

## Diseño de programa computacional para el dimensionamiento de micro-redes

Design of a computer program for microgrids sizing.

Gloria Stephanie Cuevas Muñoz, Maximiliano Hedekel Zapata Ortega, Silvia Teresa Padilla Cendejas, Carlos Daniel García Robles, José Merced Lozano García y Alejandro Pizano Martínez

Departamento de Ingeniería Eléctrica, División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato  
[gs.cuevasmunoz, mh.zapataortega, st.padillacendejas, cd.garciarobles, jm.lozano, apizano] @ugto.mx

### Resumen

El presente trabajo se enfoca en el diseño de una herramienta computacional implementada en el programa Matlab® para el dimensionamiento de micro-redes basadas en paneles fotovoltaicos, la cual se propone como una solución que facilite el proceso de diseño y planificación de sistemas de generación de energía distribuida, permitiendo obtener resultados precisos y eficientes, con el objetivo de promover el uso de fuentes de energía renovable y mejorar la eficiencia energética. El programa tiene como objetivo determinar el ahorro económico que se tendría para la dimensión establecida de la micro-red, con respecto al pago por concepto de consumo de energía eléctrica. Asimismo, a diferencia de paquetes computacionales comerciales reconocidos en la industria, la herramienta desarrollada considera los costos asociados con las tarifas eléctricas manejadas por la Comisión Federal de Electricidad en México, lo que permite obtener resultados más precisos al diseñar micro-redes para el territorio nacional y efectuar el análisis económico de la micro-red desarrollada. Para validar la operación de la herramienta propuesta, se implementa un caso de estudio en donde se diseña una micro-red fotovoltaica para la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca y se determina el ahorro económico que se tendría para diferentes configuraciones.

**Palabras clave:** micro-redes, herramienta computacional, fuentes renovables, eficiencia energética.

### Introducción

La industria eléctrica se mantiene actualizada en avances tecnológicos que mejoran la forma de distribuir la energía en todas las regiones del mundo, que brindan un suministro de calidad, y que al mismo tiempo permiten reducir el costo de facturación para los usuarios. Las micro-redes han surgido como una solución innovadora en el campo de la distribución de energía eléctrica. Estas redes se componen de una combinación de fuentes de energía distribuida tales como paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas, generadores de biogás, además de sistemas de almacenamiento de energía. Asimismo, están diseñadas para operar de forma autónoma o conectadas a la red eléctrica convencional [1]. El objetivo principal de las micro-redes es proporcionar energía confiable, eficiente y sostenible a cargas locales que pueden ser comunidades, instalaciones industriales o áreas geográficas específicas [2]. A diferencia de los sistemas de distribución de energía tradicionales, las micro-redes pueden operar de manera independiente en caso de interrupciones en la red principal, lo que las convierte en una solución valiosa para mejorar la resiliencia energética [3].

Algunas de las ventajas clave de las micro-redes incluyen la reducción de pérdidas de energía durante la transmisión y distribución, la integración de fuentes de energía renovable y la posibilidad de implementar estrategias de gestión energética más eficientes. Estas redes también pueden contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la creación de sistemas energéticos más sostenibles [4] [5].

El dimensionamiento óptimo de las micro-redes es un aspecto crítico para garantizar su funcionamiento eficiente y rentable. El proceso de dimensionamiento implica determinar el tamaño óptimo de los componentes de la micro-red, como los generadores renovables y las unidades de almacenamiento de energía, de manera que se satisfagan los requisitos de energía de la comunidad o instalación a la cual se está suministrando energía. Cuando se considera el problema de dimensionamiento óptimo se deben considerar variables como la demanda de energía, la variabilidad de las fuentes renovables, los costos de inversión y operación, y los criterios de confiabilidad y seguridad, etc. [6]. En la literatura se han propuesto herramientas computacionales para realizar el dimensionamiento óptimo de micro-redes, como la presentada en [7]. En este trabajo, la propuesta determina el tamaño óptimo de los componentes de la micro-red, de tal

manera que se minimiza el costo de los componentes durante la vida útil mientras se asegura una baja probabilidad de pérdida de energía. Por otro lado, también existen herramientas comerciales de gran reconocimiento a nivel internacional como el software HOMER Pro, de UL Solutions, que permite el diseño óptimo de micro-redes tanto aisladas como conectadas a la red [8]. Aun cuando este tipo de herramientas permite ajustar una gran cantidad de parámetros para especificar de manera precisa la operación y constitución de la micro-red, no es posible considerar de manera precisa las condiciones de cobro impuestas por proveedores particulares de energía eléctrica. Por ejemplo, en este programa no es posible incluir todos los conceptos que conforman las tarifas utilizadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de México, por lo que los resultados obtenidos por esta herramienta difieren de los que se tienen en la realidad y este aspecto podría disminuir la precisión del dimensionamiento.

Por esta razón, en este trabajo se propone el diseñar e implementar un programa computacional basado en Matlab® que permita realizar el dimensionamiento de una micro-red, con el objetivo de obtener el ahorro económico que se tendría en el pago por concepto de consumo de energía eléctrica, y que además incorpore de manera precisa todos los conceptos considerados en las tarifas utilizadas por la CFE.

