ANDRÉS RUIZ GARZÓN¹, KATLIN ANCINES PINEDA²

1. Profesores de planta del Programa de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería.
2. Ingeniera electricista de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

paula.rios@escuelaing.edu.co - daniel.gonzalez@escuelaing.edu.co - ricardo.moreno@escuelaing.edu.co - javier.ruiz@escuelaing.edu.co - katlin.pineda@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 07/04/2015 Aceptado: 15/09/2015

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

La creciente integración de recursos distribuidos de energía como generación descentralizada, sistemas de almacenamiento de energía y respuesta de la demanda, requiere una infraestructura para la administración eficiente de estos recursos y su integración en redes en baja y media tensión. La infraestructura que permite administrar y operar estos recursos es una micro-red. Una micro-red gestiona y opera cargas y generación local en una red, de baja o media tensión, que usualmente cuenta con sistemas de almacenaje de energía. Las micro-redes pueden operarse en dos modos: aislado de la red local o conectado a la red de distribución local. En este artículo se muestran los resultados del diseño de una micro-red en corriente continua (CC) para el campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería. La micro-red CC se ha diseñado para operar en el edificio F y suministrar energía para los servicios de iluminación. La fuente de energía no convencional gestionada por la micro-red es un sistema de paneles fotovoltaicos en una configuración apropiada.

Palabras claves: generación distribuida, micro-red, paneles fotovoltaicos.

Abstract

The increasing integration of distributed energy resources as distributed generation systems, energy storage, and demand response needs an infrastructure to manage these resources efficiently in low and medium voltage networks. The infrastructure that enables managing and operating these resources is a microgrid. A microgrid is defined as a network, at low or medium voltage, of loads and local generation, in addition to energy storage systems and other distributed energy resources. A microgrid can be operated in two modes: isolated from the local network or connected to the local network. In this paper, the results of designing a DC microgrid for the campus of Escuela Colombiana de Ingeniería are shown. The DC microgrid is designed to operate in the building F and supply power for lighting services. The source of unconventional energy that is managed by the microgrid is a system of photovoltaic panels in an appropriate setting.

Keywords: distributed generation, microgrid, photovoltaic panels.

INTRODUCCIÓN

La integración de recursos de energía distribuidos crea retos en la operación y administración de redes de energía eléctrica de baja y media tensión. El término de recursos de energía distribuidos caracteriza tres nociones, principalmente: generación distribuida, almacenamiento de energía y respuesta de la demanda. Las micro-redes eléctricas representan una solución para la administración de recursos de energía en soluciones locales para la gestión eficiente de la energía, utilizando fuentes de energía no convencionales.

En primer lugar, ¿cómo se define una micro-red? Según el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE, por su sigla en inglés), “una micro-red es un grupo de cargas interconectadas y de recursos de energía con límites eléctricos claramente definidos; la micro-red actúa como una entidad controlable respecto a la red. Una micro-red puede conectarse o desconectarse de la red para operar en modo conectado a la red o en modo aislado de la red” (DOE, 2012). Otra definición formal de micro-red es la que da la Cigre (International Council of Large Electric Systems), que es conceptualmente similar a la del DOE; la definición clama que “las micro-redes son sistemas de distribución de electricidad que contienen cargas y recursos de energía distribuidos (generadores distribuidos, sistemas de almacenaje y cargas controlables); las micro-redes pueden operar en forma controlada y coordinada mientras está conectada

la red local principal u operar de forma aislada de la red” (Cigre, 2012).

Las micro-redes de energía eléctrica operan en corriente directa (CC) o en corriente alterna (CA). La topología de conexión de una micro-red CC cuenta con un bus CC (barraje CC) (figura 1), y los recursos distribuidos se conectan al bus CC a través de inversores CA/CC que controlan el nivel de tensión del bus CC. Según el nivel de tensión del bus CC, pueden requerirse convertidores CC/CC para paneles fotovoltaicos y celdas de combustible. La topología de conexión de una micro-red CA cuenta con un bus CA (figura 2), al igual que con la micro-red CC; la micro-red tiene inversores CC/CA, y convertidores CA/CA para ajustar el nivel de tensión de operación del bus.

