



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO - SALAMANCA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

*“Metodología para el Diseño Óptimo de Micro-redes
Eléctricas en Instalaciones Industriales”*

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

(Opción: Instrumentación y Sistemas Digitales)

PRESENTA:

Ing. Tutira Cáceres Yuly Karina

DIRECTORES:

Dr. José Merced Lozano García

Dra. Xiomara González Ramírez

Dedicatoria

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio en este bello país, México.

A mis padres Leonel Tutira Díaz y María Eddy Cáceres quienes me dieron el privilegio de ser su hija, me brindaron su apoyo incondicional, me enseñaron a creer en mi misma y me impulsaron a no desistir. Los adoro

A mi abuelita Lola García quien me enseñó a ser valiente, a mostrar siempre una sonrisa independiente de lo que estemos viviendo. Te llevo en mi mente y corazón, y se que sólo basta con cerrar mis ojos para sentirte cerca. Simplemente te idolatro.

A mis hermanos Vanessa Tutira Cáceres y Fernando Tutira Cáceres, ellos mi luz, mi motivación constante, mi orgullo. Esto para ustedes, los quiero mucho

Yuly Tutira

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis asesores, el Dr. José Merced Lozano García y la Dra. Xiomara González Ramírez por su valiosa colaboración en el desarrollo de esta tesis, por su paciencia, por cada una de las palabras de aliento, cuando sentía que no encontraba solución. Muchas gracias.

A la Dr. Xiomara González Ramírez porque además de ser mi asesora se convirtió en mi amiga, gracias por sus valiosas palabras, en especial cuando quise desistir.

A mi amigo Freddy Velosa Piñerez por motivarme a realizar esta maestría, ser mi gran apoyo y la causa de alegría en este proceso

A mi amigo Carlos Moreno Bautista por enseñarme parte de sus conocimientos y tener paciencia para transmitírmelos. Muy agradecida.

A Renny Guillen por sus valiosos consejos, por mostrarme la grandeza de Dios y la magia que existe en los libros y en nosotros mismos

A la señora Irma Rangel por ser mi segunda mamá en este país, por brindarme su hogar y hacerme sentir muy querida

A mi amiga Karin Ruiz y amigo Pedro Esteban porque a pesar de la distancia, no dejaron de brindarme su apoyo y porque siempre me hicieron saber lo felices que son por mis triunfos. Los quiero

A mis amigos Leonardo Ramírez, Raul Esteban, Abel Pérez, Karen Plata, Leidy Cuchimaque, Orlando Sánchez, Lizet Domínguez, Adriana Bastidas, Julian Gómez, Manuel Hernandez, por todos los momentos que pasamos juntos, cada uno de ustedes jugo un papel importante en este proceso. Feliz de que se hayan convertido parte de mi vida

Yuly Tutira

Agradecimientos Institucionales

Expreso mi más sincera gratitud hacia la Universidad de Guanajuato, especialmente a la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca por la formación y el apoyo que he recibido. A todos los profesores mis agradecimientos por su duro trabajo durante estos dos años que me permitieron obtener el título de Maestra en Ingeniería.



Este trabajo fue realizado gracias al apoyo recibido del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México, CONACYT, bajo la beca otorgada en la convocatoria titulada "BECAS NACIONALES 2015 SEGUNDO PERIODO", con el número de becario 718626.



Yuly Tutira

Resumen

La implementación de estrategias de producción y uso de energías limpias y renovables es uno de los retos más importantes en la actualidad, debido al agotamiento de los recursos fósiles. Para solucionar este problema es muy importante la implementación de metodologías que ayuden a optimizar el diseño de las instalaciones industriales en las micro-redes eléctricas, y así minimizar los costos que éstas conllevan. El principal paso para que la implementación de una estrategia de producción de energía se establezca, es aumentar la rentabilidad de las fuentes de energía renovables, mejorando su competitividad. En este proyecto se desarrolla una metodología general para el diseño y dimensionamiento óptimo de micro-redes eléctricas, conformadas por unidades de generación distribuidas (DGUs, por sus siglas en inglés, *Distributed Generation Units*) y unidades de almacenamiento (DSUs, por sus siglas en inglés, *Distributed Storage Units*) con la finalidad de obtener los mayores beneficios económicos. Dentro del problema de optimización se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos: predicción de las condiciones climatológicas en la zona de instalación, condiciones de operación, limitaciones de espacio, topología de la micro-red, tipo de tarifa eléctrica contratada por la empresa y curva de consumo. Dentro del cuerpo del trabajo se muestran los estudios de detalle sobre el uso adecuado de la metodología planteada, adicionalmente se exponen y analizan los resultados en la herramienta de software matemático Matlab. Por último los resultados del diseño de la micro-red demuestran que la metodología propuesta proporciona una respuesta adecuada y una solución óptima factible a la estrategia de manejo de energía.

Abstract

The implementation of strategies for the production and use of clean and renewable energies is one of the most important challenges at today, due to the depletion of fossil resources. To solve this problem, it is very important to implement methodologies that help to optimize the design of industrial installations in electric micro-grids, and thus minimize the costs that these entail. The main step for the implementation of an energy production strategy to be established, is to increase the profitability of renewable energy sources, improving their competitiveness. This project develops a general methodology for the design and optimal sizing of electric micro-grids, made up of distributed generation units (DGUs) and distributed storage units (DSUs) in order to obtain the greatest economic benefits. Within the optimization problem, the following aspects were taken into account: prediction of weather conditions in the installation area, operating conditions, space limitations, topology of the micro-network, type of electricity tariff contracted by the company and curve of consumption. Within the body of work are detailed studies on the proper use of the proposed methodology, additionally, the results are exposed and analyzed in Matlab mathematical software tool. Finally, the results of the micro-grids design show that the proposed methodology provides an adequate response and an optimal feasible solution to the energy management strategy.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos particulares	2
1.3. Justificación	3
1.4. Estructura del trabajo	4
2. Generalidades	6
2.1. Sistemas de generación de energía eléctrica	6
2.2. Micro-red	7
2.2.1. Aplicaciones de las micro-redes	8
2.2.2. Ventajas de la micro-red	9
2.2.3. Desventajas de la micro-red	9
2.3. Fundamentos de las tecnologías renovables	10
2.3.1. Energía Solar	10
2.3.2. Energía Eólica	17
2.4. Optimización	19

2.5. Estrategia de gestión de la Energía (PMS)	21
2.6. Tarifas para el suministro de Energía Eléctrica	24
2.7. Certificados de Energías Limpias	31
3. Modelo de las componentes de la Micro-red	33
3.1. Sistema de estudio	33
3.2. Modelo del subsistema de energía eólica	35
3.3. Modelo del subsistema fotovoltaico	36
3.4. Modelo de la carga	36
3.5. Modelo de la red eléctrica	37
3.6. Modelo de la batería	38
3.7. Modelos de costos	40
3.7.1. Modelo de costos para el WPS	41
3.7.2. Modelo de costos para el PVS	42
3.7.3. Modelo de costos para el BESS	42
3.7.4. Modelo de costos para el controlador de carga BESS	43
3.7.5. Modelo de costos para el convertidor BESS	43
3.8. Modelo de Facturación de Energía Eléctrica	44
3.8.1. Cargo por Energía	45
3.8.2. Modelo de Demanda Facturable	45
3.8.3. Bonificación o recargo por factor de potencia	48
3.9. Formulación del problema de optimización	48
4. Descripción del método propuesto	51
4.1. Algoritmo de optimización	52

4.1.1. Estrategia de gestión de la energía utilizada en el algoritmo de optimización	55
4.1.2. Modelo de prueba para evaluar la eficacia de la PMS	59
5. Análisis de resultados	61
5.1. Industria de estudio: Daltile México	61
5.2. Parámetros de la micro-red	62
5.3. Datos de entrada para la metodología propuesta	63
5.4. Caso de estudio 1	66
5.5. Caso de estudio 2	71
5.6. Caso de estudio 3	76
6. Conclusiones	81
Bibliografía	83
A. Factura CFE: Empresa Industrial	89
B. Distribución horaria para la tarifa HS-L	91
C. Cotizaciones de equipos para la micro-red	94
D. Tablas de identificación del tamaño óptimo de la micro-red	99
D.1. Caso de estudio 1	99
D.2. Caso de estudio 2	101

Índice de figuras

2.1. Estructura típica de una Micro-red [1]	8
2.2. Componentes de una instalación fotovoltaica aislada y conectada a la red [2]	12
2.3. Turbinas eólicas: eje horizontal y eje vertical [3]	18
2.4. Técnicas de Optimización más relevantes. Por uniformidad con la literatura científica se conserva la denominación original en inglés de cada método [4][5]	20
2.5. Control supervisor conectado a la red [6]	23
2.6. Tarifas para el suministro y venta de Energía Eléctrica en México [7] .	25
2.7. Participación de las Energías Limpias hasta el año 2050	31
3.1. Diagrama esquemático de una Micro-red no aislada	34
3.2. Curva de salida de potencia de la turbina eólica [8]	35
3.3. Demanda máxima medida	47
4.1. Esquema de la metodología propuesta para el dimensionamiento óptimo de una micro-red	52
4.2. Algoritmo de optimización	54
4.3. Diagrama de flujo de la PMS parte 1	56
4.4. Diagrama de flujo de la PMS parte 2	57

4.5. Demanda de la carga y generación de renovables	59
4.6. Respuesta a la estrategia de manejo de energía	60
5.1. Distribución del consumo diario, empresa Daltile durante una semana del mes enero de 2017	62
5.2. Área considerada para ubicación de PVS	64
5.3. Área considerada para ubicación de WPS	64
5.4. Histórico promedio por hora durante un año: Irradiación solar y velocidad del viento	66
5.5. Variación precio de energía de la red principal	66
5.6. Identificación máximo global e impacto del tamaño del sistema en función del costo-beneficio	67
5.7. Porcentaje de energía suministrada por la micro-red y excedente de energía debido a las grandes configuraciones	69
5.8. Retorno de la inversión	70
5.9. Aporte energético anual de la micro-red	71
5.10. Estrategia de gestión de la energía	72
5.11. Identificación del máximo ahorro e impacto del tamaño del sistema en función del costo-beneficio con BESS	73
5.12. Porcentaje de energía suministrada por la micro-red y excedente de energía con BESS	75
5.13. Retorno de la inversión con BESS	76
5.14. Porcentaje de energía suministrada y venta de excedentes de energía por la micro-red	78
5.15. Retorno de la inversión con venta de excedentes de energía	78
5.16. Aporte energético anual de la Micro-red con venta de excedentes de energía	79
A.1. Factura CFE para una empresa a nivel industrial	90

C.1. Cotización Aerogenerador conectado a la red de 1 [kW]	95
C.2. Cotización panel solar de 1.2 [kW]	96
C.3. Cotización Batería de 1 [kWh]	97
C.4. Cotización Medidor Bidireccional	98

Índice de tablas

2.1. Vida útil de la batería en función de la profundidad de descarga [9] . . .	15
2.2. Niveles de tensión eléctrica	24
2.3. Límite consumo mensual, tarifas de servicio doméstico [7]	26
2.4. Porcentajes para la adquisición de Certificados de Energías Limpias . . .	32
3.1. Modelo de facturación de Energía Eléctrica	45
3.2. Factores de reducción según región tarifaria [10]	46
3.3. Bonificación o penalización por f.p.	48
5.1. Parámetros económicos para la optimización del sistema	62
5.2. Datos para la simulación	63
5.3. Límites y tamaño de paso para las variables de decisión	63
5.4. Cálculo de la cantidad de equipos a ubicar dependiendo del área	65
5.5. Tamaños y costos para diferentes configuraciones de la micro-red	68
5.6. Tamaños y costos para diferentes configuraciones de la micro-red con BESS	74
5.7. Tamaños y costos para las configuraciones óptimas de la micro-red con venta de excedentes de energía	77
5.8. Comparativa de los 3 casos de estudio	80
B.1. Distribución horaria Febrero-Abril	91

B.2. Distribución horaria Abril-Julio	92
B.3. Distribución horaria Agosto-Octubre	92
B.4. Distribución horaria Octubre-Enero	92
B.5. Cargos aplicados al año 2017	93
D.1. Tamaños y costos para diferentes configuraciones de la micro-red	100
D.2. Tamaños y costos para diferentes configuraciones de la micro-red con BESS101	

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

El uso de micro-redes ha venido creciendo gradualmente [11],[12] y se espera continúe en los próximos años; crecimiento que estará influenciado en parte por la reforma energética de cada país, a su vez por factores, económicos, tecnológicos, ambientales entre otros, debido a los retos que impone el desarrollo energético sustentable. En relación al dimensionamiento óptimo de micro-redes, se ha encontrado en la literatura muchas investigaciones que han trabajado en distintas metodologías para optimizar el costo de operación e inversión con respecto a la infraestructura a instalar.

Por ejemplo en [13] se presenta una metodología para la ubicación y el dimensionamiento óptimo de generadores distribuidos en sistemas radiales y en red, considerando como variables el voltaje y la frecuencia del sistema para modelos de carga estática; en [14] se centra en el diseño óptimo de las estaciones de carga de vehículos eléctricos, dentro de los aspectos que se tuvieron en cuenta para dar solución al problema de optimización están los costos operacionales y de inversión, tarifa eléctrica y tamaño de los componentes; otros estudios relacionados se encuentran en [15], [16], [17].

Este tema también es abordado en [18], el cual desarrolló un análisis de sensibilidad de sistemas fotovoltaicos enlazado a la red eléctrica a partir de un caso de estudio en la Universidad de Guerrero (UPEG)-México, en éste se determinó la influencia de variables como: costos capitales, reemplazo de los módulos Fotovoltaicos (FV), precio de la electricidad y tasa de interés anual. En dicho estudio los autores concluyen que un sistema fotovoltaico de 100 kW enlazado a la red eléctrica en la UPEG, podría suministrar el 80 % de su consumo de electricidad a un costo competitivo

de 0.2 USD/kWh en relación a la proveniente de la red convencional de 0.3 USD/kWh, sin embargo si la red convencional disminuyera por debajo de los 0.25 USD/kWh sería preferible continuar consumiendo electricidad de la red en lugar de instalar un sistema fotovoltaico interconectado a ella. Se apoyaron en el modelo HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) para verificar su modelo de optimización.

Como se puede observar, el estudio de micro-redes interconectadas a la red, es una temática de interés a nivel mundial, sin embargo no abundan investigaciones en las cuales se enfoquen en maximizar los beneficios económicos que se puedan lograr una vez se encuentre la micro-red operando con la red principal, en consecuencia el propósito de esta investigación es realizar el diseño y el dimensionamiento óptimo de micro-redes eléctricas conformadas por unidades de generación distribuida (DGUs, por sus siglas en inglés, *Distributed Generation Units*) y unidades de almacenamiento (DSUs, por sus siglas en inglés *Distributed Storage Units*), donde las variables a tener en cuenta en el modelo de optimización sean: predicción de las condiciones climatológicas en la zona de instalación, condiciones de operación, topología de la micro-red, tipo de tarifa eléctrica contratada por la empresa, curva de consumo, costos de energía, modelo de costos para cada subsistema de la micro-red, tasa de interés y tasa de inflación.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar una metodología general para el diseño y dimensionamiento óptimo de micro-redes eléctricas, conformadas por unidades de generación distribuidas (DGUs) basadas en fuentes renovables de energía y unidades de almacenamiento (DSUs).

1.2.2. Objetivos particulares

1. Implementar modelos matemáticos en estado estable de las diferentes DGUs y DSUs, así como sus modelos de costos consideradas para el presente estudio.
2. Implementar los modelos de facturación de una carga industrial de la empresa de suministro de energía de México.
3. Desarrollar un modelo matemático de optimización de costos considerando a su vez el desarrollo de una estrategia de manejo de energía para obtener soluciones factibles y aplicables.

4. Analizar y validar el desempeño de la metodología propuesta a partir de datos reales de facturación de una empresa de energía y el consumo energético de una empresa industrial.

1.3. Justificación

El modelo actual de los sistemas eléctricos de distribución responde a una estructura de tipo centralizada, esto es, las fuentes de producción de electricidad por medio de combustibles fósiles (carbón, gas natural, entre otros) nucleares o hidroeléctricos, diseñados para gestionar grandes centros de generación [19], se encuentran concentradas en regiones específicas dentro del sistema eléctrico general. Lo anterior ocasiona que la energía que se genera en estas centrales, deba recorrer grandes distancias para poder llegar a los centros de consumo, lo cual implica grandes pérdidas por transmisión y distribución, además de un rendimiento energético y medioambiental de bajo nivel. Por tal motivo, los sistemas eléctricos modernos han comenzado una transición dirigida hacia la modificación de su estructura convencional, para poder ser más competitivos y eficientes en términos de la satisfacción de la demanda. De esta forma, muchos de los sistemas de potencia, tradicionalmente estructurados como redes centralizadas, están adoptando la configuración de sistemas distribuidos en donde las unidades de generación (DGUs), constituidas principalmente por fuentes renovables de energía, se distribuyen a lo largo de la red para generar la energía muy cerca de los puntos de consumo. En esta configuración se reducen el tamaño y número de las líneas eléctricas que deben construirse y mantenerse en óptimas condiciones, logrando así que los sistemas de distribución con una gran penetración de fuentes renovables de energía, sean más competitivos y rentables frente a las fuentes de energía tradicionales.

En este sentido, el concepto de Micro-red se ha convertido en una de las posibles soluciones para la integración eficiente de un creciente número de redes de baja potencia, en lugar de expandir las redes actuales.

En este orden de ideas, el presente trabajo tiene como objetivo fundamental el desarrollar una metodología general para el diseño y dimensionamiento óptimo de micro-redes eléctricas, conformadas por unidades de generación distribuidas (DGUs) basadas en fuentes renovables de energía y unidades de almacenamiento (DSUs). La metodología propuesta tendrá un enfoque general, esto es, deberá ser aplicable para el diseño de micro-redes eléctricas sin restricciones de capacidad, aunque para fines prácticos se verificará su efectividad mediante casos de estudio prácticos de nivel industrial. Asimismo, el diseño de las micro-redes se planteará en términos de maximizar los beneficios económicos que puedan obtenerse una vez que la micro-red se encuentre operando como parte del sistema de suministro de la red eléctrica industrial; para tal propósito, dentro del problema de optimización se deberán tomar en cuenta

los siguientes aspectos: predicción de las condiciones climatológicas en la zona de instalación, condiciones de operación, limitaciones de espacio, topología de la micro-red, tipo de tarifa eléctrica contratada por la empresa, curva de consumo, entre otros [18]. El modelado matemático de los elementos considerados dentro del estudio deberá elaborarse con el detalle necesario para considerar la interacción entre las diferentes DGUs, DSUs, las cargas y el sistema principal. Finalmente, mediante la simulación de la micro-red diseñada será posible validar la metodología desarrollada.

1.4. Estructura del trabajo

El presente proyecto de tesis se encuentra estructurado en siete capítulos, a continuación una descripción breve de cada uno de ellos:

Capítulo I. En el primer capítulo se presentan los objetivos planteados para el trabajo, así como los antecedentes y justificación que permiten argumentar la realización del mismo.

Capítulo II. En este capítulo se muestra una breve descripción de los principales conceptos asociados a las micro-redes, características y comportamiento de las unidades de generación DGUs y unidades de almacenamiento DSUs, luego se desglosan los diferentes métodos de optimización y las estrategias de gestión de la energía (PMS, por sus siglas en inglés, *Power management strategy*), por último se describen las tarifas para el suministro de energía eléctrica en alta tensión de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) utilizados en el desarrollo del trabajo.

Capítulo III. El tercer capítulo presentan los modelos matemático de las DGUs y DSUs en estado estable, junto con los modelos de costos. Se formula el problema de optimización, así mismo se expone el modelo de facturación de energía eléctrica de la CFE.

Capítulo IV. El cuarto capítulo se encuentra enfocado al desarrollo de la metodología propuesta para el dimensionamiento óptimo de la micro-red, a su vez se puntualiza el método de optimización seleccionado y se valida la estrategia de manejo de energía diseñada para ser aplicada al metodología así obtener soluciones factibles y aplicables.

Capítulo V. El quinto capítulo presenta la validación de la metodología propuesta al utilizar datos reales de facturación la empresa de energía eléctrica CFE y el perfil de consumo de una empresa industrial.

Capítulo VI. Finalmente, en este capítulo se presentan las conclusiones resultantes del presente trabajo de investigación. De igual forma, se establecen algunas

propuestas de trabajos futuros, derivados del trabajo realizado, con el propósito de continuar con el desarrollo de esta línea de investigación.

Capítulo 2

Generalidades

En este capítulo se presenta los conceptos preliminares al desarrollo del presente trabajo de tesis, los cuales incluye sistemas de generación de energía eléctrica, micro-redes, así como las características de las DGUs (Por sus siglas en inglés, *Distributed Generation Units*) y DSUs (Por sus siglas en inglés, *Distributed Storage Units*). De igual manera, se introduce los conceptos de optimización, las estrategias de gestión de la energía (PMS, por sus siglas en inglés, *Power management strategy*), las tarifas de suministro de energía utilizadas en la metodología de la micro-red eléctrica y los Certificados de Energías Limpias (CEL) instrumento para alcanzar las metas de generación de energías limpias.

2.1. Sistemas de generación de energía eléctrica

Existe una gran variedad de sistemas de generación de energía eléctrica, éstos son empleados en función de sus costos y eficiencia operativa, también dependen de los recursos económicos y minerales de cada país, de la ubicación geográfica, entre otros. Entre los sistemas más destacados es posible mencionar los citados por [20]: Sistemas Hidráulicos, Eólicos, Oceánicos, del tipo Solar Fotovoltaico, Biomasa, Geotérmicos, Petróleo, Carbón, Ciclos Combinados y Energía Nuclear. La primera fuente de energía utilizada por el hombre fue la energía solar, luego se reporta el uso de la energía hidráulica, y posteriormente la energía eólica que fue usada a través de los molinos de viento, que aparentemente tienen su origen en Persia en el siglo VII. Pero no es sino hasta el año 1973 cuando se impulsa el desarrollo de sistemas eólicos a causa de la fuerte crisis petrolera acontecida en ese entonces; posteriormente a medida que se han generado desarrollos industriales y bélicos, han aparecido otras fuentes de generación de energía como el carbón mineral, apenas conocido hace 300 años, el cual fue una

de las fuentes supremas de energía y riqueza del mundo, y factor importante de la revolución industrial. El petróleo a finales del siglo XIX con gran auge en el siglo XX, impulsando al mundo a un desarrollo acelerado y sin precedentes en la historia. Entre otras fuentes energéticas, la nuclear apareció tres meses después del final de la Segunda Guerra Mundial.

2.2. Micro-red

Una micro-red eléctrica no es más que un sistema independiente de distribución formado por la integración de distintos tipos de carga y de diferentes recursos distribuidos, que incluye tanto las unidades de generación (DGUs) como las unidades de almacenamiento (DSUs), con la finalidad de satisfacer una variedad de clientes, tales como: edificios residenciales, comercios, entidades industriales, entre otros [19]. En otras palabras, una micro-red es una entidad controlable que provee electricidad a diferentes usuarios finales.

Las micro-redes tienen dos modos básicos de operación: conectado al sistema principal (red no autónoma), o en modo aislado (red autónoma). Cuando está conectada al sistema puede intercambiar energía con la red principal; y, cuando trabaja en modo aislado sólo los elementos de la micro-red son los que se encargan de suministrar la energía a los usuarios finales. Es importante recalcar, que este modo de operación puede entrar en juego cuando ocurre una perturbación en el sistema, ocasionando que la micro-red se desconecte de la red principal, lo que es crucial para que exista una ininterrumpida oferta de energía [20].

En la figura 2.1 se muestra un diagrama esquemático de una micro-red la cual está compuesta por el sistema de distribución de energía eléctrica que se encuentra aguas abajo de la subestación de distribución, e incluye una variedad de fuentes de energía distribuida y diferentes tipos de usuarios finales. Las unidades de energía distribuida incluyen unidades de generación distribuida (DG, por sus siglas en inglés, *Distributed Generation*) como: paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y microturbinas, las unidades de almacenamiento distribuido (DS, por sus siglas en inglés, *Distributed Storage*), que usualmente son las baterías, con diferentes capacidades y características, y, las unidades combinadas calor y electricidad (CHP, por sus siglas en inglés, *Combined Heat and Power*) desde el mismo dispositivo ó unidad de energía. El punto de conexión eléctrica de la micro-red al sistema de energía de servicios públicos (*utility grid*), en el nodo de baja tensión del transformador de subestación, constituye el punto de acoplamiento común (PCC, por sus siglas en inglés, *Point of Common Coupling*). La micro-red está operando en modo red no autónoma a través del transformador de la subestación (*substation*) [1].

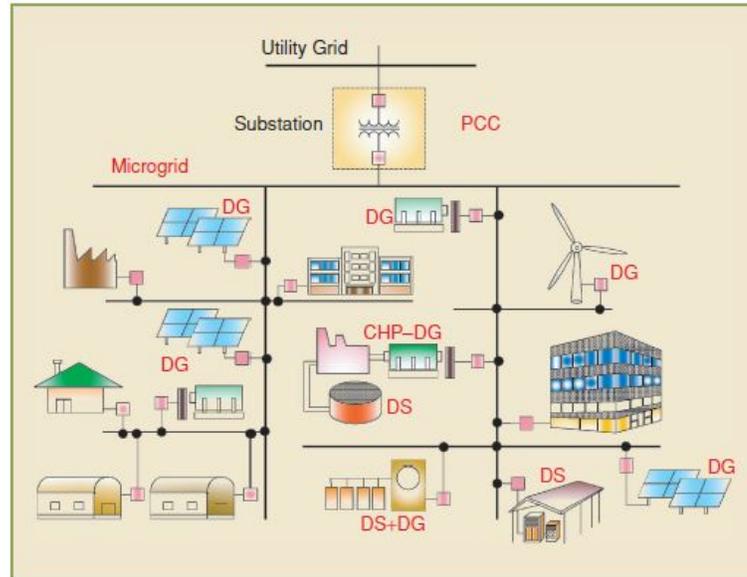


Figura 2.1. Estructura típica de una Micro-red [1]

2.2.1. Aplicaciones de las micro-redes

Las micro-redes presentan una amplia gama de aplicaciones, entre ellas se encuentran [21]:

- Sistemas para usuarios o comunidades aisladas: se trata de sistemas hasta un máximo de 100 [kW] de potencia.
- Sistemas tipo *retrofit* se trata de sistemas renovables instalados en redes locales en media tensión, hasta potencias de unos MW, con el fin de reducir las horas de funcionamiento de los generadores diésel existentes, ahorrando combustible y reduciendo las emisiones contaminantes.
- Sistemas combinados que utilizan únicamente fuentes de origen renovable y que unen las tecnologías fotovoltaica, eólica e hidroeléctrica. Debido al carácter intermitente de este tipo de generación son utilizadas en aplicaciones “grid-connected”.
- Sistemas híbridos que combinan las fuentes de origen renovable con fuentes convencionales, y que permiten operar tanto de manera aislada como conectada a la red de distribución.
- En algunas situaciones, se usan sistemas híbridos completamente renovables pero que permiten la autosuficiencia respecto a la red eléctrica. Estos sistemas

combinan una fuente continua, para cubrir la necesidad energética de base (biomasa y/o energía geotérmica), y una o más fuentes intermitentes, para cubrir los picos de potencia solicitada (hidroeléctrica, eólica, solar).

2.2.2. Ventajas de la micro-red

Existen numerosas ventajas en lo referente al uso de las micro-redes como generadores independientes de distribución, como se enlista a continuación:

- Las micro-redes tienen un menor impacto medioambiental en comparación con el sistema eléctrico convencional, cuyas fuentes de energías se basan en recursos fósiles, lo que ayudaría a combatir el calentamiento global [22].
- Debido a la reducción física de espacio entre las micro-fuentes y la carga, se disminuye la congestión en los alimentadores tanto de distribución como de transmisión, lo que aumenta la calidad de la energía que se les entrega a los consumidores [22].
- El uso de técnicas avanzadas de control para manejar cada uno de los elementos de la micro-red, la hacen comportarse como una entidad independiente que le permite conectarse y desconectarse del sistema principal en caso de que cualquier eventualidad se presente [23].
- Con una micro-red es posible que cada usuario genere, maneje, controle y almacene parte de la energía que consume, lo que le permite al consumidor volverse parte del proceso de producción de la energía eléctrica [24].

2.2.3. Desventajas de la micro-red

De igual manera, existen ciertas desventajas al momento de usar este tipo de sistemas, entre los cuales se encuentran:

- La implementación de una micro-red requiere de un capital inicialmente elevado, por lo tanto, su implementación no es sustentable para empresas de menor capital.
- Cuando se presenta algún desbalance en los generadores de potencia, la energía es automáticamente balanceada debido a la inercia que presentan los mismos generadores; pero, en una micro-red las fuentes de energías dependen de dispositivos electrónicos, los cuales carecen de dicha inercia, por lo que es necesario aplicar técnicas que compensen este problema [25].

- La cantidad de dispositivos a utilizar en una micro-red también puede representar una desventaja, ya que mientras más unidades de generación y de almacenamiento se encuentren presentes en el sistema, mayor será la complejidad de los esquemas de control que se tienen que aplicar [25].

2.3. Fundamentos de las tecnologías renovables

2.3.1. Energía Solar

El Sol es una esfera gaseosa formada, fundamentalmente, por helio, hidrógeno y carbono. Su masa es 330.000 veces la masa de la tierra y se estima que su edad es de unos 6.000 millones de años [26].

El Sol se comporta como un reactor nuclear que transforma la energía nuclear en energía de radiación, energía que llega a la tierra. Sin embargo, no toda la energía que se produce en el Sol llega a la superficie terrestre. Al atravesar la atmósfera, la radiación pierde intensidad a causa de la absorción, la difusión y la reflexión por acción de gases, vapor de agua y partículas en suspensión de la atmósfera [26]. Así, la radiación que la tierra recibe del Sol se puede dividir en:

Radiación directa: Es aquella que logra atravesar la atmósfera sin ningún cambio de dirección.

Radiación dispersa o difusa: Es aquella que se mantiene luego de sufrir los fenómenos de difusión y reflexión.

Albedo: Es la radiación que se genera en horas pico solares del día.

Se podría decir que a la tierra llega una gran cantidad de energía solar en forma de radiaciones. Por eso, la energía solar es un recurso energético importante a tener en cuenta. Asimismo, es una constante con la que se cuenta los 365 días del año, lo que hace factible su implementación en zonas del mundo que posea una disponibilidad diaria del mismo y cuya geografía no presente barreras para la instalación y adecuación de los paneles solares.

Aprovechamiento de la energía solar

La energía solar puede ser aprovechada de dos formas diferentes: térmica o fotovoltaica, esta segunda será descrita de manera más extensa debido a que es la

tecnología a considerar en el estudio.

1. Energía solar térmica

El aprovechamiento de la energía solar térmica consiste en usar la radiación del Sol para calentar un fluido que, en función de su temperatura, se utiliza para producir agua caliente, vapor o energía eléctrica. Los sistemas para aprovechar la energía solar por la vía térmica se pueden dividir en tres grupos:

- *Sistemas a baja temperatura.* El calentamiento del agua se produce por debajo de su punto de ebullición, es decir, 100 °C. La mayor parte de los equipos basados en esta tecnología se aplican en la producción de agua caliente sanitaria y en climatización.
- *Sistemas a media temperatura.* Se utilizan en esas aplicaciones que necesitan temperaturas entre 100 y 300 °C para calefacción, proporcionando calor en procesos industriales, suministro de vapor, etc.
- *Sistemas a alta temperatura.* Se utilizan en aplicaciones que necesitan temperaturas superiores a 250 o 300 °C, como por ejemplo para producir vapor o para la generación de energía eléctrica en centrales termosolares.

2. Energía solar fotovoltaica

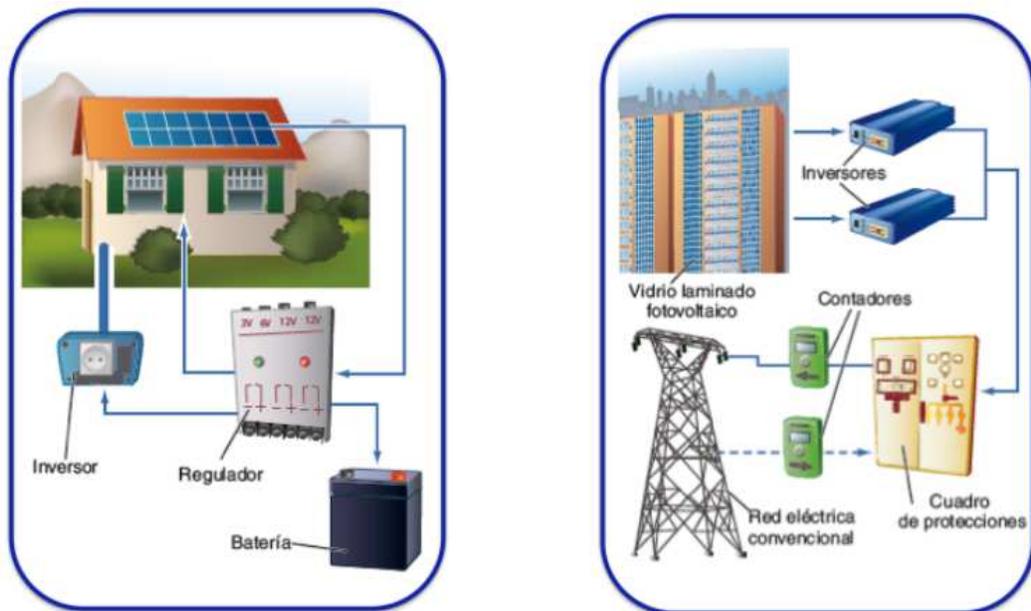
Consiste en la conversión de la energía lumínica en energía eléctrica. Esta transformación se lleva a cabo mediante las células fotovoltaicas que permiten llevar a cabo el proceso de conversión. Con este tipo de tecnologías se utiliza sólo la parte positiva del haz de luz (fotones), que al entrar en contacto con la banda de electrones del material semiconductor del que está hecho el panel, inducen movimiento, lo que genera corriente eléctrica [27]. La electricidad que se produce se puede utilizar de manera directa, almacenarse en acumuladores (baterías) para un uso posterior, e incluso se puede introducir a la red de distribución eléctrica.

La energía fotovoltaica no emite ningún tipo de polución durante su funcionamiento, contribuyendo a evitar la emisión de gases de efecto invernadero [28]. Su principal desventaja consiste en que su producción depende de la radiación solar, por lo que si la célula fotovoltaica no se encuentra alineada perpendicularmente al sol se pierde entre un 10-25 % de la energía incidente. Debido a ello, en las plantas de conexión a red se ha popularizado el uso de seguidores solares para maximizar la producción de energía [29]. La producción se ve afectada asimismo por las condiciones meteorológicas adversas, como la falta de sol, nubes o la suciedad que se deposita sobre los paneles [30]. Esto implica que para garantizar el suministro eléctrico es necesario complementar esta energía

con otras fuentes de energía gestionables como las centrales basadas en la quema de combustibles fósiles, la energía hidroeléctrica o la energía nuclear, entre otras.

Componentes de un sistema solar fotovoltaico

Las instalaciones fotovoltaicas pueden estar aisladas o conectadas a la red, Figura 2.2. En el primer caso, son instaladas para proporcionar electricidad directamente a los usuarios. Generalmente, este tipo de sistemas los utilizan usuarios con consumos de energía muy bajos. La energía es acumulada en una serie de baterías, dimensionadas de forma que garanticen una suficiente autonomía para los períodos en los que el sistema fotovoltaico no produzca electricidad. En este tipo de sistemas es necesario instalar un regulador de carga como se observa en la Figura 2.2a. Para instalaciones fotovoltaicas conectadas a red (mayor generación), es necesaria la implementación de contadores bidireccionales, en los que se registra tanto el consumo como la inyección de energía eléctrica que se hace a la red. De la misma manera, en este tipo de instalaciones es necesario el uso de inversores que convierten la corriente continua que se genera en los paneles a corriente alterna, para poder inyectarla a la red eléctrica.



(a) Instalación fotovoltaica aislada

(b) Instalación fotovoltaica conectada a la red

Figura 2.2. Componentes de una instalación fotovoltaica aislada y conectada a la red [2]

■ *Panel solar fotovoltaico*

Un módulo o panel fotovoltaico consiste en una asociación de células, encapsuladas en dos capas de EVA (etileno-vinilo-acetato), entre una lámina frontal de vidrio y una capa posterior de un polímero termoplástico u otra lámina de cristal cuando se desea obtener módulos con algún grado de transparencia [31].