## Desarrollo

La herramienta computacional propuesta debe ser capaz de modelar y simular el comportamiento de la micro-red, en términos de generación y consumo de energía, teniendo en cuenta las diferentes variables y restricciones asociadas con estos procesos. Además, debe incluir un algoritmo de optimización que permita determinar la configuración óptima de los componentes de la micro-red, maximizando la eficiencia energética y minimizando los costos en la energía. Las etapas consideradas para el desarrollo del programa propuesto son, el análisis tarifario de la instalación eléctrica para el cual se va a diseñar la micro-red, el análisis del recurso solar del lugar donde se instalará la micro-red, la selección del panel fotovoltaico para el caso de estudio, análisis del consumo energético de la instalación eléctrica y análisis económico. Cada una de estas etapas se describirán a continuación.

### A. Análisis Tarifario

Como caso de estudio se considera la instalación eléctrica de la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca (DICIS), por lo que en esta etapa se realizó el análisis tarifario correspondiente a esta instalación. Para este análisis se utilizó el recibo de CFE, Figura 1, que corresponde al periodo del mes de febrero de 2023. En este documento se pueden observar una serie de datos relevantes correspondientes al consumo de energía eléctrica de la instalación, y a la tarifa *gran demanda media tensión horaria* (GDMTH) contratada por la DICIS. La tarifa GDMTH se aplica a los servicios que destinan energía a cualquier uso, suministrados en media tensión con una demanda igual o mayor a 100 kW, y la demanda contratada de la DICIS ES DE 645 kW. Para esta tarifa la CFE divide el año en dos periodos, en donde los costos y el rango de horarios varían dependiendo del periodo, Figura 2. En esta figura se observa que la tarifa GDMTH cuenta con tres costos de energía variable, tarifas base, intermedia y punta, Figura 2. La tarifa punta es la más costosa debido a que corresponde con el horario de mayor consumo.

Para este análisis se toman en cuenta los días de la semana y los días festivos dentro del mes de febrero de 2023, ya que es el que se va a tomar como ejemplo, y estos datos influyen en la clasificación de los precios de las tarifas base, intermedia y punta, que dependen de la hora del día [9]. Los cargos asociados con la tarifa GDMTH son por concepto de suministro básico de energía eléctrica, y que corresponden a la integración de los cargos por Transmisión, Distribución, Operación del CENACE, Operación del Suministrador Básico, Servicios Conexos No MEM (Mercado Eléctrico Mayorista), Energía y Capacidad.

Algunos de los conceptos considerados al momento de hacer el análisis de consumo dentro de la tarifa GDMTH [9], y que son utilizados para calcular los costos de cada concepto mostrado en el recibo de la Figura 1, son los siguientes:

- Mínimo mensual: El importe que resulta de aplicar el cargo por la operación del suministrador de servicios básicos correspondiente a esta categoría tarifaria.

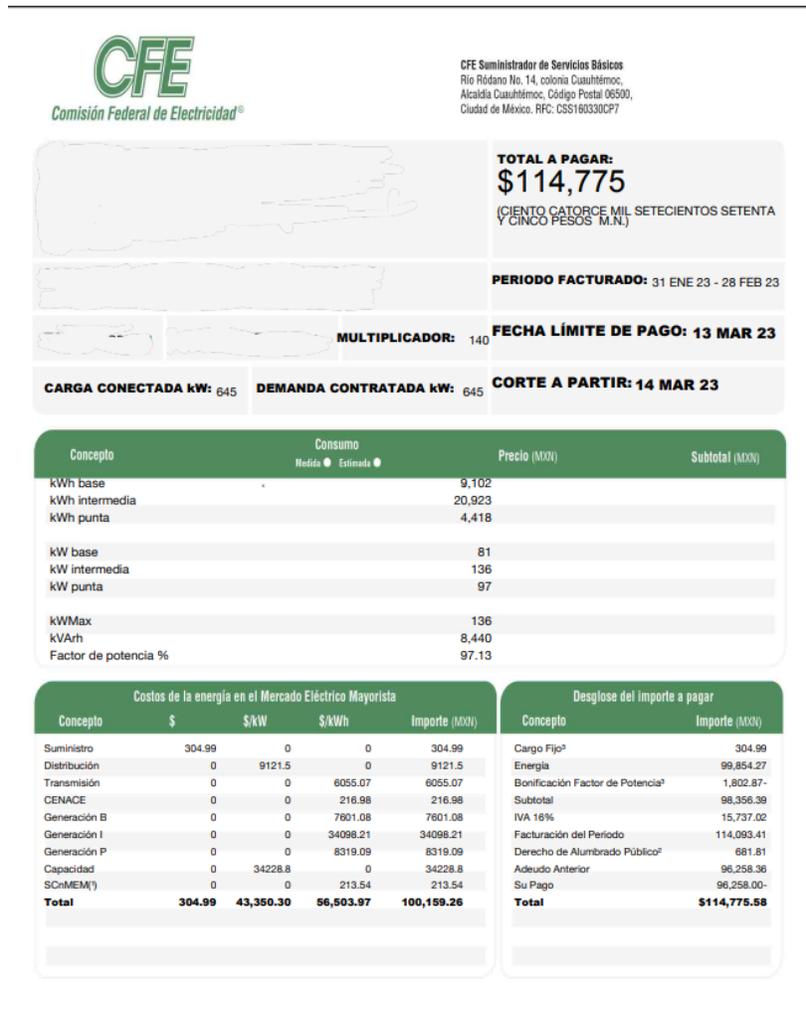


Figura 1. Recibo de CFE de la DICIS correspondiente al mes de Febrero de 2023.