MICRO-RED CC PARA LA ESCUELA

Considerando la infraestructura de la Escuela Colombiana de Ingeniería, la ubicación ideal de la micro-red sería en el edificio Ignacio Umaña de Brigard, edificio F, puesto que además de ser una de las edificaciones más representativas de la institución, es de las más recientes y caracteriza la carga típica de un edificio de aulas de clase. Adicionalmente, el edificio F presenta unas características estructurales y funcionales que facilitan la ubicación de una micro-red, entre las que se destacan:

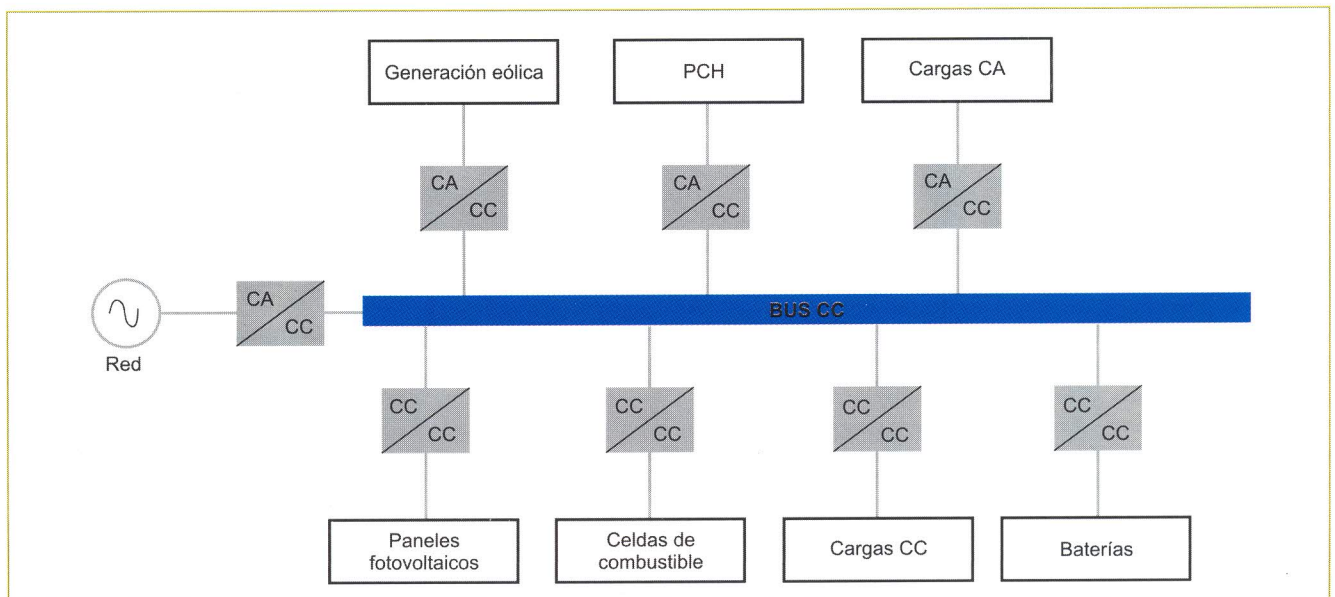


Figura 1. Topología de conexión de una micro-red CC.