Las células más comúnmente empleadas en los paneles fotovoltaicos son de silicio, y se puede dividir en tres subcategorías:

- *Las células de silicio mono cristalino*: están constituidas por un único cristal de silicio, normalmente manufacturado mediante el proceso Czochralski [32]. Este tipo de células presenta un color azul oscuro uniforme. Poseen la eficiencia más alta de este tipo de tecnología, ya que oscila entre 15% y 28% para aplicaciones convencionales.
- *Las células de silicio policristalino*: también llamado multicristalino, están constituidas por un conjunto de cristales de silicio, lo que explica que su rendimiento sea algo inferior al de las células monocristalinas [32]. Se caracterizan por un color azul más intenso.
- *Las células de silicio amorfo*: son menos eficientes que las células de silicio cristalino pero también menos costosas. La particularidad de este tipo de células es que permite captar, además de la radiación directa, la radiación difusa, por tal razón son una opción a considerar en sitios en donde se tenga una nubosidad alta. Este tipo de células es, por ejemplo, el que se emplea en aplicaciones solares como relojes o calculadoras. Tiene la ventaja de ser uniforme, es decir, la dimensión del semiconductor es dimensión del módulo [32].

■ *Inversores*

La corriente eléctrica continua que proporcionan los módulos fotovoltaicos se puede transformar en corriente alterna mediante un aparato electrónico llamado *inversor* e inyectar en la red eléctrica (para venta de energía) o bien en la red interior (para autoconsumo).

La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o el diseñador.

En las etapas iniciales del desarrollo de los inversores fotovoltaicos, los requisitos de los operadores de las redes eléctricas a la que se conectaban, solicitaban

únicamente el aporte de energía activa y la desconexión del inversor de la red si ésta excedía de unos ciertos límites de voltaje y frecuencia. Con el progresivo desarrollo de estos equipos y la cada vez mayor importancia de las redes eléctricas inteligentes, los inversores ya son capaces de proveer energía reactiva e incluso aportar estabilidad a la red eléctrica [32].

■ **Baterías**

Los acumuladores o baterías son dispositivos que son capaces de transformar la energía química almacenada en electricidad. Son usadas en instalaciones fotovoltaicas para almacenar la energía generada por los paneles y ser utilizada posteriormente [9]. En este tipo de instalaciones, las baterías cumplen tres funciones principales:

1. Almacenar energía durante determinado periodo (Horas/Días).
2. Proporcionar potencia instantánea elevada.
3. Fijar la tensión de trabajo de la instalación.

Existen diferentes clases de baterías de acuerdo con los materiales activos de sus placas, su electrolito, su construcción física, su capacidad, y si son aptas para trabajar en ciclos profundos de carga y descarga. Algunos parámetros que deben tenerse en cuenta al realizarse la selección de un acumulador son:

Capacidad

Es la capacidad de energía que puede suministrar la batería en unas determinadas condiciones de trabajo, se expresa en amperios-hora (Ah), la cual pueda ser obtenida de la batería en un ciclo de descarga completa partiendo de un estado de carga total.

Tensión

La batería es una fuente de tensión continua, los valores más habituales de ésta son 12 y 24 [V]. Las baterías de 12 [V] suelen tener capacidades de hasta 400 [Ah]. Para capacidades mayores se emplean elementos de 24 [V].

Profundidad de descarga

La profundidad de descarga (DOD, por sus siglas en inglés, *Depth of Discharge*) es la cantidad, en porcentaje, que se ha descargado una batería en un proceso

de descarga. Dependiendo de esto pueden darse descargas superficiales de 20 % ó descargas profundas 80 % [33]. No se debe utilizar una batería de propósitos generales cuando los ciclos son profundos (por ejemplo, en un panel fotovoltaico).

La vida útil de una batería depende de los procesos de carga y descarga, entonces cuando menos profundo sean éstos, mayor será la duración de la batería como se observa en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. *Vida útil de la batería en función de la profundidad de descarga [9]*

% de descarga DOD	Ciclos
25	2.200
50	1.000
75	550
100	325

Tipos de baterías

Como ya se ha mencionado, existen en el mercado diferentes tipos de baterías solares, fabricadas cada una para cumplir con unas exigencias técnicas determinadas. Es necesario aclarar que las baterías solares no tienen nada que ver con las baterías convencionales como las de un coche, ya que tienen una vida útil muy superior y permiten descargas profundas continuadas sin que ello afecte su rendimiento. A continuación, se expondrá cuál es el tipo de batería más adecuada según la instalación solar que se quiera llevar a cabo [34], [35].

- *Baterías solares monoblock*

Son el modelo más económico y recomendado en instalaciones de baja y media potencia donde se utilicen aparatos eléctricos sencillos y que no usen motor. Estos dispositivos son el televisor, el reproductor de música o DVD, el microondas, bombillas o focos de iluminación, por ello, se recomienda su uso para sistemas aislados, telecomunicaciones, instalaciones de señalización o repetidores, etc. Sin embargo, estas baterías solares no son recomendadas para aparatos complejos que lleven motor, ya que no soportan bien los picos de arranque altos que producen estos equipos, como la lavadora, la bomba de agua, un taladro, etc.

La vida útil de un batería solar monoblock son 4-5 años, sin embargo, si se utiliza con aparatos con motor se perjudicará su vida útil reduciéndola solamente a 1 año. Las baterías monoblock son baterías de ácido abierto por lo que necesitan de un mantenimiento periódico cada año y medio

aproximadamente. El modelo de mayor capacidad tiene 250 [Ah] y se conecta con otras baterías para conseguir una mayor capacidad de almacenamiento .

- *Baterías de Gel y baterías de fibra de vidrio con gran capacidad de absorción (AGM, por sus siglas en inglés, Absorbed Glass Mat)*

Se fabrican en formato monoblock pero tienen un rendimiento mayor y no necesitan mantenimiento ya que son baterías selladas y compuestas de electrolito gelificado. Estas baterías son ideales para usar cualquier tipo de aparato eléctrico ya que soportan sin problemas los altos picos de arranque de cualquier electrodoméstico. La vida media de las baterías de Gel y AGM en condiciones normales de uso son de 8-10 años. Estas baterías son muy utilizadas en instalaciones medias ya que permiten ir añadiendo módulos y ampliar la capacidad de carga poco a poco. El modelo de más capacidad utilizado en acumuladores de Gel y AGM es de 250 [Ah] [34].

- *Baterías estacionarias*

Forman parte las baterías *OPZS*, *OPZV* y *TOPZS*. Las baterías estacionarias son perfectas para instalaciones que necesiten un consumo diario y durante largos períodos de tiempo. Esto es debido a que tienen una larga vida útil, superior a los 20 años y permiten profundos ciclos de descarga diarios con resultados excelentes ante cualquier tipo de consumo.

Éstas están formadas por vasos independientes de 2 [V] cada uno, con capacidades de carga que pueden llegar hasta los 4500 [Ah]. Si bien los modelos más utilizados abarcan desde los 300 Ah hasta los 1500 [Ah]. Los vasos se conectan entre sí mediante conectores, formando sistemas de 12, 24 ó 48 [V]. Estas baterías, si bien su precio es más elevado, compensan la inversión con los años de vida que ofrecen [35].

- *Baterías de Litio*

La aleación de LI-Fe de las baterías de litio permite una descarga del 100 % de su potencia. Por ejemplo, una batería de litio de 200 [Ah] se puede cargar a ese nivel, al contrario que en otras como las AGM o Gel, en las que la potencia de carga se sitúa en un 10-20 % de la máxima potencia admitida por la batería. Ésta característica permite que el proceso de carga sea mucho más rápido que en todas las demás. Además, permite múltiples procesos de descarga (700 ciclos al 80 % DOD). Otra ventaja de las baterías de litio es el sistema de gestión de la batería y el servicio ininterrumpido con fuente de alimentación autónoma, incluso en caso de fallo de alimentación.

De ahí que, el uso de un tipo batería u otra dependerá en primer lugar del tamaño de la instalación solar, en segundo lugar, del tipo de aparatos eléctricos que se conecten y en tercer lugar, de la capacidad económica de cada persona. Es importante tener en cuenta las características de cada batería ya que el uso de una batería incorrecta repercutirá en toda la instalación y significará a corto plazo tener que instalar baterías nuevas.

■ *Regulador*

Un regulador o controlador de carga se sitúa entre el generador (ejemplo, paneles solares) y las baterías. Es el encargado de evitar situaciones de carga y sobredescarga de la batería, con el fin de alargar su vida útil [9].

El regulador trabaja en [9]:

- La parte relacionada con la carga, su función es garantizar una carga suficiente al acumulador y evitar situaciones de sobrecarga. Cuando hay mucho sol y la batería esta cargada, reduce la corriente que llega a la batería para no sobrecargarla y dañarla. Cuando la batería esta descargada y hay suficiente sol, aumenta la corriente a la batería hasta llegar a un estado de plena carga.
- En el proceso de descarga, su función es asegurar el suministro eléctrico diario suficiente y evitar la descarga excesiva de la batería.

2.3.2. Energía Eólica

La energía eólica consiste en generación de electricidad por medio del aprovechamiento de las velocidades de viento, o de la energía cinética del mismo mediante la implementación de turbinas eólicas llamadas *aerogeneradores*, los cuales pueden ser de eje vertical u horizontal dependiendo de la ubicación de su rotor, ver Figura 2.3 [3].

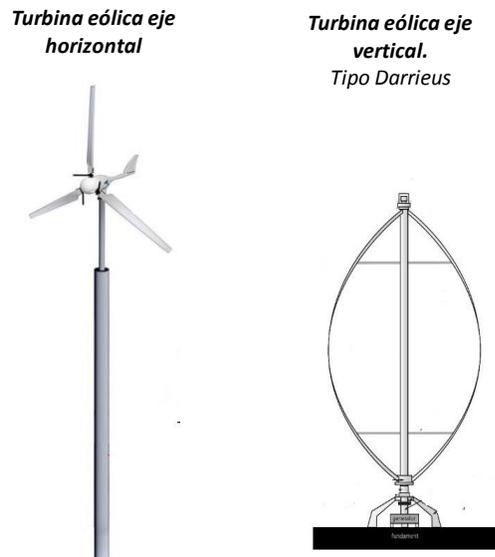


Figura 2.3. Turbinas eólicas: eje horizontal y eje vertical [3]

Para la generación de energía típicamente se emplean turbinas de:

- *Eje horizontal:* funcionan bajo la ley de Betz, la cual establece que la velocidad promedio del viento en el área del rotor del aerogenerador es proporcional a la velocidad promedio del viento antes de ingresar a la máquina y luego de salir de la misma dividida ambos momentos, es decir, antes y después del aerogenerador, y de esta manera sólo puede convertirse el 59% de la energía cinética del viento en energía mecánica. El objetivo de las mismas es generar grandes cantidades de energía por lo tanto se instalan en zonas aisladas en que se disponga de buen potencial de recurso y amplio espacio [36].
- *Eje vertical:* se adaptan a cualquier dirección de viento, debido a la adecuación de su rotor (vertical), por lo que son idóneos para la generación de energía en zonas urbanas en donde el aire sufre bastante interferencia y en el que las velocidades que alcanza no son muy altas. Su principio de funcionamiento se basa en la diferencia de coeficiente de arrastre que se presenta entre las dos mitades del aerogenerador expuestas al viento [36].

2.4. Optimización

La optimización es una herramienta importante en la ciencia para la toma de decisiones y en el análisis de sistemas físicos. Para usarlo, primero se debe identificar algún objetivo, es decir, una medida cuantitativa del rendimiento del sistema en estudio. Este objetivo podría ser ganancia, tiempo, energía potencial o cualquier cantidad o combinación de cantidades que pueda representar un número [37].

El objetivo depende de ciertas características del sistema, llamadas variables o incógnitas. La finalidad es encontrar valores de las variables que optimizan el objetivo. A menudo, las variables están restringidas o son restringidas de alguna manera. Por ejemplo, cantidades tales como la densidad de electrones en una molécula y la tasa de interés de un préstamo no pueden ser negativas. El proceso de identificación de objetivos, variables y restricciones para un problema dado se conoce como *modelado*. La construcción de un modelo apropiado es el paso más importante en el proceso de optimización. Si el modelo es demasiado sencillo, no proporcionará información útil sobre el problema práctico, pero si es demasiado complejo, puede ser muy difícil de resolver [37].

Una vez que se ha formulado el modelo, se puede usar un algoritmo de optimización para encontrar su solución. No hay un algoritmo de optimización universal. Al contrario, existe numerosos algoritmos, cada uno de los cuales se adapta a un tipo particular de problema de optimización, en la Figura 2.4 se ilustran algunas técnicas.

Un problema de dimensionamiento óptimo de una micro-red puede clasificarse como multimodal, siendo importante encontrar la solución óptima global. Como este estudio contiene variables como la velocidad del viento e irradiación solar, esto implica parámetros estocásticos y restricciones. Por lo tanto, se espera que el problema se resuelva mediante cualquiera de las técnicas probabilísticas, iterativas, enumerativas, analíticas y estocásticas. La respuesta al tamaño óptimo y el grado de precisión varían con la técnica adoptada.

A continuación se muestran algunos trabajos en los cuales se indican las técnicas de optimización que utilizaron dependiendo de la naturaleza de sus variables, restricciones y la función objetivo.

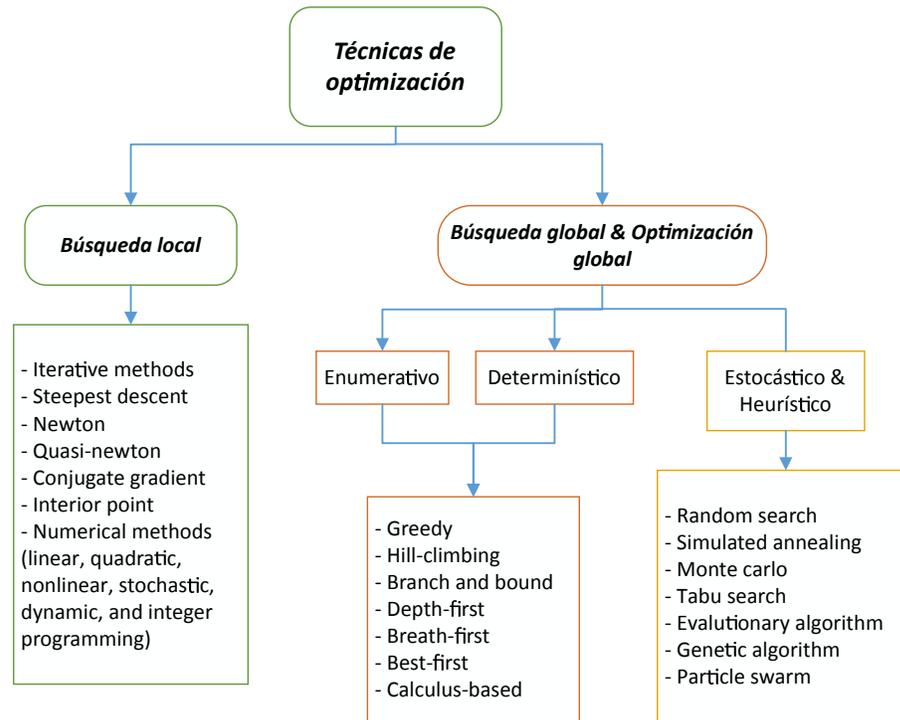


Figura 2.4. *Técnicas de Optimización más relevantes. Por uniformidad con la literatura científica se conserva la denominación original en inglés de cada método [4][5]*

Tomando la confiabilidad del suministro de energía como una restricción y adoptando el costo como una función objetivo, muchos investigadores [38]-[39] han investigado y propuesto varios enfoques para determinar los tamaños óptimos de una micro-red. Sus técnicas de optimización recomendadas son principalmente: Método de Construcción Gráfica, Enfoques Probabilísticos, Técnica Enumerativa/Iterativa y Técnicas Estocásticas y Heurísticas.

- Manteniendo una variable de decisión fija (por ejemplo, tamaño de los aerogeneradores y variando la otra (por ejemplo, tamaño de los paneles fotovoltaicos (PV, por sus siglas en inglés, *Photovoltaic Panels*)), se ha utilizado el método de construcción gráfica para determinar los tamaños de un banco de baterías y un conjunto de PV [38][37]. Este método ha utilizado solo dos variables de decisión en los procesos de optimización, y la función de costo de una micro-red se ha tomado como una función lineal que combina las variables de decisión. Este método no es efectivo para los problemas que involucran más de dos variables de decisión.
- Se ha propuesto enfoques probabilísticos en [40] para determinar el límite superior de un banco de baterías en un sistema de baterías eólicas-fotovoltaicas y para evaluar el rendimiento de un sistema de vientos-PV, respectivamente. Los métodos

probabilísticos, son generalmente los métodos de dimensionamiento más simples. La desventaja del enfoque probabilístico es que el enfoque no puede representar el rendimiento cambiante dinámico de la micro-red. Por lo tanto, los resultados obtenidos por estos métodos generalmente no son la solución más adecuada.

- Al emplear enumeración y/o esquemas iterativos y minimizar los costos para mantener la confiabilidad del suministro de energía a un valor deseado, muchos investigadores [41]-[42] han propuesto los enfoques de tamaño óptimos como objetivos únicos para numerosas configuraciones de una micro-red. Entre los estudios antes mencionados, los [41],[43],[42], han optimizado los tamaños de micro-red, cuya carga promedio diaria es baja (por ejemplo, una casa donde la carga promedio diaria es inferior a 75 [kWh]). La referencia [41] ha propuesto un algoritmo numérico simple para determinar las capacidades de generación óptimas y el almacenamiento para un sistema híbrido de baterías de viento-PV. En base a la iteración de bucle, la referencia [44] ha presentado una metodología general para el análisis técnico-económico de un sistema autónomo de energía renovable.
- Entre las técnicas estocásticas y heurísticas, el Algoritmo Genético (GA, Genetic Algorithm) [45],[46], la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO, Particle Swarm Optimization) [47], el Algoritmo de Recocido Simulado (SA, Simulated Annealing) [48] y Búsqueda Tabú (*Tabu search*) [49] se han utilizado para determinar los tamaños óptimos de una micro-red aislada (IMG, por sus siglas en inglés, *Islanded MicroGrid*). Suponiendo que el costo total sea la función objetivo, los GA se utilizan en [45] para determinar el número óptimo de módulos fotovoltaicos, generadores de turbina eólica y bancos de baterías. La referencia [50] ha empleado el GA para optimizar conjuntamente los tamaños y operaciones de un sistema híbrido-PV, mientras que la referencia [39] ha utilizado el GA para investigar tamaños óptimos y análisis económicos de un sistema híbrido de viento-microturbina-batería-PV.

En vista de los estudios mencionados, y teniendo en cuenta el tamaño de los componentes (PV- aerogeneradores-baterías), el lugar a instalar y la estrategia del manejo de energía, este trabajo de tesis utilizará la técnica iterativa para diseñar y encontrar el tamaño óptimo de la Micro-red, por el hecho de considerarse una técnica práctica y efectiva para el problema que se aborda en este trabajo.

2.5. Estrategia de gestión de la Energía (PMS)

El rendimiento económico de una micro-red depende en gran medida de las políticas operativas, es decir, los controles coordinados entre las DGUs, DSUs y la red de alta tensión, si la hay. Las estrategias de control que pertenecen a los flujos de energía

entre los componentes en una micro-red se conocen como estrategias de gestión de la energía (PMS). Con las PMS se pueden administrar los recursos eléctricos de manera eficiente y confiable, decidir las secuencias de inicio/parada, carga/descarga para los DGUs y las DSUs respectivamente y a su vez mantener un equilibrio entre los costos, la confiabilidad y la inclusión de los recursos renovables [51].

La formulación de una PMS incluye: restricciones asociadas con los límites operacionales de las fuentes generadoras de energía, balance de potencia y balance de energía de los sistemas de almacenamiento de energía [52]. En la Figura 2.5 se muestra una PMS para una micro-red (PV-aerogeneradores-batería) conectada a la red principal [6], donde Pl indica la potencia de la carga del sistema, Pre la potencia producida por las fuentes renovables, SOC (por sus siglas en inglés, *State of Charge*) estado de carga de la batería, SOC_{min} y SOC_{max} representan los límites de carga y descarga de la batería. Su funcionamiento se basa en ver la disponibilidad energética de las fuentes renovables una vez cubierta la demanda del sistema, si existe energía excedente y las baterías se encuentran por debajo de su carga máxima, estas empezarán su proceso de carga, si es lo contrario estos excedentes se suministran a la red principal y en el momento que haya un déficit de energía por parte de las fuentes renovables, la carga será compensada por las baterías y la red principal.

En numerosos estudios [53]-[54] se han enfocado en los beneficios de implementar PMS como los beneficios económicos al tener una mejor manejo de las fuentes de energía. En [55] se ha reiterado que el rendimiento de una IMG se basa principalmente en el control supervisor, y la referencia ha propuesto un esquema, en consecuencia, para un sistema PV-aerogenerador-batería. Sin tener en cuenta los tamaños óptimos, se ha analizado una PMS para un sistema de energía fotovoltaica y de energía eólica independiente en [56], y en [54], respectivamente, considerando un sistema PV-aerogeneradores-diesel-battería, también se han propuesto algunas PMS y los efectos de las PMS en el costo del ciclo de vida (LCC, por sus siglas en inglés, *Life-cycle cost*) de los equipos.

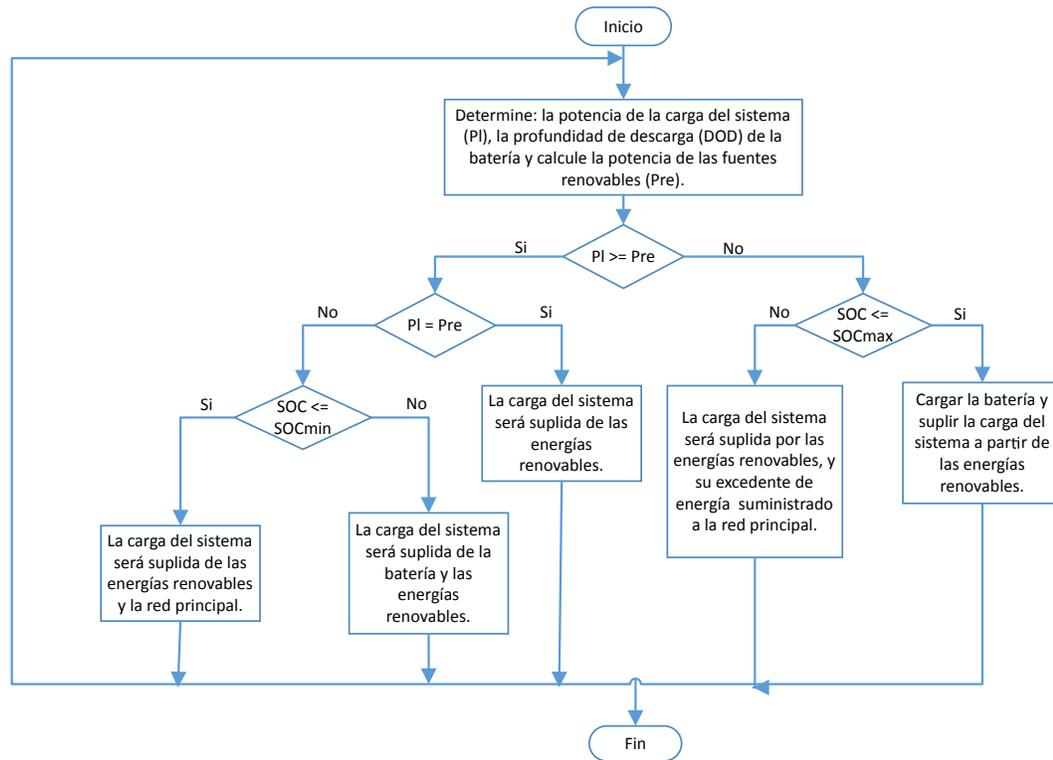


Figura 2.5. Control supervisor conectado a la red [6]

Se proponen varias estrategias de administración de potencia en [57] para un sistema de potencia híbrido autónomo integrado con almacenamiento de energía de hidrógeno. Las estrategias describen el esquema de las operaciones de almacenamiento de energía de hidrógeno a base de pilas de combustible a una potencia residual superior o inferior. La referencia [58] ha propuesto una estrategia de gestión de carga para un sistema aerogenerador-diesel-batería para que el uso de los generadores diésel (DGS, por sus siglas en inglés, Diesel Generation System) pueda minimizarse.

Los estudios de PMS antes mencionados muestran que al utilizar baterías y DGS han optimizado en su mayoría ajustando el SOC de la batería. En algunos de los estudios, las comparaciones de los PMS se han realizado solo en base al ahorro de combustible diésel, es decir, no mediante el uso de un esquema de optimización. Los aspectos de evaluación de tarifas de costos de energía y distribución horaria para la micro-red mediante el uso de los PMS no son tenidos en cuenta en los estudios antes mencionados. A su vez, en ninguno de los estudios se ha modelado estructuralmente las PMS, en el contexto de incorporar cualquier restricción de los componentes para una micro-red no aislada.

2.6. Tarifas para el suministro de Energía Eléctrica

Los sistemas de Transmisión Regional y/o Distribución Local se clasifican por niveles, en función de la tensión nominal de operación, en la Tabla 2.2 se muestran los distintos niveles de tensión eléctrica.

Tabla 2.2. Niveles de tensión eléctrica

Tipo	Valor
Baja tensión	$V \leq 1$ [kV]
Media Tensión	$1 < V \leq 35$ [kV]
Alta tensión a nivel subtransmisión	$35 < V \leq 220$ [kV]
Alta tensión a nivel transmisión	$V \geq 220$ kV

De acuerdo con información de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), existen 35 tipos de tarifas (hasta el año 2017), las cuales están clasificadas en dos grandes rubros, tarifas específicas y tarifas generales. Dentro de las *tarifas específicas* se encuentran tarifas para servicio doméstico, servicio público, agrícolas, temporal y acuícola, mientras que dentro de las *tarifas generales* están las tarifas para baja, media y alta tensión, y de servicio de respaldo e interrumpible, como se observa en la Figura 2.6. A continuación se define la aplicación de cada una de las tarifas pertenecientes a ambas clasificaciones y subclasificaciones [7]:

1. Tarifas Específicas

▪ Servicio Doméstico

Tarifa 1

Esta tarifa se aplicará a todos los servicios que destinen la energía para uso exclusivamente doméstico, para cargas que no sean consideradas de alto consumo de acuerdo a lo establecido en la Tarifa DAC (Doméstica de Alto Consumo), conectadas individualmente a cada residencia, apartamento, apartamento en condominio o vivienda.

Tarifa 1A

Esta tarifa se aplicará a todos los servicios que destinen la energía para uso exclusivamente doméstico, para cargas que no sean consideradas de alto consumo de acuerdo a lo establecido en la Tarifa DAC, conectadas individualmente a cada residencia, apartamento, apartamento en condominio o vivienda, en localidades cuya temperatura media mensual en verano sea de 25 grados centígrados como mínimo.

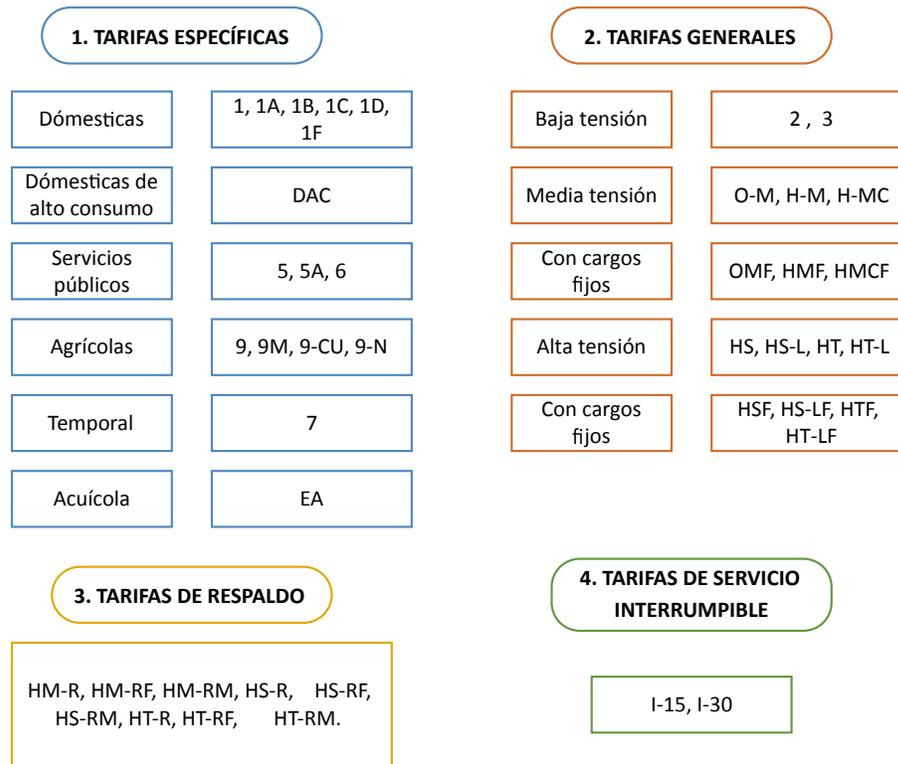


Figura 2.6. Tarifas para el suministro y venta de Energía Eléctrica en México [7]

Tarifa 1B

Esta tarifa se aplicará a todos los servicios que destinen la energía para uso exclusivamente doméstico, para cargas que no sean consideradas de alto consumo de acuerdo a lo establecido en la Tarifa DAC, conectadas individualmente a cada residencia, apartamento, apartamento en condominio o vivienda, en localidades cuya temperatura media mensual en verano sea de 28 grados centígrados como mínimo.

Tarifa 1C

Esta tarifa se aplicará a todos los servicios que destinen la energía para uso exclusivamente doméstico, para cargas que no sean consideradas de alto consumo de acuerdo a lo establecido en la Tarifa DAC, conectadas individualmente a cada residencia, apartamento, apartamento en condominio o vivienda, en localidades cuya temperatura media mensual en verano sea de 30 grados centígrados como mínimo.

Tarifa 1D

Esta tarifa se aplicará a todos los servicios que destinen la energía para uso exclusivamente doméstico, para cargas que no sean consideradas de alto consumo de acuerdo a lo establecido en la Tarifa DAC, conectadas individualmente a cada residencia, apartamento, apartamento en condominio o vivienda, en localidades cuya temperatura media mensual en verano sea

de 31 grados centígrados como mínimo.

Tarifa 1E

Esta tarifa se aplicará a todos los servicios que destinen la energía para uso exclusivamente doméstico, para cargas que no sean consideradas de alto consumo de acuerdo a lo establecido en la Tarifa DAC, conectadas individualmente a cada residencia, apartamento, apartamento en condominio o vivienda, en localidades cuya temperatura media mensual en verano sea de 32 grados centígrados como mínimo.

Tarifa 1F

Esta tarifa se aplicará a todos los servicios que destinen la energía para uso exclusivamente doméstico, para cargas que no sean consideradas de alto consumo de acuerdo a lo establecido en la Tarifa DAC, conectadas individualmente a cada residencia, apartamento, apartamento en condominio o vivienda, en localidades cuya temperatura media mensual en verano sea de 33 grados centígrados como mínimo.

Tarifa Doméstica de Alto Consumo (DAC)

Esta tarifa se aplicará a los servicios que destinen la energía para uso exclusivamente doméstico, individualmente a cada residencia, apartamento, apartamento en condominio o vivienda, considerada de alto consumo o que por las características del servicio así se requiera. Se considera que un servicio es de alto consumo cuando registra un consumo mensual promedio superior al límite de alto consumo definido para su localidad.

El límite de alto consumo se define para cada localidad en función de la tarifa en la que se encuentre clasificada, como lo indica la siguiente Tabla 2.3:

Tabla 2.3. *Límite consumo mensual, tarifas de servicio doméstico [7]*

Tarifa	Consumo [kWh/mes]
1	250
1A	300
1B	400
1C	850
1D	1.000
1E	2.000
1F	2.500

Cuando el Consumo Mensual Promedio del usuario sea superior al Límite de Alto Consumo se le reclasificará a la Tarifa Doméstica de Alto Consumo.

- **Servicio Público**

Tarifa 5

Esta tarifa sólo se aplicará al suministro de energía eléctrica para el servicio a semáforos, alumbrado y alumbrado ornamental por temporadas, de calles, plazas, parques y jardines públicos. En las zonas conurbadas del Distrito Federal, Monterrey y Guadalajara.

Tarifa 5-A

Esta tarifa sólo se aplicará al suministro de energía eléctrica para el servicio a semáforos, alumbrado y alumbrado ornamental por temporadas de calles, plazas, parques y jardines públicos en todo el país exceptuándose las circunscripciones para las cuales rige la tarifa 5.

Tarifa 6

Esta tarifa se aplicará al suministro de energía eléctrica para servicio público de bombeo de aguas potables o negras.

- **Agrícolas**

Tarifa 9

Esta tarifa se aplicará exclusivamente a los servicios en baja tensión que destinen la energía para el bombeo de agua utilizada en el riego de tierras dedicadas al cultivo de productos agrícolas y al alumbrado del local donde se encuentre instalado el equipo de bombeo.

Tarifa 9M

Esta tarifa se aplicará exclusivamente a los servicios en media tensión que destinen la energía para el bombeo de agua utilizada en el riego de tierras dedicadas al cultivo de productos agrícolas y al alumbrado del local donde se encuentre instalado el equipo de bombeo.

Tarifa 9-CU

Esta tarifa se aplicará a los servicios en baja o media tensión que destinen la energía eléctrica para el bombeo de agua hasta por el volumen que es utilizado en el riego de tierras dedicadas al cultivo de productos agrícolas. Asimismo, se aplicará al alumbrado del local donde se encuentre instalado el equipo de bombeo.

2. Tarifas Específicas

- **Baja Tensión**

Tarifa 2

Esta tarifa se aplicará a todos los servicios que destinen la energía en baja

tensión a cualquier uso, con demanda hasta de 25 kilowatts, excepto a los servicios para los cuales se fija específicamente su tarifa.

Tarifa 3

Esta tarifa se aplicará a todos los servicios que destinen la energía en baja tensión a cualquier uso, con demanda de más de 25 kilowatts, excepto a los servicios para los cuales se fija específicamente su tarifa.

■ Media Tensión

Tarifa O-M Esta tarifa se aplicará a los servicios que destinen la energía a cualquier uso, suministrados en media tensión, con una demanda menor a 100 [kW].

Tarifa H-M

Esta tarifa se aplicará a los servicios que destinen la energía a cualquier uso, suministrados en media tensión, con una demanda de 100 kilowatts o más.

Tarifa H-MC

Esta tarifa se aplicará a los servicios que destinen la energía a cualquier uso, suministrados en media tensión en la región Baja California, con una demanda de 100 kilowatts o más, y que por las características de utilización de su demanda soliciten inscribirse en este servicio, el cual tendrá vigencia mínima de un año.

■ Alta Tensión

Tarifa HS (Tarifa horaria para servicio general en alta tensión, nivel subtransmisión)

Esta tarifa se aplicará a los servicios que destinen la energía a cualquier uso, suministrados en alta tensión, nivel subtransmisión, y que por las características de utilización de su demanda soliciten inscribirse en este servicio, el cual tendrá vigencia mínima de un año.

Tarifa HS-L (Tarifa horaria para servicio general en alta tensión, nivel subtransmisión, para larga utilización)

Esta tarifa se aplicará a los servicios que destinen la energía a cualquier uso, suministrados en alta tensión, nivel subtransmisión, y que por las características de utilización de su demanda soliciten inscribirse en este servicio, el cual tendrá vigencia mínima de un año.

Tarifa HT (Tarifa horaria para servicio general en alta tensión, nivel transmisión)

Esta tarifa se aplicará a los servicios que destinen la energía a cualquier uso, suministrados en alta tensión, nivel transmisión, y que por las características de utilización de su demanda soliciten inscribirse en este servicio, el cual tendrá vigencia mínima de un año.

Tarifa HT-L (Tarifa horaria para servicio general en alta tensión, nivel transmisión para larga utilización)

Esta tarifa se aplicará a los servicios que destinen la energía a cualquier uso, suministrados en alta tensión, nivel transmisión, y que por las características de utilización de su demanda soliciten inscribirse en este servicio, el cual tendrá vigencia mínima de un año.

3. Servicio de Respaldo**Tarifa HM-R (Tarifa horaria para servicio de respaldo para falla y mantenimiento en media tensión)**

Esta tarifa se aplicará para el servicio de respaldo para falla y mantenimiento a productores externos, suministrado en media tensión, con una demanda de 500 kilowatts o más, y que por las características de utilización de su demanda soliciten inscribirse en este servicio.