Del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 20:00 22:00 - 24:00	20:00 - 22:00
sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 24:00	
domingo y festivo	0:00 - 19:00	19:00 - 24:00	

Del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 18:00 22:00 - 24:00	18:00 - 22:00
sábado	0:00 - 8:00	8:00 - 19:00 21:00 - 24:00	19:00 - 21:00
domingo y festivo	0:00 - 18:00	18:00 - 24:00	

Figura 2. Horarios y tipos de costos correspondientes a la tarifa GDMTH.

- Demanda contratada: La demanda contratada la fijará inicialmente el usuario; su valor no será menor del 60% de la carga total conectada, ni menor de 100 kW o la capacidad del mayor motor o aparato instalado. En el caso de que el 60% de la carga total conectada exceda la capacidad de la subestación del usuario, sólo se tomará como demanda contratada la capacidad de dicha subestación a un factor de 90%.
- Periodos de punta, intermedio y base: estos periodos se definen en cada una de las regiones tarifarias para distintas temporadas del año.
- El consumo en kW que se tenga medido y registrado en la lectura del horario punta es el consumo que será considerado para calcular el cobro de la demanda que se tenga para el mes facturado.
- Cargo por capacidad: la demanda máxima a la que se deberá aplicar los cargos por capacidad expresados en \$/kW-mes, será la mínima entre los valores que se definen a continuación,

$$\min \left\{ D_{max,punta} \left[ \frac{Q_{mensual}}{24*d*F.C.} \right] \right\} \quad (1)$$

donde  $D_{max,punta}$  es la demanda máxima coincidente con el periodo horario de punta medida en kW,  $Q_{mensual}$  es el consumo mensual registrado en el mes de facturación en kWh,  $d$  el número de días del periodo de facturación, y  $F.C.$  es el factor de carga correspondiente. El factor de carga es la relación entre la demanda promedio de un grupo, y la demanda máxima del mismo. Para la tarifa GDMTH,  $F.C.$  es igual a 0.57.

- Cargo por distribución: la demanda máxima a la que se deberá aplicar los cargos de distribución expresados en \$/kW-mes, será la máxima entre los valores que se definen en la siguiente relación,

$$\min \left\{ D_{max,mensual} \left[ \frac{Q_{mensual}}{24*d*F.C.} \right] \right\} \quad (2)$$

donde  $D_{max,mensual}$  es la demanda máxima registrada en el mes al que corresponde la facturación.

- Demanda máxima medida: Las demandas máximas medidas en los distintos periodos se determinarán mensualmente por medio de instrumentos de medición que indican la demanda media en kW durante cualquier intervalo de 15 minutos del periodo en el cual el consumo de energía eléctrica sea mayor que cualquier otro intervalo de 15 minutos en el periodo correspondiente, cualquier fracción de kW de demanda medida se tomará como kW completo. Cuando el usuario mantenga durante 12 meses consecutivos valores de demanda inferiores a 100 kW, podrá solicitar al suministrador su incorporación a la tarifa gran demanda media tensión ordinaria (GDMTO).
- Energía de punta, intermedia y de base: es la energía consumida durante cada uno de los tres periodos (punta, intermedio y base).

## B. Análisis del recurso solar

Se tomaron como base mediciones de irradiancia solar realizadas durante 10 años en la DICIS. El medidor que se utilizó para el registro de datos fue un Fluke FLK-IRR1-SOL, durante las 24 horas que estuvo funcionando solo logró captar valores de irradiancia desde las 6 horas a las 21 horas, esto debido a que en el lugar seleccionado para el análisis a las 6 horas sale el sol y a las 20 horas comienza a ocultarse y como consecuencia disminuyen los valores de irradiancia. Las gráficas de la Figura 3 muestran los promedios de irradiancia por día del mes de febrero.

## C. Selección del Panel fotovoltaico

Para realizar la simulación de la micro-red en términos de generación de energía se considera el uso de paneles fotovoltaicos. Para el caso de estudio se utiliza un panel con capacidad de 450w, cuyos datos de placa se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Datos de panel.

