

Diseño de los Generadores de una Microrred Piloto con Usuarios Reales para la ESIME-Zacatenco

Andrea Justo Cabrera,

Tomás I. Asiaín Olivares,

Daniel Ruiz Vega, *Senior Member, IEEE*

Programas de Posgrado en Ingeniería Eléctrica, SEPI-ESIME-Zacatenco

Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México

e-mail: drv_liege@yahoo.com

Abstract—En este trabajo se describe el proceso de diseño del sistema de generación y almacenamiento de energía eléctrica para el desarrollo futuro de una microrred eléctrica en las instalaciones de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco (ESIME-Zacatenco). Es parte de una propuesta para establecer un Proyecto piloto de una microrred eléctrica con usuarios reales en las instalaciones de la ESIME-Zacatenco, con el objeto de tener un sistema de prueba para estudiar técnicas y desarrollar prototipos de monitoreo, control y operación económica de microrredes eléctricas. El proyecto tiene el incentivo adicional de que una parte importante de la demanda eléctrica de la escuela se alimentaría por medio de los generadores de la microrred y, además, en caso de apagones de la red eléctrica principal, la microrred podría alimentar las cargas más importantes, y operar aislada del sistema eléctrico de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Keywords—microrred, ESIME, Sistema fotovoltaico, inversor, baterías, microrred en un campus universitario.

I. INTRODUCCIÓN

Dentro de la teoría de las redes inteligentes, las microrredes son una manera atractiva de integrar la generación renovable a la red de distribución, debido a que pueden funcionar tanto de manera aislada, como de manera interconectada, y aprovechan recientes avances en muchas áreas de la ingeniería eléctrica [1].

Para desarrollar y probar diferentes técnicas de planeación y operación de las microrredes, se han desarrollado alrededor del mundo, dos tipos de proyectos piloto de microrredes:

- **Microrredes con usuarios reales.** En estos proyectos se utiliza una red de distribución real con usuarios, y se desarrollan técnicas para el monitoreo y la optimización económica de estos sistemas [2].
- **Microrredes de laboratorio.** En estos sistemas eléctricos de laboratorio se desarrollan y prueban técnicas de control y protección de las microrredes ante disturbios [3].

En particular, una opción muy atractiva para la implementación de proyectos piloto con usuarios reales es el desarrollo de microrredes en campus universitarios, como se ha realizado, por ejemplo, en la Universidad de Génova [4].

La implementación de un proyecto piloto de microrred en un campus universitario es muy atractiva, debido a que, al ser una institución de enseñanza e investigación, no es necesario que sea económicamente viable al 100%, debido a que, además de proveer una gran parte de la energía eléctrica necesaria para la operación de la universidad, se puede emplear como un laboratorio para estudiar el funcionamiento de los generadores renovables y los sistemas de almacenamiento de energía, así como un sistema de prueba para validar el desempeño de prototipos propios de sistemas de monitoreo, control y protección de las microrredes. También es un sistema que provee datos importantes para el desarrollo de programas de computadora adecuados para predecir la generación eléctrica de las fuentes renovables y que ayude en la operación económica y el despacho adecuado de las fuentes locales de generación [5].

En este trabajo se presenta el dimensionamiento de la generación renovable, la convencional y el sistema de almacenamiento para una microrred con usuarios reales en el sistema eléctrico de la ESIME-Zacatenco, propuestos en [5], además de un estudio económico del proyecto.

II. MICRORREDES

Aún no existe una definición oficial de las microrredes, debido a que es un tema novedoso a nivel mundial. Por lo que se enumeran algunas dependiendo del autor:

1. La palabra microrred fue definida por Lasseter en el 2002, y en el 2007 por Hatziargyriou, como una red de media o baja tensión compuesta por un grupo local de recursos de energía distribuida que se comportan, desde la perspectiva de la red, como un solo productor o carga tanto en el mercado eléctrico como en el energético [6].
2. Las microrredes se componen por redes eléctricas integradas formadas por sistemas de distribución en baja tensión (BT) junto con recursos de energía distribuida (RED), dispositivos de almacenamiento o almacenamiento de energía distribuida (AED) y cargas flexibles. Los RED usados en microrredes, están conjuntamente integrados para generar potencia a un voltaje de distribución [7].

A. Modos de operación

- Conectada a la red.
- Red aislada

Este trabajo fue desarrollado dentro de las actividades del proyecto SIP 20182073, financiado por el Instituto Politécnico Nacional.