Tarifa HM-RF (Tarifa horaria para servicio de respaldo para falla en media tensión)

Esta tarifa se aplicará para el servicio de respaldo para falla a productores externos, suministrado en media tensión, con una demanda de 500 kilowatts o más, y que por las características de utilización de su demanda soliciten inscribirse en este servicio.

Tarifa HM-RM (Tarifa horaria para servicio de respaldo para mantenimiento programado en media tensión)

Esta tarifa se aplicará para el servicio de respaldo para mantenimiento programado dentro del periodo establecido en este Acuerdo [59], a productores externos, suministrado en media tensión, con una demanda de 500 kilowatts o más, y que por las características de utilización de su demanda soliciten inscribirse en este servicio.

Tarifa HS-R (Tarifa horaria para servicio de respaldo para falla y mantenimiento en alta tensión, nivel subtransmisión)

Esta tarifa se aplicará para el servicio de respaldo para falla y mantenimiento a productores externos, suministrado en alta tensión, nivel subtransmisión, y que por las características de utilización de su demanda soliciten inscribirse en este servicio.

Tarifa HS-RF (Tarifa horaria para servicio de respaldo para falla en alta tensión, nivel subtransmisión)

Esta tarifa se aplicará para el servicio de respaldo para falla a productores externos, suministrado en alta tensión, nivel subtransmisión, y que por las características de utilización de su demanda soliciten inscribirse en este servicio.

Tarifa HS-RM (Tarifa horaria para servicio de respaldo para mantenimiento programado en alta tensión, nivel subtransmisión)

Esta tarifa se aplicará para el servicio de respaldo para mantenimiento

programado, dentro del periodo establecido en este Acuerdo [59], a productores externos, suministrado en alta tensión, nivel subtransmisión, y que por las características de utilización de su demanda soliciten inscribirse en este servicio.

Tarifa HT-R (Tarifa horaria para servicio de respaldo para falla y mantenimiento en alta tensión, nivel transmisión)

Esta tarifa se aplicará para el servicio de respaldo para falla y mantenimiento a productores externos, suministrado en alta tensión, nivel transmisión, y que por las características de utilización de su demanda soliciten inscribirse en este servicio.

Tarifa HT-RF (Tarifa horaria para servicio de respaldo para falla en alta tensión, nivel transmisión)

Esta tarifa se aplicará para el servicio de respaldo para falla a productores externos, suministrado en alta tensión, nivel transmisión, y que por las características de utilización de su demanda soliciten inscribirse en este servicio.

Tarifa HT-RM (Tarifa horaria para servicio de respaldo para mantenimiento programado en alta tensión, nivel transmisión)

Esta tarifa se aplicará para el servicio de respaldo para mantenimiento programado dentro del periodo establecido en este Acuerdo, a productores externos, suministrado en alta tensión, nivel transmisión, y que por las características de utilización de su demanda soliciten inscribirse en este servicio.

4. Servicio Interrumpible

Tarifa I-15

Esta tarifa será aplicable a los usuarios de las tarifas H-S, H-T, H-SL y H-TL que soliciten inscribirse adicionalmente en este servicio y que tengan una demanda máxima medida en período de punta, semipunta, intermedio o base, mayor o igual a 10,000 (diez mil) kilowatts durante los tres meses previos a la solicitud de inscripción. La inscripción a este servicio tendrá vigencia mínima de un año.

Tarifa I-30

Esta tarifa será aplicable a los usuarios de las tarifas H-S, H-T, H-SL y H-TL que soliciten inscribirse adicionalmente en este servicio y que tengan una demanda máxima medida en período de punta, semipunta, intermedio o base, mayor o igual a 20,000 (veinte mil) kilowatts durante los tres meses previos a la solicitud de inscripción. La inscripción a este servicio tendrá vigencia mínima de un año.

2.7. Certificados de Energías Limpias

Uno de los mandatos para el Sector Eléctrico, derivado de la Reforma Energética es alcanzar las metas en Generación de Energías Limpias y reducciones de emisiones contaminantes, publicado el 20 de diciembre de 2013 en el Diario Oficial de la Federación en el artículo Décimo Séptimo [60]. Para el año 2015 en la Ley de Transición Energética se establece que la Secretaría de Energía (SENER) fijará como meta una participación mínima de energías limpias en la generación de energía eléctrica del 25 % para el año 2018, del 30 % para 2021 y del 35 % para 2024 como se observa en la Figura 2.7, para los siguientes años hasta el 2050 se realizarán estrategias para promover el uso de tecnologías y combustibles mas limpios [60].

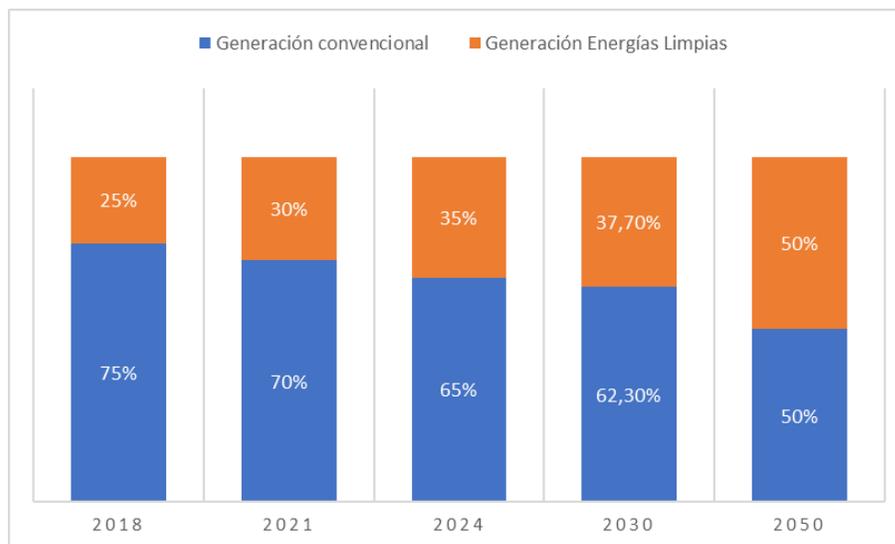


Figura 2.7. Participación de las Energías Limpias hasta el año 2050

Los Certificados de Energías Limpias (CEL) se constituyen como el principal instrumento para alcanzar dichas metas de generación de energías limpias, este concepto fue emitido por la Comisión Reguladora de Energía (CRE) que acredita la producción de un monto determinado de energía eléctrica a partir de Energías Limpias y sirve para cumplir los requisitos asociados al consumo de los Centros de Carga [61]. Es decir los CEL permiten transformar en obligaciones individuales las metas nacionales de generación limpia de electricidad, de forma eficaz y al menor costo para el país. Las obligaciones corresponden al número de Certificados de Energías Limpias que un participante obligado deberá acreditar para cubrir los requisitos de Certificados de Energías Limpias que corresponden al consumo de energía eléctrica que representan.

Los participantes obligados, ya sean de carácter público o particular, son los suministradores, los usuarios calificados participantes del Mercado Eléctrico Mayorista

(MEM), y los usuarios finales que se reciban energía por el abasto aislado, así como los titulares de los Contratos de Interconexión Legados que incluyan Centros de Carga cuya energía eléctrica no provenga en su totalidad de una Central Eléctrica limpia [62].

El requisito de Certificados de Energías Limpias correspondiente a los periodos de Obligación 2018-2021 serán los mostrados en la Tabla 2.4, valores establecidos por el SENER [63].

Tabla 2.4. *Porcentajes para la adquisición de Certificados de Energías Limpias*

2018	2019	2020	2021
5 %	5.8 %	7.4 %	10.9 %

En este capítulo se presentaron los conceptos preliminares de una micro-red, sus ventajas y desventajas, y componentes de las fuentes renovables, los cuales se utilizarán para saber que componentes se deben tener en cuenta para modelar la micro-red. A su vez se realizó un análisis de las distintas técnicas de optimización y PMS utilizadas para dimensionar de manera óptima una micro-red. Se encontró que la técnica iterativa de optimización puede utilizarse para encontrar el óptimo global, se identificó que las tarifas horarias y costos de energía por tarifa no son tenidos en cuenta en los estudios mencionados. Se consultó las diferentes tarifas de suministro de energía (al 2017) y los CEL pertinentes para la solución de la propuesta de tesis.

Capítulo 3

Modelo de las componentes de la Micro-red

En este capítulo se detalla el modelo matemático de los componentes de la micro-red de estudio, junto con el modelo de costos el cual es un criterio esencial para determinar el tamaño óptimo de la micro-red y son base para formular el problema de optimización, junto con el modelo de facturación de CFE, de esta manera se busca obtener un costo-beneficio adecuado antes de la implementación de un sistema.

3.1. Sistema de estudio

Antes de mencionar los modelos de los componentes de la micro-red, se mencionará como está integrado el sistema de estudio. En la Figura 3.1, se muestra el diagrama esquemático de la micro-red no aislada que se utilizará como caso de estudio en el presente proyecto, conformada por un subsistema de energía eólica (WPS, por sus siglas en inglés, *Wind power subsystem*), un subsistema de energía fotovoltaica (PVS, por sus siglas en inglés, *Photovoltaic subsystem*), un subsistema de almacenamiento de energía de la batería (BESS, por sus siglas en inglés, *Battery energy storage subsystem*), y la carga primaria. La micro-red operará en conexión con el sistema eléctrico para abastecer en conjunto la carga demandada.

La Figura 3.1, ilustra como el conjunto fotovoltaico comprende múltiples módulos fotovoltaicos interconectados en el punto de acoplamiento común (PCC, por sus siglas en inglés, *Point of common coupling*) a través de un inversor. Así mismo, el BESS está compuesto por un banco de baterías, un convertidor electrónico de potencia y el regulador de carga. Tanto el WPS como el PVS producen energía con un factor de potencia unitario. Sin embargo, los inversores tienen la capacidad de entregar potencia

reactiva, si así lo requiere la carga. Por lo tanto, las salidas de potencia activa y reactiva del PVS están representadas respectivamente por P^{pv} y Q^{pv} , y para el WPS la potencia activa como P^w . La potencia agregada entregada por las baterías se conoce como potencia de descarga y es denotada por P^b , y las salidas de potencia activa y reactiva del convertidor de potencia del BESS se denotan por P^{con} y Q^{con} , respectivamente. Para el sistema eléctrico la potencia activa y reactiva se definen como P^{red} , Q^{red} . Por último, las componentes de potencia activa y reactiva de la carga primaria están representados por P^l y Q^l .

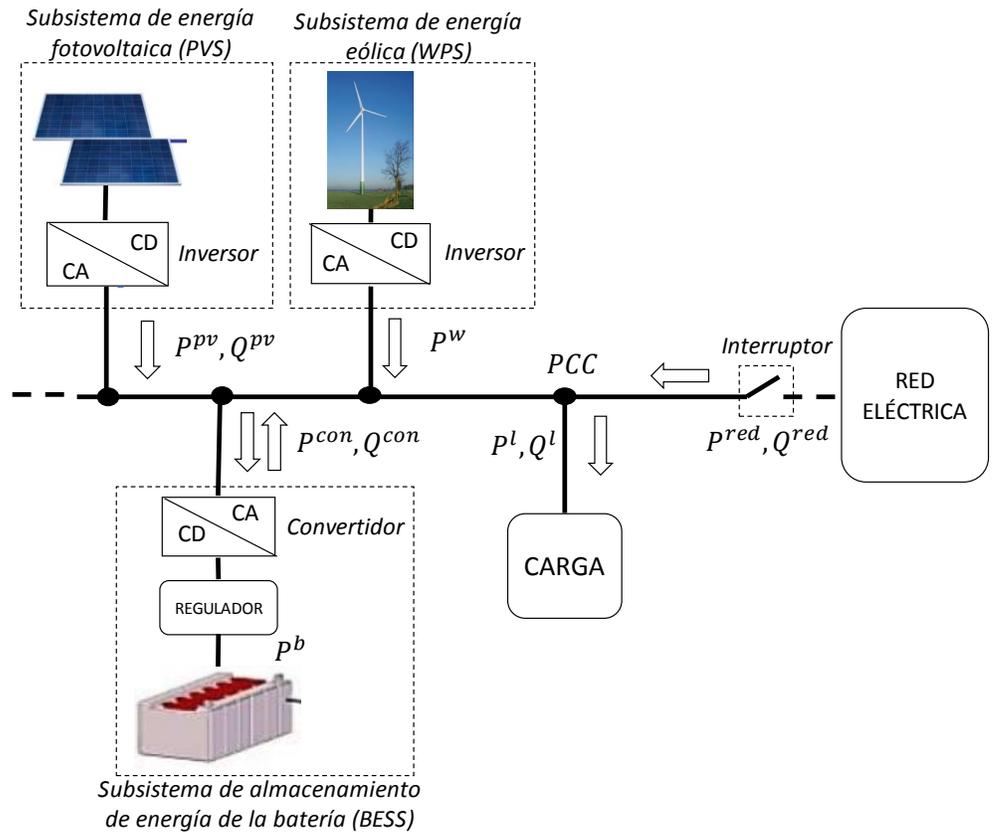


Figura 3.1. Diagrama esquemático de una Micro-red no aislada

Con el fin de mantener el funcionamiento estable de la Micro-red se requiere del balance de potencias en cualquier instante, resultando por tanto las siguientes ecuaciones:

$$P^w(t) + P^{pv}(t) + P^{con}(t) + P^{red}(t) - P^l(t) = 0 \quad (3.1)$$

$$Q^{pv}(t) + Q^{con}(t) + Q^{red}(t) - Q^l(t) = 0 \quad (3.2)$$

3.2. Modelo del subsistema de energía eólica

Los cálculos de energía y costos de producción requerirán un modelo del generador de turbina eólica para convertir velocidades de viento por hora en salidas de energía por hora. En la literatura utilizan varios modelos para el cálculo de estas variables, uno de los más utilizados es el mostrado en [64] este modelo simplificado elimina el análisis de los elementos mecánicos y eléctricos que conforman a la turbina de viento, enfocándose únicamente en el comportamiento operativo del aerogenerador en términos de producción de potencia dependiente del viento como se muestra en la ecuación 3.3. La potencia de salida P^w , característica de la velocidad del viento v_w para grandes aerogeneradores, se muestra en la Figura 3.2.

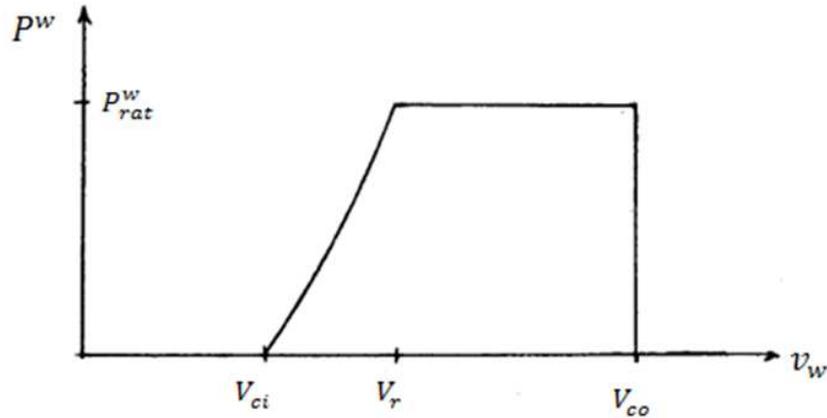


Figura 3.2. Curva de salida de potencia de la turbina eólica [8]

$$P^w = \begin{cases} 0 & , \quad v_w < V_{ci} \text{ o } v_w > V_{co} \\ (a + bv_w + c(v_w)^2)P_{rat} & , \quad V_{ci} \leq v_w \leq V_r \\ P_{rat} & , \quad V_r \leq v_w < V_{co} \end{cases} \quad (3.3)$$

Donde P_{rat}^w representa la potencia nominal del WPS respectivamente, v_w el perfil del viento en [m/s], V_{ci} , V_r y V_{co} representan las condiciones operativas en [m/s] para la velocidad del viento de corte-inicial, velocidad nominal y velocidad de corte-final, a su vez los parámetros a, b y c son calculados basándose en la V_{ci} y V_r , los cuales representan la sección no lineal del modelo y se determinan mediante las siguientes ecuaciones:

$$a = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left(V_{ci} (V_{ci} + V_r) - 4V_{ci}V_r \left(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r} \right)^3 \right) \quad (3.4)$$

$$b = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left(4(V_{ci} + V_r) \left(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r} \right)^3 - (3V_{ci} + V_r) \right) \quad (3.5)$$

$$c = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left(2 - 4 \left(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r} \right)^3 \right) \quad (3.6)$$

3.3. Modelo del subsistema fotovoltaico

El subsistema fotovoltaico del sistema de estudio (Figura 3.1) está compuesto por matrices, y estas matrices consisten en módulos. Un módulo o panel fotovoltaico, el cual es un conjunto de celdas solares conectadas en serie ó paralelo para obtener el voltaje y la corriente de salida deseada, cuando la luz del sol incide sobre una celda solar, la energía incidente de la luz solar se convierte en energía eléctrica. Por tanto, en un modelo de generador fotovoltaico se propone una función que depende del número de módulos fotovoltaicos, el área de cada módulo, eficiencia instantánea del panel y sensibilidad ante factores ambientales tales como temperatura externa y perfiles de irradiancia, necesarios para calcular la potencia de salida de un conjunto fotovoltaico [65].

$$P^{pv} = \eta_{pv} \underbrace{A_{pv} N_{pv}}_{P_{rat}^{pv}} I_s(t) \{1 - \gamma(T_c - T_{cref})\} \quad (3.7)$$

Donde η_{pv} es la eficiencia del panel, A_{pv} es el área en [m²], N_{pv} es el número de paneles fotovoltaicos en el subsistema fotovoltaico, I_s la irradiancia solar en [kW/m²], γ el coeficiente de temperatura fijado en (0,005 por cada °C), T_c la temperatura externa en [°C], T_{cref} la temperatura ambiente fijada en (25°C), P_{rat}^{pv} es la potencia nominal en [kWh] del subconjunto de paneles y P^{pv} la potencia disponible dada en [kWh].

3.4. Modelo de la carga

En México, se ha incrementado el número de instalaciones de micro-redes eléctricas de bajos niveles de potencia, principalmente para consumo residencial, y en

menor medida a niveles industriales. Por esto se utilizará, como carga primaria, una empresa a nivel subtransmisión (35-220 [kV]) de corriente alterna por lo tanto, el sistema tendrá dos componentes, la componente de potencia activa y la componente de potencia reactiva. Para la componente de potencia activa se contempla una curva de consumo variable, la cual representa un consumo promedio real y para la componente de potencia reactiva se calcula de la siguiente manera [66]:

$$P^l = S^l \cos \varphi \quad (3.8)$$

$$Q^l = S^l \sin \varphi \quad (3.9)$$

Y el factor de potencia como la relación entre la potencia activa P^l y la potencia aparente S^l ó el coseno del ángulo (φ) que forman los fasores de la corriente y la tensión [67]:

$$f.p. = \frac{P^l}{|S^l|} = \cos \varphi \longrightarrow \varphi = \cos^{-1}(f.p.) \quad (3.10)$$

$$\frac{P^l}{\cos \varphi} = \frac{Q^l}{\sin \varphi} \quad (3.11)$$

$$Q^l = P^l \tan \varphi \quad (3.12)$$

Mediante manejo de ecuaciones se obtiene la relación de potencia reactiva con las variables conocidas, como:

$$Q^l = P^l \tan (\cos^{-1}(f.p.)) \quad (3.13)$$

3.5. Modelo de la red eléctrica

La red eléctrica será la encargada de suplir la carga que no pueda ser solventada por la micro-red. Por lo tanto la potencia activa y aparente que la red estará suministrando están dadas como:

$$P^{red} = P^l - (P^{pv} + P^w) \quad (3.14)$$

$$S_{rat}^{red} = \sqrt{(P^{red})^2 + (Q^l)^2} \quad (3.15)$$

3.6. Modelo de la batería

La necesidad de energía no siempre coincide en el tiempo con la captación que se obtiene mediante las fuentes de energía renovables, debido al carácter intermitente de estas fuentes de energía, por lo que es necesario disponer de un sistema de almacenamiento (baterías) que hagan frente a la demanda en momentos de mayor consumo, haciendo el sistema de generación de energía eléctrica más robusto, autónomo, fiable y competitivo [9]. Sabiendo la importancia del uso de baterías en el sistema, es importante elegir de manera adecuada estos equipos para satisfacer la demanda de carga primaria tanto como sea posible durante las horas/días de autonomía. Los parámetros principales de un banco de baterías son la profundidad de descarga (DOD, por sus siglas en inglés, *Depth of Discharge*) el cual afecta significativamente la vida útil de la batería, la potencia nominal, la capacidad de energía nominal, el costo unitario. Los parámetros y sus efectos se tienen en cuenta en el modelo del banco de baterías [65].

Si la capacidad de energía nominal del banco de baterías es E_{rat}^b , entonces el nivel máximo de energía es E_{max}^b y el nivel mínimo de energía es E_{min}^b , para el banco de baterías se formulan como [65]:

$$E_{max}^b = 0,98E_{rat}^b \quad (3.16)$$

$$E_{min}^b = E_{rat}^b (1 - DOD_{max}) \quad (3.17)$$

Debido a las variaciones diurnas y estacionales de la irradiación solar, el conjunto fotovoltaico no produce constantemente la potencia nominal. Por lo tanto, el inversor del PVS puede utilizarse para suministrar potencia reactiva a la carga primaria. Si la potencia real instantánea de un conjunto fotovoltaico es $P^{pv}(t)$ y S_{con}^{pv} es la potencia aparente nominal del convertidor PVS, entonces la potencia reactiva que el PVS debe suministrar viene dada por:

$$Q^{pv} = \sqrt{(S_{con}^{pv})^2 - (P^{pv})^2} \quad \text{donde} \quad (S_{con}^{pv})^2 \geq (P^{pv})^2 \quad (3.18)$$

Cuando se requiere que la potencia nominal de la matriz fotovoltaica se entregue al PCC, se necesita que la potencia nominal aparente del inversor PVS sea mayor ó igual a la salida de potencia nominal de la matriz fotovoltaica.

Si la demanda de potencia reactiva de carga es alta, es decir, Q^l es mayor que Q^{pv} , entonces la potencia reactiva de carga restante Q_{rem}^l es suministrada por BESS, si el convertidor BESS entrega potencia reactiva, entonces la componente de potencia real, P_{ava}^{con} , del convertidor BESS se expresa como:

$$P_{ava}^{con} = \sqrt{(S_{rat}^{con})^2 - (\max\{0, (Q^l - Q^{pv})\})^2} \quad (3.19)$$

y

$$Q_{rem}^l = \max\{0, (Q^l - Q^{pv})\} \quad (3.20)$$

Donde S_{rat}^{con} es la potencia nominal aparente del convertidor BESS. Por lo tanto, S_{rat}^{con} debe ser mayor que Q_{rem}^l cuando el sistema eléctrico no esté presente. Si la red eléctrica está presente para suministrar potencia activa, la potencia reactiva puede ser compartida por ésta y por el convertidor BESS, como:

$$Q^{con} = \frac{S_{rat}^{con}}{S_{rat}^{con} + S_{rat}^{red}} (Q_{rem}^l) \quad (3.21)$$

Donde Q^{con} es la componente de potencia reactiva del convertidor de BESS. La variable S_{rat}^{red} , es la potencia nominal aparente de la red eléctrica. Por lo tanto, la cantidad máxima de potencia activa que el convertidor de BESS puede entregar se calcula como:

$$P_{ava}^{con} = \sqrt{(S_{rat}^{con})^2 - (Q^{con})^2} \quad (3.22)$$

Durante el proceso de **carga**, la potencia y la energía del banco de baterías se expresan como [65]:

$$P_{ava}^b = \min \left[P_{rat}^b, \max \left(0, \frac{\{E_{max}^b - SOC(t)\}}{\Delta t} \right) \right] \quad (3.23)$$

$$P^b(t) = \min (P_{exc}, P_{ava}^b, P_{ava}^{con}) \quad (3.24)$$

$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t) (1 - \delta) + \eta_c^b P^b(t) \Delta t \quad (3.25)$$

y durante el proceso de **descarga**, la potencia y la energía del banco de baterías se expresan como:

$$P_{ava}^b = \min \left[P_{rat}^b, \max \left(0, \frac{\{SOC(t) - E_{min}^b\}}{\Delta t} \right) \right] \quad (3.26)$$

$$P^b(t) = \min (P_{def}, P_{ava}^b, P_{ava}^{con}) \quad (3.27)$$

$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t)(1 - \delta) - \frac{P^b(t)}{\eta_d^b} \Delta t \quad (3.28)$$

Donde P^b es la máxima potencia tomada para la carga y para la descarga de la unidad según corresponda al proceso y SOC es la energía almacenada del banco de baterías. La potencia P_{exc} y P_{def} corresponde al excedente y el déficit de generación de energías renovables, respectivamente; es decir son la diferencia entre la generación renovable instalada y la potencia de la carga. El parámetro δ es el coeficiente de autodescarga del banco de baterías, y η_c^b, η_d^b son la eficiencia de carga y descarga del BESS. Cuando el tiempo mínimo de carga o descarga del banco de baterías es T_{chr} , entonces la potencia nominal del banco de baterías P_{rat}^b , puede formularse como [65]:

$$P_{rat}^b = \frac{E_{max}^b}{T_{chr}} \quad (3.29)$$

Ahora, en referencia al modelo operativo, al encontrarse en el estado de carga o descarga dependiendo del $SOC(t)$ de la batería y la E^b se encuentra dentro de los límites operativos, el parámetro P^b considera la disponibilidad y la demanda energética. En el proceso de carga, P^b establece una comparativa entre la potencia excedente producida por la micro-red P_{exc} , la tasa de carga de la batería P_{ava}^b y la cantidad máxima de potencia activa que el convertidor del BESS puede entregar P_{ava}^{con} , la batería solo podrá almacenar el mínimo de estas potencias. De igual forma en el proceso de descarga, P^b compara el déficit de energías renovables P_{def} , la P_{ava}^b y la P_{ava}^{con} , ya que, si el nivel de consumo excedente por cubrir esta por debajo de P_{ava}^b y P_{ava}^{con} , la batería únicamente cubriría ese consumo restante.

3.7. Modelos de costos

Se analiza los modelos económicos para cada uno de los elementos que compone la micro-red. Este modelo económico LCC (por sus siglas en inglés, *Life cycle cost*)

considera principalmente el costo capital, costo de reposición, costo de operación y mantenimiento, y valor de salvamento de cada uno de los subsistemas. En este análisis, todos los flujos de costos son convertidos a valor presente neto (NPV, por sus siglas en inglés, *Net present value*), esto se hace para evaluar los proyectos de inversión a largo plazo. Este factor es calculado como [68]:

$$NPV(r_1, N_{lp}) = \frac{(1 + r_1)^{N_{lp}} - 1}{r_1(1 + r_1)^{N_{lp}}} \quad (3.30)$$

$$r_1 = \frac{(1 + r_2)}{(1 + r_3)} - 1 \quad (3.31)$$

donde r_1 , r_2 y r_3 son la tasa de descuento, tasa de interés y tasa de inflación respectivamente. N_{lp} es el tiempo de vida del proyecto. Se asume que los PVS y WPS tienen el mismo tiempo de vida del proyecto.

3.7.1. Modelo de costos para el WPS

Este modelo de costos incluye: el costo capital C_c^w , el costo de operación y mantenimiento C_{om}^w , y el valor de salvamento C_s^w , de todo el subsistema, los cuales son calculados como [65]:

$$C_c^w = \beta_c^w P_{rat}^w \quad (3.32)$$

$$C_{om}^w = \beta_{om}^w P_{rat}^w NPV(r_1, N_{lp}) \quad (3.33)$$

$$C_s^w = \beta_s^w P_{rat}^w \left(\frac{1 + r_3}{1 + r_2} \right)^{N_{lp}} \quad (3.34)$$

$$C_T^w = C_c^w + C_{om}^w - C_s^w \quad (3.35)$$

Donde β_c^w , β_{om}^w y β_s^w son el costo capital, costo de operación y mantenimiento, y valor de salvamento para un subsistema de energía eólica de 1.2 [kW] respectivamente. P_{rat}^w es la potencia nominal del WPS, éste valor indicará el tamaño final dentro la micro-red.

3.7.2. Modelo de costos para el PVS

Este modelo de costos incluye: el costo capital C_c^{pv} , el costo de operación y mantenimiento C_{om}^{pv} , valor de salvamento C_s^{pv} y el costo total C_T^{pv} , de todo el subsistema, los cuales son calculados como [65]:

$$C_c^{pv} = \beta_c^{pv} P_{rat}^{pv} \quad (3.36)$$

$$C_{om}^{pv} = \beta_{om}^{pv} P_{rat}^{pv} NPV(r_1, N_{lp}) \quad (3.37)$$

$$C_s^{pv} = \beta_s^{pv} P_{rat}^{pv} \left(\frac{1+r_3}{1+r_2} \right)^{N_{lp}} \quad (3.38)$$

$$C_T^{pv} = C_c^w + C_{om}^{pv} - C_s^{pv} \quad (3.39)$$

Donde β_c^{pv} , β_{om}^{pv} y β_s^{pv} son el costo capital, costo de operación y mantenimiento, y el valor de salvamento para un subsistema de energía fotovoltaica de 1 [kW] respectivamente. P_{rat}^{pv} es la potencia nominal del PVS, éste valor indicará el tamaño final dentro la micro-red.

3.7.3. Modelo de costos para el BESS

Este modelo de costos incluye: el costo capital C_c^b , el costo de operación y mantenimiento C_{om}^b , y el costo total C_T^b , de todo el subsistema, los cuales son calculados como [65]:

$$C_c^b = \beta_c^b E_{rat}^b + \beta_r^b E_{rat}^b \sum_{i=2}^{N_{pb}} \left(\frac{1+r_3}{1+r_2} \right)^{(i-1)N_b} \quad (3.40)$$

$$C_{om}^b = \beta_{om}^b E_{rat}^b NPV(r_1, N_{lp}) \quad (3.41)$$

$$C_T^b = C_c^b + C_{om}^b \quad (3.42)$$

Donde β_c^b y β_{om}^b son el costo capital y costo de mantenimiento y operación para un banco de baterías de 1 [kWh], respectivamente. N_{pb} es la cantidad de veces que se debe comprar el banco de baterías durante el ciclo de vida útil del proyecto y N_b es la vida útil del banco de baterías. E_{rat}^b es la energía nominal del *BESS*, éste valor indicará el tamaño final dentro la micro-red.

3.7.4. Modelo de costos para el controlador de carga *BESS*

El tiempo de vida del banco de baterías y el controlador de carga es usualmente más corto que la vida útil del proyecto. Un controlador de carga para el banco de baterías es calculado a partir de este modelo, el cual incluye: el costo capital C_c^{chr} , el costo de operación y mantenimiento C_{om}^{chr} , valor de salvamento C_s^{chr} y el costo total C_T^{chr} , de todo el subsistema, los cuales son calculados como [65]:

$$C_c^{chr} = \beta_c^{chr} P_{rat}^b \sum_{i=1}^{N_{pcc}} \left(\frac{1+r_3}{1+r_2} \right)^{(i-1)N_{chr}} \quad (3.43)$$

$$C_{om}^{chr} = \beta_{om}^{chr} P_{rat}^b NPV(r_1, N_{lp}) \quad (3.44)$$

$$C_T^{chr} = C_c^{chr} + C_{om}^{chr} \quad (3.45)$$

Donde β_c^{chr} es el costo capital y β_{om}^{chr} es el costo de operación y mantenimiento para un controlador de carga de 0,2 [kW], N_{chr} y N_{pcc} respectivamente denotan el ciclo de vida y la cantidad de veces que se compra el controlador de carga. P_{rat}^b es la potencia nominal del controlador de carga del *BESS*, éste valor indicará el tamaño final dentro la micro-red.

3.7.5. Modelo de costos para el convertidor *BESS*

El costo capital C_c^{con} , el costo de operación y mantenimiento C_{om}^{con} , valor de salvamento C_s^{con} y el costo total C_T^{con} , de todo el subsistema, los cuales son calculados como [65]:

$$C_c^{con} = \beta_c^{con} S_{rat}^{con} + \beta_r^{con} S_{rat}^{con} \sum_{i=2}^{N_{pc}} \left(\frac{1+r_3}{1+r_2} \right)^{(i-1)N_{con}} \quad (3.46)$$

$$C_{om}^{con} = \beta_{om}^{con} S_{rat}^{con} NPV(r_1, N_{lp}) \quad (3.47)$$

$$C_s^{con} = \beta_s^{con} S_{rat}^{con} \sum_{i=1}^{(N_{pc}-1)} \left(\frac{1+r_3}{1+r_2} \right)^{(i-1)N_{con}} \quad (3.48)$$

$$C_T^{con} = C_c^{wcon} + C_{om}^{con} - C_s^{con} \quad (3.49)$$

Donde β_c^{con} , β_{om}^{con} y β_s^{con} son el costo capital, costo de operación mantenimiento y el valor de salvamento para un convertidor del BESS de 0,2 [kVA], respectivamente. N_{pc} es el número de veces que se compra el convertidor y N_{con} es la vida útil del convertidor. S_{rat}^{con} es la potencia aparente nominal del convertidor de BESS, éste valor indicará el tamaño final dentro la micro-red.

El modelo económico que describe la inversión de la micro-red es el total de todos los costos antes mencionados, expresado como:

$$LCC = C_T^w + C_T^{pv} + C_T^b + C_T^{chr} + C_T^{con} \quad (3.50)$$

3.8. Modelo de Facturación de Energía Eléctrica

El siguiente modelo de facturación de Energía Eléctrica, se aplica para servicio general en alta tensión (H-S, H-SL, H-T, H-TL), fijado por la Comisión Federal de Electricidad. Como se indicó en el capítulo 2, la CFE maneja diferentes tarifas para el cobro del consumo energético, por ejemplo en instalaciones industriales, empresas cuyas características de demanda son tan elevadas se debe solicitar un servicio en niveles de subtransmisión. Se examinará la tarifa H-SL, nivel subtransmisión, para larga duración, aplicada a la Región Geográfica Sur, a la cual pertenece el estado de Guanajuato.

En la Tabla 3.1 se muestra de manera general el modelo de facturación de Energía Eléctrica, como ejemplo los datos son tomados de un recibo de una empresa a nivel industrial. A continuación se indica de manera detallada como se encuentra cada uno de los conceptos del modelo de facturación, a su vez estos conceptos son resaltados en una factura de CFE, ver Anexo A.

Tabla 3.1. Modelo de facturación de Energía Eléctrica

Conceptos	Importe \$MXN
Cargo por Energía	2'245.647,34
Cargo por Demanda Facturable	612.864,28
Bonificación ó recargo por factor de potencia	-60.028,74
Subtotal	2'798.482,88
Iva 16 %	447.757,264
Derecho alumbrado público	102,65
TOTAL	3'246.342,79

3.8.1. Cargo por Energía

El cargo por energía para las Tarifas específicas Alta tensión, se define como la sumatoria de la energía consumida en cada período (punta, intermedia, base) multiplicada por el respectivo cargo para la energía de punta, intermedia y base, según corresponda:

$$\begin{aligned} \text{Cargo por Energía} = & (\text{kWh punta}) * (\text{cargo por kWh punta}) + \\ & (\text{kWh intermedio}) * (\text{cargo por kWh intermedio}) + \\ & (\text{kWh base}) * (\text{cargo por kWh base}) \end{aligned}$$

Donde la *Energía de Punta* corresponde a la energía consumida en período Punta, la *Energía Intermedia* corresponde a la energía consumida en período Intermedio y la *Energía Base* corresponde a la energía consumida en período Base.

Los periodos de punta, intermedio y base se definen en cada una de las regiones tarifarias para distintas temporadas del año, como se describe en el Diario Oficial de la Federación [10]. Esto significa que en cada tarifa las regiones tienen distintas temporadas y períodos. En el Anexo B, se muestra la distribución horaria para la tarifa HS-L, región central, así mismo se muestran los cargos para la energía de punta, intermedia y base, aplicables para cada uno de los meses del año 2017.

3.8.2. Modelo de Demanda Facturable

La CFE cobra cargos tanto por demanda facturable (DF) como por consumo neto de energía, y a su vez existen dos modelos para el cálculo de la demanda facturable, según la región a tratar [69].

- *Región baja california*

$$DF = DP + 0,199 [\max(DS - DP, 0)] + \quad (3.51)$$

$$FRI [\max(DI - DPS, 0)] + FRB [\max(DB - DPSI, 0)]$$

- *Regiones Baja California Sur, Central, Noreste, Noroeste, Norte, Peninsular y Sur*

$$DF = DP + FRI [\max(DI - DP, 0)] + FRB [\max(DB - DPI, 0)] \quad (3.52)$$

Donde:

DP es la demanda máxima medida en el periodo de punta.

