



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Dimensionamiento de microrred aislada para el municipio de Inírida Guainía

JOHN EDWAR PULGARIN MURILLO

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Manizales, Colombia
Agosto 2020

Dimensionamiento de microrred aislada para el municipio de Inírida Guainía

JOHN EDWAR PULGARIN MURILLO

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
de:

Magíster en Ingeniería, Ingeniería eléctrica

Director (a):

Ph. D JUAN DAVID BASTIDAS RODRIGUEZ

Línea de Profundización

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Manizales, Colombia
Agosto 2020
Año

Agradecimientos

A mi esposa Laura Estrada Carvajal y mi hija Isabella Pulgarin Estrada, por la paciencia y el acompañamiento durante este proceso, a mis padres por siempre estar presentes, a mi profesor Juan David Bastidas Rodríguez por sus grandes aportes y su disponibilidad, a mi empresa GESTIÓN ENERGÉTICA S.A. por permitir formarme mientras desarrollo mis actividades y a mi amigo Gustavo Adolfo Valbuena Giraldo por su ayuda.

Resumen

Dimensionamiento de microrred aislada para el municipio de Inírida Guainía

En este documento se realiza el dimensionamiento de una microrred aislada para el municipio de Inírida Guainía que inicia con la revisión del estado actual del sistema de generación de esta localidad y su dimensionamiento, revisando los costos de inversión, de operación y mantenimiento de acuerdo con la regulación vigente. Luego de esto, se procede a verificar los recursos de generación disponibles en la zona y se procede a determinar la capacidad de potencia para cada tipo de generación que garantice el suministro de energía de manera confiable y que obedezca a los parámetros de calidad de potencia requeridos por la normatividad colombiana, teniendo en cuenta los costos durante la vida útil del proyecto comparándolo con la actualidad del sistema.

Palabras clave: (Microrred; generación; energías renovables; almacenamiento; costos de inversión, operación y mantenimiento; dimensionamiento).

Abstract

Dimensioning of an isolated microgrid for the municipality of Inírida Guainía

This document perform the sizing of an isolated microgrid for the municipality of Inírida, Guainía which begins with the review of the current state of the generation system of this location and its dimensioning, reviewing the investment, operation and maintenance costs in accordance with current regulations. After this, the generation resources available in the zone are verified and then proceeds to determine the power capacity for each type of generation that guarantees the supply of energy in a reliable way and that obeys the required power quality parameters for the Colombian regulations, taking into account the costs during the useful life of the project, comparing it with the current situation of the system.

Keywords: (Microgrid; generation; renewable energy; storage; investment, operation and maintenance costs, sizing)

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Abstract	VI
Lista de figuras	IX
Lista de tablas	X
Lista de Símbolos y abreviaturas	XII
Introducción	1
1.1 Identificación del problema.....	2
1.2 Objetivos	3
1.2.1 General.....	3
1.2.2 Específicos	3
1.3 Marco teórico	4
2. Evaluación del sistema de generación actual del municipio de Inírida	7
2.1 Parque de generación Inírida	7
2.2 Central diésel de Inírida Guainía	7
2.3 Granja solar Inírida.....	9
2.4 Generación de energía.....	10
2.5 Consumo de combustible	11
2.6 Curva de carga diaria	13
2.7 Recursos Energéticos disponibles.....	15
2.7.1 Recurso solar	15
2.7.2 Recurso hídrico.....	17
2.7.3 Recurso eólico.....	17
2.7.4 Otros recursos.	19
2.7.5 Acumulación de energía	19
3. Simulación sistema actual	21
3.1 Datos de entrada HOMER ENERGY PRO	22
3.2 Parámetros utilizados en la simulación.....	25
4. Dimensionamiento Microrred Inírida	36
4.1 Dimensionamiento y simulación	36
4.1.1 Dimensionamiento optimizado por HOMER.....	37
4.1.2 Dimensionamiento de microrred teniendo en cuenta la infraestructura existente.....	42

4.1.3 Anexo: Simulación nuevo dimensionamiento conservando la infraestructura existente.Simulación sin tener en cuenta toda la infraestructura actual.....	47
5. Comparación de resultados	51
6. Conclusiones y recomendaciones	55
6.1 Conclusiones	55
6.2 Trabajos futuros	56
A. Anexo: Simulación sistema actual.	59
B. Anexo: Simulación nuevo dimensionamiento optimizado por HOMER.....	60
C. Anexo: Simulación nuevo dimensionamiento conservando la infraestructura existente.	61
D. Anexo: Simulación nuevo dimensionamiento sin mantener infraestructura existente.	63
Bibliografía	65