Panel	Marca	Tipo	Capacidad	Area (m <sup>2</sup> )	Eficiencia %
EGEGE450	Panel Solar	Monocristali	450 W	2.186	20.6

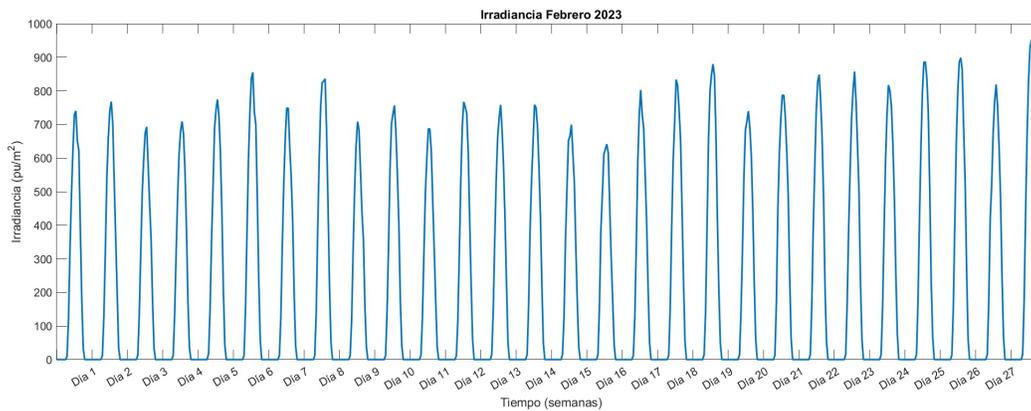


Figura 3. Promedio de irradiancia por día del mes de febrero.

#### D. Análisis de Consumo Energético

Los datos que se requieren para observar el alcance de la micro-red son los de consumo y el costo total que conlleva el uso de la energía suministrada por CFE. Lo anterior es para hacer una comparación con la energía que pudiera generar la micro-red y el ahorro que este aportaría al usuario. Se tiene el ejemplo de un recibo facturado en el periodo de enero a febrero 2023, el cual también nos muestra un historial de la energía consumida en meses anteriores. La Figura 4. muestra una lista de un año de consumo, donde se refleja la cantidad de potencia y energía consumida por mes, así como el factor de potencia.

Periodo	Demanda kW	Consumo total kWh	Factor potencia %	Factor carga %	Precio medio (MXN)
FEB 22	110	24,855	95.39	34	2.6658
MAR 22	147	34,513	97.33	32	2.5714
ABR 22	163	2,640	96.88	34	2.5412
ABR 22	156	29,637	95.56	28	2.4582
MAY 22	289	54,115	96.28	25	2.3434
JUN 22	232	43,738	95.28	26	2.3061
JUL 22	147	29,121	96.61	27	2.4153
AGO 22	165	37,524	92.92	31	2.3639
SEP 22	176	41,230	91.97	33	2.5469
OCT 22	186	37,064	93.73	29	2.5312
OCT 22	133	2,538	92.77	39	2.6977
NOV 22	135	37,438	93.28	39	2.8015
DIC 22	133	29,059	94.57	29	2.7077
ENE 23	127	30,494	94.66	32	2.7020
FEB 23	136	34,443	97.13	38	2.8556

Figura 4. Historial de consumo en la DICIS.

Con los datos que se muestran en el recibo, se realiza un simulador de la tarifa GDMTH en el programa Matlab®, a fin de determinar cada uno de los conceptos que conforman el costo total tarifario. Los resultados del simulador se muestran en las Figuras 5 y 6. La Figura 5 presenta un resumen de los datos de consumo que se agregan al simulador, en este caso, se ingresaron los correspondientes al recibo mostrado en la Figura 1. Al incorporar los conceptos y fórmulas descritos en la sección anterior del análisis tarifario, así información del precio del mercado de distribución, transmisión, energía, y los cargos establecidos por el CENACE y el MEM, en el simulador de la tarifa, se calculan los costos por los conceptos de cargo fijo, energía, bonificación F.P., facturación del periodo y cobro total. Como se aprecia en la Figura 6, las cantidades arrojadas por el simulador corresponden con las mostradas en el recibo, lo que demuestra la efectividad del simulador de la tarifa.

Concepto	Consumo
kWh base	9101.98
kWh Intermedia	20923
kWh Punta	4417.97
kW base	80.9998
kW Intermedia	136
kW Punta	96.9999
kWMax	136
kVArh	8440
Factor de potencia %	97

Figura 5. Resultados arrojados por el simulador tarifario correspondientes al consumo energético.

Desglose Del Importe A Pagar	
Concepto	Importe
Cargo Fijo	\$304.99
Energía	\$99854.19
Bonificación F.P.	\$-1806.996
Subtotal	\$98352.18
IVA	\$15736.350
Facturación del Periodo	\$114088.53
DAP	\$688.47
Su pago	\$114777.00
-----TOTAL-----	\$114777.00

Figura 6. Resultados arrojados por el simulador tarifario correspondientes a los costos de la tarifa GDMTH.