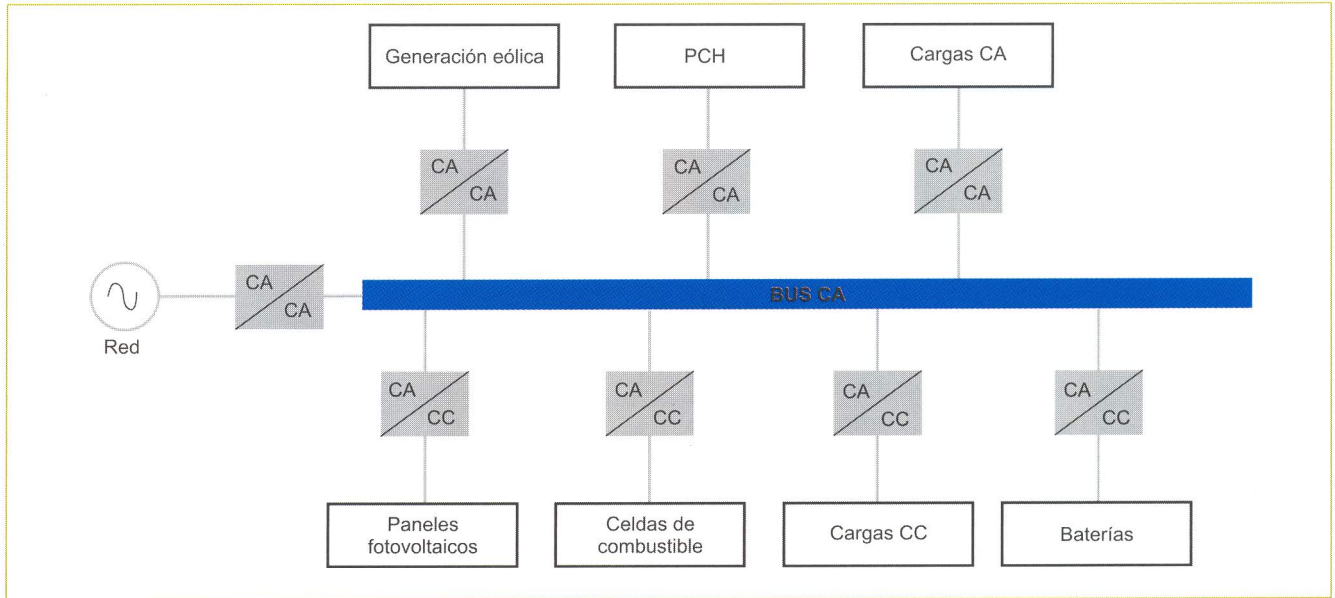


Figura 2. Topología de conexión de una micro-red CA.

- Techo plano.
- Área amplia en el techo, ideal para ubicación de paneles solares.
- Fácil acceso al techo para realizar obras de instalación y mantenimiento.
- Espacio disponible para la instalación de equipos electrónicos destinados al control de la micro-red.

- Carga representativa de la Escuela que está siempre en uso, la cual, si es alimentada con algún tipo de energía renovable, representaría significativos beneficios económicos para ésta.

La alimentación del bloque F deriva de una tercera subestación que se encuentra en el bloque D, de acuerdo con el diagrama unifilar que se muestra a continuación (figura 3).

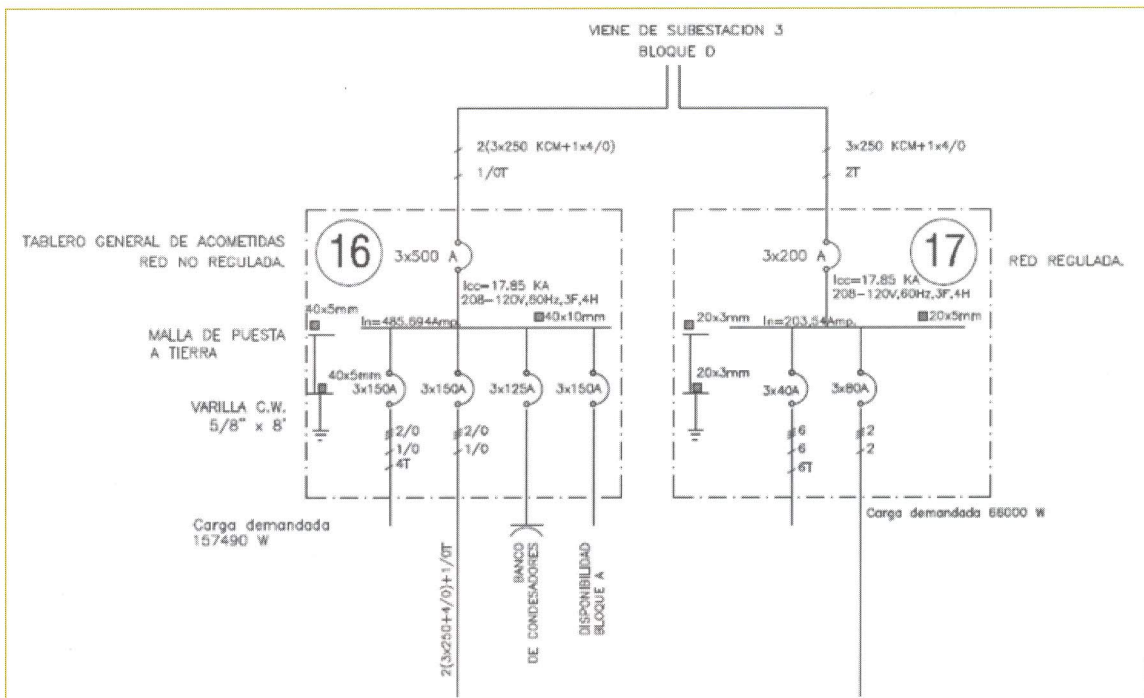


Figura 3. Diagrama unifilar de alimentación del edificio F en la Escuela Colombiana de Ingeniería.

Para caracterizar la demanda de energía eléctrica del edificio F se llevaron a cabo mediciones en el totalizador del edificio durante una semana típica. Se obtuvo que la corriente máxima es cercana a 160 A y la potencia demandada es igual a 57 kW.

La micro-red CC del edificio F tendría una instalación de paneles solares, un banco de baterías, inversores, reguladores de tensión y transformadores de aislamiento, acorde con la topología de conexión ya mostrada (figura 1). Esta micro-red funcionaría en dos modos: aislado de la red eléctrica y conectada a la red eléctrica. Además, cuenta con paneles solares como única fuente no convencional de energía. Esta sección contiene las consideraciones de diseño de la micro-red CC.