Los autores agradecen al CONACyT por el apoyo económico otorgado al primer autor, por la beca para desarrollar sus estudios de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en la SEPI-ESIME-Zacatenco del IPN.

B. Arquitectura de una microrred

La configuración básica de una microrred se muestra en la Fig. 1; consiste en cargas eléctricas y micro fuentes conectadas a través de una red de distribución de baja tensión acoplada con la red principal mediante un punto de acoplamiento común.

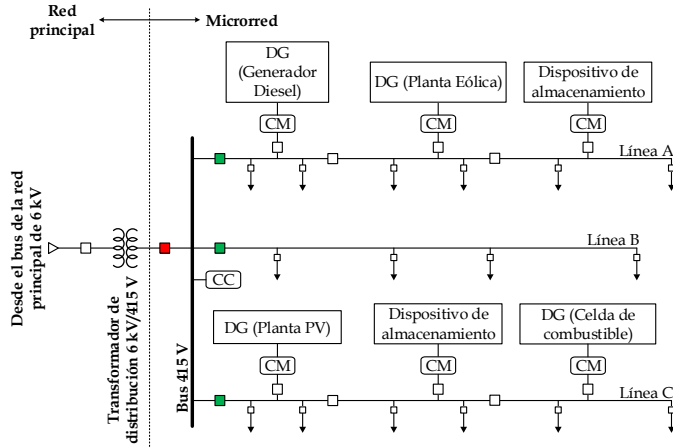


Fig. 1. Diagrama unifilar básico de una microrred (Adaptado de [8],[9]).

III. EL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”

El sistema eléctrico de la unidad profesional “Adolfo López Mateos”, la cual es conocida coloquialmente como la unidad Zacatenco del IPN, está alimentado mediante dos acometidas (una preferente y otra emergente) a un nivel de tensión de 23 kV (Fig. 2). Posteriormente, la acometida alimenta una subestación general, donde los 5 edificios que conforman la ESIME Zacatenco se encuentran dentro de un sistema subterráneo con configuración en anillo.

Finalmente, cada edificio cuenta con un transformador de 225 kVA con conexión delta-estrella, relación de transformación de 23 kV/ 220-127 V, que se conecta con los tableros de distribución de cada piso, ubicados en un cuarto a un costado de los sanitarios.

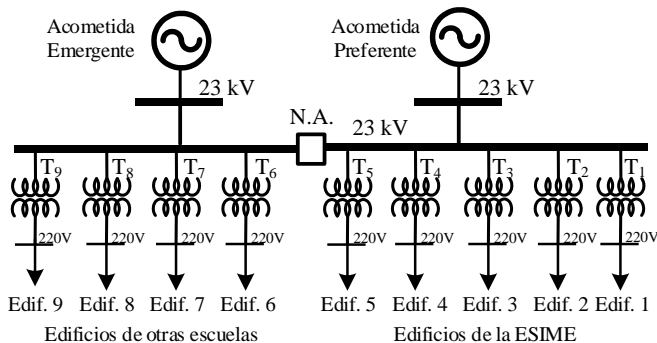


Fig. 2. Diagrama unifilar del sistema eléctrico de la unidad Zacatenco del IPN. Los transformadores T₁ a T₉ son de 225 kVA, con una r.t. de 23 kV/220-127 V. El interruptor de enlace está normalmente abierto.

Como se puede observar en la Fig. 2, se decidió proponer la implementación de la microrred incluyendo los 5 edificios de la ESIME-Zacatenco porque se encuentran conectados a la misma barra. Además, al ser una sola escuela, las decisiones administrativas y técnicas dependen de un solo cuerpo administrativo.

IV. ESTIMACIÓN DE LA CARGA DE LOS EDIFICIOS

La estimación de la carga es de vital importancia debido a que con base en ella se realiza el dimensionamiento de los componentes de la microrred. Se realizó el levantamiento eléctrico de la carga instalada del edificio 3 y se generalizó para los demás edificios de la ESIME Zacatenco. Mediante el levantamiento se realizaron los cuadros de carga para poder determinar la carga instalada del edificio, con el fin de dimensionar la instalación fotovoltaica. Las luminarias instaladas tienen las siguientes características: luminaria con 2 lámparas fluorescentes de 32 W, con balastro electrónico de 2 x 32 W con tensión de 120 V- 127 V, marca PHILLIPS. La lámpara instalada en los sanitarios es tipo Downlight de 32 W.