DS es la demanda máxima medida en el periodo de semipunta.

DI es la demanda máxima medida en el periodo intermedio.

DB es la demanda máxima medida en el periodo de base.

DPS es la demanda máxima medida en los periodos de punta y semipunta.

$DPSI$ es la demanda máxima medida en los periodos de punta, semipunta e intermedio.

DPI es la demanda máxima medida en los periodos de punta e Intermedio.

El símbolo “ \max ” significa máximo, es decir, cuando la diferencia de demandas entre paréntesis sea negativa, ésta tomará el valor cero.

FRI y FRB son factores de reducción que tendrán los siguientes valores, dependiendo de la región tarifaria (ver Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Factores de reducción según región tarifaria [10]

Región	FRI	FRB
Baja California	0,066	0,033
Baja California Sur	0,124	0,062
Central	0,200	0,100
Noreste	0,200	0,100
Noroeste	0,200	0,100
Norte	0,200	0,100
Peninsular	0,200	0,100
Sur	0,200	0,100

Demanda máxima medida

Las demandas máximas medidas en los distintos periodos se determinan mensualmente por medio de instrumentos de medición, que indican la demanda media en kilowatts, durante cualquier intervalo de 15 [min] del periodo en el cual el consumo de energía eléctrica sea mayor que en cualquier otro intervalo de 15 [min] en el periodo correspondiente de facturación.

En la figura 3.3 se muestra un perfil aleatorio de demanda energética como ejemplo para dar claridad al concepto de DF, cada color indica un intervalo de 15 [min]. Se puede observar un pico de demanda que podría ser interpretado como la demanda máxima (intervalo de color rojo y verde) lo cual no es correcto porque no se encuentra en ninguna de las ventanas de 15 [min]. Por tanto la demanda máxima correcta corresponde al intervalo de color verde como se indica en la Figura 3.3.

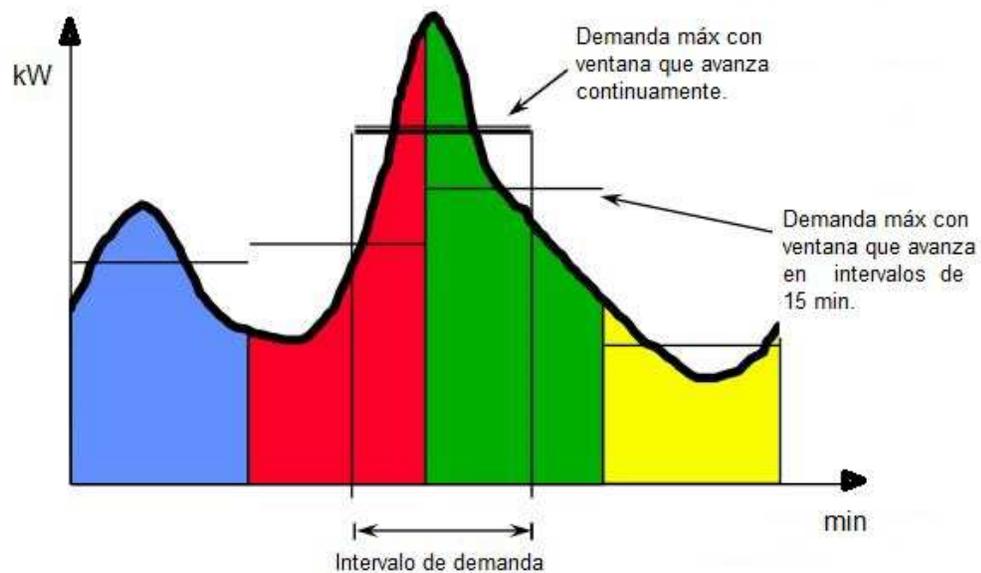


Figura 3.3. *Demanda máxima medida*

Cabe resaltar que se toma un valor de demanda máxima medida para cada uno de los periodos (punta, intermedio y base), luego estos valores de demanda máxima son utilizados en la ecuación (3.50) y (3.51) según corresponda la región de estudio, para obtener la Demanda Facturable.

3.8.3. Bonificación o recargo por factor de potencia

Factor de potencia (f.p.)

Es un indicador sobre el correcto aprovechamiento de la energía, de forma general es la cantidad de energía que se ha convertido en trabajo [10].

$$f.p. = \frac{\sum kWh}{\sqrt{(\sum kWh)^2 + (\sum kVArh)^2}} * 100 \quad (3.53)$$

El factor de potencia por debajo del 90 % significa energía desperdiciada por la empresa y en consecuencia un incremento innecesario en el importe de la facturación. De acuerdo con el comportamiento del factor de potencia se aplica una penalización cuando el f.p. es < al 90 % o bonificación cuando el f.p. es > al 90 % conforme a la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. *Bonificación o penalización por f.p.*

Concepto	Fórmula	% Máximo aplicable
Bonificación	$\frac{1}{4} \left[1 - \left(\frac{90}{f.p.} \right) \right] * 100$	2.5
Penalización	$\frac{3}{5} \left[\left(\frac{90}{f.p.} \right) - 1 \right] * 100$	120

3.9. Formulación del problema de optimización

Se busca una configuración que obtenga la máxima ganancia para el usuario, logrando disminuir el uso de la red eléctrica y obteniendo el menor costo de inversión al aprovechar de manera adecuada los recursos renovables dependiendo de la zona de estudio, e involucre la administración de la energía en función de las diferentes tarifas horarias de la empresa de suministro de energía.

Un modelo de optimización es propuesto para encontrar la mejor configuración y se presenta a continuación:

$$\text{maximizar } (G) \quad (3.54)$$

$$G = f_1 - (f_2 + LCC) \quad (3.55)$$

Donde G hace referencia de manera generalizada a la función objetivo que se busca maximizar, y, f_1 , f_2 y LCC representan el conjunto de funciones que integran a la función G .

La ecuación 3.56 muestra el costo que representa la demanda que debe cubrir la empresa de suministro de energía para un periodo total N^{lp} y la ecuación 3.57 evalúa el costo de la cantidad de energía que la micro-red suministra a la carga del sistema.

$$f_1 = \sum_{n=1}^{(N^{lp})} \left(\underbrace{\sum_{t=1}^T P^l(t) T_{CFE}(t)}_{\text{demanda}} \right) \quad (3.56)$$

$$f_2 = \sum_{n=1}^{(N^{lp})} \left(\underbrace{\sum_{t=1}^T (P^l(t) - (N_{pv}P^{pv}(t) + N_wP^w(t) + N_bP^b(t))) T_{CFE}(t)}_{\text{suministrada}} \right) \quad (3.57)$$

Donde N^{lp} indica el tiempo de vida del proyecto, P^l es la carga del sistema, T_{CFE} es costo de las tarifas horarias de la empresa de suministro de energía (CFE). P^{pv} , P^w , P^b indican la aporte energético por parte de los paneles, aerogeneradores y baterías respectivamente, N_{pv} , N_w , N_b son la cantidad de equipos que representan la configuración con mejores beneficios para el usuario.

Sin embargo la maximización de la función objetivo “ G ” esta sujeta al conjunto de restricciones que se presentan la región factible:

$$s.a \quad \begin{cases} P^{red} + P^w + P^{pv} + P^b = P^l \\ P_{min}^w \leq P^w \leq P_{max}^w \\ P_{min}^{pv} \leq P^{pv} \leq P_{max}^{pv} \\ P_{min}^{con} \leq P^b \leq P_{max}^{con} \end{cases} \quad (3.58)$$

Donde P^{red} es la potencia que aporta la red eléctrica, cuando la micro-red no logra suplir la demanda de la carga. P_{min} y P_{max} definen los límites mínimos y máximos de potencia que podrán tener los PVS , WPS , $BESS$ dentro de la micro-red.

Este capítulo ha presentado la formulación y modelos necesarios para dar solución al problema de optimización para una micro-red no aislada. Se desea que

esta sea capaz de localizar el máximo global de la función “ G ” manteniendo una alta confiabilidad del suministro de energía en la micro-red y al mismo tiempo optimice los tamaños de los componentes y la PMS. Se tiene en cuenta el efecto de la potencia reactiva en cada uno de los modelos de las componentes de la micro-red.

Capítulo 4

Descripción del método propuesto

Un problema importante para una micro-red conectada a la empresa de suministro es la administración de la energía y el dimensionamiento apropiado para ésta. De modo que de forma óptima se determine tanto la operación como el dimensionamiento de la micro-red, para reducir los costos de producción y el consumo de energía de la red eléctrica convencional. En este contexto, se propone realizar el dimensionamiento de una micro-red eléctrica compuesta por fuentes convencionales y fuentes no convencionales de generación de energía. El sistema de dimensionamiento óptimo que se formulará debe obtener la configuración de las fuentes de generación de energía de forma que se obtenga el mayor beneficio económico una vez realizada la inversión. En la Figura 4.1 se ilustra un esquema de la metodología propuesta para el dimensionamiento de una micro-red.

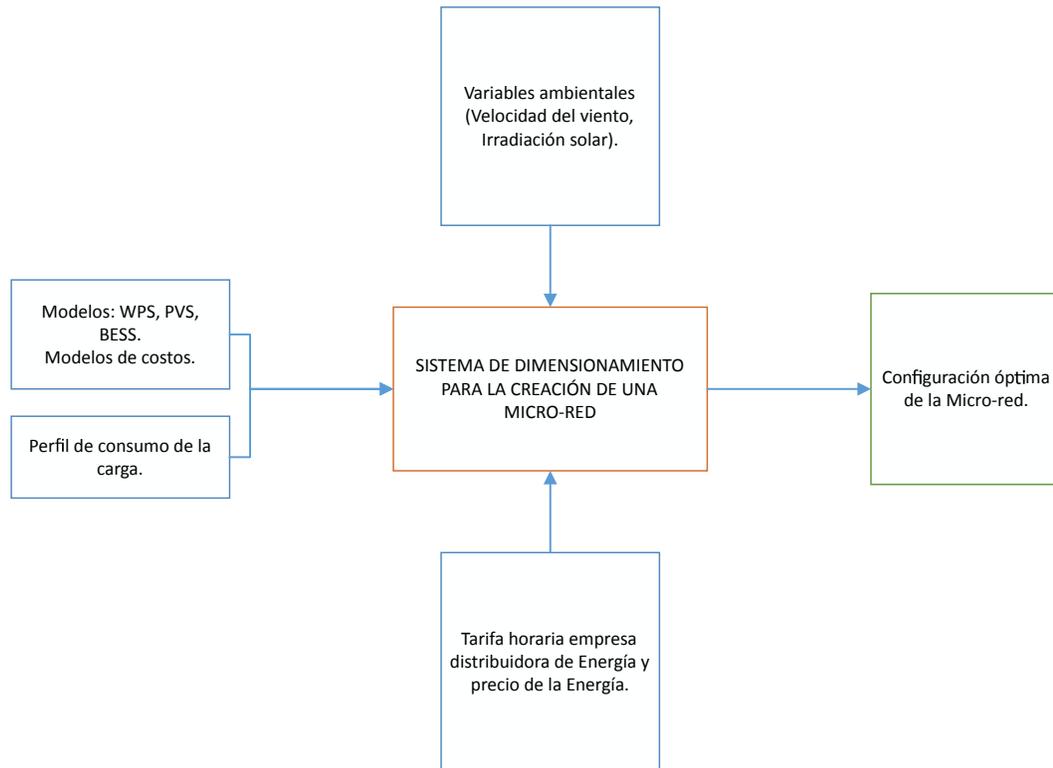


Figura 4.1. Esquema de la metodología propuesta para el dimensionamiento óptimo de una micro-red

El sistema de dimensionamiento óptimo de la micro-red tiene como variables de entrada los modelos de los subsistemas de los paneles, aerogeneradores y baterías, a su vez los modelos de costos, el perfil de consumo de la carga, la irradiación solar, la velocidad del viento, el precio de la energía y las tarifas horarias de la empresa distribuidora de energía. Como la velocidad del viento y la irradiación solar exhiben variaciones diurnas y estacionales, el algoritmo propuesto aprovecha las ventajas de la simulación cronológica basada en el año meteorológico y la enumeración basada en técnicas iterativas.

4.1. Algoritmo de optimización

El sistema de dimensionamiento propuesto identifica el máximo global y simultáneamente proporciona la capacidad adecuada de los componentes, para esto se propone un algoritmo simple y robusto para el dimensionamiento óptimo de la micro-red no aislada, empleando un método iterativo. El algoritmo propuesto incorpora el efecto de potencias activas y reactivas sobre los tamaños de los componentes de la micro-red,

a su vez incluye las variables de entrada nombradas en la Figura 4.1. El diagrama de flujo se muestra en la Figura 4.2 y el algoritmo opera como se describe a continuación:

Para establecer la mejor configuración se hace un análisis cada hora, durante los 365 días del año, en un lapso de 20 años, el cual es el periodo de vida útil de la micro-red.

1. Inicializar los valores para el tiempo $t = 1[\text{hr}]$ sugeridos por los valores mínimos y máximos junto con el tamaño de paso, los cuales definen el número de la configuración N de las variables a ser optimizadas.
2. Incluir la velocidad del viento y la irradiación solar por hora a partir de datos meteorológicos.
3. Actualizar los cargos por: demanda facturable, energía de punta, energía intermedia, energía base en el tiempo t , según la empresa distribuidora de energía.
4. Incorporar los modelos de WPS, PVS, BESS y perfil de consumo de la carga para hacer un cálculo del aporte energético de las fuentes renovables por hora y compararlo con la carga.
5. Calcular el aporte energético por tarifa horaria, según disponibilidad de los recursos renovables.
6. Utilizar las potencias y cargas generadas por hora en la estrategia de manejo de energía (PMS), ésta se explicará a detalle en la sección 4.1.1.
7. Calcular la nueva demanda a pagar a la empresa suministradora de energía debido al aporte energético de la micro-red de estudio, a su vez realizar el cálculo de excedentes de energía y verificar el cumplimiento de las restricciones, haciendo énfasis en la restricción de balance de potencia.
8. Realizar análisis económico, según facturación de la empresa de suministradora de energía, la cual se explicará en la sección 4.1.3.
9. Regresar al quinto paso y realizar el proceso durante 8760 horas para calcular el costo anual al incluir las energías renovables.
10. Incluir modelo de costos para WPS, PVS, BESS y convertidores, de esta manera obtener una proyección de los costos de inversión y el nuevo costo de facturación a 20 años.
11. Almacenar la configuración, es decir, el vector de las variable de decisión.
12. Regresar al primer paso para el siguiente conjunto de vectores N de las variables de decisión.

13. Se repite el ciclo hasta que se cumplan los criterios de parada del algoritmo. Finalmente se comparan todos los vectores obtenidos y se identifica el vector de variable de decisión que proporciona la máxima ganancia para el usuario.

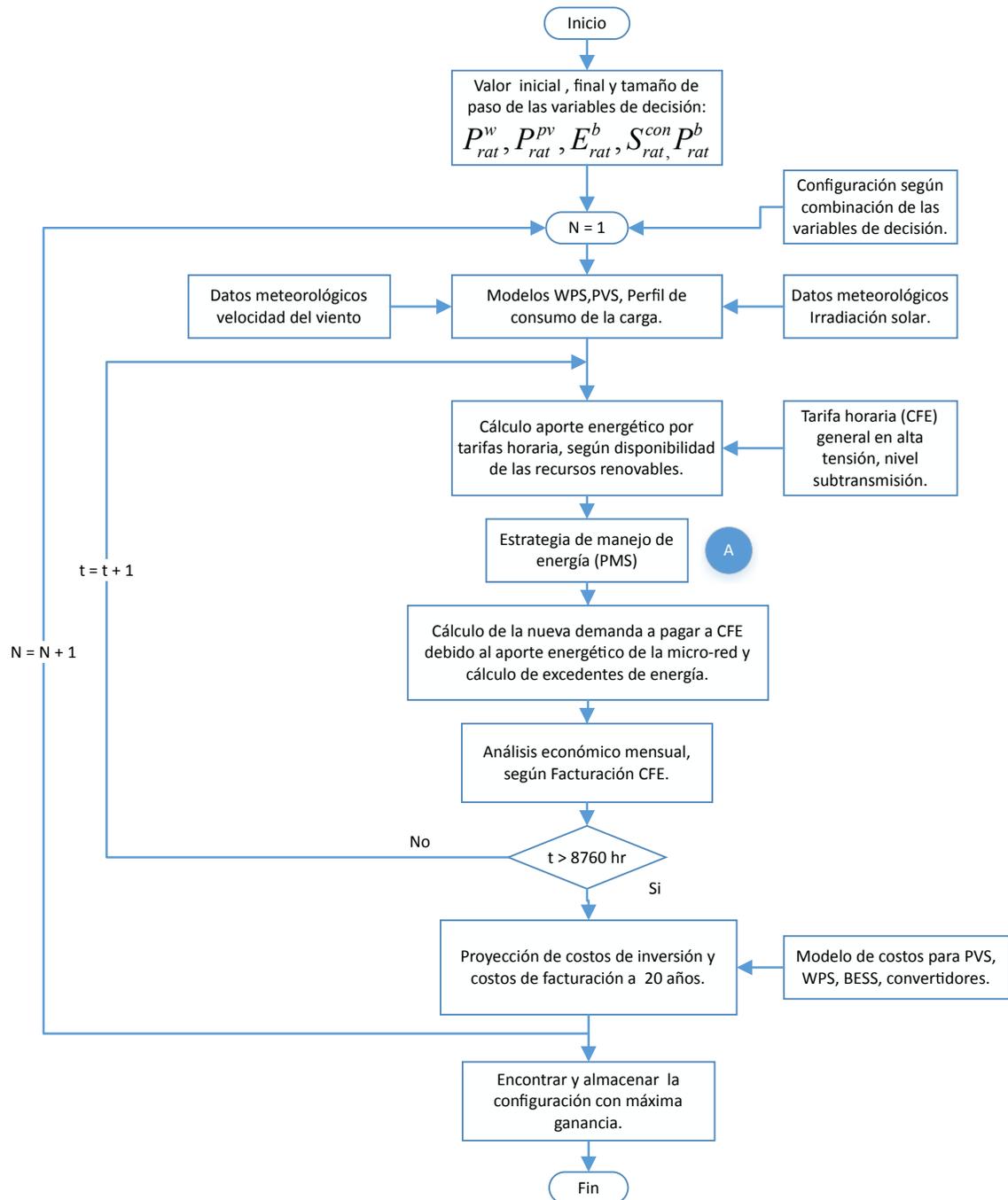


Figura 4.2. Algoritmo de optimización

4.1.1. Estrategia de gestión de la energía utilizada en el algoritmo de optimización

Dado que se requiere una estrategia de gestión de la energía (PMS) para la optimización del uso adecuado de las baterías y el suministro de energía de los sistemas de almacenamiento, este capítulo modifica la PMS del Capítulo 2 para adecuarla a los requerimientos deseados.

Aquí surgen dos posibles casos, el primero viene dado en los periodos donde la tarifa de la empresa de suministro de energía es de mayor costo y la generación energética de la micro-red es mínima o nula, es decir, la energía producida por la micro-red no se estaría aprovechando en los periodos de mayor costo y no se lograría analizar si esto causa un mayor costo-beneficio para el usuario. El segundo caso se presenta en los periodos donde el nivel de generación de la micro-red está por encima de la demanda energética, por lo que la generación excedente se dejaría de aprovechar.

En la Figura 4.3 y la Figura 4.4 se muestra el diagrama de la PMS modificada a los casos planteados.

- El diagrama de flujo de la Figura 4.3 comienza con la compensación de la potencia reactiva de la carga, con los recursos disponibles en la micro-red (en este estudio se utilizará la red principal para compensar la potencia reactiva de la carga) y se calcula los tamaños restantes de los componentes en base a la formula 3.22 para el cálculo de la potencia activa. A su vez se determina el SOC y las variables a utilizar para el modelo de BESS analizado en Capítulo 3, sección 3.6. El análisis de las variables se realiza para todo t dentro de un periodo operativo de 8760 horas.
- Debido a los requerimientos deseados para los BESS estos pueden ser modelados para operar en función de un proceso de carga (Sc) ó descarga (Sd), de esta manera se da solución a los casos planteados anteriormente.

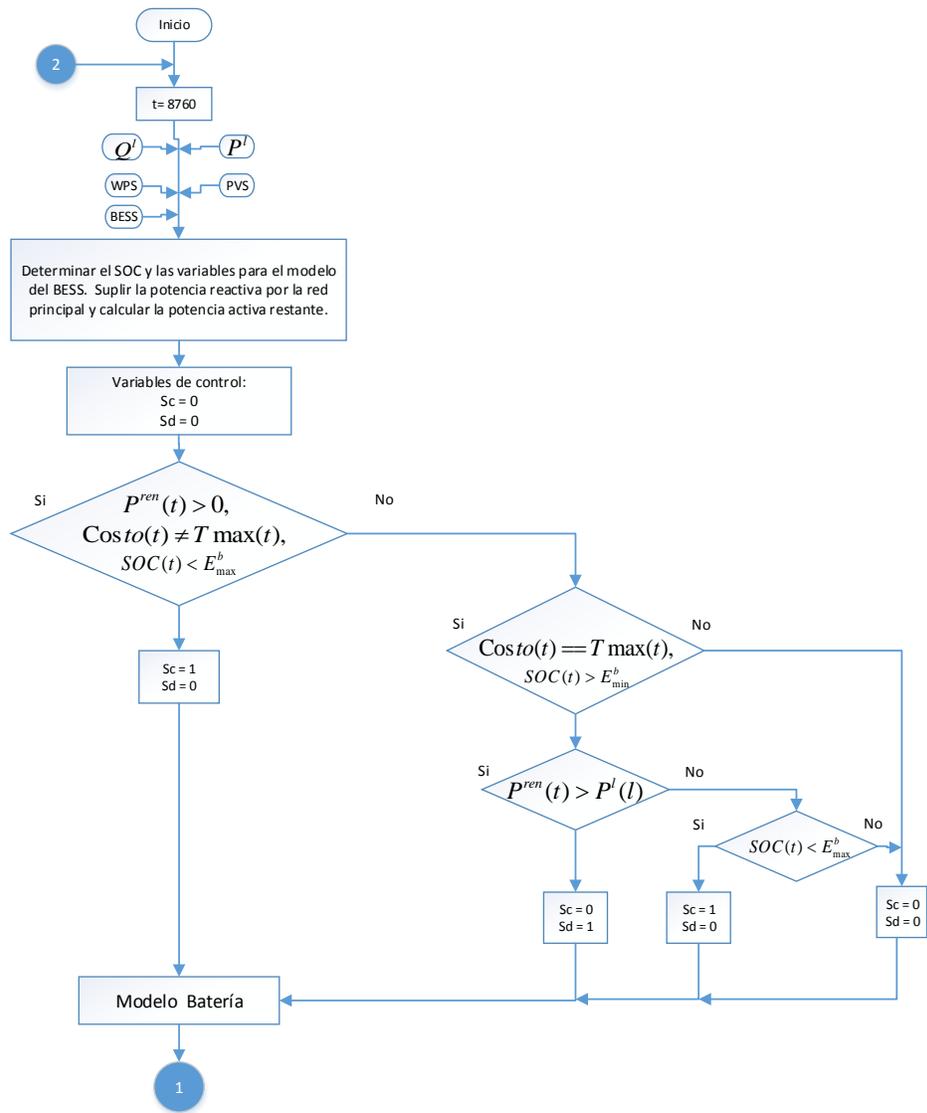


Figura 4.3. Diagrama de flujo de la PMS parte 1

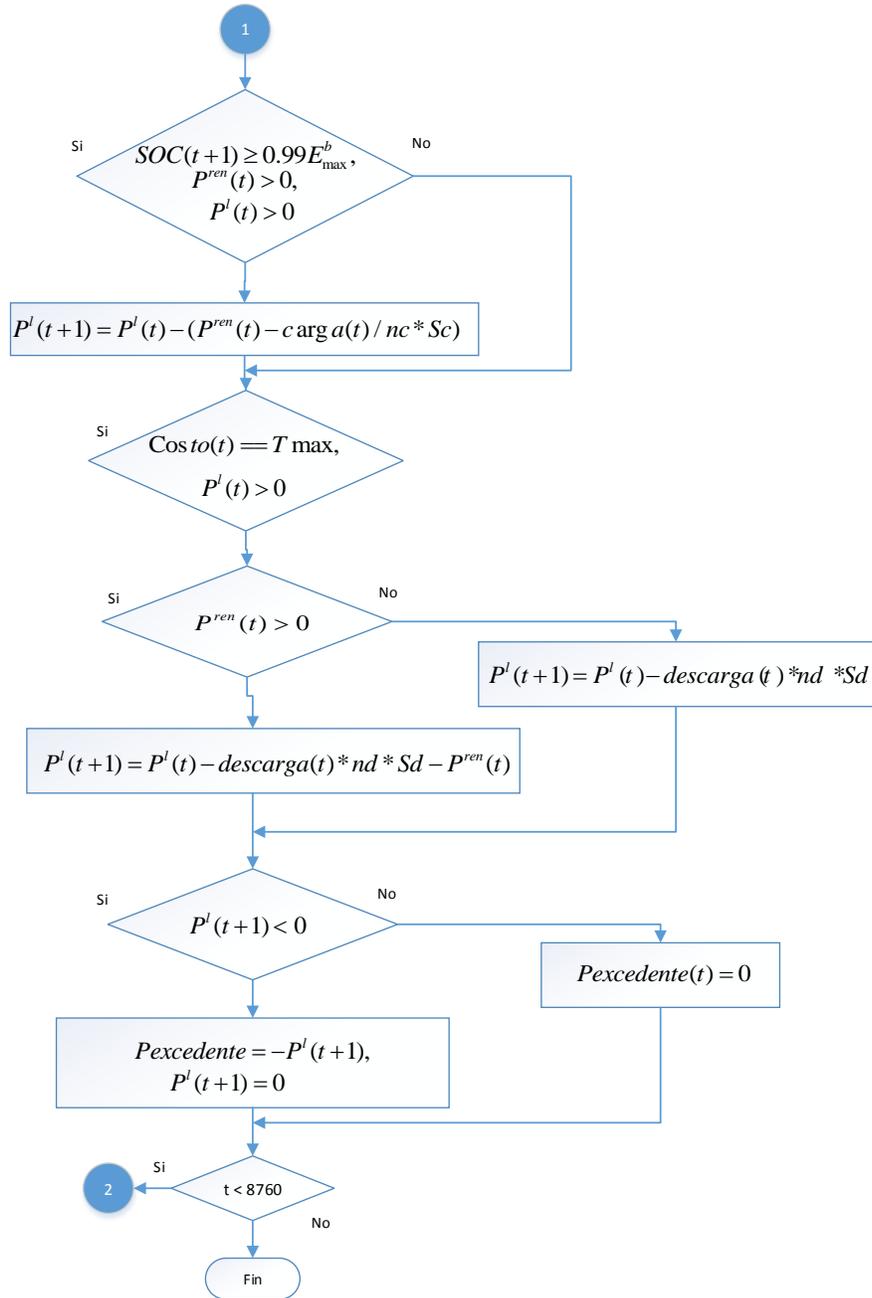


Figura 4.4. Diagrama de flujo de la PMS parte 2

Proceso de carga ($Sc = 1$) y descarga ($Sd = 1$) del banco de baterías:

- A continuación se definieron varias restricciones para que los BESS empiecen su proceso de carga, uno de ellos es, si existe potencia renovable disponible, si el SOC de la batería es menor a E_{max}^b y si se encuentra en un periodo distinto a la tarifa horaria de mayor costo (es decir tarifa de punta) de acuerdo a lo establecido por la empresa distribuidora de energía, la variable de control Sd se activa ($Sd = 1$) y empieza el proceso de carga hasta un valor máximo posible.
- Si existe un déficit de generación renovable y a su vez no se cumplen las restricciones precedentes, se verifica si el proceso se encuentra en la tarifa de punta ó tarifa de mayor costo, según corresponda al día en análisis y se evalúa el SOC , si es mayor a la E_{min}^b , en esta situación la variable de control Sc se activa ($Sc = 1$) empezando el proceso de descarga para el banco de baterías.
- En el caso que se encuentre en la tarifa de mayor costo, que exista un excedente de energía renovable y el SOC sea menor a E_{max}^b se continuará con el proceso de carga y se activará la variable de control Sd .

Una vez definidas las restricciones para la activación de las variables de control de carga Sc y de descarga Sd , estas pasan al modelo de la batería para definir el nuevo SOC de BESS en función de la disponibilidad de las fuentes renovables y de la demanda energética respectivamente, con esto se define el porcentaje de carga y descarga que se utilizará para suministrar a la carga del sistema.

Banco de baterías y las fuentes de energía renovables compensan la demanda energética del sistema:

Como se observa en la Figura 4.4 se muestran las restricciones para la compensación de la demanda energética del sistema.

- Cuando el SOC sea mayor o igual a $0,99E_{max}^b$ del banco de baterías y exista potencia renovable disponible, la potencia activa del sistema será suministrada por la generación de las energías renovables y la carga almacenada en el BESS.
- El déficit de potencia activa de la carga será compensado por el banco de baterías como prioridad, si la tarifa se encuentra en periodo de mayor costo. Y si a su vez existe potencia renovable, el déficit de carga será compensado por el banco de baterías y las fuentes de energía renovables.
- Si el nuevo estado de la potencia activa de la carga del sistema P^l es menor a cero, esto indicará que se presenta generación de energía excedente la cual puede ser utilizada para la venta de energía, ésta se analizará en el Capítulo 5, Sección 5.4, Caso de estudio 3.

- La red principal cubrirá la demanda de potencia activa de la carga del sistema que no puede ser suministrada por el banco de baterías y las fuentes renovables.

4.1.2. Modelo de prueba para evaluar la eficacia de la PMS

Para mostrar el comportamiento de la PMS se establece el perfil de demanda de la carga y el perfil energético de la micro-red que se plantean en [70], Figura 4.5. En este caso la micro-red no se encuentra interconectada a la red eléctrica, es decir tiene una operación en modo aislado de la red, esto porque el interés principal es validar la PMS. Adicionalmente el precio de la energía varía cada hora, como se mencionó en el Anexo B, existen diferentes tarifas y a su vez diferentes periodos que se definen en cada una de las regiones tarifarias para distintas temporadas del año. Esta estrategia se implementará en los casos de estudio que se abordarán en el capítulo 5, la PMS se evaluará mediante simulaciones en el entorno Matlab[®].

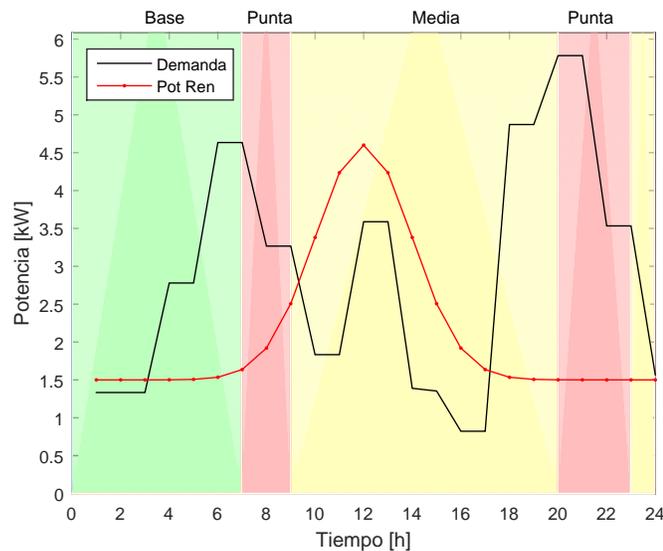


Figura 4.5. Demanda de la carga y generación de renovables

En la Figura 4.5 se presentó la demanda de la carga (línea negra) y se representa los aportes de energías renovables (generación eólica y solar) a la micro-red (línea roja). Además, se gráfica los periodos base, intermedio y punta (franjas verde, amarillo y rojo respectivamente), los cuales representan el perfil de costos de la energía para un día, donde el periodo de punta indica un mayor costo.

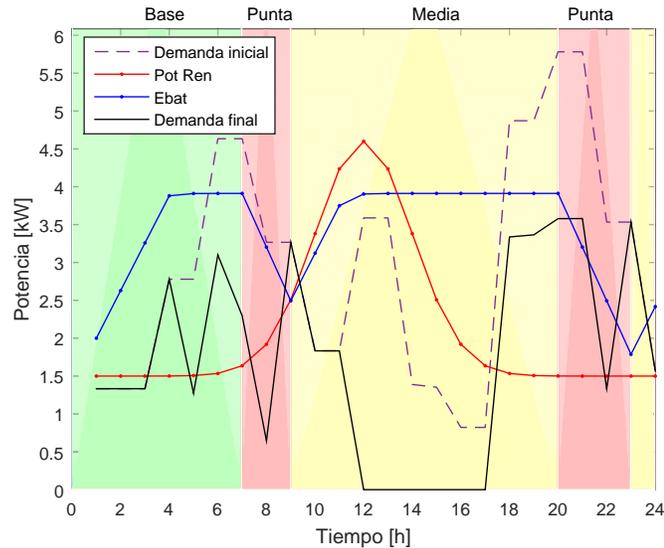


Figura 4.6. Respuesta a la estrategia de manejo de energía

Es importante notar en la Figura 4.6 la variación de la energía dada por la batería. Si se analiza el comportamiento de ésta en las horas iniciales de operación (entre la 1 y las 4 horas), la batería se está cargando, y por lo tanto se comporta como una demanda adicional para la micro-red. A las 7 horas de operación, cuando se encuentra en el periodo de punta, la demanda de energía para la micro-red es suplida por la batería y las energías renovables si hay disponibilidad. Una vez terminado el periodo de punta, la batería inicia su proceso de carga y se mantiene en su nivel máximo (entre las 12 y las 20 horas) hasta encontrar el periodo de punta y suplir la demanda de energía de la carga. Como resultado de la estrategia de manejo de energía planteada, se observa la conmutación del banco de baterías y las fuentes de energías renovables durante las 24 horas del día para cubrir con la demanda exigida por la carga, priorizando los periodos de punta, a fin de evitar los precios más altos y buscando obtener una reducción del consumo en las horas pico de demanda, como se puede apreciar en la Figura 4.6 (línea negra, demanda final).

Este capítulo ha modelado una PMS, compuesta por *WPS*, *PVS*, *BESS* utilizando diagramas de flujo basándose en la PMS presentada en el capítulo 2, se considera la inclusión de la distribución horaria y la tarifa de costos de la empresa de suministro de energía para su análisis, a su vez se considera la red eléctrica como fuente principal suministrador de energía reactiva. La PMS hace parte de la metodología propuesta que se utiliza para determinar de manera efectiva la configuración óptima de la micro-red.

Capítulo 5

Análisis de resultados

En este capítulo se aplica la metodología propuesta desarrollada en el capítulo 4, a su vez se indica la empresa a nivel industrial que fue utilizada en el estudio. Finalmente se presentan los resultados obtenidos para 3 casos de estudio.

5.1. Industria de estudio: Daltile México

Como empresa a nivel industrial se estudió la empresa Daltile México, la cuál fabrica y distribuye pisos, muros, porcelánicos, cerámicos y piedra natural a nivel mundial. La empresa Daltile, analizada en este trabajo, se encuentra ubicada a las afueras de la ciudad de Salamanca, Guanajuato, México. Daltile se fundó en 1947 como Dallas Ceramic Tile, en 1995 cambia su razón social por Daltile México, a su vez se asocia con American Olean, segunda empresa en su ramo. En el 2012 inicia operaciones la planta Salamanca; la cual se enfoca en cubrir las necesidades del mercado nacional.

Daltile México al tener una demanda elevada, tiene un contrato con CFE en nivel subtransmisión, cuya demanda contratada es de 10.800 [kW] y tarifa HSL. La demanda diaria de energía promedio para una semana de la empresa se presenta en la Figura 5.1, como se observa CFE maneja diferentes tarifas para empresas cuyas características de demanda son elevadas, se puede observar en color verde la **tarifa base**, la cual tiene un menor costo; en amarillo la **tarifa intermedia** y en color rojo la **tarifa punta**, ésta última tiene el mayor costo.