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Diagrama Unifilar Inírida.....	9
Figura 2-2: Curva de carga Inírida 2019 [kW].	14
Figura 2-3: Ubicación estaciones meteorológicas IDEAM.	16
Figura 2-4 Velocidad del viento a 10 metros (m/s).....	18
Figura 3-1: Consumo de energía Inírida Guainía.....	30
Figura 3-2: Perfiles de carga por mes año 2019.	31
Figura 3-3: Diagrama esquemático de la simulación del sistema de generación actual de Mitú.	31
Figura 3-4: Participación en los costos del proyecto por componente [%].	33
Figura 3-5: Cantidad de emisiones.	34
Figura 4-1 Esquema propuesto para dimensionamiento ideal.	38
Figura 4-2 Resultados generación de energía.	41
Figura 4-3 Esquema propuesto para dimensionamiento.....	43
Figura 4-4 Resultados según arquitectura.	44
Figura 4-5 Esquemático simulación sin infraestructura existente.....	48
Figura 4-6 Arquitecturas simuladas.	48
Figura 5-1 Emisiones [kg/año].	54

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Grupos electrógenos central diésel Inírida.....	8
Tabla 2-2: Energía neta consumida por circuito Inírida.....	10
Tabla 2-3: Energía generada por la central diésel de Inírida.....	10
Tabla 2-4: Consumo de combustible diésel en galones para la producción de energía en Inírida.....	12
Tabla 2-5: Generación de energía Vs Consumo de combustible.....	12
Tabla 2-6: Demanda de potencia Inírida Guainía.....	13
Tabla 2-7: Radiación solar global promedio multianual.....	15
Tabla 2-8: Velocidad del viento a 10 metros (m/s).....	17
Tabla 2-9: Proyectos inscritos UPME.....	19
Tabla 3-1: Ejemplos de trabajos simulados con HOMER.....	21
Tabla 3-2: Datos de entrada HOMER ENERGY PRO.....	23
Tabla 3-3: Documentos CREG.....	25
Tabla 3-4: Parámetros iniciales.....	26
Tabla 3-5: Parámetros generadores diésel.....	26
Tabla 3-6: Inversión y mantenimiento Unidades diésel según CREG 091-2007 durante la vida útil del proyecto.....	27
Tabla 3-7: Parámetros Granja Solar Inírida.....	28
Tabla 3-8: Tipos de mantenimiento y periodicidad.....	28
Tabla 3-9: Resultados económicos simulación.....	32
Tabla 3-10: Generación de energía por componente [kWh/año].....	33
Tabla 4-1: Parámetros unidad Biogás.....	38
Tabla 4-2: Parámetros convertidor de potencia.....	39
Tabla 4-3: Parámetros Baterías.....	39
Tabla 4-4: Clasificación de resultados según arquitectura.....	39
Tabla 4-5: Resultados económicos simulación ideal.....	40
Tabla 4-6: Categorías de arquitecturas según simulación HOMER.....	43
Tabla 4-7: Arquitectura seleccionada en la simulación.....	44
Tabla 4-8: Resultados económicos de la simulación.....	45
Tabla 4-9: Resultados económicos simulación sin infraestructura actual.....	49
Tabla 4-10: Generación de energía y participación.....	50
Tabla 5-1: Comparación resultados económicos de las simulaciones.....	51
Tabla 5-2: Comparación de generación por caso.....	52

Tabla 5-3: Consumo de combustible por caso. 53

Lista de Símbolos y abreviaturas

ZNI: Zonas no Interconectadas.

SIN: Sistema Interconectado Nacional.

CREG: Comisión de regulación de Energía y Gas.

HOMER: Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources.

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

NASA: National Aeronautics and Space Administration.

POWER: Prediction Of Worldwide Energy Resources.

UPME: Unidad de Planeación Minero Energética.

NREL: National Renewable Energy Laboratory.

IPSE: Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas No Interconectadas.

Introducción

El municipio de Inírida Guainía, ubicado en el norte de las amazonas pertenece a las zonas no interconectadas de Colombia, que por definición son los municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectados al sistema interconectado nacional SIN [1].

Debido a las condiciones de las zonas no interconectadas (ZNI) y la imposibilidad de acceder a un mercado eléctrico se tienen monopolios naturales en las actividades de generación, distribución y comercialización. En estos casos no se requiere un sistema de transmisión, debido a que la generación se realiza cerca o dentro de los centros de consumo. Por lo tanto, la función de regular los monopolios, cuando la competencia no sea posible es responsabilidad de la comisión de regulación de energía y gas CREG, para que las operaciones sean económicamente eficientes.