En la Tabla I se muestra el cuadro de cargas de la planta baja y se tomó en cuenta que el alumbrado general está operando continuamente durante 12 horas, el de la papelería de 8 horas y el de la biblioteca de 10 horas; para el caso de los contactos se consideró un tiempo máximo de 2 horas debido a que no es considerado como carga continua. De acuerdo a la Tabla 220-42 y 220-44 de la NOM-001-SEDE-2012 [10], el factor de demanda para alumbrado es del 100%, y a partir de 10 kVA se considera un factor de demanda del 50% para cargas de contacto. Se aplicó un factor de utilización y simultaneidad de 1 para alumbrado y contactos ocupados mientras que para los contactos libres un factor de 0.2.

TABLA I CARGA DE LA PLANTA BAJA DEL EDIFICIO 3 [5].

Sección	Tipo de cargas	kW demandados	kVA demandados	ku
Laboratorios, pasillos, escaleras, sanitarios y cub.	Alumbrado	10.816	12.017	1
Papelería		0.640	0.711	1
Biblioteca		7.488	8.32	1
Computadoras	Contactos	21.000	23.333	1
Proyector		0.448	0.497	1
Impresora		3.2	3.555	1
Libres		4.05	4.5	0.2
TOTAL		47.642	52.933	---
ks	kW demandados	kVA demandados	Tiempo de utilización	Energía kWh
1	10.816	12.017	12	129.792
1	0.640	0.711	8	5.12
1	7.488	8.32	10	74.88
0.2	4.2	4.666	2	8.4
0.2	0.089	0.098	2	0.178
0.2	0.64	0.711	2	1.28
0.2	0.162	0.18	2	0.36
-	24.0356	26.703	-----	220.01

En la Tabla II se muestra el cuadro de cargas del primer piso. Se tomó en cuenta que el alumbrado general es continuo durante 12 horas, el del cubículo de profesores funciona 6 horas y en la sala de profesores y cuarto de telecomunicaciones de 3 horas; para el caso de los contactos se consideró un tiempo máximo de 2 horas debido a que no es considerado como carga continua y se aplican los factores de corrección. Se generaliza esta carga para los 2 pisos superiores, debido a que tienen cargas similares.

TABLA II CARGAS DEL PRIMER PISO DEL EDIFICIO 3 (ADAPTADO DE [5]).

Sección	Tipo de cargas	kW demandados	kVA demandados	ku
Salones, pasillos, escaleras y sanitarios	Alumbrado	12.672	14.080	1
Cubículo		2.048	2.275	1
Sala de profesores		0.512	0.568	1
Cuarto de comunicaciones	Contactos	0.064	0.071	1
Computadoras		4.8	5.333	1
Todos los demás		10.449	11.610	0.2
TOTAL		30.545	33.937	---
ks	kW demandados	kVA demandados	Tiempo de utilización	Energía kWh
1	12.672	14.080	12	152.064
1	2.048	2.275	6	12.288
1	0.512	0.568	3	1.563
1	0.064	0.071	3	0.192
0.2	0.816	0.906	2	1.624
0.2	0.419	0.466	2	0.838
---	16.531	18.366	---	168.569

El consumo total del edificio, con los factores corrección sería:

- Planta baja: 220.010 kW/h
- 3 pisos superiores: $3 * 168.569 = 505.707$ kWh
- Resultando un consumo total de: **725.17 kWh**.

V. PLANTAS FOTOVOLTAICAS

Como la Ciudad de México presenta un nivel adecuado de irradiación solar, se eligió la generación fotovoltaica para la generación principal de la microrred. Cada edificio tendrá la capacidad de alimentar su propio consumo y también cuenta con el espacio suficiente para dicha instalación.

A. Disponibilidad de Recursos Renovables

Para realizar el dimensionamiento de la planta fotovoltaica es necesario conocer los datos geográficos del lugar como se muestra en la Tabla III del edificio 4 de la ESIME Zacatenco con el fin de conocer la latitud y longitud.

TABLA III DATOS GEOGRÁFICOS DE ESIME, ZACATENCO [5].