DETERMINACIÓN DE DEMANDA TOTAL DE ENERGÍA DIARIA QUE DEBE CUBRIRSE CON LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

Energía para suplir la micro-red CC con banco de baterías:

$$E_{\text{banco de baterías}} = 9 \text{ kWh} \cdot (4) = 36 \text{ kWh} \quad [1]$$

Energía para suplir la micro-red CC sin baterías:

$$E_{\text{micro-red CC sin baterías}} = 115,2 \text{ kWh} \cdot (5) = 576 \text{ kWh} \quad [2]$$

Energía total

$$E_T = 9 \text{ kWh} (4) + 115,2 \text{ kWh} (5) = 612 \text{ kWh} \quad [3]$$

CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO DE RADIACIÓN SOLAR EN ESCUELA

La micro-red contaría con un sistema de paneles solares como fuente no convencional de energía. Para determinar la capacidad y el número de paneles se determinó previamente la radiación solar en el campus de la Escuela, para lo cual se llevó a cabo una revisión de las mediciones que se han realizado en Bogotá, en particular, las mediciones hechas por el Ideam (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia) y la Secretaría Distrital de Ambiente. El Ideam tiene cuatro estaciones, ubicadas en Tibaitatá, Ciudad Bolívar, en el campus principal de la Universidad Nacional de Colombia y en Villa Teresa; mientras que la Secretaría Distrital de Ambiente cuenta con estaciones en Guaymaral, Usme, Vitelma, Tunal, PSB y Kennedy.

El Ideam presentó una nueva herramienta interactiva que organiza la información sobre la precipitación de lluvias, la dirección del viento y la radiación solar, entre muchas otras, por ciclos mensuales y a escala regional en Colombia. El aplicativo cuenta con 78 mapas sobre la radiación solar (Ideam, 2015). Con base en el *Atlas de radiación solar de Colombia*, creado con la colaboración de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), se determinaron la irradiación solar incidente y las horas de brillo solar (HBS) por mes en la zona de la instalación.

A partir de estos mapas se obtuvo el promedio acumulado de radiación solar anual en la Escuela (tabla 2).

Tabla 1
Descripción de las necesidades en corriente alterna (CA)

Carga que hay que suplir	Potencia (kW)	Horas de funcionamiento al día (h/día)	Total de energía necesaria (kWh)	Total de energía necesaria x margen seguridad (20 %) (kWh)	Número de veces repetido
Luminarias	0,62	12	7,5	9	4
Luminarias +tomas +bombas	8	12	96	115,2	5