Actualmente, la generación de energía en el municipio de Inírida se realiza con diésel, donde la central de generación cuenta con una capacidad instalada de 9.250 kW [2]. En el mes de junio de 2020, se generaron 1.358.799 kWh, lo que representa un incremento del 13,38% respecto a junio de 2019 (1.198.437 kWh), con un factor de potencia promedio de 0,95 y con un pico de potencia máximo de 2.608 kW [3].

En el municipio se están adelantando proyectos de generación con fuentes no convencionales de energía, como son una granja solar de 2,47 MWp y generación con Biomasa de 0,36 MW, de acuerdo a los registros de proyectos de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) [4]. Se observa entonces que se están dando condiciones para la creación de una microrred ya que si se dan estos

proyectos se tendrá una red de distribución con generadores con tres fuentes de energía diferentes [5]. Sin embargo, hasta el momento no se ha analizado este sistema de generación como una microrred, es decir, los generadores fotovoltaicos y de biomasa se han dimensionado de forma independiente y sin considerar el sistema como un conjunto.

En conclusión, el municipio de Inírida, debido a su ubicación geográfica y a sus condiciones demográficas, es denominado no interconectable al sistema interconectado Nacional [34]. Es por esto, que se convierte en un sitio ideal para desarrollar una microrred aislada que puede ir creciendo con el tiempo permitiendo crecimiento generación con fuentes no convencionales de energía y la interacción de la demanda y la generación

Por lo tanto, se propone con este trabajo realizar el dimensionamiento de una microrred para el municipio de Inírida teniendo en cuenta los recursos energéticos disponibles, las tecnologías de almacenamiento de energía viables y la carga eléctrica del municipio.

1.1 Identificación del problema

Como se dijo anteriormente, Inírida pertenece a las zonas no interconectadas de Colombia y tiene las mismas necesidades energéticas que tienen la mayoría de estos territorios debido básicamente a las características demográficas y geográficas. Estas necesidades se fundamentan principalmente en las siguientes características [6]:

- Costos elevados de energía debido a la utilización de generación térmica a base de diésel requiriendo alto porcentaje de subsidios del gobierno ya que el transporte de combustible eleva su precio final comparado con el centro del país.
- Bajas (nulas) posibilidades de interconexión al SIN.

- Limitadas posibilidades de generación con fuentes alternas a los combustibles fósiles.
- Falta de personal calificado y soporte técnico.

En Inírida se inició la diversificación de la canasta energética con la construcción de la granja solar más grande de las ZNI [7] con una capacidad instalada de 2,47 kWp, que se espera genere cerca del 20% de la energía total del municipio y que opere de manera conjunta con la central diésel de este municipio buscando disminuir el consumo de diésel.

Sin embargo, se considera que se realizó el proyecto pensando en aumentar la penetración de fuentes no convencionales en las zonas no interconectadas y no obedece a un dimensionamiento adecuado de una microrred.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

- Dimensionar una microrred para el municipio de Inírida Guainía buscando reducir el consumo de diésel.

1.2.2 Específicos

- Evaluación del sistema de generación actual del municipio de Inírida (Costos y datos de operación).
- Recopilar la información necesaria para el proceso de dimensionamiento de la microrred.
- Determinar la capacidad de potencia de las tecnologías de generación y almacenamiento.
- Evaluar costos y datos de operación de la solución propuesta.

- Comparar indicadores de costos y de operación del sistema actual y el propuesto por medio de simulación.

1.3 Marco teórico

Las Microrredes comprenden sistemas de distribución de baja tensión con recursos de energía distribuida (micro turbinas, celdas de combustible, generación fotovoltaica, entre otros) junto con dispositivos de almacenamiento (volantes, condensadores de energía, baterías) y cargas flexibles [8]. La principal función de una microrred aislada es mantener de manera confiable y con calidad el suministro de energía eléctrica a los usuarios finales disminuyendo la cantidad de apagones y garantizando la continuidad del servicio.

La planificación de las microrredes y su operación debe ofrecer confiabilidad y calidad de la potencia garantizando sostenibilidad económica, es por esto que se vuelve un proceso complejo, ya que se tienen gran cantidad de restricciones que en la mayoría de ocasiones no son compatibles entre sí y hace que cada decisión que se tome tenga impactos sobre la evaluación económica y los aspectos técnicos del sistema. Es por lo anterior que el proceso de planificación de microrredes se puede abordar como una secuencia de problemas de optimización [9].