Al conocer la cantidad de energía que se puede generar con la red fotovoltaica conformada por los paneles fotovoltaicos seleccionados, y al aplicar el recurso solar durante cada hora el mes de febrero 2023, es posible determinar el ahorro que se tendría al instalar la red fotovoltaica. Cada kWh generado por la micro-red fotovoltaica es un kWh que la instalación eléctrica de la DICIS no consumiría de CFE, y por lo tanto, no se vería reflejado en el recibo, lo que haría que disminuyera el cobro total. Este es principio de operación que se seguirá para establecer la lógica del algoritmo que seguirá el programa computacional a desarrollar. La cantidad de energía consumida durante el mes de febrero se observa en la Figura 7, mientras que en la Figura 8, se presenta el patrón de consumo de potencia en la DICIS.

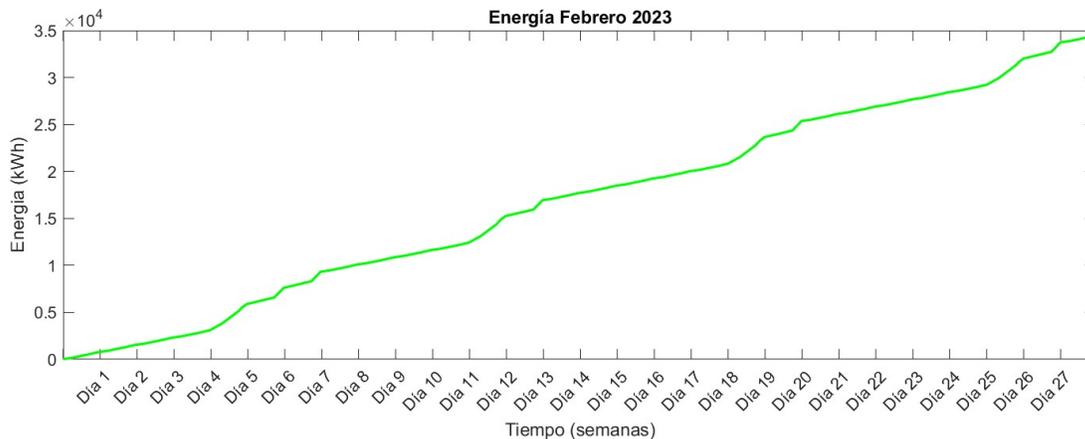


Figura 7. Energía consumida acumulada durante el mes de febrero de 2023 en la DICIS.

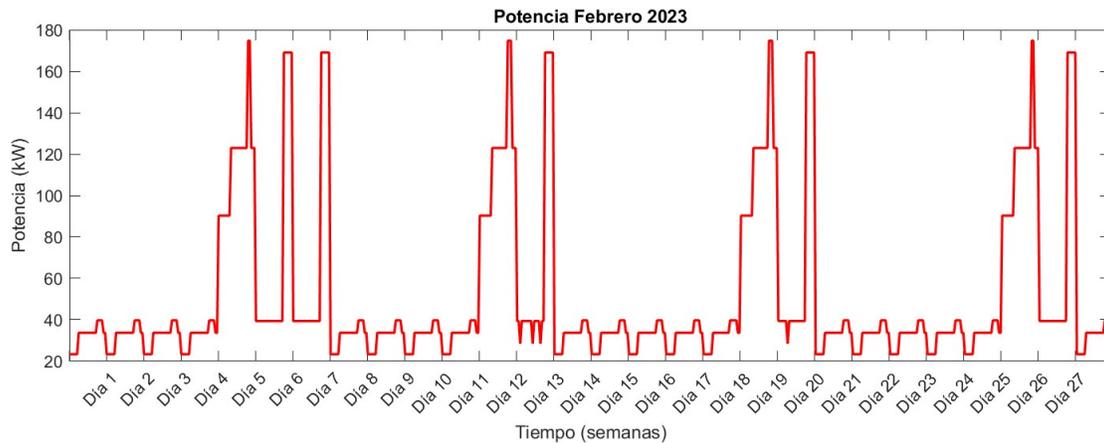


Figura 8. Patrón de consumo de potencia durante el mes de febrero en la DICIS.

### E. Diseño de Herramienta Computacional

Para el diseño de la herramienta computacional primeramente se programa la función que organiza y recolecta la información de las mediciones de irradiancia. En esta función se utilizan parámetros de irradiancia durante cada hora del día del mes completo.

Por otro lado, para determinar la generación de energía mediante la micro-red se utiliza la función del recurso solar y mediante la ecuación (3) se determina cuanta energía generará un número  $N$  de paneles fotovoltaicos durante cada hora del día.

$$P = \frac{\eta AN\varphi}{1000} \quad (3)$$

donde:  $P$  es la potencia generada del panel [kW],  $\eta$  es su eficiencia,  $A$  es su área [ $m^2$ ],  $N$  es el número de paneles, y  $\varphi$  es la Irradiancia [ $\frac{W}{m^2}$ ].

Para considerar con precisión como la generación de energía mediante la micro-red fotovoltaica afectaría el costo total del recibo, es necesario incluir en el programa la diferenciación del día de la semana, día festivo, y hora en la que se genera la energía, para de esta manera darle la correcta ponderación, de acuerdo con la tarifa GDMTH. Debido a que el recibo no proporciona un registro de consumo eléctrico por hora y solo se tiene información de los kWMax totales, se opta por distribuir esa potencia entre las horas del día y mes, para establecer una cantidad de potencia estimada de consumo para cada hora dentro de la tarifa respectiva (punta, intermedia y base).