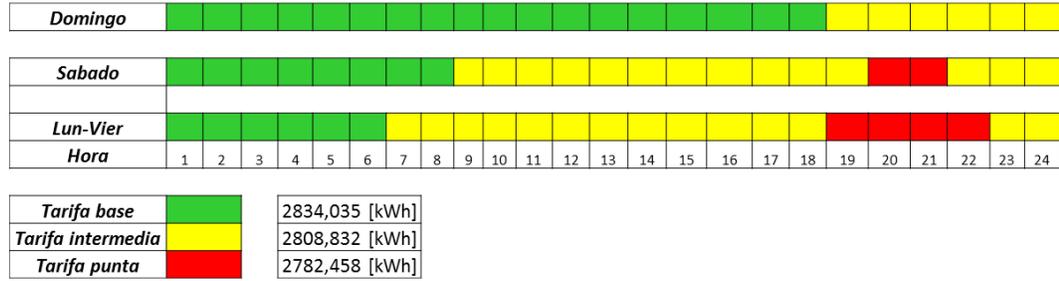


Figura 5.1. Distribución del consumo diario, empresa Daltile durante una semana del mes enero de 2017

5.2. Parámetros de la micro-red

La topología de la micro-red eléctrica que se observa en el capítulo 3, Figura 3.1, fue utilizada para la realización de los tres casos de estudio. Esta micro-red no aislada cuenta con una carga cuya demanda de energía debe ser cubierta en todo momento. Los parámetros de operación utilizados se definen en las Tablas 5.1 y 5.2.

Tabla 5.1. Parámetros económicos para la optimización del sistema

Componentes	Tamaño	Costo capital β_c , \$MXN	Costo de reposición β_r , \$MXN\$	Costo O&M β_{om} , \$MXN	Valor de salvamento β_s , \$MXN	Vida útil años
WPS	1 kW	16.017	-	570/año	1.520	20
PVS	1,2 kW	28.937	-	380/año	1.900	20
BESS	1 kWh	3.800	3.800	114/año	-	5
Convertidor	0,2 kVA	3.400	3.400	190/año	-	10
Control de carga	0,2 kW	1.900	1.900	114/año	-	10
Medidor bidireccional	ION 8650-B	95.150				

Tabla 5.2. Datos para la simulación

Parámetros	Variable	Valor
Periodo del proyecto	N_{pl}	20 años
Tasa de interés	r_2	7 %
Tasa de inflación	r_3	6,77 %
Eficiencia PVS	η_{pv}	17,3 %
Área panel de 290 [W]	A_{pv}	1,68 [m ²]
Velocidad de corte-in del viento	V_{ci}	3,5 [m/s]
Velocidad nominal del viento	V_r	12 [m/s]
Velocidad de corte-out del viento	V_{co}	23 [m/s]
Periodo bajo observación	t	8.760 [h]
Almacenamiento DOD_{max}	DOD_{max}	60 %
Estado de carga inicial BESS	SOC_{in}	50 % de la nominal
Factor de potencia	$f.p.$	0,98
Autodescarga de la batería	δ	0,2 % por hora
Eficiencia del convertidor (descarga)	η_d	95 %
Eficiencia del rectificador (carga)	η_c	95 %
Tiempo de descarga de BESS	T_c	6 [h]

5.3. Datos de entrada para la metodología propuesta

Los límites de operación de los equipos que conforman la micro-red son uno de los datos de entrada para el esquema de la metodología propuesta en el capítulo 4, los cuales se muestran en la Tabla 5.3, estos están restringidos a disponibilidad del espacio que haya en la empresa para ser ubicados. En este caso el área total de la empresa Daltile es de 294.975 [m²], de los cuales 80.640 [m²] se consideraron para ubicar los PVS, esta área corresponde al techo de la empresa, como se aprecia en la Figura 5.2. Para ubicar los WPS se consideró un área de 76.993 [m²] ver Figura 5.3.

Tabla 5.3. Límites y tamaño de paso para las variables de decisión

Componentes	Unidad	Valor mínimo	Tamaño de paso	Valor máximo
PVS P_{rat}^{pv}	kW	0	1.500	10.500
WPS P_{rat}^w	kW	0	53	371
BESS E_{rat}^b	kWh	0	2.000	12.000
Convertidor S_{rat}^{con}	kVA	0	333	2.000
Control de carga P_{rat}^b	kW	0	333	2.000



Figura 5.2. Área considerada para ubicación de PVS

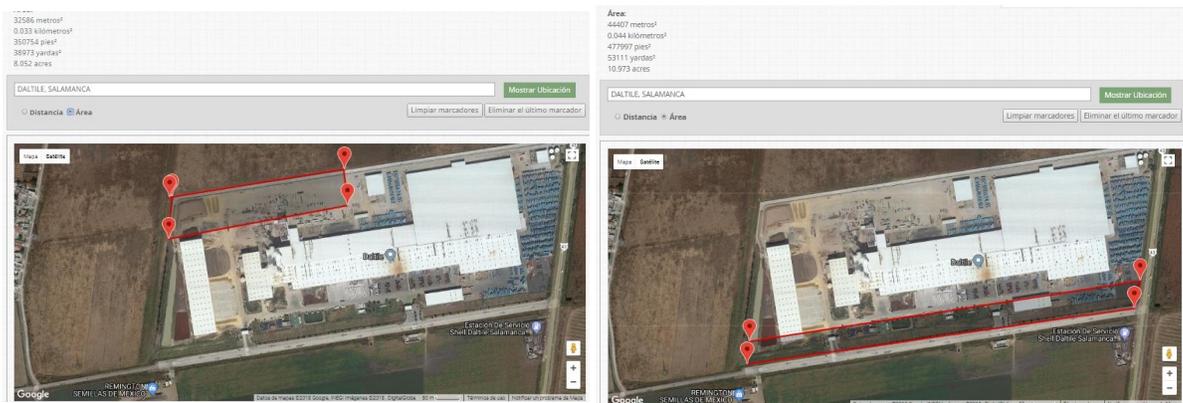


Figura 5.3. Área considerada para ubicación de WPS

En la Tabla 5.4 se muestra la cantidad máxima de equipos que se pueden ubicar según el área respectiva que ocupa cada equipo, cabe resaltar que para la ubicación de los aerogeneradores sobre el terreno, deben tenerse en cuenta las condiciones del viento como velocidades medias, direcciones predominantes, rafagosidad y vientos extremos, así como los aspectos correspondientes al terreno disponible tales como: la disposición característica de su eje de rotación y la distancia entre ellos, además de las características de los propios aerogeneradores, como el tamaño, el tipo y la altura de las torres [71].

Cuando existe un viento con una dirección predominante, en general se recomienda una distribución en filas alineadas, con separación transversal (perpendicular a la del viento dominante) entre turbinas de tres a cinco veces el diámetro del rotor, y de cinco a nueve veces el diámetro del rotor en dirección del viento

dominante. Cuando el viento tiene frecuentes cambios de dirección con respecto a la velocidad predominante, los aerogeneradores se colocan al tresbolillo (filas paralelas) [71]. Con base en lo anterior y observando el perfil de velocidad del viento variable no dominante de la zona de estudio, ver Figura 5.4b, se supone que la mejor ubicación sería en filas paralelas con separación de 4 veces el diámetro del rotor. El diámetro del rotor para este caso de estudio es de 2,88 [m] (ver características del equipo Anexo C).

Tabla 5.4. *Cálculo de la cantidad de equipos a ubicar dependiendo del área*

Equipo	Área disponible [m ²]	Área por equipo [m ²]	Total Equipos
PVS (1,2 [kW])	80.640	6,72	12.000
PWS (1 [kW])	76.993	207,36	371

Los perfiles de carga del sistema, velocidad del viento e irradiación solar, se han obtenido de diferentes fuentes. El perfil de carga de la empresa Daltile México se obtuvo a partir de un recibo de la CFE correspondiente al mes Enero del año 2015. La velocidad del viento y la irradiación solar se obtuvieron del Centro de Ciencias Atmosféricas de la Universidad de Guanajuato [72], para un periodo de 12 años a partir del año 2006 al 2017. Con los cuales se hizo un promedio para obtener un perfil aproximado para el periodo de estudio de la micro-red, a fin de determinar de forma más exacta la energía eléctrica que generaría la micro-red. En la Figura 5.4 se muestra el histórico promedio por hora de la velocidad del viento y la irradiación solar. En la Figura 5.5 se presentan las variaciones del precio de la energía en México para un año no específico, los cuales cambian mensualmente y en los que se observa como estos precios van en aumento.

En el Anexo B se encuentran los datos de cargos por demanda facturable, cargos para los periodos de Punta, Intermedio y Base, y la Distribución horaria para el año 2017, los cuales corresponden a la empresa de suministro de energía CFE, utilizados como referencia para calcular el costo aproximado de la energía que se dejaría de consumir de CFE.

Para realizar la interconexión de la micro-red eléctrica con la red de alta tensión se necesita de un *Contrato de interconexión a la red de alta tensión* el cual aplica para todos las empresas industriales con una capacidad instalada arriba de 0,5 [MW] independiente si se venderá o no energía. Este contrato de interconexión a la red tiene un precio de \$800.000 MXN y es un gasto único para la realización del proyecto.

Por último *los modelos de costos y modelos operativos de las DGUs, DSUs* vistos en el capítulo 3 se utilizaron como datos de entrada para la metodología propuesta.

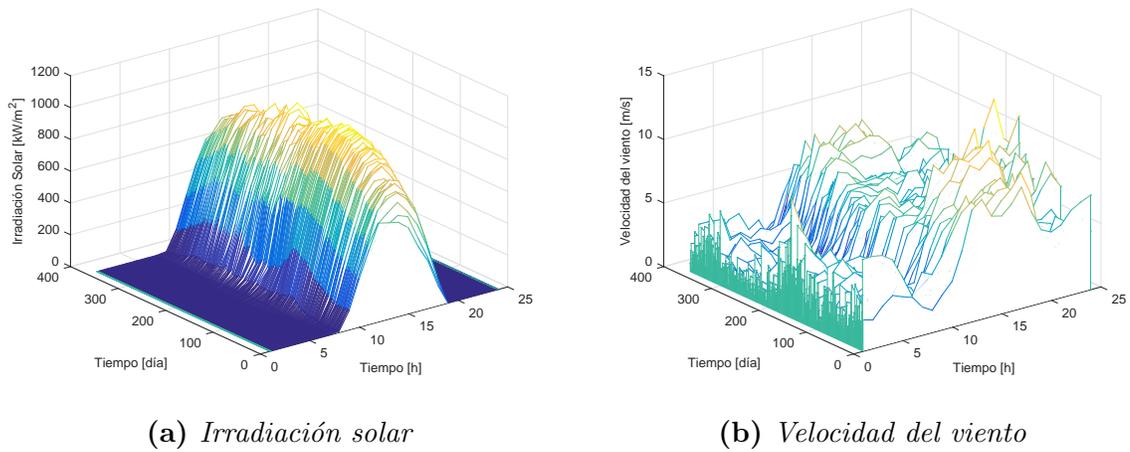


Figura 5.4. Histórico promedio por hora durante un año: Irradiación solar y velocidad del viento

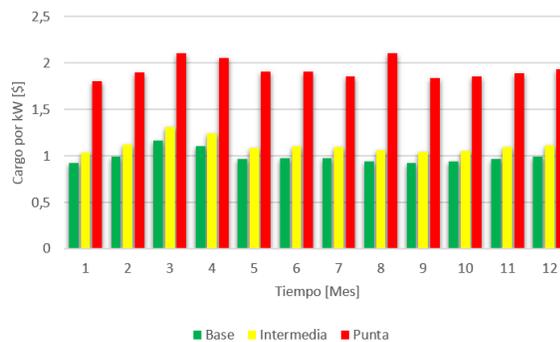


Figura 5.5. Variación precio de energía de la red principal

5.4. Caso de estudio 1

En este primer caso de estudio se considera la micro-red no aislada sin elementos de almacenamiento, se analiza la viabilidad del proyecto y se presenta la solución de la metodología propuesta planteada en la Figura 4.1, cuya finalidad es encontrar la configuración que obtenga un mejor costo-beneficio al usuario, reduciendo los niveles de demanda exigida a la red principal al incluir costos de inversión de la micro-red, logrando con esto el máximo ahorro económico en el periodo de vida útil del proyecto. A continuación se muestran los resultados simulados obtenidos:

1. Resultado de la aplicación del método de optimización.

Como resultado de la metodología planteada, se obtiene diferentes configuraciones de la micro-red como se presenta en la Figura 5.6. De la gráfica se observa el impacto del tamaño de *PVS* y *WPS* sobre el ahorro económico. La Figura 5.6, muestra 8 curvas lineales para 8 diferentes tamaños de *PVS*, en la cual el tamaño de *PVS* se mantiene fijo entretanto el tamaño de *WPS* va cambiando. Las curvas demuestran que el ahorro económico es máximo a medida que el tamaño de *WPS* disminuye, esto debido a que la velocidad del viento donde está ubicada la empresa industrial es mínima para cubrir la demanda exigida por la carga, no siendo rentable el uso de estos equipos.

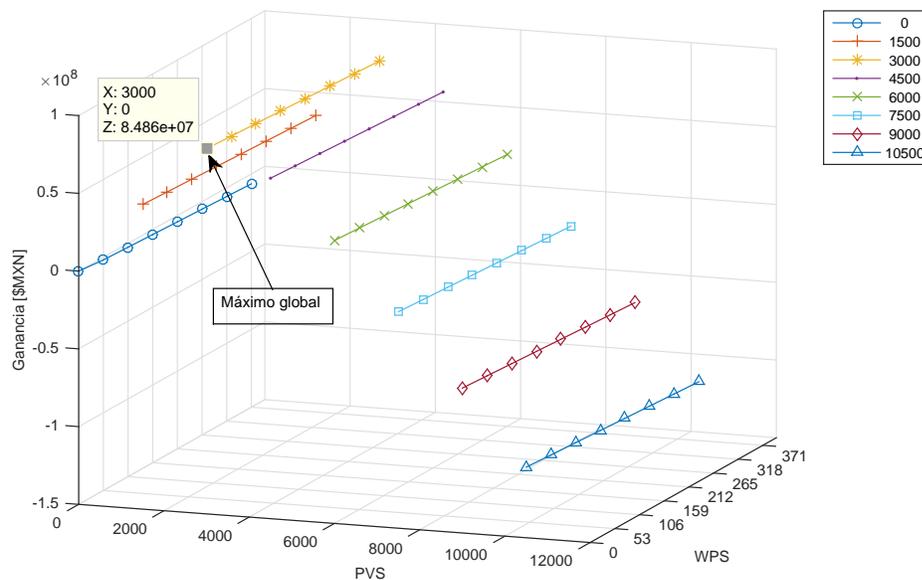


Figura 5.6. Identificación máximo global e impacto del tamaño del sistema en función del costo-beneficio

2. Identificación del tamaño óptimo de la micro-red.

En análisis a los resultados presentados en la Tabla 5.5, se puede apreciar algunas configuraciones para la combinación de *PVS* y *WPS*, cuyos valores a pagar de factura con micro-red y ganancia obtenidos a los 20 años cambian drásticamente a medida que aumenta el número de equipos en cada configuración (en el sección D.1 del anexo D se presentan todos los resultados para este caso de estudio). Para la configuración 64, se pagaría un menor costo en la factura final con la inclusión de micro-redes, pero no se obtendría el máximo ahorro, al contrario se tendrían pérdidas, ésto debido a los altos costos de inversión que se tendrían que hacer para iniciar el proyecto.

Por el contrario, la configuración 17 (sombreado color azul) obtiene el máximo

ahorro económico, el cual tiene un ahorro de 9,85 % respecto de la factura que se pagaría a CFE en 20 años al incluir la micro-red.

Tabla 5.5. *Tamaños y costos para diferentes configuraciones de la micro-red*

Configuración <i>N</i>	<i>PVS</i>	<i>WPS</i>	Factura sin Micro-red [\$MXN]	Factura con Micro-red [\$MXN]	Costos de inversión [\$MXN]	Ganancia al finalizar proyecto [\$MXN]	Ahorro respecto a la factura con Micro-red [%]
1	0	0	861.52E+6	861.55E+6	0	0	0,000
2	0	53	861.52E+6	860.96E+6	2.29E+6	-1.73E+6	-0,201
11	1.500	106	861.52E+6	761.72E+6	55.47E+6	44.32E+6	5,145
12	1.500	159	861.52E+6	761.13E+6	56.84E+6	43.55E+6	5,054
16	1.500	371	861.52E+6	758.79E+6	62.29E+6	40.44E+6	4,694
17	3.000	0	861.52E+6	672.09E+6	104.57E+6	84.86E+6	9,850
18	3.000	53	861.52E+6	671.59E+6	105.93E+6	83.99E+6	9,749
25	4.500	0	861.52E+6	636.19E+6	156.39E+6	68.93E+6	8,001
26	4.500	53	861.52E+6	635.83E+6	157.75E+6	67.93E+6	7,885
50	9.000	53	861.52E+6	606.22E+6	313.22E+6	-57.92E+6	-6,723
51	9.000	106	861.52E+6	605.93E+6	314.58E+6	-58.99E+6	-6,848
63	10.500	318	861.52E+6	600.74E+6	371.85E+6	-111.08E+6	-12,893
64	10.500	371	861.52E+6	600.45E+6	373.22E+6	-112.15E+6	-13,018

Así mismo, para la mejor configuración se observa una ganancia total de \$84.860.000 MXN al terminar la vida útil de la micro-red, con este valor se cubriría un 81,78 % de la inversión inicial para el siguiente periodo, haciendo aún mas rentable la integración de las unidades de generación, garantizando mayores beneficios económicos al usuario.

3. Energía generada por la micro-red y excedentes de energía.

En la Figura 5.7 se muestra la energía aportada a la empresa para reducir los niveles de demanda exigida a la red principal para las distintas configuraciones. Para la configuración seleccionada (17) se observa que el aporte a la red principal fue de un 30,15 %, y el excedente de energía es de un 1,15 %, el cual es mínimo, indicando que la configuración seleccionada tiene como prioridad suministrar la demanda de la carga con un mínimo de excedentes de energía.

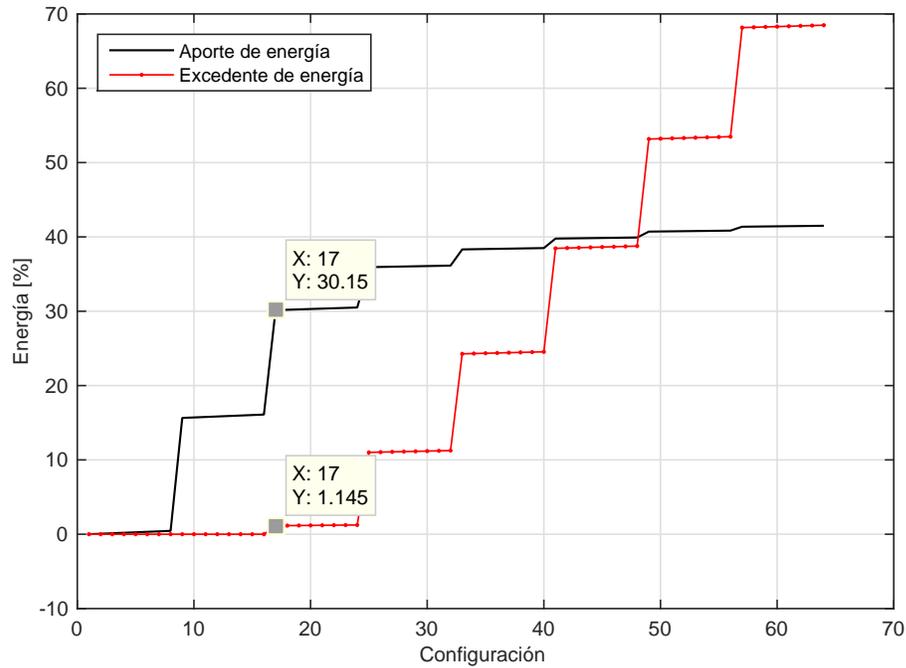


Figura 5.7. Porcentaje de energía suministrada por la micro-red y excedente de energía debido a las grandes configuraciones

4. Retorno de la inversión.

Para obtener el tiempo de retorno de la inversión se utiliza la siguiente ecuación:

$$t_{RI} = \frac{CInv}{FacCFE - FacMR} \quad (5.1)$$

Donde t_{RI} indica el tiempo en que se recuperaría la inversión dado en [años]; $CInv$ se define como el costo de inversión del proyecto en [MXN]; $FacCFE$ se define como el costo de la factura que se debe pagar a CFE sin micro-red en [MXN] y por último $FacMR$ como el costo de la factura a pagar a CFE al incluir la micro-red dado en [MXN].

Una vez aplicado la ecuación anterior, se observa en la Figura 5.8 que el tiempo de retorno de la inversión es aproximadamente en 11,04 años.

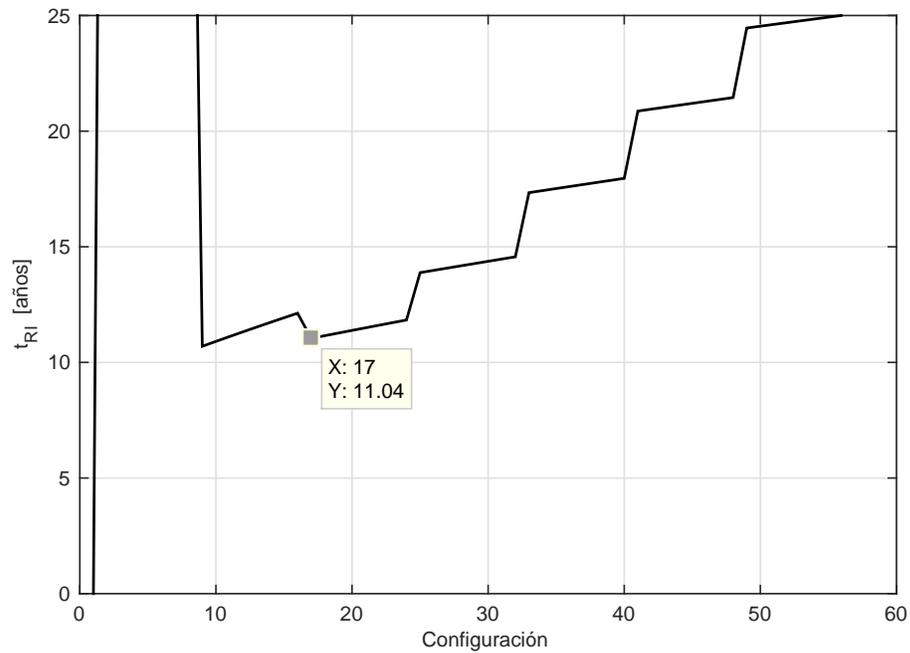


Figura 5.8. Retorno de la inversión

5. Energía producida por la micro-red anualmente.

Con la finalidad de alcanzar las metas de generación de energías limpias y reducción de emisiones, los Certificados de Energías Limpias (CEL) se constituyen como el principal instrumento para alcanzar dichas metas de generación [61]. La meta nacional de generación limpia se convierte en obligaciones individuales, las empresas tanto generadoras como consumidores deberán generar un 5% de su consumo total de su demanda para el año 2018 [63]. El consumo anual de la empresa Daltile es de 24.658.452 [kWh] y la energía producida, Figura 5.9, para la configuración (17) seleccionada es de 7.434.000 [kWh] al año, lo que corresponde a un 30.1% del consumo total, por tanto se estaría cumpliendo con la meta nacional establecida.

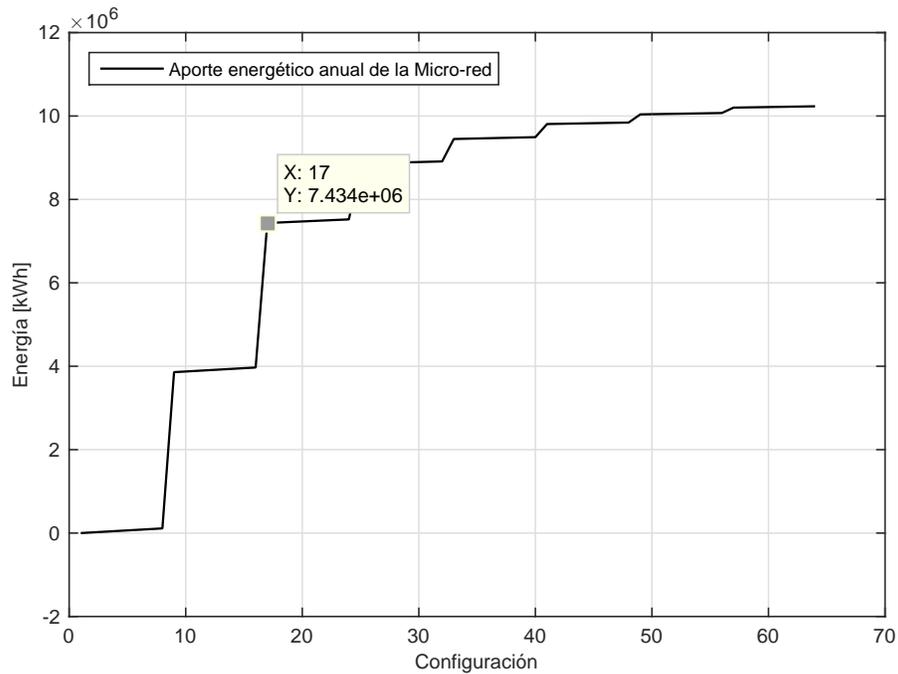


Figura 5.9. Aporte energético anual de la micro-red

5.5. Caso de estudio 2

Este caso de estudio presenta la integración de DSUs a la micro-red no aislada con la finalidad de analizar los beneficios energéticos y económicos que acarrea la inclusión de este tipo de unidades al sistema bajo estudio.

En este sentido se muestra el resultado de la PMS sobre el sistema de estudio y los ítems que se analizaron en el caso de estudio 1.

1. Comportamiento de la PMS.

Para la simulación se consideraron los aspectos estudiados en la sección 4.1.1. La simulación se realizó para los 365 días del año, para un mejor análisis se muestra la simulación en un intervalo de 72 horas, por lo que se indican las tarifas de cobro dadas por CFE para dicho intervalo, se utilizó una de las configuraciones del caso de estudio 2, la configuración 448 (ver Anexo D, Tabla D.2) para mostrar el comportamiento de la PMS, la cual corresponde a 10.500 *PVS*, 371 *WPS* y 1.200 *BESS*.

Por tanto, de los resultados obtenidos, se ilustra la estrategia del manejo de energía en la Figura 5.10.

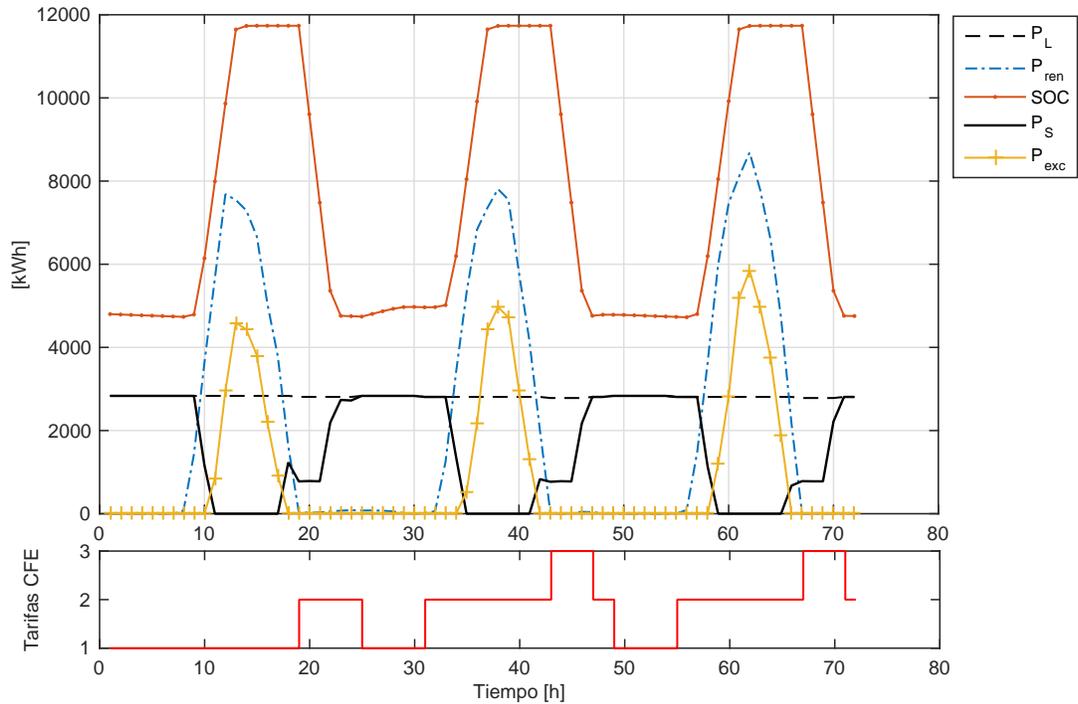


Figura 5.10. Estrategia de gestión de la energía

En la Figura 5.10 P_L indica el perfil de consumo de la empresa, P_{ren} indica la energía generada y disponible por las fuentes renovables de la micro-red, el SOC indica el estado de carga de las unidades de almacenamiento ($BESS$), P_S indica el nuevo estado de carga del perfil de la demanda al descargar la batería en los intervalos donde la tarifa es más costosa, P_{exc} indica el excedente de energía que se presenta debido al gran tamaño de los elementos ($DGUs$ y $DSUs$) que conforman la micro-red. En la parte inferior se muestra el perfil de las tarifas que utiliza CFE, “1” para indicar la tarifa base, “2” tarifa intermedia y “3” tarifa punta.

Se resalta que la PMS planteada hace su análisis cada 24 horas, como se definió en la sección 4.1.1 el proceso de descarga de las unidades de almacenamiento se hace como prioridad en la tarifa punta, pero como se muestra en la figura 5.10 para el primer día no se presenta esta tarifa, entonces el proceso de descarga de la unidad de almacenamiento se hace en la tarifa intermedia, la cual es la siguiente más costosa. Esto con el objetivo de aprovechar la utilidad que brindan las unidades de almacenamiento.

En análisis a los resultados presentados en la gráfica, se puede indicar que la solución para esta configuración en especial no es conveniente debido a los excedentes de energía que se presentan una vez cubierta la demanda requerida por la empresa en ciertas horas del día, pero si puede ser justificable para otras configuraciones.

2. Resultado de la aplicación del método de optimización.

Como resultado de la metodología planteada, se obtiene diferentes configuraciones de la micro-red como se presenta en la Figura 5.11. De la gráfica se observa el impacto del tamaño de *WPS*, *PVS* y *BESS* sobre el ahorro económico. La Figura 5.11, muestra 56 curvas lineales para 8 diferentes tamaños de *PVS*, en la cual el tamaño de *PVS* se mantiene fijo entretanto el tamaño de *WPS* y el *BESS* van cambiando.

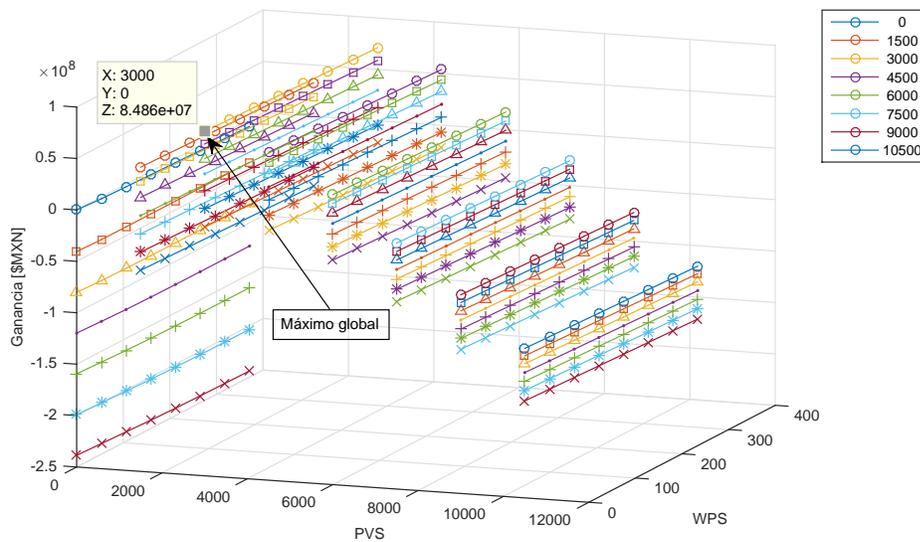


Figura 5.11. Identificación del máximo ahorro e impacto del tamaño del sistema en función del costo-beneficio con *BESS*

La solución seleccionada del método utilizado representó una solución que no sólo disminuyó la demanda exigida a la red principal, sino también permitió los mayores beneficios económicos para el usuario.

3. Identificación del tamaño óptimo de la micro-red.

En la tabla 5.6 se muestran 24 configuraciones de las 448 posibles, en el Anexo D, Sección D.2, se presentan todos los resultados para este caso de estudio. La configuración con la cual se presenta un máximo ahorro económico es la 113

(resaltada en color azul), ésta corresponde a la cantidad de 3.000 *PVS*, 0 *WPS* y 0 *BESS*, en contraste con la solución mostrada en el caso de estudio 1, se observa la misma configuración, de donde se infiere que no es conveniente utilizar elementos de almacenamiento ni aerogeneradores para este caso de estudio debido en primer lugar a condiciones meteorológicas del lugar y segundo a los altos costos de estos equipos los cuales no justifican la inversión.

Así mismo, con la mejor configuración (113) se obtiene un ahorro de 9,85% respecto de la factura que se pagaría a CFE y una ganancia total de \$84.860.000 MXN al terminar la vida útil de la micro-red, siendo rentable la instalación de esta configuración.

Tabla 5.6. *Tamaños y costos para diferentes configuraciones de la micro-red con BESS*

Configuración N	<i>PVS</i>	<i>WPS</i>	<i>BESS</i>	Factura sin Micro-red [\$MXN]	Factura con Micro-red [\$MXN]	Costos de inversión [\$MXN]	Ganancia al finalizar proyecto [\$MXN]	Ahorro respecto a la factura con Micro-red [%]
3	0	0	4.000	861.52E+6	861.52E+6	80.15E+6	-80.15E+6	-9,304
4	0	0	6.000	861.52E+6	861.52E+6	119.77E+6	-119.77E+6	-13,902
11	0	53	6.000	861.52E+6	861.27E+6	121.13E+6	-120.89E+6	-14,032
12	0	53	8.000	861.52E+6	861.28E+6	160.74E+6	-160.50E+6	-18,630
17	0	106	4.000	861.52E+6	860.50E+6	82.88E+6	-81.87E+6	-9,502
18	0	106	6.000	861.52E+6	860.88E+6	122.49E+6	-121.86E+6	-14,145
55	0	371	10.000	861.52E+6	856.66E+6	208.53E+6	-203.68E+6	-23,642
56	0	371	12.000	861.52E+6	857.41E+6	248.15E+6	-244.04E+6	-28,327
57	1.500	0	0	861.52E+6	763.33E+6	52.75E+6	45.44E+6	5,275
58	1.500	0	2.000	861.52E+6	737.26E+6	92.36E+6	31.90E+6	3,703
73	1.500	106	4.000	861.52E+6	712.43E+6	134.70E+6	14.38E+6	1,670
74	1.500	106	6.000	861.52E+6	690.59E+6	174.31E+6	-3.38E+6	-0,393
112	1.500	371	12.000	861.52E+6	622.13E+6	299.97E+6	-60.59E+6	-7,033
113	3.000	0	0	861.52E+6	672.09E+6	104.57E+6	84.86E+6	9,850
114	3.000	0	2.000	861.52E+6	645.31E+6	144.18E+6	72.02E+6	8,360
115	3.000	0	4.000	861.52E+6	620.02E+6	183.80E+6	57.70E+6	6,697
234	6.000	53	4.000	861.52E+6	559.68E+6	288.80E+6	13.03E+6	1,512
235	6.000	53	6.000	861.52E+6	530.56E+6	328.42E+6	2.54E+6	0,295
275	6.000	371	2.000	861.52E+6	588.41E+6	257.36E+6	15.74E+6	1,827
276	6.000	371	4.000	861.52E+6	557.91E+6	296.98E+6	6.63E+6	0,769
435	10.500	318	0	861.52E+6	600.83E+6	371.85E+6	-111.17E+6	-12,904
436	10.500	318	2.000	861.52E+6	568.50E+6	411.47E+6	-118.45E+6	-13,749
447	10.500	371	10.000	861.52E+6	443.89E+6	571.29E+6	-153.66E+6	-17,836
448	10.500	371	12.000	861.52E+6	414.45E+6	610.90E+6	-163.83E+6	-19,016

4. Energía generada por la micro-red y excedentes de energía.

En la Figura 5.12 se muestra la energía aportada a la empresa para reducir los niveles de demanda exigida a la red principal para las distintas configuraciones. Al igual que el caso de estudio 1 el aporte a la empresa Daltile fue de un 30,15% y el excedente de energía de un 0,998%, lo cual indica el mejor aprovechamiento de la micro-red para la configuración seleccionada.