Datos geográficos del lugar			
Nombre	ESIME, unidad Zacatenco		
Estado	Ciudad de México		
Coordenadas	UTM	Decimal	Grados
Latitud	485953.09	19.49940654	19°29'57.86"N
Longitud	2156092.66	-99.1338668	99° 8 '1.92" W

Es necesario conocer la radiación solar debido a que con ella se calcula la hora solar pico. El dato tomado de la NASA fue del ángulo promedio anual cuyo valor fue de 5.95 [5].

B. Dimensionamiento del generador fotovoltaico

Se realizó el dimensionamiento para generar el 100% del consumo eléctrico en kWh, debido a que se cuenta con espacio disponible para generar esa energía fotovoltaica.

$$PFV = \frac{\text{Energía requerida diaria} + \text{pérdidas}}{HSP} \quad (1)$$

Donde:

Energía requerida = es el promedio al día en kWh.

Pérdidas = se consideran el 15% [12].

HSP = hora solar del lugar donde se realizará el proyecto.

Para obtener la hora solar pico es necesario tener el valor de la irradiación promedio del lugar que fue de 5.95 kWh/m² [5] y de la irradiancia estándar que es de 1.00 kW/m² [12], ya que es el cociente; dando un resultado de 5.95 kWh/m². Sustituyendo los valores numéricos, queda como:

$$PFV = \frac{725 \text{ kW} / h + 108.75}{5.95} = 140 \text{ kWp} \quad (2)$$

Se seleccionó el módulo fotovoltaico JA SOLAR descrito en la Tabla IV.

TABLA IV PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL MÓDULO [13].

Tipo	MARCA: JAP6-72-310/4BB
Potencia nominal máxima en condiciones de prueba estándar	310 W
Voltaje de circuito abierto (Voc)	45.66 V
Voltaje a potencia máxima (Vmp)	36.99 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	8.89 A
Corriente a potencia máxima (Imp)	8.38A
Coefficiente de temperatura de Isc	+0.058%/°C
Coefficiente de temperatura de Voc	-0.310%/°C
Coefficiente de temperatura de Pmax	-0.410%/°C
Condiciones de prueba estándar (STC)	Irradiancia 1000 W/m ² , temperatura de célula 25°C.

Se calcula el número de módulos que alimentará la instalación

$$\text{Módulos} = \frac{\text{Potencia fotovoltaica}}{\text{Potencia del módulo}} = \frac{140 \text{ kWp}}{0.310 \text{ kWp}} = 452 \quad (3)$$

Obteniendo 452 módulos.

De acuerdo a la Tabla 690-7 de [10], se realiza el cálculo de ajuste de la tensión por temperatura ($V_{O\text{Corregida}}$). Según [5], el mes de enero es donde se presenta la menor temperatura del año, la cual es de 6.41°, por lo que:

$$T_{\text{celda}} = T_{\text{amb}} - 4^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{celda}} = 6.41^{\circ}\text{C} - 4^{\circ}\text{C} = 2.41^{\circ}\text{C}$$

$$T = 25^{\circ}\text{C} - 2.41^{\circ}\text{C} = 22.59^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{temp.coef.}} (V_{oc})(T_{\text{Corregida}}) = -0.330\% / ^{\circ}\text{C}(22.59^{\circ}\text{C}) = 7.4547\%$$

$$V_{O\text{Corregida}} = 45.66\text{V} + 7.457\%$$

$$V_{O\text{Corregida}} = 45.66\text{V} + 3.4048\text{V} = 49.0648\text{V}$$

A partir de la tensión corregida a circuito abierto $V_{O\text{Corregida}}$ calculada previamente, se calcula el número de módulos que se pueden ocupar para el arreglo serie. El módulo cuenta con un nivel de aislamiento de 1,000 V:

$$M. \text{ serie} = \frac{\text{Nivel de aislamiento}}{\text{Nivel de tensión corregida}} = \frac{1000V}{49.0648V} = 20 \quad (4)$$

Obteniendo 20 módulos máximo en serie.

C. Dimensionamiento del inversor

Debido a que la instalación es trifásica, se elige una configuración de inversores en “string” (inversor monofásico para cada fase). Para seleccionar el inversor es necesario realizar el cálculo para determinar su potencia de entrada. Para la configuración en “string” se tiene lo siguiente:

$$P_{inv} = \frac{PFV}{3} = 46.66 \text{ kW} \quad (5)$$

Se eligió un inversor de 48 kW marca KACO. Sus parámetros son mostrados en la Tabla V.