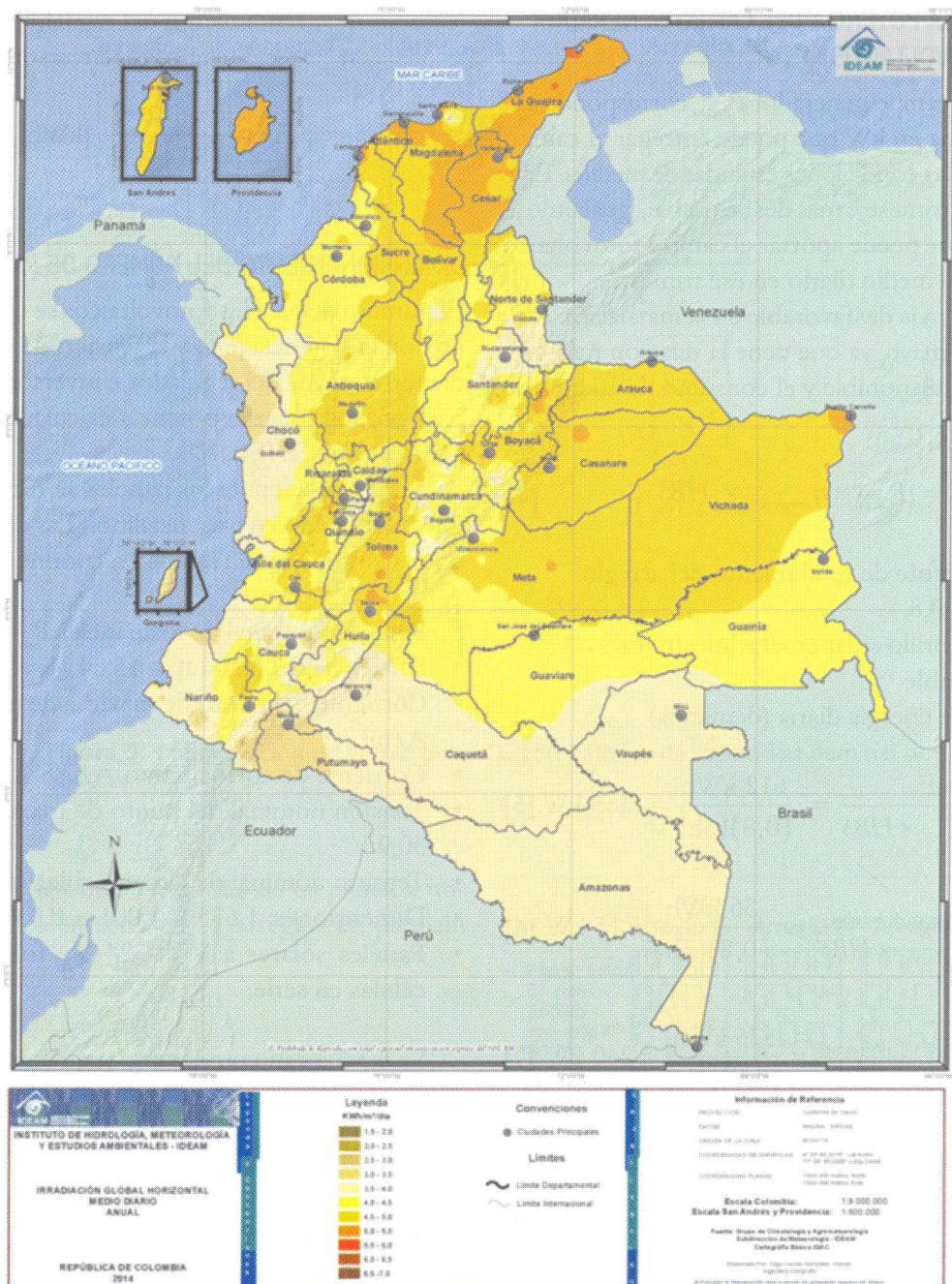


Figura 4. Mapa de irradiación global horizontal, medio diario, anual (Ideam, 2015).

Tabla 2
Promedio de radiación solar en la Escuela

Promedio acumulado trimestral de radiación solar global en la Escuela	Irradiación Ro (kWh/m ²)	Horas de brillo solar HBS (h)
Diciembre-enero-febrero	4,80	5-6
Marzo-abril-mayo	4,10	3-4
Junio-julio-agosto	4,30	4-5
Septiembre-octubre-noviembre	4,20	3-4
Acumulado promedio de irradiación solar global al año	4,35	

DEFINICIÓN DE LA POTENCIA DEL CAMPO GENERADOR (PANELES FOTOVOLTAICOS)

La potencia del campo generador P_{GEN} corresponde a la potencia máxima en kW que puede entregar el campo fotovoltaico en las condiciones estándar de medida. Ésta se obtiene en el trimestre más desfavorable, igualando la energía diaria que puede aportar el campo fotovoltaico con el consumo medio diario en ese trimestre.

El trimestre más desfavorable en la instalación es el de marzo-abril-mayo, ya que tiene la relación más baja entre la energía disponible y el consumo de energía de todo el año.

$$E_T = P_{GEN} \times \eta_{arreglo\ PV} \times HBS \quad [4]$$

$\eta_{arreglo\ PV}$: coeficiente de rendimiento del arreglo PV = 0,8.

HBS: horas de brillo solar en el trimestre más desfavorable

E_T : consumo de energía diaria (demanda).

$$P_{GEN} = \frac{E_T}{\eta_{arreglo\ PV} \times HBS} = \frac{612\text{ kWh}}{(0,8)(3h)} = 255\text{ kW} \quad [5]$$

$$P_{GEN_1} = \frac{E_{banco\ de\ baterías}}{\eta_{arreglo\ PV} \times HBS} = \frac{36\text{ kWh}}{(0,8)(3h)} = 15\text{ kW} \quad [6]$$

$$P_{GEN_2} = \frac{E_{micro-red\ CC\ sin\ baterías}}{\eta_{arreglo\ PV} \times HBS} = \frac{576\text{ kWh}}{(0,8)(3h)} = 240\text{ kW} \quad [7]$$

DIMENSIONAMIENTO

El consumo diario total E_T está dado por la ecuación [8], teniendo en cuenta los rendimientos del inversor y del regulador. El inversor convierte la corriente continua generada por los paneles solares en corriente alterna de 208 voltios AC.

$$E_T = \left(\frac{\sum E_{iCC}}{\eta_{reg}} + \frac{\sum E_{iAC}}{\eta_{reg} + \eta_{inv}} \right) [\text{kWh}] \quad [8]$$