- Selección de tecnologías de los recursos energéticos.
- Dimensionamiento de los recursos energéticos.
- Ubicación de los recursos energéticos.
- Gestión de los recursos energéticos.
- Análisis de sensibilidad.

El objetivo del dimensionamiento de los recursos es determinar la capacidad de potencia de las diferentes tecnologías seleccionadas, considerando el costo del ciclo de vida de la microrred, ya que el dimensionamiento afecta directamente la

inversión inicial. Debe cumplir con alta confiabilidad, bajo impacto ambiental y alto costo-efectividad cumpliendo con las restricciones propias del proyecto analizado.

Actualmente, varias herramientas informáticas están disponibles para un dimensionamiento óptimo del sistema integrado. La configuración óptima se puede encontrar entre diferentes configuraciones del sistema en función del costo actual neto y el rendimiento [10]. Entre las diversas herramientas informáticas, el modelo de optimización híbrido para energías renovables (HOMER) es una de las herramientas más populares para dimensionar sistemas integrados. HOMER es capaz de modelar el comportamiento físico de un sistema de potencia basado en su costo de vida del ciclo, que es la suma de la instalación y el costo de mantenimiento de los componentes del sistema durante el tiempo de vida del sistema. HOMER permite a el programador comparar muchas configuraciones de diseño diferentes sobre la base de sus méritos técnicos y económicos [11]

2. Evaluación del sistema de generación actual del municipio de Inírida

Para realizar la evaluación del sistema de generación actual del municipio de Inírida se inició con la recopilación de información relevante del mismo, tal como, generación anual, curva de carga del municipio, componentes actuales del sistema de generación, consumo de combustible, entre otros. Esta información fue recopilada de diversas fuentes disponibles como el Centro Nacional de Monitoreo del IPSE, la empresa Gestión Energética S.A. ESP. GENSA S.A. responsable de la generación de energía en el municipio de Inírida, entre otras. A continuación, se muestra el resultado de la recopilación de información.

2.1 Parque de generación Inírida

El parque de generación de Inírida está constituido por una central diésel con una capacidad de 9270 kW [3] interconectada a una granja solar de 2470 kWp.

2.2 Central diésel de Inírida Guainía

La central diésel de Inírida Guainía está ubicada en el casco urbano del municipio, en la transversal 6 lote 4 en la vía al corregimiento del coco. Está conformada por cinco grupos electrógenos, 4 de ellos con una capacidad de 2000 kW [12] y uno con una capacidad de 1270 kW [13]. En la Tabla 2-1 se observan las principales

características de cada uno de los grupos electrógenos instalados en la central diésel de Inírida Guainía.

Tabla 2-1: Grupos electrógenos central diésel Inírida.

Fuente: Elaboración propia, datos CNM y Hojas de datos de los equipos.

Identificación	Marca	Modelo	Potencia Stand By [kW]	Corriente [A]	Tensión [V]	Tipo de combustible
U1	CUMMINS	QSK60-C2000D6	2000	3007	480	DIESEL
U2	CUMMINS	QSK60-C2000D6	2000	3007	480	DIESEL
U3	CUMMINS	KTA-50 C1250D6	1270	1910	480	DIESEL
U4	CUMMINS	QSK60-C2000D6	2000	3007	480	DIESEL
U5	CUMMINS	QSK60-C2000D6	2000	3007	480	DIESEL

Esta central genera energía para cinco circuitos, cuatro a 13,2 kV y uno a 34,5 kV que inicialmente fue construido como interconexión internacional que unía a Inírida en Colombia con San Fernando de Atabapo en la República Bolivariana de Venezuela [14].

Esta central cuenta con una subestación con capacidad de transformación aproximada de 15,6 MVA que funciona de frontera comercial con el operador de red y comercializador EMELCE y recibe la interconexión de la Granja solar de Inírida.