TABLA V PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL INVERSOR [14].

Datos eléctricos	Modelo: KACO 48.0 TL3 Park
Máximo recomendado de PFV	48,000 W
Rango de voltaje MPPT	410 V-800 V
Rango de trabajo	200 V-950 V
Tensión CC mín./tensión inicial	220 V/250 V
Tensión en vacío	1000 V
Corriente máxima de entrada	102 A
Corriente máxima de cortocircuito	122.4 A

Para comprobar el número de módulos que se pueden conectar en serie o paralelo en el inversor se realiza lo siguiente:

$$\text{Paneles mín. serie} = \frac{\text{Voltaje mínimo MPPT}}{V_{mp \text{ del módulo}}} = \frac{410V}{36.99V} = 11.084 \quad (6)$$

Obteniendo 11 paneles mínimos en serie.

$$\text{Paneles max. serie} = \frac{\text{Voltaje máximo MPPT}}{V_{mp \text{ del módulo}}} = \frac{800V}{36.99V} = 21.6274 \quad (7)$$

Obteniendo 22 paneles máximos en serie.

$$\text{Paneles max paralelo} = \frac{\text{Corriente nominal}}{I_{mp \text{ del módulo}}} = \frac{102 A}{8.38 A} = 12.1718 \quad (8)$$

Obteniendo 12 paneles máximos en paralelo.

El arreglo se conforma de 10 strings en paralelo con 15 paneles en serie por inversor, resultando un total de 450 módulos de 310 W. Los voltajes de circuito abierto y potencia máxima son, respectivamente:

$$V_{oc} = 684.9 \text{ V y } V_{mp} = 554.85 \text{ V}$$

Debido a que cada módulo nos entrega un V_{oc} de 45.66V, y conectaremos 15 módulos de 310 Watts, se calcula la corrección de voltaje por temperatura de la siguiente forma:

$$V_{O\text{Corregida}.t.\text{min}} = V_{OC\text{módulo}} \left[100\% + (T_{\text{min lugar}} - 25^\circ C) C_{\text{coef. modulo}} \right] \quad (9)$$

$$V_{O\text{Corregida}.t.\text{min}} = 684.9V \left[100\% + (6.41 - 25)^\circ C (0.330)\% / ^\circ C \right]$$

$$V_{O\text{Corregida}.t.\text{min}} = 726.8843 \text{ V}$$

Este valor es adecuado porque es menor que el nivel de aislamiento de los componentes (1,000 V).

Debido a que cada módulo nos entrega una V_{mp} de 36.99 V y conectaremos 15 módulos de 310 watts, tenemos:

$$V_{mp\text{corregida}.t.\text{máx}} = V_{mp\text{módulo}} \left[100\% + (T_{\text{montaje}} + T_{\text{max}} - T_{\text{stc}}) C_{\text{coef. modulo}} \right] \quad (10)$$

$$V_{mp\text{corregida}.t.\text{máx}} = V_{mp\text{módulo}} \left[100\% + (30 + 39.8 - 25)^\circ C (0.330)\% / ^\circ C \right]$$

$$V_{mp\text{corregida}.t.\text{máx}} = 472.7876 \text{ V}$$

Con estos cálculos nos aseguramos de operar dentro de los rangos de voltaje donde el inversor trabaja en MPPT, optimizando al máximo la potencia de entrada del arreglo fotovoltaico y garantizando el funcionamiento del equipo en altas temperaturas ya que su valor mínimo es de 250 V.

D. Dimensionamiento del cableado por ampacidad

De acuerdo al artículo 690-8 de [10] se calcula la corriente máxima:

$$I_{\text{diseño}} = I_{sc} * \text{Número de ramas en paralelo} \quad (11)$$

$$I_{\text{diseño}} = 8.89 \text{ A}(2A) = 17.78 \text{ A}$$

$$I_{\text{máx}} = I_{\text{diseño}} (1.25)(1.25) \quad (12)$$

$$I_{\text{máx}} = 17.78A (1.56) = 27.73 \text{ A.}$$

Se selecciona un conductor de calibre 10 AWG, con capacidad de 40 A, de acuerdo a la Sección 110-14(c)(2); Tabla 310-15(b)(16) a 90° C de [10]. Posteriormente, se realiza el ajuste por temperatura de acuerdo a la Tabla 310-15(b)(3)(c) de la [6]. La temperatura media ambiente según [9] es de 31.39°C.