En la Figura 9 se muestra un diagrama que ilustra la organización de las diferentes funciones incorporadas en la herramienta computacional desarrollada. En el programa se comienza por introducir los datos base que se deben conocer como lo es la irradiancia que se capta en el área elegida para ser diseñada la micro-red, las horas en la que va a operar, el modelo de panel a utilizar y la energía consumida por la instalación eléctrica. Con los datos del panel fotovoltaico se calcula la energía generada por la micro-red, y esta energía se resta de la energía que la instalación le demanda a la CFE. Para realizar la evaluación económica, a partir de la introducción del número de paneles fotovoltaicos se actualiza el nuevo costo total del recibo. Finalmente, para determinar el ahorro económico, se resta el nuevo costo del recibo (considerando la micro-red) del costo del recibo original (sin considerar la micro-red), de esta manera es posible determinar con que configuración de micro-red se obtiene el mayor beneficio económico. A partir de los resultados obtenidos se toman decisiones sobre el dimensionamiento óptimo de la micro-red.

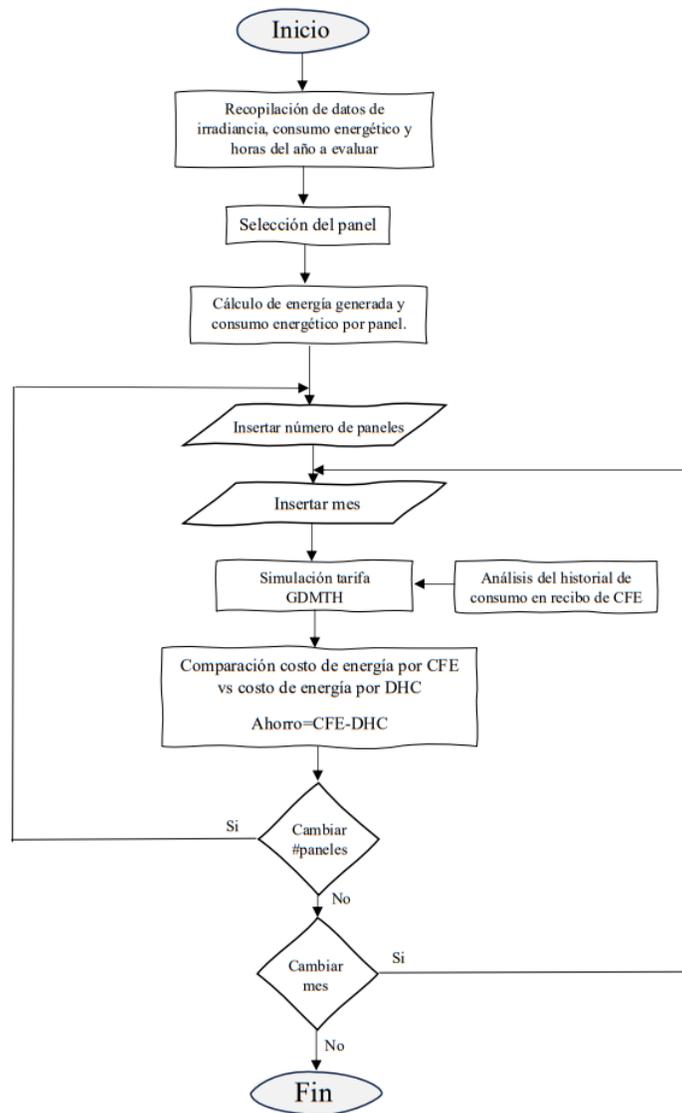


Figura 9. Diagrama de flujo general de la herramienta computacional propuesta.

## Resultados

Para verificar el funcionamiento de la herramienta computacional desarrollada se comienza por analizar el caso de estudio planteado, en donde se diseñará una micro-red fotovoltaica para la instalación eléctrica de la DICIS. Como caso base, y para comprobar la correcta programación de la herramienta, se consideran inicialmente una cantidad de cero paneles fotovoltaicos. Los resultados de esta condición se muestran en la Figura 10, donde se observan los datos de consumo considerados y los resultados que servirán como base para la evaluación de la herramienta y las diferentes configuraciones de la micro-red.

Como segunda condición, y para mostrar la operación de la herramienta computacional, se muestran los resultados cuando se utiliza una cantidad de 1000 paneles fotovoltaicos, donde se observa que los resultados obtenidos muestran que el costo total del recibo se ha reducido. el usuario inserta el número de paneles requerido, en este caso fue de mil paneles y como se puede observar en la figura.11 y 12 comparando ambas tarifas se puede observar como la factura se ve beneficiada por la generación de estos paneles.