En el diseño se utilizó un regulador Atersa MPPT 80 C y un inversor (Sun Fields Europe, 2011) con los siguientes parámetros nominales:

η_{reg} : rendimiento del regulador de 0,98.
 η_{inv} : rendimiento del inversor de 0,95.

$$E_T = \frac{612}{0,98 + 0,95} [\text{kWh}] \quad [9]$$

DIMENSIONAMIENTO DEL NÚMERO DE PANELES

El número de paneles fotovoltaicos se calcula de acuerdo con la potencia pico y la tensión de trabajo, dependiendo a su vez del regulador e inversor seleccionados para proporcionar la potencia calculada del campo de paneles (Ruiz, 2014).

En la selección de los paneles se recomiendan módulos fotovoltaicos policristalinos. Las características de operación típicas se resumen a continuación:

- Potencia nominal de los paneles $P_m = 255\text{ W}$
- Eficiencia del panel $\eta = 15,54\%$.
- Corriente del punto de máxima de potencia = 8,32 A/m².
- Corriente de cortocircuito = 8,88 A.
- Tensión nominal del punto de máxima potencia = 30,9 V.
- Tensión nominal de circuito abierto = 38 V
- Dimensiones: 1,675 × 1,001 × 0,031 m
- Paneles solares a $V_m = 24\text{ V}_{cc}$ formados por 72 células en serie.

Se llevó a cabo un dimensionamiento para suplir la micro-red CC con banco de baterías y otro dimensionamiento para suplir la micro-red CC sin baterías.

DIMENSIONAMIENTO DEL NÚMERO DE PANELES – MICRO-RED CC CON BANCO DE BATERÍAS

- Tensión nominal de la instalación $V_n = 48\text{ V}_{cc}$

Número de paneles en serie

$$N_s = \frac{V_n}{V_m} = \frac{48\text{ V}_{cc}}{24\text{ V}_{cc}} = 2 \quad [10]$$

Número de paneles en paralelo

$$N_p = \frac{P_{GEN_1}}{P_m \times N_s} = \frac{15.000\text{ W}}{(255\text{ W})(2)} \approx 30 \quad [11]$$

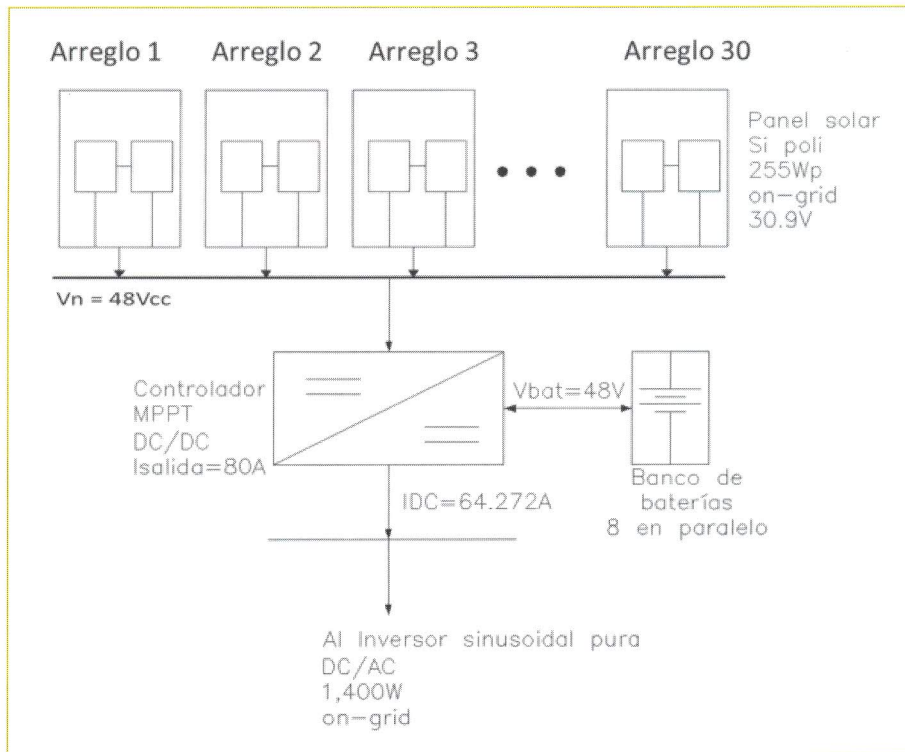


Figura 5. Configuración de la micro-red CC con baterías de capacidad nominal de 2500 W.

Por lo tanto, se obtiene un total de 60 paneles, utilizando 2 paneles en serie en 30 arreglos en paralelo (figura 5).