$$T = T_{\text{amb. media máx}} + 22^\circ C \quad (13)$$

Donde T es la temperatura que alcanzará el conductor.

$$T = 31.39^\circ C + 22^\circ C = 53.39^\circ C$$

De acuerdo a la Tabla 310-15(b)(16) de [10], se debe aplicar un factor de corrección por temperatura de acuerdo a la Tabla 310-15(b)(2)(a), el cual es 0.76

$$I_{\text{corregida}} = (0.76)(40) = 30.4 \text{ A.}$$

Debido a que 30.4 A > 27.7 A, el calibre seleccionado es adecuado para la instalación. Para el conductor puesta a tierra se selecciona un calibre 10 AWG de acuerdo a la Tabla 250-122 de [10].

E. Dimensionamiento de la canalización

De acuerdo a nuestro arreglo, cada tubería tendrá dos ramas con un conductor positivo, uno negativo y un conductor puesta a tierra, por lo que de acuerdo a la Tabla 1 del capítulo 10 de [10], el factor de relleno es del 40 %. De acuerdo a la Tabla 5, el calibre 10 AWG con el tipo de aislamiento THHW cuenta con un área de 55.68 mm², por lo que:

$$55.68 \times 3 = 167.04 \text{ mm}^2$$

VII. SISTEMA ELÉCTRICO FINAL

A. Datos de la propuesta

En la Tabla VI se presenta una lista de los componentes seleccionados para los 5 edificios de la microrred propuesta para la ESIME-Zacatenco.

TABLA VI EQUIPOS QUE COMPONEN A LA MICRORRED [5].

Sistema	Componente	Cantidad
Sistema Fotovoltaico	Panel solar marca JA SOLAR modelo JAP6-72-310/4BB	2,250
	Inversor marca KACO modelo 48.0 TL3 Park	15
	Controlador de carga marca Steca modelo Power Tarom 4110	15
	Batería marca ROLLS 48V 550 Ah modelo S550	60
Sistema Auxiliar	Microturbina de gas de 30 kW marca Capstone modelo C30	1

En la Fig. 3 se muestra el diagrama unifilar propuesto para cada edificio de la microrred de ESIME, mostrado en el diagrama unifilar general del a Fig. 2.

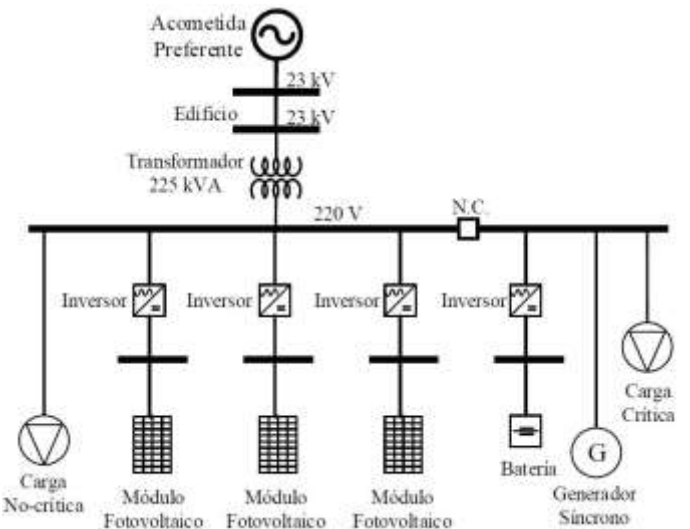


Fig. 3. Diagrama unifilar del sistema eléctrico de un edificio de la ESIME-Zacatenco del IPN (Adaptado de [5]).

En el diagrama unifilar de la Fig. 3, el interruptor de enlace que conecta las fuentes renovables y la carga no crítica con la sección de la barra que tiene la fuente convencional, la batería y la carga crítica, opera normalmente cerrado. En condiciones de falla se abre para que la carga crítica sea alimentada de manera independiente.

B. Evaluación económica del proyecto

En la Tabla VII se presenta un análisis económico detallado del proyecto de implementación de la red en los 5 edificios de la ESIME de la Fig. 2, considerando únicamente el costo de las fuentes de energía eléctrica y el sistema de almacenamiento de energía [5].