Ingrese el número de paneles: 0

Periodo del mes de Enero a Febrero del 2023

Dias = 28  
FC = 0.57  
FP = 97  
Q mensual = 34508.7  
FC\_dias = 383.04  
%Recargo = -4.3  
%Bonificación = 1.80412  
Demanda = 90  
Demanda máxima = 77.8703  
Cargos de distribución = 78

Tarifa	Int. Horario	Cargo	Unidades	Febrero
	-----	Fijo	\$/mes	304.99
		Base	\$/kWh	0.8351
		Intermedia	\$/kWh	1.6297
		Punta	\$/kWh	1.883
GDMTH	-----	Distribucion	\$/kW	101.35
	-----	Capacidad	\$/kW	380.32
	-----	Transmision	\$/kW	0.1758
	-----	CENACE	\$/kW	0.0063
	-----	MEM	\$/kW	0.0062

Concepto	Consumo
kWh base	8585.21
kWh Intermedia	17734.8
kWh Punta	8188.68
kW base	33.0909
kW Intermedia	49.9288
kW Punta	77.8703
kNMax	77.8703
KVArh	8440
Factor de potencia %	97

Concepto	Costo En El Mercado Electrico Mayorista			Importe
	\$	\$/kW	\$/kWh	
Suministro	304.99	0	0	304.99
Distribucion	0	7905.3	0	7905.3
Transmision	0	0	6066.627	6066.63
CENACE	0	0	217.405	217.405
Generacion B	0	0	7169.51	7169.51
Generacion I	0	0	28902.40	28902.40
Generacion P	0	0	15419.281	15419.281
Capacidad	0	29615.6	0	29615.6
SCnMEM	0	0	213.954	213.954
-----Total-----				95815.08

Desglose Del Importe A Pagar	
Concepto	Importe
Cargo Fijo	\$304.99
Energia	\$95510.09
Bonificación F.P.	<b>-\$1728.623</b>
Subtotal	\$94086.46
IVA	\$15053.833
Facturación del Periodo	\$109140.29
DAP	\$658.61
Su pago	\$109798.90
-----TOTAL-----	<b>\$109798.90</b>

Figura 10. Costo total a pagar cuando no se considera la operación de la micro-red (cero paneles fotovoltaicos).

Ingrese el número de paneles: 1000

Periodo del mes de Enero a Febrero del 2023

Dias = 28  
FC = 0.57  
FP = 97  
Q mensual = 18968.9  
FC\_dias = 383.04  
%Recargo = -4.3  
%Bonificación = 1.80412  
Demanda = 50  
Demanda máxima = 42.804  
Cargos de distribución = 43

Tarifa	Int. Horario	Cargo	Unidades	Febrero
	-----	Fijo	\$/mes	304.99
	Base	Variable (Energia)	\$/kWh	0.8351
	Intermedia	Variable (Energia)	\$/kWh	1.6297
	Punta	Variable (Energia)	\$/kWh	1.883
GDMTH	-----	Distribucion	\$/kW	101.35
	-----	Capacidad	\$/kW	380.32
	-----	Transmision	\$/kW	0.1758
	-----	CENACE	\$/kW	0.0063
	-----	MEM	\$/kW	0.0062

Concepto	Consumo
kWh base	4719.15
kWh Intermedia	9748.53
kWh Punta	4501.18
kW base	18.1895
kW Intermedia	27.445
kW Punta	42.804
kWMax	42.804
kVArh	8440
Factor de potencia %	97

Concepto	Costo En El Mercado Electrico Mayorista			Importe
	\$	\$/kW	\$/kWh	
Suministro	304.99	0	0	304.99
Distribucion	0	4358.05	0	4358.05
Transmision	0	0	3334.725	3334.73
CENACE	0	0	119.504	119.504
Generacion B	0	0	3940.96	3940.96
Generacion I	0	0	15887.17	15887.17
Generacion P	0	0	8475.724	8475.724
Capacidad	0	16279.2	0	16279.2
SCnMEM	0	0	117.607	117.607
-----Total-----				52817.95

Desglose Del Importe A Pagar	
Concepto	Importe
Cargo Fijo	\$304.99
Energia	\$52512.96
Bonificación F.P.	<b>\$-952.901</b>
Subtotal	\$51865.05
IVA	\$8298.408
Facturación del Periodo	\$60163.46
DAP	\$363.06
Su pago	\$60526.51
-----TOTAL-----	<b>\$60526.51</b>

Figura 11. Costo total por pagar cuando se considera una micro-red fotovoltaica (1000 paneles fotovoltaicos).

En la Figura 12 se muestra el comportamiento del costo total por concepto de consumo energético contra el número de paneles que conforman la micro-red. Como se observa en la gráfica, la relación entre estas variables no es completamente lineal, lo cual se debe a las fórmulas utilizadas para el cálculo de cada concepto que conforma la tarifa GDMTH. Con esta información es posible determinar para que configuración, número de paneles fotovoltaicos, se obtiene el mayor ahorro económico, pudiéndose de esta manera determinar la configuración óptima para la micro-red.