DIMENSIONAMIENTO DEL NÚMERO DE PANELES – MICRO-RED CC SIN BATERÍAS

- Tensión nominal de la instalación $V_n = 240 V_{cc}$

Número de paneles en serie

$$N_s = \frac{V_n}{V_m} = \frac{240 V_{CC}}{24 V_{CC}} = 10 \quad [12]$$

Número de paneles en paralelo

$$N_p = \frac{P_{GEN_2}}{P_m \times N_s} = \frac{240.000 W}{(255 W)(10)} \approx 95 \quad [13]$$

A renglón seguido se muestra la configuración de esta micro-red CC sin almacenamiento en baterías, conectada a la red de corriente alterna a través del inversor.

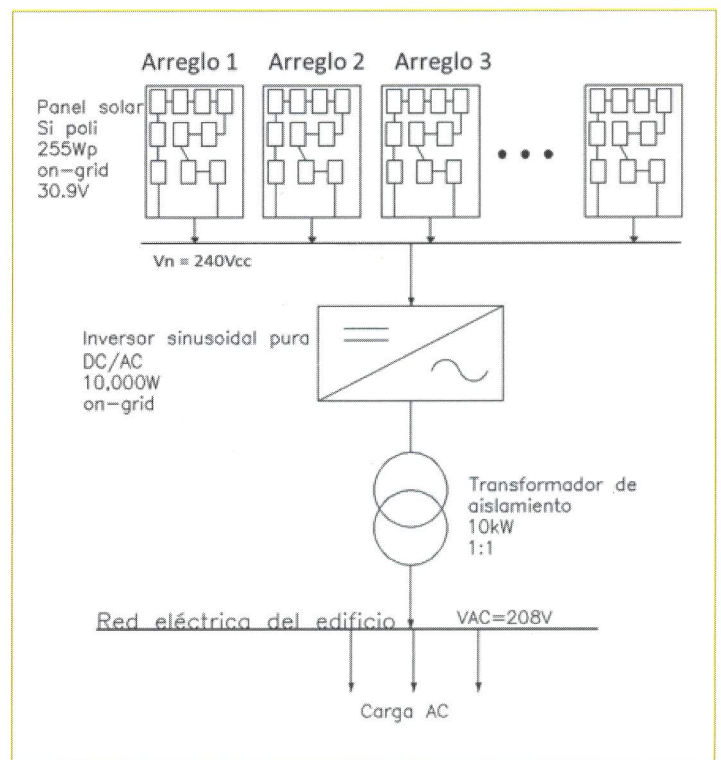


Figura 6. Configuración de la sección de la micro-red CC sin baterías.

Los componentes de la micro-red CC están resumidos en la tabla siguiente (tabla 3).

Tabla 3
Elementos de la micro-red CC

Arreglo total				
Elementos	Tipo	Capacidad	Unidad	Cantidad
Paneles solares	Si Poli	255	W	1010
Sección sin baterías				
Inversor	Sinusoidal pura	10.000	W	5
Sección con baterías				
Inversor	Sinusoidal pura	1400	W	4
Regulador de batería	MPPT	80	A	4
Batería	AGM	205	Ah	32

Los costos en pesos colombianos asociados a la micro-red CC se resumen así (tabla 4).

Tabla 4
Elementos de la micro-red CC

Arreglo total			
Componente	Costo unitario	Unidades	Costo total
Paneles solares	\$4401/W	1010	\$1.134.000.000
Sección sin baterías			
Inversor	\$2972/W	5	\$148.600.00
Sección con baterías			
Inversor	\$2972 /W	4	\$16.643.200
Regulador	\$11.508/A	4	\$3.682.560
Batería	\$490/Ah	128	\$3.214.400
Total			\$1.306.000.000

Los datos de la curva característica de carga se muestran a continuación (tabla 5).

Tabla 5
Curva de carga tipificada del edificio F

Datos	Valor
Carga máxima - red aislada	51 kW
Carga mínima - red aislada	42,5 kW
Demanda de electricidad - año	372 MWh
Tarifa de electricidad - caso base	300 \$/kWh
Costo total de electricidad	\$74.460.000

Un análisis simple de flujo de caja (figura 7) con los parámetros mostrados en la tabla siguiente (tabla 6).