Se dimensiona el tubo Conduit metálico pesado (RMC) de acuerdo al artículo 344 de la tabla 4 de [10], y se utiliza la columna con el factor de relleno al 40%, debido a que tienen más de dos conductores, quedando el tubo de 27 mm o 1 pulgada.

F. Dimensionamiento de las protecciones

Las protecciones son útiles para evitar corrientes de retorno producidas por un desbalanceo o una sombra, retiro involuntario o descomposición de algún módulo que desbalancee el arreglo. Los valores de las corrientes de cortocircuito son:

$$I_{sc} = 8.89 A \times 1.25 = 11.1125 A$$

$$I_{sc} = 8.89 A \times 1.50 = 13.335 A$$

Por lo que se requiere un fusible de 500 V con capacidad de 12 a 13 A y un diodo de bloqueo de 13 A, debido a que se calcula al 150% de la corriente de cortocircuito I_{sc} .

VI. PLANTAS CONVENCIONALES Y BATERÍAS

A. Dimensionamiento del controlador

El controlador se selecciona tomando en cuenta la corriente a potencia máxima $I_{MP} = I_{MP} \times \text{número de ramas en paralelo}$. Se tiene que: $I_{MP} = 8.38 \times 10 = 83.8 A$.

Se seleccionó un controlador de carga *Steca Power Tarom 4110* con una tensión de entrada de 48 V, y una capacidad de corriente de hasta 100 A.

B. Dimensionamiento de las baterías

Es necesario determinar la cantidad de A/h de las baterías mediante la siguiente ecuación:

$$Ah = \frac{\text{Energía requerida} + \text{pérdidas}}{\text{Voltaje de la batería}} \quad (14)$$

$$Ah = \frac{24kW \cdot 10h + 1.3}{48 V} = 5027.0833Ah$$

La batería seleccionada fue la batería marca ROLL 48V, 550 Ah, S550. El dimensionamiento de la batería se hace para la planta baja, la cual es considerada como carga crítica, ya que es donde se encuentran las ventanillas, dirección, etc. Es necesario calcular el porcentaje de descarga de la batería:

$$\% \text{ descarga} = \frac{Ah \text{ requeridos}}{Ah \text{ batería}} + 100\% \quad (15)$$

$$\% \text{ descarga} = \frac{5027.0833}{550(12)} 100\% = 76.16\%$$

Teniendo un valor de 76.16 %. Es recomendable trabajar la batería hasta un 80% de su capacidad de descarga por lo que es correcto.

C. Sistema Auxiliar

Para seleccionar la microturbina de gas se consideró una parte de la carga como carga crítica y se seleccionó una microturbina de gas con potencia de 30 kW modelo C30 marca Capstone [15].

TABLA VII INVERSIÓN TOTAL DEL PROYECTO [5].

Concepto	Descripción	Precio	Precio Equivalente
Costo Directo	Costo total de materiales y equipo.	\$30,305,115.00	100%
	Misceláneo.	\$6,061,023.00	20% del costo total de materiales y equipo.
	Mano de obra directa	\$9,091,534.50	30% del costo total de materiales y equipo.
Costo Indirecto	Personal administrativo Prestaciones de ley (IMSS, AFORE, INFONAVIT). Impuestos. Rentas.	\$6,061,023.00	20% del costo total de materiales y equipo.
	Total Costo Directo + Costo Indirecto	\$51,518,695.50	
	Utilidades (15% de total Costo Directo + Costo Indirecto),	\$7,727,804.33	
	Costo Neto	\$59,246,499.83	

Se calcula la amortización para saber si es viable el proyecto económicamente, teniendo los siguientes datos [5]:

Costo total del sistema por edificio: \$ 11,690,272.446

Costo por consumo (ahorro mensual): \$33,221.98

$$\text{Amortización} = \frac{\text{Costo total del sistema}}{\text{Costo por consumo mensual}} \quad (16)$$

$$\text{Amortización} = \$11,690,272.446 / \$33,221.98 = 351.88 \text{ meses}$$

Se puede comprobar en este caso, que la utilización de energía fotovoltaica requiere un largo tiempo de amortización (aprox. 29 años), el cual excede el tiempo de vida útil de los componentes renovables. Sin embargo, la ventaja de desarrollar esto en un campus universitario es que, a diferencia de una instalación comercial o industrial, el beneficio de la instalación no consiste solamente en el ahorro de energía.