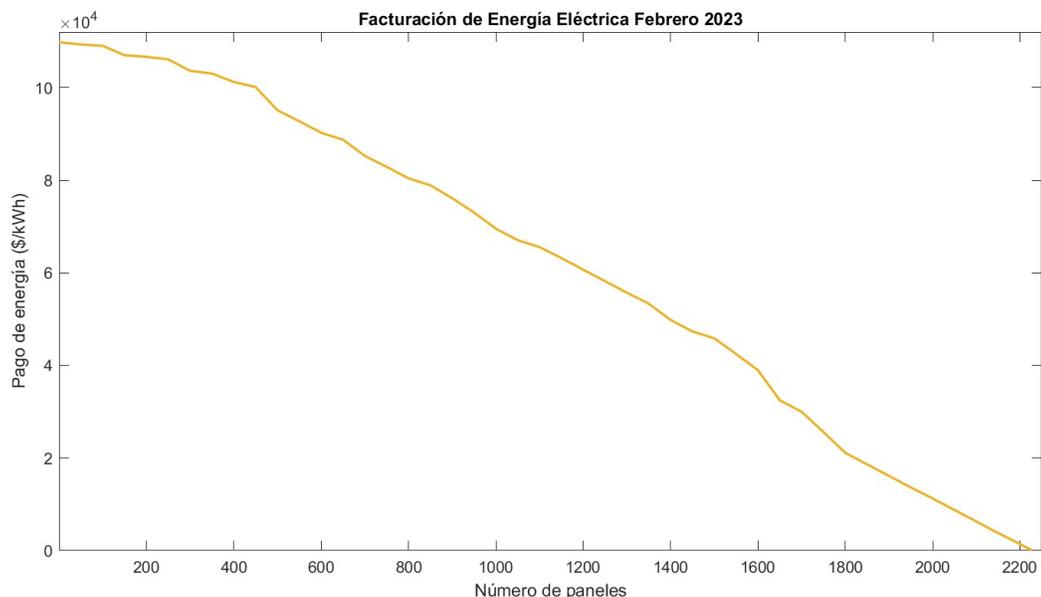


Figura 12. Costo total por consumo de energía eléctrica por número de paneles en la micro-red.

## Conclusión

En el presente trabajo se describió el diseño de un programa computacional desarrollado para el dimensionamiento de micro-redes fotovoltaicas. El programa desarrollado determina de manera detallada la generación de energía por la micro-red, y realiza cálculos de generación y consumo de energía en pasos de tiempo de una hora. Al incorporar la programación de los conceptos considerados en la tarifa GDMTH de la CFE, así como la diferenciación de los días festivos, días de la semana y horarios en los que se genera y consume la energía, es posible obtener cifras precisas del ahorro económico que se puede lograr al operar la micro-red.

La herramienta computacional ha sido evaluada para un caso de estudio en el que se planteó el diseño de una micro-red para la DICIS. Mediante varios casos de estudio se verificó la correcta programación de la herramienta, en donde fue posible verificar que, al variar la dimensión de la micro-red, la herramienta propuesta nos arroja el nuevo costo del recibo que se tendría que pagar una vez que se encuentre en operación la micro-red. Los resultados obtenidos nos mostraron que es posible extender la funcionalidad de la herramienta computacional a fin de obtener un dimensionamiento óptimo, para lo cual sería necesario incorporar cálculos del ahorro unitario para cada configuración de micro-red analizada. Esta funcionalidad se plantea como un trabajo futuro.

Finalmente, es posible concluir que la herramienta puede representar una solución integral y eficaz para el diseño, la planificación y el control de este tipo de sistemas. A través de su implementación, se puede maximizar la eficiencia energética, mejorar la confiabilidad y garantizar un suministro estable de energía, lo que contribuye al desarrollo sostenible y a la transición hacia fuentes de energía más limpias.

## Bibliografía/Referencias

- [1] Farag, A. S., & Mohamed, Y. A. (2019). Microgrid energy management: State of the art and future trends. *IEEE Access*, 7, 2962-2980.
- [2] Hatzigiorgiou, N., Asano, H., Iravani, R., & Marnay, C. (2017). Microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine*, 15(1), 35-42.
- [3] Guerrero, J. M., Chandorkar, M. C., & Loh, P. C. (2013). *Microgrids: Control and operation*. John Wiley & Sons.
- [4] Yang, H., Xu, Y., & Wu, B. (2016). *Microgrids: Energy management by utilizing power electronics devices*. CRC Press.
- [5] Moreno-Munoz, A., Melendez, J., & Sumper, A. (2015). Microgrids in energy transition: Opportunities and challenges of local energy management. *Energy*, 90, 1497-1507.
- [6] Bozchalui, M. C., & Karabasoglu, O. (2017). Optimal sizing of solar panels, wind turbines and batteries for a stand-alone hybrid energy system. *Applied Energy*, 187, 533-546.
- [7] Bhuiyan, F. A., Yazdani, A., Primak, S. L. (2014). Optimal sizing approach for islanded microgrids. *IET Renewable Power Generation*, 9, 166-175.
- [8] UL Solutions. HOMER Pro Software. <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>
- [9] Comisión Federal de Electricidad. (s.f.). Tarifas de Gran Demanda en Media y Alta Tensión. Recuperado de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRENegocio/Tarifas/GranDemandaMTH.aspx>