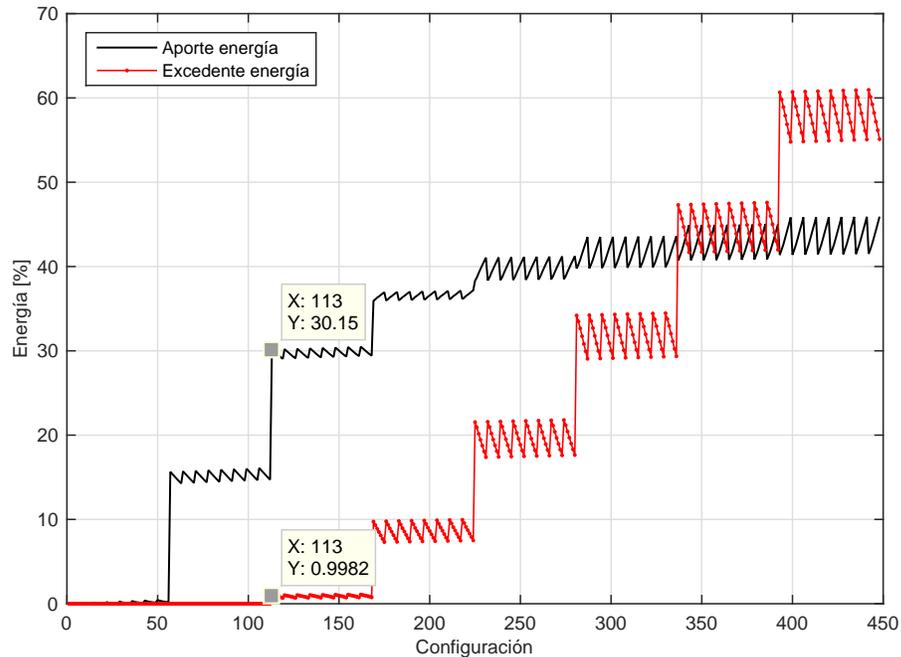


Figura 5.12. Porcentaje de energía suministrada por la micro-red y excedente de energía con BESS

5. Retorno de la inversión.

Como se observa en la Figura 5.13 para la configuración óptima (113) el tiempo de retorno de la inversión es de 11,04 años. Una vez cubierta la inversión se generan ganancias, para esta configuración se obtuvo una ganancia de \$ 84.860.000 MXN, valor que se puede utilizar para cubrir los costos de inversión del siguiente periodo, si esta es la elección se cubriría un 81,78 % del costo de inversión (ver Tabla 5.6).

Cabe aclarar que para el nuevo cálculo de los costos de inversión se debe restar el valor del contrato de interconexión a la red de alta tensión ya que este es un gasto único para el proyecto.

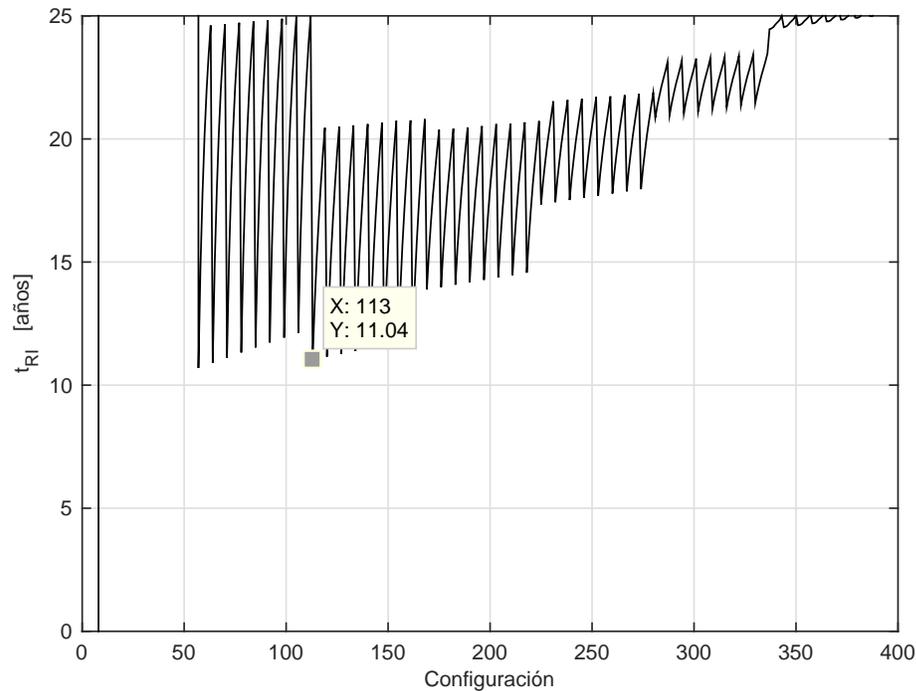


Figura 5.13. Retorno de la inversión con BESS

5.6. Caso de estudio 3

Para configuraciones y horas en específico del día donde la micro-red cubre el perfil de consumo de la empresa, se presentan excedentes de energía como se observó en las Figuras 5.7 y 5.12 que podrían ser aprovechados. Una forma es vender estos excedentes de energía a CFE u otra empresa privada.

Al vender directamente a CFE, ésta pagaría el kWh a un 80 ó 90 % del valor estipulado para cada tarifa, este valor puede no ser fijo, depende del valor que estipule CFE. Para vender energía a CFE se debe tener un contrato de interconexión a la red de alta tensión, el cual ya fue tenido en cuenta en los costos de inversión por ser el mismo requisito para conectarse a la red (ver ítem 5.3). Una ventaja de vender energía a CFE es el no cobro de multas por el no cumplimiento de venta ante fallas en la micro-red. Si se opta por vender estos excedentes a empresas privadas se debe entrar en el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM), esto implica un cambio de contrato regido por la Reforma Energética del 2014 en México [73], el cual se rige por una única tarifa de cobro y su precio es establecido por el Centro Nacional de Control de la Energía (CENACE), este valor tiene mayor utilidad a las empresas que el brindado por CFE. La desventaja es

la inclusión de otros estudios de interconexión de altos costos, ampliación de la línea si es requerido y penalizaciones si no se cumple con la producción de energía que se pacta para la venta.

En vista de lo anterior se analizará la venta de excedentes de energía a CFE y se dejará como estudios posteriores el ingreso al MEM.

A continuación se expone de manera paralela los resultados para los 2 casos de estudios vistos anteriormente.

1. Identificación del tamaño óptimo de la micro-red.

En la tabla 5.7 se muestran las configuraciones con las cuales se obtiene el máximo ahorro económico una vez que se tuvo en cuenta la venta de excedentes de energía a CFE, por practicidad se consideró el cobro del kWh de un 90 % del valor estipulado para cada tarifa de CFE. En análisis a los resultados se observa para los 2 casos de estudio que la mejor configuración, considerando la venta de excedentes a CFE, corresponde a 10.500 *PVS*, 0 *WPS* y 0 *BESS*, de manera que no sigue siendo rentable el incluir elementos de almacenamiento *BESS* en la micro-red debido principalmente a sus costos de inversión.

Tabla 5.7. *Tamaños y costos para las configuraciones óptimas de la micro-red con venta de excedentes de energía*

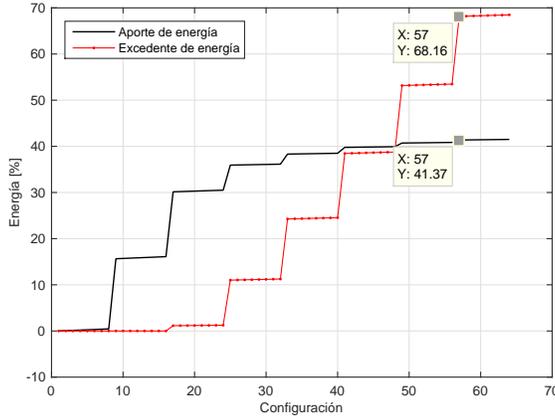
Caso de estudio	Configuración N	<i>PVS</i>	<i>WPS</i>	<i>BESS</i>	Factura sin Micro-red [\$MXN]	Factura sin Micro-red [\$MXN]	Costos de inversión [\$MXN]	Ganancia al finalizar el proyecto [\$MXN]	Ahorro respecto a la factura con Micro-red [%]
1	57	10.500	0	-	861.52E+6	216.03E+6	363.68E+6	281.81E+6	32,71
2	393	10.500	0	0	861.52E+6	216.03E+6	363.68E+6	281.81E+6	32,71

2. Energía generada por la micro-red y excedentes de energía.

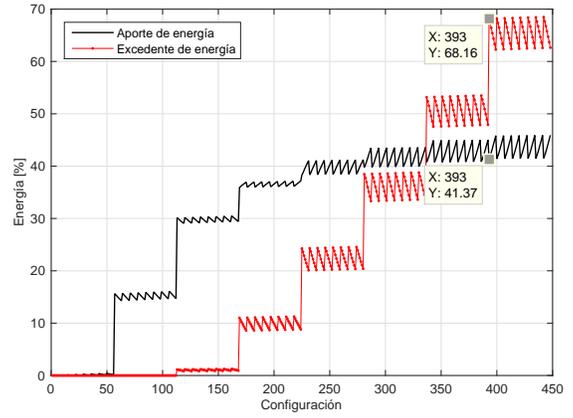
Como se observa en la Figura 5.14 para los dos casos de estudio se muestra la energía aportada a la empresa para reducir los niveles de demanda exigida a la red principal (línea negra) y los excedentes de energía vendidos a CFE (línea roja) para las distintas configuraciones.

En la Figura 5.14 se resaltan los resultados obtenidos para las configuraciones (57) y (393) obtenidos como solución a las configuraciones óptimas al vender excedentes de energía (ver Tabla 5.7), donde el aporte de energía a la empresa fue de un 41.37 % y el excedente de energía vendido a CFE fue de un 68.16 %. Éste es mayor debido a que la única restricción para la venta de energía es el área disponible por la empresa Daltile para instalar los elementos de la micro-red. Caso contrario para las curvas (líneas negras) las cuales se estabilizan en un 46 % aproximadamente ya que hay más limitantes para poder cubrir la demanda total

de la empresa, como lo son los datos meteorológicos y el área disponible para ubicar los equipos de la micro-red.



(a) Caso de estudio 1

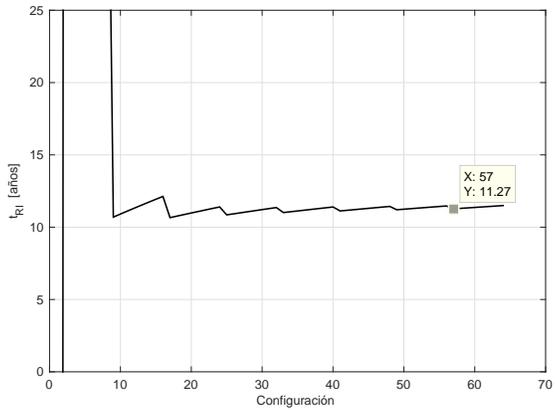


(b) Caso de estudio 2

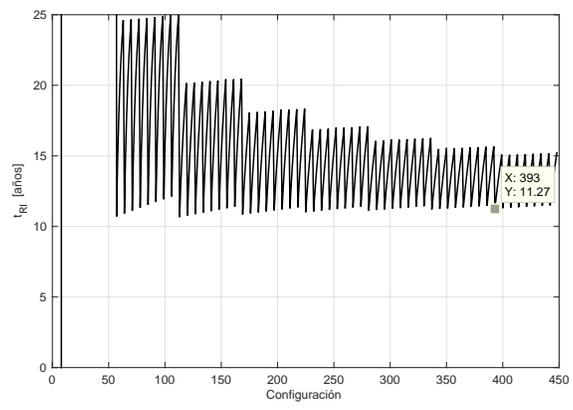
Figura 5.14. Porcentaje de energía suministrada y venta de excedentes de energía por la micro-red

3. Retorno de la inversión.

Como se observa en la Figura 5.15 para los dos casos de estudio el tiempo de retorno de la inversión es de aproximadamente 11,27 años. Una vez cubierta la inversión se generan ganancias, para las dos configuraciones se obtuvo una ganancia de \$ 281.810.000 MXN. Se puede concluir que la venta de excedentes de energía es viable aunque se deba hacer una mayor inversión al inicio del proyecto, pero con utilidades muy favorables para el usuario.



(a) Caso de estudio 1

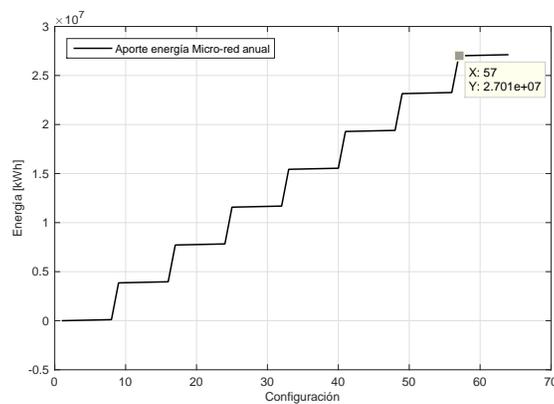


(b) Caso de estudio 2

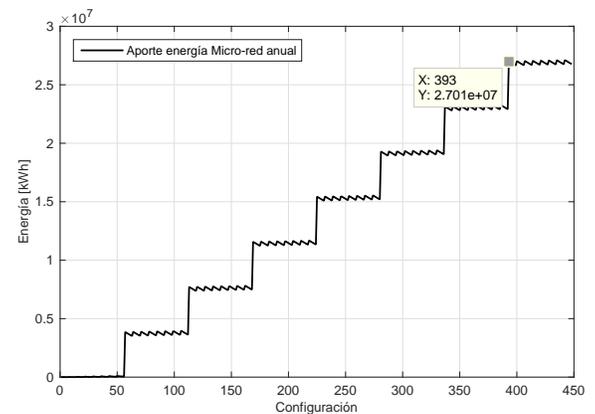
Figura 5.15. Retorno de la inversión con venta de excedentes de energía

4. Energía producida por la micro-red anualmente.

Como se explicó anteriormente los CEL son de gran importancia como estrategia para promover el uso de tecnologías limpias. Sabiendo que 1 CEL corresponde a 1 [MWh], es importante saber la cantidad de energía que se está generando anualmente, es por esto que en la Figura 5.16 se muestra la energía aportada anualmente para cada configuración para los dos casos de estudio, se destacan las configuración (57) y (393) donde el aporte energético anual es de 27.010.000 [kWh], valor que corresponde a la energía suministrada por la micro-red a la empresa Daltile y los excedentes de energía vendidos a CFE.



(a) Caso de estudio 1



(b) Caso de estudio 2

Figura 5.16. Aporte energético anual de la Micro-red con venta de excedentes de energía

La Tabla 5.8 expone los resultados numéricos de las pruebas simuladas, estableciendo una comparativa de los resultados obtenidos al no emplear fuentes de almacenamiento (BESS) versus los resultados obtenidos al emplear fuentes de almacenamiento (BESS) tanto para el caso sin venta de excedentes de energía a CFE, como para el caso con venta de excedentes de energía a CFE.

Tabla 5.8. *Comparativa de los 3 casos de estudio*

	Caso de estudio 1	Caso de estudio 2	Caso de estudio 3	
	(sin venta de excedentes de energía) (sin BESS)	(con BESS)	(con venta de excedentes de energía) (sin BESS)	(con BESS)
	N: 17	N: 113	N: 57	N: 393
Configuración óptima	3.000 <i>PVS</i> 0 <i>WPS</i> - <i>BESS</i>	3.000 <i>PVS</i> 0 <i>WPS</i> 0 <i>BESS</i>	10.500 <i>PVS</i> 0 <i>WPS</i> - <i>BESS</i>	10.500 <i>PVS</i> 0 <i>WPS</i> 0 <i>BESS</i>
Costos de inversión	\$104.570.000 MXN	\$104.570.000 MXN	\$363.680.000 MXN	\$363.680.000 MXN
Energía generada por la micro-red	30,15 %	30,15 %	42,37 %	42,37 %
Excedentes generados por la micro-red	1,15 %	1 %	68,16 %	68,16 %
Retorno de la inversión	11,04 años	11,04 años	11,27 años	11,27 años
Ganancia al finalizar la vida útil del proyecto	\$ 84.860.000 MXN	\$ 84.860.000 MXN	\$281.810.000 MXN	\$281.810.000 MXN
Aporte energético anual	7.434.000 [kWh]	7.434.000 [kWh]	27.010.000 [kWh]	27.010.000 [kWh]

Respecto a los resultados presentados en la Tabla 5.8, se observa que a pesar de las distintas variables que se analizaron en cada caso de estudio, no es viable considerar el uso de WPS y BESS dentro de la micro-red para ninguna de las configuraciones seleccionadas, esto es debido en parte a las condiciones climatológicas de la región en que se encuentra la empresa. De esta manera se demuestra que utilizar los BESS en periodos de punta o intermedia según la tarifa más alta del día correspondiente al análisis, no garantiza un mejor costo-beneficio para el usuario. Es importante mencionar que si se opta por elegir la configuración con venta de excedentes de energía a la red principal CFE, se siguen obteniendo ganancias hasta del 75 % una vez cubierta la inversión y un retorno de inversión semejante a las configuraciones sin venta de excedentes de energía.

Capítulo 6

Conclusiones

Se presentó una metodología de diseño óptimo para una micro-red eléctrica de aplicación industrial. Los resultados obtenidos para los 3 casos de estudio aplicados a la empresa Daltile, muestran la viabilidad del proyecto al emplear la metodología propuesta, permitiendo resolver dos factores importantes dentro del dimensionamiento de una micro-red: menor dependencia del sistema eléctrico principal y el alto costo de inversión del proyecto al generar un equilibrio entre estas dos variables.

Respecto a las configuraciones obtenidas en los casos de estudio para la empresa Daltile y analizando principalmente las mejores configuraciones con y sin venta de excedentes de energía a CFE, las cuales corresponden a 10.500 *PVS*, 0 *WPS* y 0 *BESS*, y 3.000 *PVS*, 0 *WPS* y 0 *BESS* respectivamente, ante la respuesta a la metodología propuesta se resalta como el algoritmo elimina el hecho de utilizar *WPS* y *BESS* ya que sus restricciones climatológicas y económicas no generan un costo-beneficio para esta empresa.

La metodología propuesta no solamente permite el análisis del caso de estudio presentado en este trabajo, sino también queda abierta al análisis de cualquier empresa industrial.

Respecto a la operación de la micro-red con la metodología propuesta, se identificaron y analizaron los comportamientos del sistema de almacenamiento, en función del costo de energía en el mercado y las tarifas horarias estipuladas por CFE. Se observó como en los intervalos de precios más altos, el *BESS* suplió la mayor cantidad posible de energía a la micro-red, logrando disminuir los costos de energía por consumo en las altas tarifas, pero resultando no beneficioso para el usuario el incluir los *BESS*.

La inversión inicial para este tipo de micro-redes es una cantidad considerable, variable que estará como obstáculo a la hora de seleccionar una cierta topología, no

obstante el costo de las unidades de almacenamiento ha ido disminuyendo, factor que favorece y permitirá incluir estas unidades para así aprovechar la PMS presentada en el trabajo.

Para el sistema en operación con y sin unidades almacenamiento, se analizó la dificultad de encontrar la configuración óptima. Esto debido a que en algunas ocasiones la generación de energía con fuentes renovables superó la demanda y por lo tanto el algoritmo evidenciaría un déficit en la optimización. Esto se corrigió al incluir la opción de venta de excedentes de energía a CFE, dándole prioridad al usuario de elegir si desea una configuración que contenga el aprovechamiento de los excedentes de energía.

En vista de las metas de generación de energías limpias y reducción de emisiones, se hace aún más importante la generación de energía por medio de fuentes no convencionales, pero aún más importante la implementación de micro-redes que tengan el máximo costo-beneficio para el usuario y a su vez ayude con el cumplimiento de los CEL, los cuales son un instrumento para alcanzar la meta nacional de generación limpia establecida anualmente.

Trabajos Futuros

Con respecto a la investigación desarrollada, se proponen los siguientes temas como posibles trabajos futuros:

- Desarrollar una interfaz gráfica que permita una mejor interacción del usuario con la metodología propuesta.
- Incluir en el análisis la venta de energía excedente de la micro-red a empresas privadas.
- Se aconseja la aplicación de diferentes algoritmos tanto heurísticos como determinísticos para la solución del problema de optimización propuesto en la metodología para el dimensionamiento óptimo de una micro-red.
- Incluir y modificar las tarifas al nuevo esquema tarifario, establecidos por la Comisión Reguladora de Energía a partir de Marzo del 2018 para los clientes de CFE.
- Aunque la estrategia de gestión de la energía no incluye suministro de potencia reactiva por parte de las fuentes renovables, ya que esta es suministrada por la red principal, se sugiere su análisis como una mejora para micro-redes aisladas.
- Se sugiere realizar los análisis y modificaciones necesarias sobre la metodología propuesta para el estudio de otro tipo de industria.

Bibliografía

- [1] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, and A. Dimeas, “Microgrids management,” *IEEE power and energy magazine*, vol. 6, no. 3, 2008.
- [2] T. Díaz and G. Carmona, “Componentes de una instalación solar fotovoltaica,” *Técnico en instalaciones eléctricas y automáticas. Reforma LOE*, 2010.
- [3] J. G. Velasco, *Energías renovables*. Reverte, 2009.
- [4] C. R. Reeves, “Modern heuristic techniques for combinatorial optimization,” *Alfred Waller Ltd*, 1993.
- [5] M. P. Lozano and T. Pukkala, “Métodos de optimización heurística para la resolución de modelos de planificación forestal,” *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, no. 18, 2004.
- [6] F. A. Bhuiyan, A. Yazdani, and S. L. Primak, “Modeling, simulation, and performance analysis of power management strategies for an islanded microgrid,” *International Journal of Energy Science*, vol. 3, no. 6, 2013.
- [7] D. O. de la Federación, “Esquema tarifario 2013,” *Diario Oficial de la Federación*, 2013.
- [8] P. Giorsetto and K. F. Utsurogi, “Development of a new procedure for reliability modeling of wind turbine generators,” *IEEE transactions on power apparatus and systems*, no. 1, pp. 134–143, 1983.
- [9] O. Style, *Energía Solar Autónoma: Planificación, dimensionado e instalación de un sistema fotovoltaico autónomo*. Oliver Style, 2012.
- [10] N. Peña Silva, “Tarifas comisión federal de electricidad,” tech. rep., DOF-Diario Oficial de la Federación, 2017.
- [11] L. R. Phillips, “Managing microgrids using grid services,” in *2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering*, pp. 1–5, IEEE, 2007.

- [12] T. L. Vandoorn, B. Zwaenepoel, J. D. De Kooning, B. Meersman, and L. Vandeveldel, “Smart microgrids and virtual power plants in a hierarchical control structure,” in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on*, pp. 1–7, IEEE, 2011.
- [13] R. Singh and S. Goswami, “Optimal siting and sizing of distributed generations in radial and networked systems considering different voltage dependent static load models,” in *Power and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International*, pp. 1535–1540, IEEE, 2008.
- [14] C. Corchero, M. Cruz-Zambrano, F. Heredia, J. Cairo, L. Igualada-Gonzalez, and A. Romero-Ortega, “Optimal sizing of microgrids: A fast charging station case,” *Proc. IEEE EEM*, 2012.
- [15] T. Logenthiran, D. Srinivasan, A. M. Khambadkone, and T. S. Raj, “Optimal sizing of distributed energy resources for integrated microgrids using evolutionary strategy,” in *2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 1–8, IEEE, 2012.
- [16] H. Alharbi and K. Bhattacharya, “Optimal sizing of battery energy storage systems for microgrids,” in *Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2014 IEEE*, pp. 275–280, IEEE, 2014.
- [17] M. Anand, W. Ongsakul, J. G. Singh, and K. Sudhesh, “Optimal allocation and sizing of distributed generators in autonomous microgrids based on lsf and pso,” in *Energy Economics and Environment (ICEEE), 2015 International Conference on*, pp. 1–6, IEEE, 2015.
- [18] “Sensitivity analysis of grid-connected photovoltaic systems: Case study in guerrero, mexico,” pp. 13–20, 2011.
- [19] J. P. Fossati, “Revisión bibliográfica sobre micro redes inteligentes,” *Memoria de trabajos de difusión científica y técnica*, no. 9, pp. 13–20, 2011.
- [20] A. Colino Martínez, “Historia, energía, hidrógeno, discurso en la recepción pública en la real academia ingeniería,” 2004.
- [21] F. J. M. Beloki, “Centro de estudios e investigaciones técnicas de guipúzcoa,” *On diseño*, no. 274, pp. 150–165, 2006.
- [22] C. A. Carreño Meneses, “Control secundario para una micro-red inteligente basado en técnicas de inteligencia artificial,” 2016.
- [23] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, “Microgrids,” *IEEE power and energy magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 78–94, 2007.

- [24] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. De Vicuña, and M. Castilla, “Hierarchical control of droop-controlled ac and dc microgrids—a general approach toward standardization,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, 2011.
- [25] N. Hatziargyriou, N. Jenkins, G. Strbac, J. P. Lopes, J. Ruela, A. Engler, J. Oyarzabal, G. Kariniotakis, A. Amorim, *et al.*, “Microgrids—large scale integration of microgeneration to low voltage grids,” *CIGRE C6-309*, 2006.
- [26] E. Solar, “Energía solar fotovoltaica,” vol. 26, 2007.
- [27] K. W. Böer, *Survey of semiconductor physics*. Wiley New York, 2002.
- [28] J. M. Pearce, “Photovoltaics—a path to sustainable futures,” *Futures*, vol. 34, no. 7, pp. 663–674, 2002.
- [29] S. Tamseel and M. Parvez, “A review of solar powered generation by photovoltaic technology,” *Invertis Journal of Renewable Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 17–28, 2017.
- [30] B. Parida, S. Iniyani, and R. Goic, “A review of solar photovoltaic technologies,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 15, no. 3, pp. 1625–1636, 2011.
- [31] M. P. Aparicio, *Energía solar fotovoltaica: cálculo de una instalación aislada*. Marcombo, 2010.
- [32] S. A. Maggi Silva, “Modelamiento térmico de un panel fotovoltaico con disipador de calor operando en el norte de Chile,” 2013.
- [33] V. M. Mateo, *Instalaciones generadoras fotovoltaicas*. Ediciones Paraninfo, SA, 2015.
- [34] C. A. Gonzalez Santacruz *et al.*, “Análisis técnico de los diferentes tipos de batería comercialmente disponibles para su integración en el proyecto de una microrred aislada,” 2016.
- [35] M. P. Aparicio, *Energía solar fotovoltaica: cálculo de una instalación aislada*. Marcombo, 2010.
- [36] J. Moragues and A. Rapallini, “Energía eólica,” *Instituto Argentino de la Energía “General Mosconi*, p. 3, 2003.
- [37] S. Wright and J. Nocedal, “Numerical optimization,” *Springer Science*, vol. 35, no. 67-68, p. 7, 1999.
- [38] T. Zhou and B. François, “Energy management and power control of a hybrid active wind generator for distributed power generation and grid integration,” *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 95–104, 2011.

- [39] M. Kalantar *et al.*, “Dynamic behavior of a stand-alone hybrid power generation system of wind turbine, microturbine, solar array and battery storage,” *Applied energy*, vol. 87, no. 10, pp. 3051–3064, 2010.
- [40] S. Karaki, R. Chedid, and R. Ramadan, “Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, no. 3, pp. 766–772, 1999.
- [41] H. Yang, Z. Wei, and L. Chengzhi, “Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar–wind power generation system,” *Applied Energy*, vol. 86, no. 2, pp. 163–169, 2009.
- [42] S. Diaf, M. Belhamel, M. Haddadi, and A. Louche, “Technical and economic assessment of hybrid photovoltaic/wind system with battery storage in corsica island,” *Energy policy*, vol. 36, no. 2, pp. 743–754, 2008.
- [43] H. Yang, L. Lu, and W. Zhou, “A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system,” *Solar energy*, vol. 81, no. 1, pp. 76–84, 2007.
- [44] C. Protogeropoulos, B. Brinkworth, and R. Marshall, “Sizing and techno-economical optimization for hybrid solar photovoltaic/wind power systems with battery storage,” *International Journal of Energy Research*, vol. 21, no. 6, pp. 465–479, 1997.
- [45] T. Senjyu, D. Hayashi, A. Yona, N. Urasaki, and T. Funabashi, “Optimal configuration of power generating systems in isolated island with renewable energy,” *Renewable energy*, vol. 32, no. 11, pp. 1917–1933, 2007.
- [46] H. Yang, Z. Wei, and L. Chengzhi, “Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar–wind power generation system,” *Applied Energy*, vol. 86, no. 2, pp. 163–169, 2009.
- [47] J. Wang and F. Yang, “Optimal capacity allocation of standalone wind/solar/battery hybrid power system based on improved particle swarm optimisation algorithm,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 7, no. 5, pp. 443–448, 2013.
- [48] O. Ekren and B. Y. Ekren, “Size optimization of a pv/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing,” *Applied Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 592–598, 2010.
- [49] Y. A. Katsigiannis, P. S. Georgilakis, and E. S. Karapidakis, “Hybrid simulated annealing–tabu search method for optimal sizing of autonomous power systems with renewables,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 3, pp. 330–338, 2012.

- [50] G. Seeling-Hochmuth, “A combined optimisation concept for the design and operation strategy of hybrid-pv energy systems,” *Solar energy*, vol. 61, no. 2, pp. 77–87, 1997.
- [51] C.-C. Lin, H. Peng, J. W. Grizzle, and J.-M. Kang, “Power management strategy for a parallel hybrid electric truck,” *IEEE transactions on control systems technology*, vol. 11, no. 6, pp. 839–849, 2003.
- [52] D. E. Olivares, C. A. Cañizares, and M. Kazerani, “A centralized energy management system for isolated microgrids.,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1864–1875, 2014.
- [53] D. E. Olivares, C. A. Cañizares, and M. Kazerani, “A centralized energy management system for isolated microgrids,” *IEEE Transactions on smart grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1864–1875, 2014.
- [54] M. Ashari and C. Nayar, “An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (pv)–diesel–battery hybrid power system,” *Solar Energy*, vol. 66, no. 1, pp. 1–9, 1999.
- [55] F. Valenciaga and P. F. Puleston, “Supervisor control for a stand-alone hybrid generation system using wind and photovoltaic energy,” *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 20, no. 2, pp. 398–405, 2005.
- [56] C. Wang and M. H. Nehrir, “Power management of a stand-alone wind/photovoltaic/fuel cell energy system,” *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 23, no. 3, pp. 957–967, 2008.
- [57] D. Ipsakis, S. Voutetakis, P. Seferlis, F. Stergiopoulos, and C. Elmasides, “Power management strategies for a stand-alone power system using renewable energy sources and hydrogen storage,” *International journal of hydrogen energy*, vol. 34, no. 16, pp. 7081–7095, 2009.
- [58] J. M. Lujano-Rojas, C. Monteiro, R. Dufo-López, and J. L. Bernal-Agustín, “Optimum load management strategy for wind/diesel/battery hybrid power systems,” *Renewable Energy*, vol. 44, pp. 288–295, 2012.
- [59] S. de Hacienda y Crédito Público, “Acuerdos que autorizan o modifican tarifas,” *Comisión Federal de Electricidad*, 2012.
- [60] N. R. Delgado Contreras, “Adquisición de certificado de energías limpias para el 2021,” tech. rep., DOF-Diario Oficial de la Federación, 2018.
- [61] E. Peña Nieto, “Ley de la industria eléctrica-artículo 3,” tech. rep., DOF-Diario Oficial de la Federación, 2014.

- [62] E. Peña Nieto, “Ley de la industria eléctrica-artículo 123,” tech. rep., DOF-Diario Oficial de la Federación, 2014.
- [63] E. Peña Nieto, “Ley de la industria eléctrica-artículo 124,” tech. rep., DOF-Diario Oficial de la Federación, 2014.
- [64] G. L. Park, “Planning manual for utility application of wecs,” tech. rep., Michigan State Univ., East Lansing (USA). Div. of Engineering Research, 1979.
- [65] F. A. Bhuiyan, A. Yazdani, and S. L. Primak, “Optimal sizing approach for islanded microgrids,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, no. 2, pp. 166–175, 2014.
- [66] M. H. Ahmed, K. Bhattacharya, and M. M. Salama, “Probabilistic distribution load flow with different wind turbine models,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1540–1549, 2013.
- [67] B. S. Guru, H. R. Hiziroglu, J. E. Brito, *et al.*, *Máquinas eléctricas y transformadores*. Oxford University Press, 2003.
- [68] G. M. Masters, *Renewable and efficient electric power systems*. John Wiley & Sons, 2013.
- [69] “Demanda facturable comisión federal de electricidad,” tech. rep., DOF-Diario Oficial de la Federación, 2013.
- [70] C. A. Moreno Bautista, J. M. Lozano-García, V. Gutiérrez Martínez, I. A. Hernández-Robles, E. A. Zamora-Cárdenas, and O. Rodríguez Villalón, “Programación óptima de cargas residenciales ante variación de costos en tiempo real,” 2017.
- [71] F. Moreno, “Distribución de aerogeneradores en un parque eólico,” *Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER)*. Ciudad de la Habana, Cuba, 2006.
- [72] “Centro de ciencias atmosféricas de la universidad de guanajuato.” [urlhttp://www.ccaug.ugto.mx/clima6gto](http://www.ccaug.ugto.mx/clima6gto), 2006-2017. Accedido 07-06-2017.
- [73] E. Peña Nieto, “Ley de la industria eléctrica-artículo 14,” tech. rep., DOF-Diario Oficial de la Federación, 2014.

Anexo A

Factura CFE: Empresa Industrial

En este anexo se muestra como ejemplo una factura de CFE a nivel industrial, para dar claridad a los conceptos vistos en el capítulo 3, sección 3.8 en el cual se muestra el modelo de facturación de Energía Eléctrica.

La estructura de cobro se observa en la Figura A.1. Un primer paso es identificar en que tarifa de suministro se encuentra contratada la empresa. Este se indica en círculo negro numeral 1, para este ejemplo la tarifa es HSL, que significa alta tensión, nivel subtransmisión para larga duración. Una vez identificada la tarifa de suministro en la página oficial de CFE se pueden verificar los cargos por periodo para el mes que corresponda.

La demanda de energía mensual para los periodos de punta, intermedio y baste, junto con los cargos para cada periodo, se indican en el numeral 2. Para obtener el cargo por energía se debe multiplicar estos dos valores como se muestra en la sección 3.8. En el numeral 3 se muestra la demanda máxima medida para cada periodo y en el numeral 4 la Demanda Facturable, la cual utiliza los valores de Demanda máxima medida por periodo para su respectivo resultado. Por último en el numeral 5 se muestra el factor de potencia, como éste es mayor a 0,9 indica que la empresa obtiene bonificación por Factor de potencia como se muestra en el numeral 6.

AVISO RECIBO



Comisión Federal de Electricidad
 Av. Paseo de la Reforma Num. 164
 Col. Juárez, México, D.F. 06800
 RFC: CFE370814-QIO

Número de servicio:

Total a pagar:

\$3,272,964.00

(TRES MILLONES DOSCIENTOS SETENTA Y DOS MIL NOVECIENTOS SESENTA Y CUATRO PESOS 00/100 M.N.)

Fecha límite de pago:

13 FEB 15

Nombre y Domicilio:

Ruta	Periodo	No. Medidor
	31 DIC 14 A 31 ENE 15	

Tarifa	Carga conectada kW	Demanda contratada kW	Multiplicador
HSL	10800	D10800	Historicos 12000

Función	No. Medidor	Lectura actual	Lectura anterior	Diferencia	Totales
kWh base					719,845
kWh intermedia					1,106,680
kWh punta					267,116

Mes	Días de mes	Consumo prom. diario	Energía kWh	Precio \$/kWh	Importe \$
kW base					3,375
kW intermedia					3,404
kW punta					3,377

kVArh	Factor de proporción	Demanda máxima kW	Precio \$/kWh	Importe \$	Factor de potencia %
Factor de potencia %				98.55	98.27

Energía en base kWh	Energía en intermedia kWh	Energía en punta kWh	Demanda facturable kW
719,845	1,106,680	267,116	3,383

Avisos Importantes

- Corte a partir de 14 FEB 15.
- Nos transformamos para servirte mejor.
- Servicio a Clientes Teléfono 071.