Al ser la ESIME, por ejemplo, una institución académica relacionada con el control, la electrónica, las comunicaciones y los sistemas eléctricos de potencia, el beneficio principal de una instalación de este tipo es que las disciplinas mencionadas anteriormente pueden emplear la microrred como un laboratorio para la docencia y la investigación de las técnicas de esas áreas que se aplican a las microrredes, dentro de la teoría de las redes inteligentes.

VIII. CONCLUSIONES

La propuesta desarrollada en este trabajo se encuentra dentro de las tendencias actuales de investigación a nivel mundial ya que es un tema que se ha desarrollado en distintas universidades debido a que es un tema incipiente.

Asimismo, es importante mencionar que es factible implementar la microrred debido a que no es una instalación

común, sino un laboratorio para la docencia, investigación, y desarrollo de las microrredes como una manera de integrar las energías renovables a los sistemas de distribución, que está dentro del plan de transición energética de la SENER.

Como se ha mencionado anteriormente, una microrred piloto con usuarios reales es muy útil para desarrollar sistemas de control y monitoreo de la microrred para mejorar la operación económica de las mismas, por medio de sistemas de predicción tanto de la demanda como de la producción de energía fotovoltaica. El costo de esta manera, se compensaría con el dinero que se ahorraría en la adquisición de sistemas de laboratorio para cada una de las disciplinas mencionadas.

El desarrollo final de la microrred requiere la implementación de sistemas de monitoreo y control de la energía en estado normal y ante contingencias. Se pueden adquirir equipos comerciales para realizar esta función, pero además se pueden desarrollar por los diferentes grupos de investigación de la ESIME-Zacatenco.

REFERENCIAS

- [1] T. F. Garrity. "Getting Smart". *IEEE Power and Energy Magazine*. Vol. 6, Issue 2, 2008.
- [2] N. D. Hatzigryriou, H. Asano, R. Iravani and C. Marnay. "Microgrids". *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 5, No. 4, July/August 2007.
- [3] B. Kroposki, R. H. Lasseter, T. Ise, S. Morozumi, S. A. Papathanassiou and N. D. Hatzigryriou. "A Look at Microgrid Technologies and Testing Projects from Around the World". *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 6, No. 3, May/June 2008.
- [4] A. Bonfiglio, L. Barillari, F. Delfino, F. Pampararo, R. Procopio, M. Rossi, M. Ivernizzi, G. B. Denegri, S. Bracco. "The Smart Microgrid Pilot Project of the University of Genoa". *AET Annual Conference*, 3-5 Oct. 2013, Mondello, Palermo, ITALY.
- [5] A. Justo Cabrera. *Propuesta de Implementación de una Microrred en el Sistema Eléctrico de la Unidad Profesional "Adolfo López Mateos"*. Tesis de Ingeniería Eléctrica. Junio de 2018, ESIME-Zacatenco, IPN.
- [6] Kumudhini Ravindra, Balaraman Kannan and Nagaraja Ramappa. "Microgrid A Value-Based Paradigm", *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 2, No. 1, March, 2014.
- [7] Solar Energy: Integration of Photovoltaic Systems in Microgrids, Edx, Disponible en línea en el portal: <https://www.edx.org/es/course/solar-energy-integration-photovoltaic-delftx-pv4x>
- [8] J. C. Sierra García. *Análisis Dinámico de una Microrred de Laboratorio*. Tesis de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica. 27 de abril de 2018, SEPI-ESIME-Zacatenco, IPN.
- [9] S. Chowdhury, S. P. Chowdhury and P. Crossley. *Microgrids and Active Distribution Networks*. IET, London, UK, 2009.
- [10] Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas (Utilización). Disponible en línea en: https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5280607
- [11] Solar App CCEEA. Disponible en línea en el portal: <https://ccea.mx/solar>
- [12] M. E. Alvarado, G. Cruz. *Manual de instalador fotovoltaico - Sistemas autónomos*. México, Alfaomega Grupo Editor, Primera edición, 2016.
- [13] Características principales del panel fotovoltaico. Disponible en http://calculationsolar.com/pdfs/Calculationsolar_module_SOLARTEC_S60PC230907.pdf
- [14] Características principales del inversor. Disponible en <https://pdf.archiexpo.es/pdf/kaco-new-energy/powador-480-tl3-park-720-tl3-park/70010-303087.html>
- [15] Características principales de la Turbina convencional. Disponible en <https://www.capstoneturbine.com/products/c30>