Tabla 6
Datos de evaluación financiera del proyecto

Datos	Unidad	Valor
Capacidad de generación eléctrica	kW	55,60
Costos iniciales incrementales	\$	\$1.306.000.000
Tasa de inflación	%	3,65
Tiempo de vida del proyecto	año	20
TIR antes de impuestos activos	%	4,9

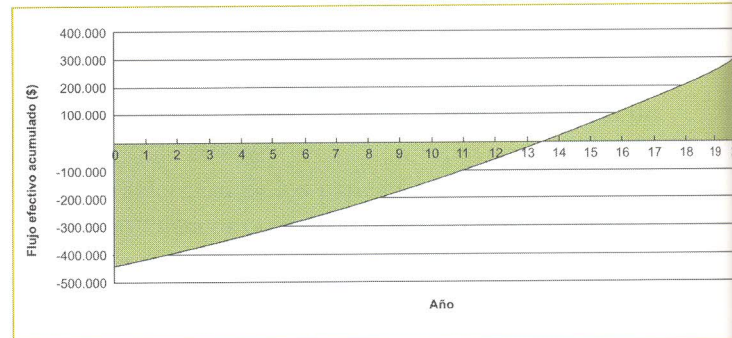


Figura 7. Flujo de caja acumulado del proyecto micro-red CC a un plazo de 20 años.

CONCLUSIONES

En este artículo se propone la instalación de una micro-red CC para el campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Dado que esta micro-red está embebida en un lugar que cuenta con distribución local de energía, entonces podría operar de modo aislado o conectado a la red local. Este tipo de micro-redes CC, embebidas en lugares con acceso a electricidad son claves en el desarrollo de las redes de energía eléctrica inteligentes debido a que esta clase de infraestructuras eléctricas permitiría el uso de fuentes de energía no convencionales de manera distribuida. Así mismo, la gestión de la infraestructura de micro-red permitiría administrar en forma más eficiente las redes de baja tensión con la incorporación de estrategias de respuesta de la demanda.

La micro-red CC propuesta en este capítulo para la Escuela permitiría gestionar la energía que demanda el edificio F desde un sistema de paneles solares fotovoltaicos o desde la red de distribución local. La micro-red CC para el edificio F cuenta, además de las secciones de paneles, con un sistema de baterías y de inversores para ajustar los niveles de corriente y tensión. Se ha estimado que la carga de punta del edificio F es de 51 kW, para lo cual se ha propuesto una micro-red con un total de 1010 paneles solares, con dimensiones $1,675 \times$

1,001 × 0,031 m y una capacidad de 255 W por panel. El costo total del proyecto es igual a \$1.306.000.000 colombianos del año 2014.

La micro-red propuesta sería un proyecto ambicioso, dado que el diseño permitiría operar el edificio F en forma aislada de la red local de distribución. Sin embargo, la tasa de retorno de este proyecto de micro-red CC es igual a 4,9 % con 13,5 años de tiempo para la recuperación de la inversión en un tiempo de vida total de 20 años. En el contexto de recursos de energías distribuidos es viable diseñar e implementar una micro-red que permita administrar de manera eficiente estos recursos. En este artículo se mostró la metodología para diseñar una micro-red destinada al edificio F de la Escuela, la cual utiliza energía proveniente de un sistema de paneles fotovoltaicos. El diseño de la micro-red permite que opere aislada de la red local con autonomía de un día y eventualmente podría entregar energía a la red.

El campus de la Escuela podría contar con una micro-red CC en el edificio F, que permitiría utilizar energía proveniente de un sistema de paneles fotovoltaicos para el consumo interno del edificio F. La micro-red contaría con un banco de baterías para el almacenaje de energía que permitiría proporcionar respaldo en casos de no

suministro de energía. En total, se requerirían 1010 paneles solares con capacidad de 255 W, corriente del punto de máxima de potencia de 8,32 A/m², corriente de cortocircuito de 8,88 A, tensión nominal del punto de máxima potencia de 30,9 V y tensión nominal de circuito abierto = 38 V.

En este artículo se indica la metodología para el diseño de una micro-red CC, la cual puede aplicarse a otro edificio de la Escuela e incluso adaptarse a otro campus con la información apropiada.

REFERENCIAS

- Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia* (2015). Ideam (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales).
- Microgrid Exchange Group (MEG) (2011). *Microgrid Workshop* (reporte), U.S. Department of Energy (DOE).
- Microgrid Working Group (2012). *Microgrid Evolution Roadmap* (reporte). Cigre (International Council of Large Electric Systems).
- University of Dundee (2014). *Design and project feasibility analysis using RETScreen of PV systems in Colombia - a case study*. Tesis de maestría. Javier Andrés Ruiz Garzón, Dundee, UK.
- Ortega Rodríguez, M. (2001). *Energías renovables*. Madrid: Ediciones Paraninfo.
- Sun Fields Europe (2011). *Boletín Solar Fotovoltaica Autónoma* (reporte).