Mes	kW	Día	no	A	C	P	U	P	A	S	O	N	D	E	F	C	Precio medio
ENE 14	3,314	31	4,016,300	98.27	73	1,010.2											
FEB 14	3,402	28	1,904,343	98.81	83	1,544.9											
MAR 14	3,324	31	2,150,237	98.61	83	1,435.3											
ABR 14	3,287	30	346,843	98.74	85	1,467.5											
MAY 14	3,323	31	1,653,134	98.87	82	1,459.7											
JUN 14	3,301	30	2,023,100	98.80	81	1,416.7											
JUL 14	3,409	31	2,057,270	98.62	83	1,431.6											
AUG 14	3,461	31	2,074,707	98.87	81	1,457.2											
AGO 14	3,415	31	2,069,195	98.75	80	1,491.4											
SEP 14	3,351	30	1,966,224	98.83	81	1,474.8											
OCT 14	3,350	31	1,648,499	98.72	81	1,423.3											
OCT 14	2,989	31	340,544	99.02	75	1,453.7											
NOV 14	3,255	30	1,842,122	99.01	77	1,446.0											
DIC 14	3,248	31	1,931,896	98.27	79	1,417.4											
ENE 15	3,383	31	2,033,641	98.27	83	1,356.7											

Conceptos	Importe \$
Energía	2,245,647.34
Demanda Facturable	612,864.28
Bonificación Factor de Potencia	-60,028.74
Intereses	22,350.00
Subtotal	2,821,432.88
IVA 16%	451,429.26
Facturación del Periodo	3,272,862.14
Derecho de Alumbrado Público	102.65
Adeudo Anterior	3,209,322.12
Su Pago	-3,209,322.00
Total	\$3,272,964.01

<p>Datos Fiscales del Receptor</p> <p>DTM950801A9</p> <p>Serie: PB Folio: 00001531265</p> <p>Folio Fiscal: 50E0CCB7-27A7-4C62-8167-5DF1258C0771</p> <p>N. Certificado del SAT: 0000100000300494988</p> <p>No. certificado del CSD: 0000100000300470059</p> <p>Fecha y Hora de certificación: 2015-02-02T18:23:11</p> <p>Unidad de medida: No Aplica</p> <p>Forma de pago: No Identificado</p> <p>Régimen Fiscal: TÍTULO III DEL RÉGIMEN DE LAS PERSONAS MORALES CON FINES NO LUCRATIVOS</p>	<p>Conceptos</p> <p>Energía 2,245,647.34</p> <p>Demanda Facturable 612,864.28</p> <p>Bonificación Factor de Potencia -60,028.74</p> <p>Intereses 22,350.00</p> <p>Subtotal 2,821,432.88</p> <p>IVA 16% 451,429.26</p> <p>Facturación del Periodo 3,272,862.14</p> <p>Derecho de Alumbrado Público 102.65</p> <p>Adeudo Anterior 3,209,322.12</p> <p>Su Pago -3,209,322.00</p> <p>Total \$3,272,964.01</p>
--	---

Cadena original

Este documento es una representación impresa de un CFDI

Pago en una sola exhibición

01 052120104977 150213 003272964 9

Total a pagar:

\$3,272,964.00

(TRES MILLONES DOSCIENTOS SETENTA Y DOS MIL NOVECIENTOS SESENTA Y CUATRO PESOS 00/100 M.N.)

Fecha, hora y lugar de impresión:

03 FEB 15 08:15:25 hrs

Calle Zaragoza No 804 Colonia Zona Centro Balneario Salamanca Guanajuato Mexico

Ruta:

Clave de envío:

2

Repartir

TALÓN DE CAJÁ

Figura A.1. Factura CFE para una empresa a nivel industrial

Anexo B

Distribución horaria para la tarifa HS-L

En este anexo se muestran las tablas características [10] de la tarifa horaria para el servicio general en alta tensión (HSL), nivel subtransmisión, para larga utilización, región sur, región a la cual corresponde el estado de Guanajuato donde se encuentra ubicada la empresa que se utilizó como caso de estudio. A su vez se muestran los cargos por la demanda facturable y los cargos para cada una de los periodos (punta, intermedio y base). Datos utilizados en el diseño de la metodología propuesta en una Micro-red de aplicación industrial.

Los periodos de punta, intermedio y base están definidos para distintas temporadas del año, como se describe a continuación:

Del 1° de febrero al sábado anterior al primer domingo de abril, ver Tabla B.1.

Tabla B.1. *Distribución horaria Febrero-Abril*

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 19:00	22:00 - 24:00 19:00 - 22:00
Sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 24:00	
Domingo y festivo	0:00 - 19:00	23:00 - 24:00	19:00 - 23:00

Del primer domingo de abril al 31 de julio, ver Tabla B.2.

Tabla B.2. *Distribución horaria Abril-Julio*

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a viernes	1:00 - 6:00	0:00 - 1:00 6:00 - 20:00	22:00 - 24:00 20:00 - 22:00
Sábado	1:00 - 7:00	0:00 - 1:00 7:00 - 24:00	
Domingo y festivo	0:00 - 19:00	19:00 - 24:00	

Del 1º de agosto al sábado anterior al último domingo de octubre. Tabla B.3.

Tabla B.3. *Distribución horaria Agosto-Octubre*

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 19:00	22:00 - 24:00 19:00 - 22:00
Sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 24:00	
Domingo y festivo	0:00 - 19:00	23:00 - 24:00 19:00 - 23:00	

Del último domingo de octubre al 31 de enero, ver Tabla B.4.

Tabla B.4. *Distribución horaria Octubre-Enero*

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	

Se aplicaron los siguientes cargos: cargo por demanda facturable, energía de punta, intermedia y base para el año 2017. Estos se utilizaron para el cálculo de la nueva facturación que se pagaría a CFE una vez la micro-red suministra la energía a la carga del sistema, ver Tabla B.5.

Tabla B.5. *Cargos aplicados al año 2017*

Mes	Cargo por kW de Demanda Facturable	Cargo por kWh de Energía de Punta	Cargo por kWh de Energía Intermedia	Cargo por kWh de Energía de Base
Enero	\$ 214,93	\$ 1,8080	\$ 1,0340	\$ 0,9191
Febrero	\$ 217,94	\$ 1,9026	\$ 1,1204	\$ 0,9959
Marzo	\$ 224,54	\$ 2,1087	\$ 1,3132	\$ 1,1673
Abril	\$ 225,89	\$ 2,0535	\$ 1,2443	\$ 1,1060
Mayo	\$ 224,29	\$ 1,9056	\$ 1,0888	\$ 0,9678
Junio	\$ 221,76	\$ 1,9077	\$ 1,1011	\$ 0,9787
Julio	\$ 222,09	\$ 1,9012	\$ 1,0930	\$ 0,9715
Agosto	\$ 220,16	\$ 1,8596	\$ 1,0574	\$ 0,9398
Septiembre	\$ 219,06	\$ 1,8384	\$ 1,0397	\$ 0,9241
Octubre	\$ 219,50	\$ 1,8544	\$ 1,0544	\$ 0,9372
Noviembre	\$ 220,25	\$ 1,8932	\$ 1,0917	\$ 0,9703
Diciembre	\$ 220,25	\$ 1,8932	\$ 1,0917	\$ 0,9703

Anexo C

Cotizaciones de equipos para la micro-red

En este anexo se muestran las cotizaciones de los equipos utilizados para realizar el estimado del costo que tendría la inversión de la micro-red para el respectivo estudio.

EnergyEquipment
We,always focus on your needs.



JIANGSU NAIER WIND POWER



1kw on grid wind generator system

price terms

Item	Spec	Unit Price	Qty	Amount
1kw wind generator	48v	USDS478	1	USDS478
1kw on grid inverter	48v, output: single phase,110v/120v/220v/230v	USDS256	1	USDS256
6 meters cable tower	2 secitons 3 meters/section	USDS108	1	USDS108
Total EXW price				USDS842

Payment terms	T/T(bank transfer)
Delivery time	Within 3-5 working days

1

Figura C.1. Cotización Aerogenerador conectado a la red de 1 [kW]



Energia Alternativa de Mexico
 Ing Oscar Cantu Gonzalez
 Deandar Amador # 121
 Col Doctores
 Reynosa, Tamps Mexico
 RFC:CAGX-660519-G50

Cotizacion

Fecha	Cotizacion #
7/30/2018	26871

Nombre / Direccion
Al portador
Tel.-
RFC.-

MENSUALIDADES CON **PayPal**



Descripcion	Cant	PU	Total
Sistema interconectado a CFE Enphase de 1080 watts Mod.- SIRE-1080W-IQ6	1	1,851.60	1,851.60
Inc; - 4 Fococeldas TrinaSolar de 270 watts - Estructura para colocar fococeldas sobre losa plana - 4 Microinversores Enphase IQ6 - Accesorios			
Manejo y envio a (Ocorre x cobrar)		0.00	0.00
Sub-total			1,851.60
- Tipo de cambio del dolar del DOF			
		Subtotal	USD 1,851.60
		Iva (0.0%)	USD 0.00
		Total	USD 1,851.60

Tel.-(899) 925 8988 www.enalmex.com Tel.-(800) 561 2566

Figura C.2. Cotización panel solar de 1.2 [kW]

www.whcsolar.cc



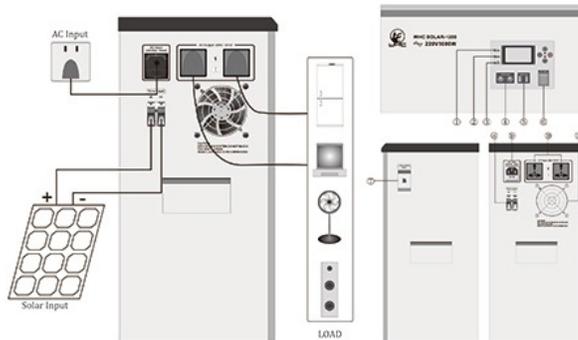
WHC SOLAR 1200

Solar Home Generaor

- ◆ Inverter:WHC Pure Sine Wave 1000W
- ◆ Battery:WHC GEL 12V100AH*1pcs
- ◆ Controller:12V30A
- ◆ AC Charge:20A
- ◆ Solar Panel:WHC150W Mono *2pcs
- ◆ Size:46*23*52cm
- ◆ Appliance:Fridge,Tv,Fan,Light ,Speaker Computer,Mobie Charge etc.

Product Feature

- ◆ Long Service Life Of WHC GEL Battery
- ◆ High Efficient , Long Life Of WHC Solar Panel
- ◆ Full Power Inverter & Intelligent Controller
- ◆ Easy Use, Simple Installation,Covenient Move
- ◆ User-friendly Design More Safe For Children
- ◆ Low Frequency Pure Sine Wave Output
- ◆ Over Load And Short Circuit Protection
- ◆ LCD Real-time Display Device Parameters, Running Status At A Glance



Explain

- ① Solar Pilot Lamp
- ② Battery Pilot Lamp
- ③ DC Output Pilot Lamp
- ④ 12Vdc Output Port
- ⑤ 5Vdc Output Port(Usb)
- ⑥ DC Output Switch
- ⑦ Battery Input Switch
- ⑧ Solar Input Port
- ⑨ AC Input Port
- ⑩ AC Output Port
- ⑪ System Cooling Fan

Reduce Your Electricity Costs, 10 Years Experience Solution by WHC SOLAR!

6

Figura C.3. Cotización Batería de 1 [kWh]

Partida: 1
Cantidad: 1
Modelo: ION 8650-B (720 Canales) -333 SIN PLACA DE IDENTIFICACION DE DATOS DE CFE
 -334 CON PLACA DE IDENTIFICACION DE DATOS DE CFE
No. Catalogo: 8650B 0 C 0 H 6 E T A 1 A
Precio Unitario (usd): \$4,757.00 **NO INCLUYE AVISO DE PRUEBA POR PARTE DE LAPEM**
Precio Total (usd): \$4,757.00
 Opción Seleccionada

Descripción General:	<input checked="" type="checkbox"/> M8650B	Medidor/Analizador multifunción de alta precisión y funciones avanzadas de control y monitoreo, basado en microprocesador de 32 bits, con las siguientes características: valores de energía (Wh, VARh, VAh, I _h , V _h y otros) bidireccional y de cuatro cuadrantes, con Puerto de entrada Irig B para recibir señal de sincronización. Los valores a mostrar en pantalla son programables por el usuario; Homologado por CFE LAPEM según la especificación CFE G0000-48. Con Clase de Precisión 0.1 e Irig B
		Memoria masiva de 64 MBytes, con capacidad para almacenar hasta 45 registros con 16 parámetros cada uno (720 canales en total); Tarifa horaria con cuatro diferentes tarifas y calendario de 20 años; detección de Sagu/Swells; registro de mínimos y máximos. Monitoreo de Calidad de la Energía. Clase "S"
Configuración:	<input checked="" type="checkbox"/> 0	TIPO SOCKET: ANSI Forma 95 de 3-elementos para medición de un servicio de 4-Hilos Delta o Estrella. Rango operativo de 57 a 277 Volts Línea-a-Neutro (+/-15%)
	<input checked="" type="checkbox"/> 7	TIPO TABLERO (FT-21): De 3-elementos para medición de un servicio de 4-Hilos Delta o Estrella. Rango operativo de 57 a 277 Volts Línea-a-Neutro (+/-15%). Caja semi-embudida con bloque de prueba integrado.
Entrada de Corriente:	<input checked="" type="checkbox"/> C	5 amperios nominal con capacidad máxima de 20 amperios continuos; Cumple con ANSI Clase 20 y la IEC 5/20
Entrada de Voltaje:	<input checked="" type="checkbox"/> 0	Estándar (Las entradas de voltaje a sensor están definido en el campo CONFIGURACIÓN Y MEMORIA)
	<input checked="" type="checkbox"/> E	Auto-Alimentado de las 3 fases del servicio. Rango operativo de 120 a 277 Volts Línea-a-Neutro RMS (+/-20%), 47 a 63 Hz
Fuente de Alimentación:	<input checked="" type="checkbox"/> H	Alimentado de una Fuente Externa con un rango operativa de 65 a 120 VCA (+/-15%), 47 a 63 Hz) o 80 a 160 VCD (+/-20%)
	<input checked="" type="checkbox"/> J	Alimentado de una Fuente Externa con un rango operativa de 160 a 277 VCA (+/-20%), 47 a 63 Hz) o 200 a 350 VCD (+/-20%)
Frecuencia:	<input checked="" type="checkbox"/> 6	Calibrado para Sistema de 60 Hertz
	<input checked="" type="checkbox"/> A0	COM1: RS-232/485, COM3: Infrarrojo en el panel frontal, COM4: RS-485
	<input checked="" type="checkbox"/> C7	COM1: RS-232/485, COM2: Modem de 33.6 kbps, COM3: Infrarrojo en el panel frontal, COM4: RS-485, RED: Ethernet 10/100 Base-T
	<input checked="" type="checkbox"/> E1	COM1: RS-232/485, COM3: Infrarrojo en el panel frontal, COM4: RS-485, RED: Ethernet 10/100 Base-T
	<input checked="" type="checkbox"/> M1	COM1: RS-232/485, COM2: Modem de 33.6 kbps con conector RJ11, COM3: Infrarrojo en el panel frontal, COM4: RS-485
		Nota 1: Los puertos de comunicación se pueden configurar con cualquiera de los siguientes protocolos: Para los puertos seriales y Modem: Protocolo ION, DNP3.0 (Nivel 2), Modbus RTU, Modbus Master y GPS. Para el puerto Ethernet: Protocolo ION, Modbus TCP, DNP
Entradas y Salidas:	<input checked="" type="checkbox"/> A	Ninguna (se puede pedir por separado el "I/O Box" con entradas/salidas)
	<input checked="" type="checkbox"/> B	Cuatro (4) Salidas Digitales Forma "C" y Tres (3) Entradas Digitales Forma "A". Las salidas tienen una capacidad máxima de 200 VCA o VCD y 100 miliamperes. Las entradas digitales pueden ser excitadas internamente del mismo medidor a 30 VCD o pueden ser excitadas de una fuente externa.
Seguridad:	<input checked="" type="checkbox"/> 0	Protección estándar con claves de acceso.
	<input checked="" type="checkbox"/> 1	Protección estándar mas protección física (Se requiere destapar el medidor y oprimir un botón para poder reconfigurar el medidor via software)
Opciones Especiales:	<input checked="" type="checkbox"/> A	Ninguna
Breakout Cable:	<input checked="" type="checkbox"/> X	Con Breakout Cable No.101-627 - Permite acceso a los puertos seriales, longitud de 1.7 metros, incluye terminación DB9 para el puerto RS-232.

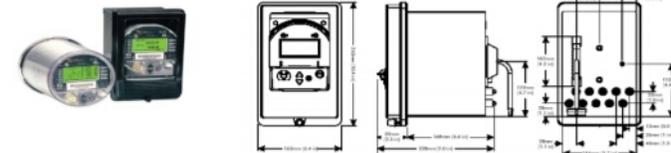


Figura C.4. Cotización Medidor Bidireccional

Anexo D

Tablas de identificación del tamaño óptimo de la micro-red

En este anexo se muestran los resultados completos correspondientes a la aplicación de la metodología propuesta. En primer lugar los resultados del primer caso de estudio el cual corresponde a una micro-red aislada sin elementos de almacenamiento, en segundo lugar los datos correspondientes al segundo caso de estudio teniendo en cuenta elementos de almacenamiento, y en tercer lugar, el primer y segundo caso de estudio teniendo en cuenta la venta de excedentes de energía para cada configuración.

D.1. Caso de estudio 1

Los resultados mostrados en la Tabla D.1 corresponden al caso de estudio 1, éste considera la micro-red no aislada sin elementos de almacenamiento. Ésta indica para cada una de las configuraciones el valor de la factura que se tendría que pagar a la empresa generadora de energía al incluir la micro-red, junto con la ganancia que se tendría al finalizar la vida útil del proyecto.

Tabla D.1. *Tamaños y costos para diferentes configuraciones de la micro-red*

Configuración <i>N</i>	<i>PVS</i>	<i>WPS</i>	Factura sin Micro-red [\$MXN]	Factura con Micro-red [\$MXN]	Costos de inversión [\$MXN]	Ganancia al finalizar proyecto [\$MXN]	Ahorro respecto a la factura con Micro-red [%]
1	0	0	861.52E+6	861.55E+6	0	0	0,000
2	0	53	861.52E+6	860.96E+6	2.29E+6	-1.73E+6	-0,201
3	0	106	861.52E+6	860.36E+6	3.65E+6	-2.50E+6	-0,290
4	0	159	861.52E+6	859.77E+6	5.01E+6	-3.27E+6	-0,380
5	0	212	861.52E+6	859.18E+6	6.38E+6	-4.04E+6	-0,469
6	0	265	861.52E+6	858.59E+6	7.74E+6	-4.81E+6	-0,559
7	0	318	861.52E+6	858.00E+6	9.10E+6	-5.58E+6	-0,648
8	0	371	861.52E+6	857.41E+6	10.46E+6	-6.36E+6	-0,738
9	1.500	0	861.52E+6	762.89E+6	52.75E+6	45.88E+6	5,325
10	1.500	53	861.52E+6	762.31E+6	54.11E+6	45.10E+6	5,235
11	1.500	106	861.52E+6	761.72E+6	55.47E+6	44.32E+6	5,145
12	1.500	159	861.52E+6	761.13E+6	56.84E+6	43.55E+6	5,054
13	1.500	212	861.52E+6	760.55E+6	58.20E+6	42.77E+6	4,964
14	1.500	265	861.52E+6	759.96E+6	59.56E+6	41.99E+6	4,874
15	1.500	318	861.52E+6	759.38E+6	60.92E+6	41.21E+6	4,784
16	1.500	371	861.52E+6	758.79E+6	62.29E+6	40.44E+6	4,694
17	3.000	0	861.52E+6	672.09E+6	104.57E+6	84.86E+6	9,850
18	3.000	53	861.52E+6	671.59E+6	105.93E+6	83.99E+6	9,749
19	3.000	106	861.52E+6	671.10E+6	107.30E+6	83.12E+6	9,649
20	3.000	159	861.52E+6	670.60E+6	108.66E+6	82.25E+6	9,548
21	3.000	212	861.52E+6	670.11E+6	110.02E+6	81.38E+6	9,446
22	3.000	265	861.52E+6	669.63E+6	111.38E+6	80.51E+6	9,345
23	3.000	318	861.52E+6	669.14E+6	112.75E+6	79.63E+6	9,243
24	3.000	371	861.52E+6	668.66E+6	114.11E+6	78.75E+6	9,141
25	4.500	0	861.52E+6	636.19E+6	156.39E+6	68.93E+6	8,001
26	4.500	53	861.52E+6	635.83E+6	157.75E+6	67.93E+6	7,885
27	4.500	106	861.52E+6	635.47E+6	159.12E+6	66.93E+6	7,769
28	4.500	159	861.52E+6	635.11E+6	160.48E+6	65.93E+6	7,653
29	4.500	212	861.52E+6	634.75E+6	161.84E+6	64.93E+6	7,536
30	4.500	265	861.52E+6	634.39E+6	163.20E+6	63.92E+6	7,420
31	4.500	318	861.52E+6	634.03E+6	164.57E+6	62.92E+6	7,303
32	4.500	371	861.52E+6	633.68E+6	165.93E+6	61.91E+6	7,186
33	6.000	0	861.52E+6	621.35E+6	208.21E+6	31.95E+6	3,709
34	6.000	53	861.52E+6	621.01E+6	209.58E+6	30.93E+6	3,590
35	6.000	106	861.52E+6	620.68E+6	210.94E+6	29.90E+6	3,471
36	6.000	159	861.52E+6	620.34E+6	212.30E+6	28.87E+6	3,351
37	6.000	212	861.52E+6	620.01E+6	213.66E+6	27.84E+6	3,232
38	6.000	265	861.52E+6	619.68E+6	215.03E+6	26.81E+6	3,112
39	6.000	318	861.52E+6	619.35E+6	216.39E+6	25.78E+6	2,993
40	6.000	371	861.52E+6	619.01E+6	217.75E+6	24.75E+6	2,873
41	7.500	0	861.52E+6	612.30E+6	260.04E+6	-10.82E+6	-1,256
42	7.500	53	861.52E+6	612.00E+6	261.40E+6	-11.88E+6	-1,379
43	7.500	106	861.52E+6	611.69E+6	262.76E+6	-12.94E+6	-1,502
44	7.500	159	861.52E+6	611.39E+6	264.12E+6	-14.00E+6	-1,625
45	7.500	212	861.52E+6	611.09E+6	265.49E+6	-15.06E+6	-1,748
46	7.500	265	861.52E+6	610.79E+6	266.85E+6	-16.12E+6	-1,871
47	7.500	318	861.52E+6	610.49E+6	268.21E+6	-17.18E+6	-1,995
48	7.500	371	861.52E+6	610.19E+6	269.57E+6	-18.24E+6	-2,118
49	9.000	0	861.52E+6	606.51E+6	311.86E+6	-56.85E+6	-6,599
50	9.000	53	861.52E+6	606.22E+6	313.22E+6	-57.92E+6	-6,723
51	9.000	106	861.52E+6	605.93E+6	314.58E+6	-58.99E+6	-6,848
52	9.000	159	861.52E+6	605.64E+6	315.94E+6	-60.06E+6	-6,972
53	9.000	212	861.52E+6	605.34E+6	317.31E+6	-61.14E+6	-7,096
54	9.000	265	861.52E+6	605.05E+6	318.67E+6	-62.21E+6	-7,221
55	9.000	318	861.52E+6	604.76E+6	320.03E+6	-63.28E+6	-7,345
56	9.000	371	861.52E+6	604.47E+6	321.39E+6	-64.35E+6	-7,469
57	10.500	0	861.52E+6	602.46E+6	363.68E+6	-104.62E+6	-12,144
58	10.500	53	861.52E+6	602.17E+6	365.04E+6	-105.70E+6	-12,269
59	10.500	106	861.52E+6	601.89E+6	366.40E+6	-106.78E+6	-12,394
60	10.500	159	861.52E+6	601.60E+6	367.77E+6	-107.85E+6	-12,519
61	10.500	212	861.52E+6	601.31E+6	369.13E+6	-108.93E+6	-12,643
62	10.500	265	861.52E+6	601.03E+6	370.49E+6	-110.00E+6	-12,768
63	10.500	318	861.52E+6	600.74E+6	371.85E+6	-111.08E+6	-12,893
64	10.500	371	861.52E+6	600.45E+6	373.22E+6	-112.15E+6	-13,018

D.2. Caso de estudio 2

En la Tabla D.2 se muestran los resultados del caso de estudio 2. Éste caso de estudio presenta la integración de DSUs a la micro-red no aislada. La Tabla D.2 indica para cada una de las configuraciones el valor de la factura que se tendría que pagar a la empresa generadora de energía al incluir la micro-red, junto con la ganancia que se tendría al finalizar la vida útil del proyecto.

Tabla D.2. *Tamaños y costos para diferentes configuraciones de la micro-red con BESS*

Configuración N	PVS	WPS	BESS	Factura sin Micro-red [\$MXN]	Factura con Micro-red [\$MXN]	Costos de inversión [\$MXN]	Ganancia al finalizar proyecto [\$MXN]	Ahorro respecto a la factura con Micro-red [%]
1	0	0	0	861.52E+6	861.52E+6	0	0	0
2	0	0	2.000	861.52E+6	861.52E+6	40.54E+6	-40.54E+6	-4,706
3	0	0	4.000	861.52E+6	861.52E+6	80.15E+6	-80.15E+6	9,304
4	0	0	6.000	861.52E+6	861.52E+6	119.77E+6	-119.77E+6	-13,902
5	0	0	8.000	861.52E+6	861.52E+6	159.38E+6	-159.38E+6	-18,500
6	0	0	10.000	861.52E+6	861.52E+6	199.00E+6	-199.00E+6	-23,098
7	0	0	12.000	861.52E+6	861.52E+6	238.61E+6	-238.61E+6	-27,696
8	0	53	0	861.52E+6	860.94E+6	2.29E+6	-1.71E+6	-0,198
9	0	53	2.000	861.52E+6	861.01E+6	41.90E+6	-41.40E+6	-4,805
10	0	53	4.000	861.52E+6	861.27E+6	81.52E+6	-81.27E+6	-9,433
11	0	53	6.000	861.52E+6	861.27E+6	121.13E+6	-120.89E+6	-14,032
12	0	53	8.000	861.52E+6	861.28E+6	160.74E+6	-160.50E+6	-18,630
13	0	53	10.000	861.52E+6	861.28E+6	200.36E+6	-200.12E+6	-23,229
14	0	53	12.000	861.52E+6	861.28E+6	239.97E+6	-239.74E+6	-27,828
15	0	106	0	861.52E+6	860.36E+6	3.65E+6	-2.49E+6	-0,289
16	0	106	2.000	861.52E+6	859.75E+6	43.27E+6	-41.50E+6	-4,817
17	0	106	4.000	861.52E+6	860.50E+6	82.88E+6	-81.87E+6	-9,502
18	0	106	6.000	861.52E+6	860.88E+6	122.49E+6	-121.86E+6	-14,145
19	0	106	8.000	861.52E+6	861.02E+6	162.11E+6	-161.61E+6	-18,759
20	0	106	10.000	861.52E+6	861.02E+6	201.72E+6	-201.23E+6	-23,357
21	0	106	12.000	861.52E+6	861.03E+6	241.33E+6	-240.85E+6	-27,956
22	0	159	0	861.52E+6	859.78E+6	5.01E+6	-3.27E+6	-0,380
23	0	159	2.000	861.52E+6	858.36E+6	44.63E+6	-41.47E+6	-4,814
24	0	159	4.000	861.52E+6	859.32E+6	84.24E+6	-82.04E+6	-9,523
25	0	159	6.000	861.52E+6	860.00E+6	123.86E+6	-122.33E+6	-14,200
26	0	159	8.000	861.52E+6	860.42E+6	163.47E+6	-162.38E+6	-18,848
27	0	159	10.000	861.52E+6	860.64E+6	203.08E+6	-202.20E+6	-23,471
28	0	159	12.000	861.52E+6	860.77E+6	242.70E+6	-241.95E+6	-28,084
29	0	212	0	861.52E+6	859.20E+6	6.38E+6	-4.06E+6	-0,471
30	0	212	2.000	861.52E+6	856.88E+6	45.99E+6	-41.35E+6	-4,800
31	0	212	4.000	861.52E+6	857.98E+6	85.60E+6	-82.07E+6	-9,526
32	0	212	6.000	861.52E+6	858.86E+6	125.22E+6	-122.56E+6	-14,226
33	0	212	8.000	861.52E+6	859.49E+6	164.83E+6	-162.80E+6	-18,897
34	0	212	10.000	861.52E+6	859.95E+6	204.45E+6	-202.88E+6	-23,549
35	0	212	12.000	861.52E+6	860.25E+6	244.06E+6	-242.79E+6	-28,182
36	0	265	0	861.52E+6	858.62E+6	7.74E+6	-4.84E+6	-0,562
37	0	265	2.000	861.52E+6	855.42E+6	47.35E+6	-41.25E+6	-4,788
38	0	265	4.000	861.52E+6	856.62E+6	86.97E+6	-82.07E+6	-9,527
39	0	265	6.000	861.52E+6	857.55E+6	126.58E+6	-122.62E+6	-14,233
40	0	265	8.000	861.52E+6	858.38E+6	166.19E+6	-163.06E+6	-18,927
41	0	265	10.000	861.52E+6	858.98E+6	205.81E+6	-203.27E+6	-23,595
42	0	265	12000	861.52E+6	859.45E+6	245.42E+6	-243.36E+6	-28,248
43	0	318	0	861.52E+6	858.04E+6	9.10E+6	-5.62E+6	-0,653
44	0	318	2.000	861.52E+6	854.03E+6	48.72E+6	-41.23E+6	-4,786
45	0	318	4.000	861.52E+6	855.20E+6	88.33E+6	-82.02E+6	-9,520

46	0	318	6.000	861.52E+6	856.22E+6	127.94E+6	-122.64E+6	-14,236
47	0	318	8.000	861.52E+6	857.12E+6	167.56E+6	-163.16E+6	-18,938
48	0	318	10.000	861.52E+6	857.90E+6	207.17E+6	-203.55E+6	-23,627
49	0	318	12.000	861.52E+6	858.47E+6	246.78E+6	-243.74E+6	-28,292
50	0	371	0	861.52E+6	857.46E+6	10.46E+6	-6.41E+6	-0,744
51	0	371	2.000	861.52E+6	852.68E+6	50.08E+6	-41.25E+6	-4,788
52	0	371	4.000	861.52E+6	853.72E+6	89.69E+6	-81.89E+6	-9,505
53	0	371	6.000	861.52E+6	854.86E+6	129.31E+6	-122.65E+6	-14,236
54	0	371	8.000	861.52E+6	855.79E+6	168.92E+6	-163.19E+6	-18,943
55	0	371	10.000	861.52E+6	856.66E+6	208.53E+6	-203.68E+6	-23,642
56	0	371	12.000	861.52E+6	857.41E+6	248.15E+6	-244.04E+6	-28,327
57	1.500	0	0	861.52E+6	763.33E+6	52.75E+6	45.44E+6	5,275
58	1.500	0	2.000	861.52E+6	737.26E+6	92.36E+6	31.90E+6	3,703
59	1.500	0	4.000	861.52E+6	713.56E+6	131.98E+6	15.98E+6	1,854
60	1.500	0	6.000	861.52E+6	691.72E+6	171.59E+6	-1.79E+6	-0,208
61	1.500	0	8.000	861.52E+6	669.86E+6	211.20E+6	-19.54E+6	-2,269
62	1.500	0	10.000	861.52E+6	647.98E+6	250.82E+6	-37.28E+6	-4,327
63	1.500	0	12.000	861.52E+6	626.13E+6	290.43E+6	-55.04E+6	-6,389
64	1.500	53	0	861.52E+6	762.75E+6	54.11E+6	44.65E+6	5,183
65	1.500	53	2.000	861.52E+6	736.69E+6	93.72E+6	31.10E+6	3,610
66	1.500	53	4.000	861.52E+6	713.00E+6	133.34E+6	15.18E+6	1,762
67	1.500	53	6.000	861.52E+6	691.15E+6	172.95E+6	-2.59E+6	-0,301
68	1.500	53	8.000	861.52E+6	669.29E+6	212.57E+6	-20.34E+6	-2,361
69	1.500	53	10.000	861.52E+6	647.41E+6	252.18E+6	-38.07E+6	-4,419
70	1.500	53	12.000	861.52E+6	625.55E+6	291.79E+6	-55.82E+6	-6,480
71	1.500	106	0	861.52E+6	762.18E+6	55.47E+6	43.86E+6	5,091
72	1.500	106	2.000	861.52E+6	736.13E+6	95.09E+6	30.30E+6	3,517
73	1.500	106	4.000	861.52E+6	712.43E+6	134.70E+6	14.38E+6	1,670
74	1.500	106	6.000	861.52E+6	690.59E+6	174.31E+6	-3.38E+6	-0,393
75	1.500	106	8.000	861.52E+6	668.72E+6	213.93E+6	-21.14E+6	-2,453
76	1.500	106	10.000	861.52E+6	646.84E+6	253.54E+6	-38.87E+6	-4,512
77	1.500	106	12.000	861.52E+6	624.97E+6	293.16E+6	-56.61E+6	-6,571
78	1.500	159	0	861.52E+6	761.61E+6	56.84E+6	43.07E+6	5,000
79	1.500	159	2.000	861.52E+6	735.56E+6	96.45E+6	29.50E+6	3,425
80	1.500	159	4.000	861.52E+6	711.86E+6	136.06E+6	13.59E+6	1,577
81	1.500	159	6.000	861.52E+6	690.02E+6	175.68E+6	-4.18E+6	-0,485
82	1.500	159	8.000	861.52E+6	668.16E+6	215.29E+6	-21.93E+6	-2,546
83	1.500	159	10.000	861.52E+6	646.28E+6	254.90E+6	-39.67E+6	-4,604
84	1.500	159	12.000	861.52E+6	624.40E+6	294.52E+6	-57.41E+6	-6,663
85	1.500	212	0	861.52E+6	761.03E+6	58.20E+6	42.29E+6	4,908
86	1.500	212	2.000	861.52E+6	735.00E+6	97.81E+6	28.71E+6	3,332
87	1.500	212	4.000	861.52E+6	711.30E+6	137.43E+6	12.79E+6	1,485
88	1.500	212	6.000	861.52E+6	689.45E+6	177.04E+6	-4.97E+6	-0,577
89	1.500	212	8.000	861.52E+6	667.59E+6	216.65E+6	-22.73E+6	-2,638
90	1.500	212	10.000	861.52E+6	645.71E+6	256.27E+6	-40.46E+6	-4,697
91	1.500	212	12.000	861.52E+6	623.84E+6	295.88E+6	-58.20E+6	-6,756
92	1.500	265	0	861.52E+6	760.46E+6	59.56E+6	41.50E+6	4,817
93	1.500	265	2.000	861.52E+6	734.43E+6	99.17E+6	27.91E+6	3,239
94	1.500	265	4.000	861.52E+6	710.73E+6	138.79E+6	12.00E+6	1,393
95	1.500	265	6.000	861.52E+6	688.88E+6	178.40E+6	-5.77E+6	-0,670
96	1.500	265	8.000	861.52E+6	667.02E+6	218.02E+6	-23.52E+6	-2,730
97	1.500	265	10.000	861.52E+6	645.14E+6	257.63E+6	-41.26E+6	-4,789
98	1.500	265	12.000	861.52E+6	623.27E+6	297.24E+6	-59.00E+6	-6,848
99	1.500	318	0	861.52E+6	759.89E+6	60.92E+6	40.71E+6	4,725
100	1.500	318	2.000	861.52E+6	733.87E+6	100.54E+6	27.11E+6	3,147
101	1.500	318	4.000	861.52E+6	710.16E+6	140.15E+6	11.21E+6	1,301
102	1.500	318	6.000	861.52E+6	688.32E+6	179.76E+6	-6.56E+6	-0,762
103	1.500	318	8.000	861.52E+6	666.45E+6	219.38E+6	-24.32E+6	-2,823
104	1.500	318	10.000	861.52E+6	644.58E+6	258.99E+6	-42.05E+6	-4,881
105	1.500	318	12.000	861.52E+6	622.70E+6	298.61E+6	-59.79E+6	-6,940
106	1.500	371	0	861.52E+6	759.31E+6	62.29E+6	39.92E+6	4,634
107	1.500	371	2.000	861.52E+6	733.30E+6	101.90E+6	26.31E+6	3,054
108	1.500	371	4.000	861.52E+6	709.59E+6	141.51E+6	10.41E+6	1,208
109	1.500	371	6.000	861.52E+6	687.75E+6	181.13E+6	-7.36E+6	-0,854
110	1.500	371	8.000	861.52E+6	665.89E+6	220.74E+6	-25.11E+6	-2,915
111	1.500	371	10.000	861.52E+6	644.01E+6	260.35E+6	-42.85E+6	-4,973
112	1.500	371	12.000	861.52E+6	622.13E+6	299.97E+6	-60.59E+6	-7,033
113	3.000	0	0	861.52E+6	672.09E+6	104.57E+6	84.86E+6	9,850
114	3.000	0	2.000	861.52E+6	645.31E+6	144.18E+6	72.02E+6	8,360
115	3.000	0	4.000	861.52E+6	620.02E+6	183.80E+6	57.70E+6	6,697

116	3.000	0	6.000	861.52E+6	595.22E+6	223.41E+6	42.89E+6	4,978
117	3.000	0	8.000	861.52E+6	572.19E+6	263.03E+6	26.30E+6	3,052
118	3.000	0	1.0000	861.52E+6	549.97E+6	302.64E+6	8.91E+6	1,034
119	3.000	0	1.2000	861.52E+6	527.65E+6	342.25E+6	-8.39E+6	-0,973
120	3.000	53	0	861.52E+6	672.17E+6	105.93E+6	83.41E+6	9,682
121	3.000	53	2.000	861.52E+6	644.82E+6	145.55E+6	71.15E+6	8,259
122	3.000	53	4.000	861.52E+6	619.54E+6	185.16E+6	56.82E+6	6,595
123	3.000	53	6.000	861.52E+6	594.73E+6	224.77E+6	42.01E+6	4,877
124	3.000	53	8.000	861.52E+6	571.71E+6	264.39E+6	25.42E+6	2,951
125	3.000	53	10.000	861.52E+6	549.48E+6	304.00E+6	8.03E+6	0,933
126	3.000	53	12.000	861.52E+6	527.16E+6	343.62E+6	-9.26E+6	-1,074
127	3.000	106	0	861.52E+6	671.8E+6	107.30E+6	82.54E+6	9,581
128	3.000	106	2.000	861.52E+6	644.33E+6	146.91E+6	70.28E+6	8,157
129	3.000	106	4.000	861.52E+6	619.05E+6	186.52E+6	55.94E+6	6,493
130	3.000	106	6.000	861.52E+6	594.24E+6	226.14E+6	41.14E+6	4,775
131	3.000	106	8.000	861.52E+6	571.22E+6	265.75E+6	24.55E+6	2,849
132	3.000	106	10.000	861.52E+6	548.99E+6	305.36E+6	7.16E+6	0,831
133	3.000	106	12.000	861.52E+6	526.67E+6	344.98E+6	-10.13E+6	-1,176
134	3.000	159	0	861.52E+6	671.19E+6	108.66E+6	81.66E+6	9,479
135	3.000	159	2.000	861.52E+6	643.84E+6	148.27E+6	69.40E+6	8,056
136	3.000	159	4.000	861.52E+6	618.57E+6	187.89E+6	55.06E+6	6,391
137	3.000	159	6.000	861.52E+6	593.76E+6	227.50E+6	40.26E+6	4,673
138	3.000	159	8.000	861.52E+6	570.73E+6	267.11E+6	23.67E+6	2,747
139	3.000	159	10.000	861.52E+6	548.50E+6	306.73E+6	6.29E+6	0,730
140	3.000	159	12.000	861.52E+6	526.18E+6	346.34E+6	-11.00E+6	-1,277
141	3.000	212	0	861.52E+6	670.71E+6	110.02E+6	80.79E+6	9,377
142	3.000	212	2.000	861.52E+6	643.36E+6	149.63E+6	68.52E+6	7,954
143	3.000	212	4.000	861.52E+6	618.09E+6	189.25E+6	54.17E+6	6,288
144	3.000	212	6.000	861.52E+6	593.28E+6	228.86E+6	39.38E+6	4,571
145	3.000	212	8.000	861.52E+6	570.25E+6	268.48E+6	22.79E+6	2,645
146	3.000	212	10.000	861.52E+6	548.01E+6	308.09E+6	5.41E+6	0,628
147	3.000	212	12.000	861.52E+6	525.68E+6	347.70E+6	-11.87E+6	-1,378
148	3.000	265	0	861.52E+6	670.23E+6	111.38E+6	79.91E+6	9,275
149	3.000	265	2.000	861.52E+6	642.88E+6	151.00E+6	67.64E+6	7,851
150	3.000	265	4.000	861.52E+6	617.62E+6	190.61E+6	53.29E+6	6,185
151	3.000	265	6.000	861.52E+6	592.80E+6	230.22E+6	38.49E+6	4,468
152	3.000	265	8.000	861.52E+6	569.77E+6	269.84E+6	21.91E+6	2,543
153	3.000	265	10.000	861.52E+6	547.53E+6	309.45E+6	4.54E+6	0,526
154	3.000	265	12.000	861.52E+6	525.20E+6	349.07E+6	-12.75E+6	-1,479
155	3.000	318	0	861.52E+6	669.75E+6	112.75E+6	79.02E+6	9,173
156	3.000	318	2.000	861.52E+6	642.40E+6	152.36E+6	66.75E+6	7,748
157	3.000	318	4.000	861.52E+6	617.14E+6	191.97E+6	52.40E+6	6,082
158	3.000	318	6.000	861.52E+6	592.32E+6	231.59E+6	37.61E+6	4,365
159	3.000	318	8.000	861.52E+6	569.29E+6	271.20E+6	21.02E+6	2,440
160	3.000	318	10.000	861.52E+6	547.05E+6	310.81E+6	3.65E+6	0,424
161	3.000	318	12.000	861.52E+6	524.71E+6	350.43E+6	-13.62E+6	-1,581
162	3.000	371	0	861.52E+6	669.27E+6	114.11E+6	78.14E+6	9,070
163	3.000	371	2.000	861.52E+6	641.93E+6	153.72E+6	65.87E+6	7,645
164	3.000	371	4.000	861.52E+6	616.67E+6	193.34E+6	51.51E+6	5,979
165	3.000	371	6.000	861.52E+6	591.84E+6	232.95E+6	36.72E+6	4,262
166	3.000	371	8.000	861.52E+6	568.81E+6	272.56E+6	20.14E+6	2,338
167	3.000	371	10.000	861.52E+6	546.57E+6	312.18E+6	2.77E+6	0,322
168	3.000	371	12.000	861.52E+6	524.22E+6	351.79E+6	-14.50E+6	-1,683
169	4.500	0	0	861.52E+6	636.54E+6	156.39E+6	68.58E+6	7,961
170	4.500	0	2.000	861.52E+6	606.92E+6	196.01E+6	58.59E+6	6,801
171	4.500	0	4.000	861.52E+6	578.53E+6	235.62E+6	47.37E+6	5,498
172	4.500	0	6.000	861.52E+6	551.54E+6	275.23E+6	34.75E+6	4,033
173	4.500	0	8.000	861.52E+6	524.50E+6	314.85E+6	22.17E+6	2,573
174	4.500	0	10.000	861.52E+6	499.50E+6	354.46E+6	7.55E+6	0,877
175	4.500	0	12.000	861.52E+6	475.15E+6	394.07E+6	-7.71E+6	-0,894
176	4.500	53	0	861.52E+6	636.18E+6	157.75E+6	67.58E+6	7,844
177	4.500	53	2.000	861.52E+6	606.58E+6	197.37E+6	57.57E+6	6,683
178	4.500	53	4.000	861.52E+6	578.18E+6	236.98E+6	46.35E+6	5,380
179	4.500	53	6.000	861.52E+6	551.20E+6	276.60E+6	33.72E+6	3,914
180	4.500	53	8.000	861.52E+6	524.18E+6	316.21E+6	21.13E+6	2,453
181	4.500	53	10.000	861.52E+6	499.17E+6	355.82E+6	6.53E+6	0,758
182	4.500	53	12.000	861.52E+6	474.79E+6	395.44E+6	-8.71E+6	-1,011
183	4.500	106	0	861.52E+6	635.82E+6	159.12E+6	66.58E+6	7,728
184	4.500	106	2.000	861.52E+6	606.23E+6	198.73E+6	56.55E+6	6,565
185	4.500	106	4.000	861.52E+6	577.84E+6	238.34E+6	45.34E+6	5,262

186	4.500	106	6.000	861.52E+6	550.87E+6	277.96E+6	32.69E+6	3,795
187	4.500	106	8.000	861.52E+6	523.84E+6	317.57E+6	20.10E+6	2,333
188	4.500	106	10.000	861.52E+6	498.83E+6	357.19E+6	5.50E+6	0,639
189	4.500	106	12.000	861.52E+6	474.43E+6	396.80E+6	-9.71E+6	-1,127
190	4.500	159	0	861.52E+6	635.47E+6	160.48E+6	65.57E+6	7,611
191	4.500	159	2.000	861.52E+6	605.88E+6	200.09E+6	55.54E+6	6,447
192	4.500	159	4.000	861.52E+6	577.49E+6	239.71E+6	44.32E+6	5,144
193	4.500	159	6.000	861.52E+6	550.52E+6	279.32E+6	31.67E+6	3,677
194	4.500	159	8.000	861.52E+6	523.51E+6	318.93E+6	19.07E+6	2,214
195	4.500	159	10.000	861.52E+6	498.48E+6	358.55E+6	4.48E+6	0,521
196	4.500	159	12.000	861.52E+6	474.07E+6	398.16E+6	-10.72E+6	-1,244
197	4.500	212	0	861.52E+6	635.11E+6	161.84E+6	64.56E+6	7,494
198	4.500	212	2.000	861.52E+6	605.53E+6	201.46E+6	54.53E+6	6,330
199	4.500	212	4.000	861.52E+6	577.14E+6	241.07E+6	43.30E+6	5,026
200	4.500	212	6.000	861.52E+6	550.17E+6	280.68E+6	30.66E+6	3,559
201	4.500	212	8.000	861.52E+6	523.17E+6	320.30E+6	18.05E+6	2,095
202	4.500	212	10.000	861.52E+6	498.14E+6	359.91E+6	3.47E+6	0,402
203	4.500	212	12.000	861.52E+6	473.71E+6	399.52E+6	-11.72E+6	-1,360
204	4.500	265	0	861.52E+6	634.75E+6	163.20E+6	63.56E+6	7,378
205	4.500	265	2.000	861.52E+6	605.18E+6	202.82E+6	53.52E+6	6,212
206	4.500	265	4.000	861.52E+6	576.80E+6	242.43E+6	42.28E+6	4,908
207	4.500	265	6.000	861.52E+6	549.83E+6	282.05E+6	29.64E+6	3,441
208	4.500	265	8.000	861.52E+6	522.84E+6	321.66E+6	17.02E+6	1,976
209	4.500	265	10.000	861.52E+6	497.80E+6	361.27E+6	2.45E+6	0,284
210	4.500	265	12.000	861.52E+6	473.36E+6	400.89E+6	-12.73E+6	-1,477
211	4.500	318	0	861.52E+6	634.40E+6	164.57E+6	62.55E+6	7,260
212	4.500	318	2.000	861.52E+6	604.83E+6	204.18E+6	52.51E+6	6,095
213	4.500	318	4.000	861.52E+6	576.46E+6	243.79E+6	41.26E+6	4,789
214	4.500	318	6.000	861.52E+6	549.48E+6	283.41E+6	28.63E+6	3,323
215	4.500	318	8.000	861.52E+6	522.50E+6	323.02E+6	16.00E+6	1,857
216	4.500	318	10.000	861.52E+6	497.45E+6	362.64E+6	1.43E+6	0,166
217	4.500	318	12.000	861.52E+6	473.00E+6	402.25E+6	-13.74E+6	-1,594
218	4.500	371	0	861.52E+6	634.05E+6	165.93E+6	61.54E+6	7,143
219	4.500	371	2.000	861.52E+6	604.48E+6	205.54E+6	51.49E+6	5,977
220	4.500	371	4.000	861.52E+6	576.12E+6	245.16E+6	40.23E+6	4,670
221	4.500	371	6.000	861.52E+6	549.13E+6	284.77E+6	27.62E+6	3,206
222	4.500	371	8.000	861.52E+6	522.16E+6	324.38E+6	14.97E+6	1,738
223	4.500	371	10.000	861.52E+6	497.11E+6	364.00E+6	407.02E+3	0,047
224	4.500	371	12.000	861.52E+6	472.65E+6	403.61E+6	-14.75E+6	-1,712
225	6.000	0	0	861.52E+6	621.61E+6	208.21E+6	31.69E+6	3,678
226	6.000	0	2.000	861.52E+6	590.62E+6	247.83E+6	23.06E+6	2,677
227	6.000	0	4.000	861.52E+6	559.97E+6	287.44E+6	14.11E+6	1,637
228	6.000	0	6.000	861.52E+6	530.85E+6	327.06E+6	3.61E+6	0,419
229	6.000	0	8.000	861.52E+6	501.86E+6	366.67E+6	-7.01E+6	-0,814
230	6.000	0	10.000	861.52E+6	474.13E+6	406.28E+6	-18.89E+6	-2,193
231	6.000	0	12.000	861.52E+6	447.75E+6	445.90E+6	-32.13E+6	-3,729
232	6.000	53	0	861.52E+6	621.28E+6	209.58E+6	30.66E+6	3,559
233	6.000	53	2.000	861.52E+6	590.32E+6	249.19E+6	22.00E+6	2,554
234	6.000	53	4.000	861.52E+6	559.68E+6	288.80E+6	13.03E+6	1,512
235	6.000	53	6.000	861.52E+6	530.56E+6	328.42E+6	2.54E+6	0,295
236	6.000	53	8.000	861.52E+6	501.56E+6	368.03E+6	-8.08E+6	-0,938
237	6.000	53	10.000	861.52E+6	473.84E+6	407.65E+6	-19.97E+6	-2,318
238	6.000	53	12.000	861.52E+6	447.46E+6	447.26E+6	-33.20E+6	-3,853
239	6.000	106	0	861.52E+6	620.95E+6	210.94E+6	29.63E+6	3,439
240	6.000	106	2.000	861.52E+6	590.01E+6	250.55E+6	20.96E+6	2,433
241	6.000	106	4.000	861.52E+6	559.39E+6	290.17E+6	11.96E+6	1,388
242	6.000	106	6.000	861.52E+6	530.26E+6	329.78E+6	1.48E+6	0,171
243	6.000	106	8.000	861.52E+6	501.26E+6	369.39E+6	-9.14E+6	-1,061
244	6.000	106	10.000	861.52E+6	473.55E+6	409.01E+6	-21.04E+6	-2,443
245	6.000	106	12.000	861.52E+6	447.16E+6	448.62E+6	-34.27E+6	-3,978
246	6.000	159	0	861.52E+6	620.62E+6	212.30E+6	28.60E+6	3,319
247	6.000	159	2.000	861.52E+6	589.69E+6	251.92E+6	19.91E+6	2,311
248	6.000	159	4.000	861.52E+6	559.09E+6	291.53E+6	10.89E+6	1,264
249	6.000	159	6.000	861.52E+6	529.96E+6	331.14E+6	413.68E+3	0,048
250	6.000	159	8.000	861.52E+6	500.96E+6	370.76E+6	-10.20E+6	-1,184
251	6.000	159	10.000	861.52E+6	473.26E+6	410.37E+6	-22.11E+6	-2,567
252	6.000	159	12.000	861.52E+6	446.87E+6	449.98E+6	-35.33E+6	-4,101
253	6.000	212	0	861.52E+6	620.29E+6	213.66E+6	27.56E+6	3,199
254	6.000	212	2.000	861.52E+6	589.37E+6	253.28E+6	18.87E+6	2,190
255	6.000	212	4.000	861.52E+6	558.80E+6	292.89E+6	9.83E+6	1,141

256	6.000	212	6.000	861.52E+6	529.66E+6	332.51E+6	-649.09E+3	-0,075
257	6.000	212	8.000	861.52E+6	500.66E+6	372.12E+6	-1126E+6	-1,307
258	6.000	212	10.000	861.52E+6	472.96E+6	411.73E+6	-2318E+6	-2,690
259	6.000	212	12.000	861.52E+6	446.57E+6	451.35E+6	-3640E+6	-4,225
260	6.000	265	0	861.52E+6	619.96E+6	215.03E+6	26.53E+6	3,079
261	6.000	265	2.000	861.52E+6	589.05E+6	254.64E+6	17.83E+6	2,069
262	6.000	265	4.000	861.52E+6	558.50E+6	294.25E+6	8.76E+6	1,017
263	6.000	265	6.000	861.52E+6	529.36E+6	333.87E+6	-1.71E+6	-0,199
264	6.000	265	8.000	861.52E+6	500.36E+6	373.48E+6	-12.32E+6	-1,430
265	6.000	265	10.000	861.52E+6	472.66E+6	413.10E+6	-24.24E+6	-2,814
266	6.000	265	12.000	861.52E+6	446.27E+6	452.71E+6	-37.46E+6	-4,348
267	6.000	318	0	861.52E+6	619.63E+6	216.39E+6	25.50E+6	2,959
268	6.000	318	2.000	861.52E+6	588.73E+6	256.00E+6	16.78E+6	1,948
269	6.000	318	4.000	861.52E+6	558.21E+6	295.62E+6	7.69E+6	0,893
270	6.000	318	6.000	861.52E+6	529.06E+6	335.23E+6	-2.78E+6	-0,322
271	6.000	318	8.000	861.52E+6	500.06E+6	374.84E+6	-13.38E+6	-1,553
272	6.000	318	10.000	861.52E+6	472.36E+6	414.46E+6	-25.31E+6	-2,937
273	6.000	318	12.000	861.52E+6	445.97E+6	454.07E+6	-38.53E+6	-4,472
274	6.000	371	0	861.52E+6	619.30E+6	217.75E+6	24.46E+6	2,839
275	6.000	371	2.000	861.52E+6	588.41E+6	257.36E+6	15.74E+6	1,827
276	6.000	371	4.000	861.52E+6	557.91E+6	296.98E+6	6.63E+6	0,769
277	6.000	371	6.000	861.52E+6	528.76E+6	336.59E+6	-3.84E+6	-0,446
278	6.000	371	8.000	861.52E+6	499.76E+6	376.21E+6	-14.45E+6	-1,677
279	6.000	371	10.000	861.52E+6	472.07E+6	415.82E+6	-26.37E+6	-3,061
280	6.000	371	12.000	861.52E+6	445.67E+6	455.43E+6	-39.59E+6	-4,595
281	7.500	0	0	861.52E+6	612.53E+6	260.04E+6	-11.05E+6	-1,282
282	7.500	0	2.000	861.52E+6	581.06E+6	299.65E+6	-19.19E+6	-2,228
283	7.500	0	4.000	861.52E+6	549.82E+6	339.26E+6	-27.57E+6	-3,200
284	7.500	0	6.000	861.52E+6	519.39E+6	378.88E+6	-36.75E+6	-4,266
285	7.500	0	8.000	861.52E+6	489.07E+6	418.49E+6	-46.04E+6	-5,345
286	7.500	0	10.000	861.52E+6	459.54E+6	458.10E+6	-56.13E+6	-6,515
287	7.500	0	12.000	861.52E+6	431.56E+6	497.72E+6	-67.76E+6	-7,866
288	7.500	53	0	861.52E+6	612.22E+6	261.40E+6	-12.11E+6	-1,405
289	7.500	53	2.000	861.52E+6	580.79E+6	301.01E+6	-20.28E+6	-2,354
290	7.500	53	4.000	861.52E+6	549.57E+6	340.63E+6	-28.68E+6	-3,329
291	7.500	53	6.000	861.52E+6	519.14E+6	380.24E+6	-37.86E+6	-4,395
292	7.500	53	8.000	861.52E+6	488.82E+6	419.85E+6	-47.15E+6	-5,473
293	7.500	53	10.000	861.52E+6	459.30E+6	459.47E+6	-57.25E+6	-6,645
294	7.500	53	12.000	861.52E+6	431.31E+6	499.08E+6	-68.88E+6	-7,995
295	7.500	106	0	861.52E+6	611.92E+6	262.76E+6	-13.17E+6	-1,528
296	7.500	106	2.000	861.52E+6	580.50E+6	302.37E+6	-21.36E+6	-2,479
297	7.500	106	4.000	861.52E+6	549.31E+6	341.99E+6	-29.78E+6	-3,457
298	7.500	106	6.000	861.52E+6	518.88E+6	381.60E+6	-38.97E+6	-4,523
299	7.500	106	8.000	861.52E+6	488.56E+6	421.22E+6	-48.26E+6	-5,602
300	7.500	106	10.000	861.52E+6	459.05E+6	460.83E+6	-58.36E+6	-6,774
301	7.500	106	12.000	861.52E+6	431.06E+6	500.44E+6	-69.99E+6	-8,124
302	7.500	159	0	861.52E+6	611.62E+6	264.12E+6	-14.23E+6	-1,652
303	7.500	159	2.000	861.52E+6	580.22E+6	303.74E+6	-22.44E+6	-2,604
304	7.500	159	4.000	861.52E+6	549.05E+6	343.35E+6	-30.89E+6	-3,585
305	7.500	159	6.000	861.52E+6	518.62E+6	382.96E+6	-40.07E+6	-4,651
306	7.500	159	8.000	861.52E+6	488.30E+6	422.58E+6	-49.36E+6	-5,730
307	7.500	159	10.000	861.52E+6	458.80E+6	462.19E+6	-59.48E+6	-6,904
308	7.500	159	12.000	861.52E+6	430.81E+6	501.81E+6	-71.10E+6	-8,253
309	7.500	212	0	861.52E+6	611.32E+6	265.49E+6	-15.29E+6	-1,775
310	7.500	212	2.000	861.52E+6	579.93E+6	305.10E+6	-23.51E+6	-2,729
311	7.500	212	4.000	861.52E+6	548.79E+6	344.71E+6	-31.99E+6	-3,713
312	7.500	212	6.000	861.52E+6	518.36E+6	384.33E+6	-41.18E+6	-4,779
313	7.500	212	8.000	861.52E+6	488.04E+6	423.94E+6	-50.46E+6	-5,858
314	7.500	212	10.000	861.52E+6	458.55E+6	463.55E+6	-60.59E+6	-7,033
315	7.500	212	12.000	861.52E+6	430.56E+6	503.17E+6	-72.21E+6	-8,382
316	7.500	265	0	861.52E+6	611.02E+6	266.85E+6	-16.36E+6	-1,898
317	7.500	265	2.000	861.52E+6	579.64E+6	306.46E+6	-24.59E+6	-2,854
318	7.500	265	4.000	861.52E+6	548.53E+6	346.08E+6	-33.09E+6	-3,841
319	7.500	265	6.000	861.52E+6	518.10E+6	385.69E+6	-42.28E+6	-4,907
320	7.500	265	8.000	861.52E+6	487.78E+6	425.30E+6	-51.57E+6	-5,985
321	7.500	265	10.000	861.52E+6	458.30E+6	464.92E+6	-61.70E+6	-7,162
322	7.500	265	12.000	861.52E+6	430.31E+6	504.53E+6	-73.32E+6	-8,511
323	7.500	318	0	861.52E+6	610.72E+6	268.21E+6	-17.42E+6	-2,022
324	7.500	318	2.000	861.52E+6	579.35E+6	307.82E+6	-25.66E+6	-2,979
325	7.500	318	4.000	861.52E+6	548.26E+6	347.44E+6	-34.18E+6	-3,968

326	7.500	318	6.000	861.52E+6	517.84E+6	387.05E+6	-43.38E+6	-5,035
327	7.500	318	8.000	861.52E+6	487.52E+6	426.67E+6	-52.67E+6	-6,113
328	7.500	318	10.000	861.52E+6	458.05E+6	466.28E+6	-62.81E+6	-7,291
329	7.500	318	12.000	861.52E+6	430.06E+6	505.89E+6	-74.43E+6	-8,640
330	7.500	371	0	861.52E+6	610.43E+6	269.57E+6	-18.48E+6	-2,145
331	7.500	371	2.000	861.52E+6	579.07E+6	309.19E+6	-26.74E+6	-3,103
332	7.500	371	4.000	861.52E+6	547.99E+6	348.80E+6	-35.28E+6	-4,095
333	7.500	371	6.000	861.52E+6	517.58E+6	388.41E+6	-44.48E+6	-5,163
334	7.500	371	8.000	861.52E+6	487.25E+6	428.03E+6	-53.77E+6	-6,241
335	7.500	371	10.000	861.52E+6	457.79E+6	467.64E+6	-63.92E+6	-7,419
336	7.500	371	12.000	861.52E+6	429.80E+6	507.26E+6	-75.54E+6	-8,768
337	9.000	0	0	861.52E+6	606.65E+6	311.86E+6	-56.99E+6	-6,615
338	9.000	0	2.000	861.52E+6	574.65E+6	351.47E+6	-64.61E+6	-7,499
339	9.000	0	4.000	861.52E+6	543.17E+6	391.08E+6	-72.73E+6	-8,443
340	9.000	0	6.000	861.52E+6	512.44E+6	430.70E+6	-81.62E+6	-9,474
341	9.000	0	8.000	861.52E+6	481.66E+6	470.31E+6	-90.46E+6	-10,500
342	9.000	0	10.000	861.52E+6	451.15E+6	509.93E+6	-99.56E+6	-11,556
343	9.000	0	12.000	861.52E+6	422.08E+6	549.54E+6	-110.10E+6	-12,780
344	9.000	53	0	861.52E+6	606.36E+6	313.22E+6	-58.07E+6	-6,740
345	9.000	53	2.000	861.52E+6	574.39E+6	352.83E+6	-65.71E+6	-7,627
346	9.000	53	4.000	861.52E+6	542.93E+6	392.45E+6	-73.86E+6	-8,573
347	9.000	53	6.000	861.52E+6	512.20E+6	432.06E+6	-82.75E+6	-9,605
348	9.000	53	8.000	861.52E+6	481.43E+6	471.67E+6	-91.59E+6	-10,631
349	9.000	53	10.000	861.52E+6	450.92E+6	511.29E+6	-100.69E+6	-11,688
350	9.000	53	12.000	861.52E+6	421.86E+6	550.90E+6	-111.24E+6	-12,912
351	9.000	106	0	861.52E+6	606.07E+6	314.58E+6	-59.14E+6	-6,864
352	9.000	106	2.000	861.52E+6	574.12E+6	354.20E+6	-66.80E+6	-7,753
353	9.000	106	4.000	861.52E+6	542.68E+6	393.81E+6	-74.97E+6	-8,703
354	9.000	106	6.000	861.52E+6	511.96E+6	433.42E+6	-83.87E+6	-9,735
355	9.000	106	8.000	861.52E+6	481.19E+6	473.04E+6	-92.71E+6	-10,761
356	9.000	106	10.000	861.52E+6	450.69E+6	512.65E+6	-101.83E+6	-11,819
357	9.000	106	12.000	861.52E+6	421.63E+6	552.26E+6	-112.38E+6	-13,044
358	9.000	159	0	861.52E+6	605.78E+6	315.94E+6	-60.21E+6	-6,989
359	9.000	159	2.000	861.52E+6	573.84E+6	355.56E+6	-67.88E+6	-7,880
360	9.000	159	4.000	861.52E+6	542.43E+6	395.17E+6	-76.09E+6	-8,832
361	9.000	159	6.000	861.52E+6	511.71E+6	434.79E+6	-84.98E+6	-9,864
362	9.000	159	8.000	861.52E+6	480.94E+6	474.40E+6	-93.83E+6	-10,891
363	9.000	159	10.000	861.52E+6	450.46E+6	514.01E+6	-102.95E+6	-11,950
364	9.000	159	12.000	861.52E+6	421.40E+6	553.63E+6	-113.51E+6	-13,175
365	9.000	212	0	861.52E+6	605.49E+6	317.31E+6	-61.28E+6	-7,114
366	9.000	212	2.000	861.52E+6	573.56E+6	356.92E+6	-68.97E+6	-8,006
367	9.000	212	4.000	861.52E+6	542.18E+6	396.53E+6	-77.20E+6	-8,961
368	9.000	212	6.000	861.52E+6	511.46E+6	436.15E+6	-86.10E+6	-9,994
369	9.000	212	8.000	861.52E+6	480.69E+6	475.76E+6	-94.94E+6	-11,020
370	9.000	212	10.000	861.52E+6	450.22E+6	515.38E+6	-104.08E+6	-12,081
371	9.000	212	12.000	861.52E+6	421.16E+6	554.99E+6	-114.64E+6	-13,306
372	9.000	265	0	861.52E+6	605.20E+6	318.67E+6	-62.36E+6	-7,238
373	9.000	265	2.000	861.52E+6	573.29E+6	358.28E+6	-70.05E+6	-8,131
374	9.000	265	4.000	861.52E+6	541.92E+6	397.90E+6	-78.30E+6	-9,089
375	9.000	265	6.000	861.52E+6	511.21E+6	437.51E+6	-87.21E+6	-10,123
376	9.000	265	8.000	861.52E+6	480.45E+6	477.12E+6	-96.06E+6	-11,150
377	9.000	265	10.000	861.52E+6	449.98E+6	516.74E+6	-105.20E+6	-12,211
378	9.000	265	12.000	861.52E+6	420.92E+6	556.35E+6	-115.76E+6	-13,437
379	9.000	318	0	861.52E+6	604.91E+6	320.03E+6	-63.43E+6	-7,363
380	9.000	318	2.000	861.52E+6	573.01E+6	359.65E+6	-71.14E+6	-8,257
381	9.000	318	4.000	861.52E+6	541.66E+6	399.26E+6	-79.40E+6	-9,217
382	9.000	318	6.000	861.52E+6	510.96E+6	438.87E+6	-88.32E+6	-10,252
383	9.000	318	8.000	861.52E+6	480.20E+6	478.49E+6	-97.17E+6	-11,279
384	9.000	318	10.000	861.52E+6	449.74E+6	518.10E+6	-106.33E+6	-12,342
385	9.000	318	12.000	861.52E+6	420.69E+6	557.71E+6	-116.89E+6	-13,568
386	9.000	371	0	861.52E+6	604.62E+6	321.39E+6	-64.50E+6	-7,487
387	9.000	371	2.000	861.52E+6	572.73E+6	361.01E+6	-72.22E+6	-8,383
388	9.000	371	4.000	861.52E+6	541.40E+6	400.62E+6	-80.51E+6	-9,345
389	9.000	371	6.000	861.52E+6	510.71E+6	440.24E+6	-89.43E+6	-10,381
390	9.000	371	8.000	861.52E+6	479.95E+6	479.85E+6	-98.28E+6	-11,408
391	9.000	371	10.000	861.52E+6	449.50E+6	519.46E+6	-107.45E+6	-12,472
392	9.000	371	12.000	861.52E+6	420.45E+6	559.08E+6	-118.01E+6	-13,698
393	10.500	0	0	861.52E+6	602.55E+6	363.68E+6	-104.71E+6	-12,154
394	10.500	0	2.000	861.52E+6	570.15E+6	403.29E+6	-111.92E+6	-12,991
395	10.500	0	4.000	861.52E+6	538.33E+6	442.91E+6	-119.72E+6	-13,897

396	10.500	0	6.000	861.52E+6	507.31E+6	482.52E+6	-128.31E+6	-14,893
397	10.500	0	8.000	861.52E+6	476.21E+6	522.13E+6	-136.83E+6	-15,882
398	10.500	0	10.000	861.52E+6	445.51E+6	561.75E+6	-145.74E+6	-16,917
399	10.500	0	12.000	861.52E+6	416.04E+6	601.36E+6	-155.89E+6	-18,095
400	10.500	53	0	861.52E+6	602.26E+6	365.04E+6	-105.79E+6	-12,279
401	10.500	53	2.000	861.52E+6	569.89E+6	404.66E+6	-113.03E+6	-13,120
402	10.500	53	4.000	861.52E+6	538.10E+6	444.27E+6	-120.85E+6	-14,027
403	10.500	53	6.000	861.52E+6	507.07E+6	483.88E+6	-129.44E+6	-15,025
404	10.500	53	8.000	861.52E+6	475.98E+6	523.50E+6	-137.96E+6	-16,014
405	10.500	53	10.000	861.52E+6	445.29E+6	563.11E+6	-146.88E+6	-17,049
406	10.500	53	12.000	861.52E+6	415.82E+6	602.72E+6	-157.03E+6	-18,227
407	10.500	106	0	861.52E+6	601.98E+6	366.40E+6	-106.86E+6	-12,404
408	10.500	106	2.000	861.52E+6	569.62E+6	406.02E+6	-114.12E+6	-13,246
409	10.500	106	4.000	861.52E+6	537.85E+6	445.63E+6	-121.97E+6	-14,158
410	10.500	106	6.000	861.52E+6	506.83E+6	485.25E+6	-130.56E+6	-15,155
411	10.500	106	8.000	861.52E+6	475.74E+6	524.86E+6	-139.09E+6	-16,144
412	10.500	106	10.000	861.52E+6	445.06E+6	564.47E+6	-148.02E+6	-17,181
413	10.500	106	12.000	861.52E+6	415.60E+6	604.09E+6	-158.17E+6	-18,360
414	10.500	159	0	861.52E+6	601.69E+6	367.77E+6	-107.94E+6	-12,529
415	10.500	159	2.000	861.52E+6	569.35E+6	407.38E+6	-115.21E+6	-13,373
416	10.500	159	4.000	861.52E+6	537.61E+6	446.99E+6	-123.08E+6	-14,287
417	10.500	159	6.000	861.52E+6	506.59E+6	486.61E+6	-131.68E+6	-15,285
418	10.500	159	8.000	861.52E+6	475.50E+6	526.22E+6	-140.21E+6	-16,274
419	10.500	159	10.000	861.52E+6	444.83E+6	565.84E+6	-149.15E+6	-17,313
420	10.500	159	12.000	861.52E+6	415.37E+6	605.45E+6	-159.31E+6	-18,491
421	10.500	212	0	861.52E+6	601.40E+6	369.13E+6	-109.02E+6	-12,654
422	10.500	212	2.000	861.52E+6	569.07E+6	408.74E+6	-116.30E+6	-13,499
423	10.500	212	4.000	861.52E+6	537.35E+6	448.36E+6	-124.19E+6	-14,415
424	10.500	212	6.000	861.52E+6	506.35E+6	487.97E+6	-132.80E+6	-15,415
425	10.500	212	8.000	861.52E+6	475.26E+6	527.58E+6	-141.33E+6	-16,404
426	10.500	212	10.000	861.52E+6	444.60E+6	567.20E+6	-150.28E+6	-17,444
427	10.500	212	12.000	861.52E+6	415.14E+6	606.81E+6	-160.44E+6	-18,623
428	10.500	265	0	861.52E+6	601.12E+6	370.49E+6	-110.09E+6	-12,779
429	10.500	265	2.000	861.52E+6	568.80E+6	410.11E+6	-117.39E+6	-13,626
430	10.500	265	4.000	861.52E+6	537.10E+6	449.72E+6	-125.30E+6	-14,544
431	10.500	265	6.000	861.52E+6	506.10E+6	489.33E+6	-133.92E+6	-15,544
432	10.500	265	8.000	861.52E+6	475.01E+6	528.95E+6	-142.44E+6	-16,534
433	10.500	265	10.000	861.52E+6	444.36E+6	568.56E+6	-151.41E+6	-17,575
434	10.500	265	12.000	861.52E+6	414.91E+6	608.17E+6	-161.57E+6	-18,754
435	10.500	318	0	861.52E+6	600.83E+6	371.85E+6	-111.17E+6	-12,904
436	10.500	318	2.000	861.52E+6	568.50E+6	411.47E+6	-118.45E+6	-13,749
437	10.500	318	4.000	861.52E+6	536.84E+6	451.08E+6	-126.40E+6	-14,672
438	10.500	318	6.000	861.52E+6	505.85E+6	490.70E+6	-135.03E+6	-15,674
439	10.500	318	8.000	861.52E+6	474.77E+6	530.31E+6	-143.56E+6	-16,664
440	10.500	318	10.000	861.52E+6	444.13E+6	569.92E+6	-152.54E+6	-17,706
441	10.500	318	12.000	861.52E+6	414.68E+6	609.54E+6	-162.70E+6	-18,885
442	10.500	371	0	861.52E+6	600.55E+6	373.22E+6	-112.25E+6	-13,029
443	10.500	371	2.000	861.52E+6	568.22E+6	412.83E+6	-119.54E+6	-13,875
444	10.500	371	4.000	861.52E+6	536.58E+6	452.44E+6	-127.51E+6	-14,800
445	10.500	371	6.000	861.52E+6	505.61E+6	492.06E+6	-136.15E+6	-15,803
446	10.500	371	8.000	861.52E+6	474.52E+6	531.67E+6	-144.68E+6	-16,793
447	10.500	371	10.000	861.52E+6	443.89E+6	571.29E+6	-153.66E+6	-17,836
448	10.500	371	12.000	861.52E+6	414.45E+6	610.90E+6	-163.83E+6	-19,016