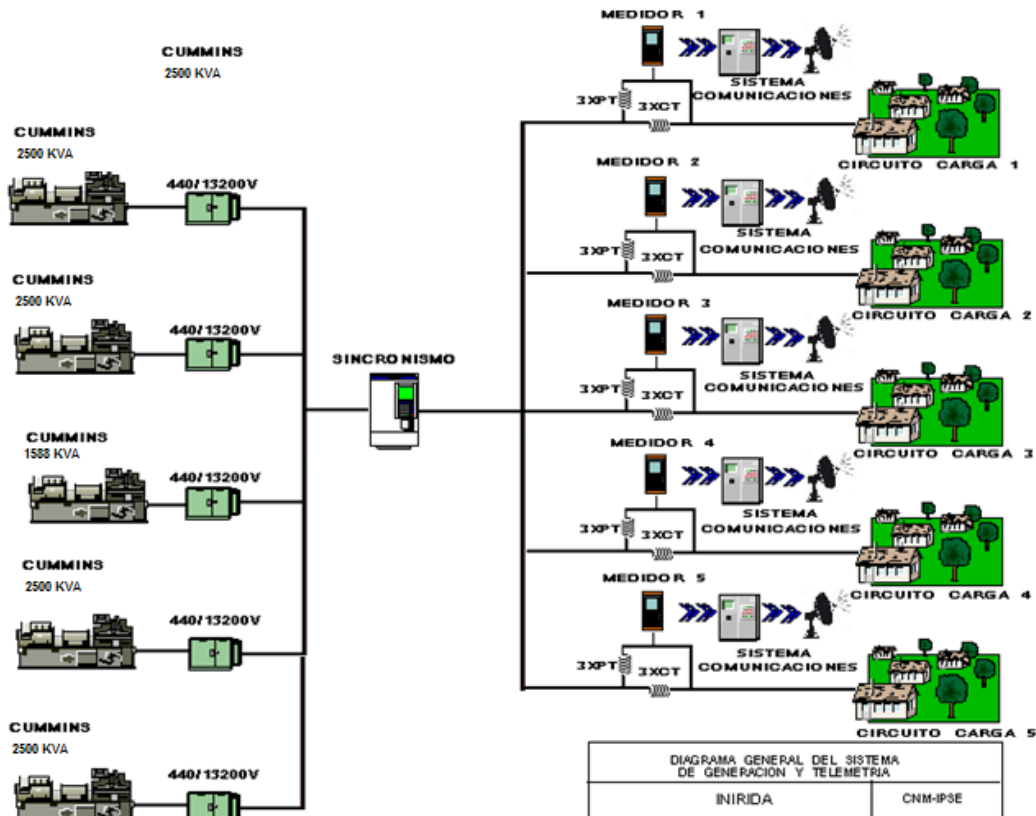


Figura 2-1: Diagrama Unifilar Inírida.

Fuente: Informe de telemetría Junio 2020 [3].

En la Figura 2-1, se muestra el diagrama unifilar del municipio de Inírida, indicando las unidades de la central diésel, y los circuitos que alimenta el sistema de generación del municipio.

2.3 Granja solar Inírida

La granja solar de Inírida fue construida cerca al aeropuerto César Gaviria Trujillo en el poste 28 vía Inírida – Guamal. Está constituida por 7.540 paneles solares con una potencia unitaria de 330 Wp, para un total de 2,47 MWp [15], un inversor de 2,25 MVA y un transformador de 2,25MVA. La granja solar se interconecta a la subestación de la central diésel a través de una línea de transmisión a 34,5 kV con una longitud aproximada de 3 kilómetros.

2.4 Generación de energía

Para comprender el comportamiento del consumo de energía en el municipio de Inírida se procedió a analizar los datos del año 2019 que se encontraban tabulados por circuito, por potencia y energía consumida, con datos registrados hora a hora, lo que permitió realizar el análisis mostrado en la Tabla 2-2, de lo que se destaca, que el municipio presenta tres circuitos con un consumo representativo y dos circuitos con un consumo de energía bajo. También se observa una expansión de la red de distribución en el mes de agosto del año 2019, ya que un circuito inicio su operación en esta fecha.

Tabla 2-2: Energía neta consumida por circuito Inírida.

Fuente: Elaboración propia.

INÍRIDA GUAINÍA						
Mes (2019)	Circuito 1 [kWh]	Circuito 2 [kWh]	Circuito 3 [kWh]	Circuito 4 [kWh]	Circuito 5 [kWh]	TOTAL
Enero	496.593	485.059	368.896	108.706	No está en servicio	1.459.254
Febrero	466.893	452.455	360.822	98.281		1.378.450
Marzo	516.635	498.787	397.474	110.623		1.523.518
Abril	480.131	478.852	379.566	106.236		1.444.785
Mayo	342.122	476.850	375.034	115.133		1.309.139
Junio	298.474	452.848	338.668	109.749		1.199.739
Julio	348.084	463.056	344.388	114.525		1.270.053
Agosto	466.048	478.478	352.374	118.870	11.160	1.426.930
Septiembre	502.392	506.352	370.942	119.557	11.550	1.510.793
Octubre	510.510	503.074	373.516	120.034	9.780	1.516.914
Noviembre	517.836	502.106	378.136	119.288	14.820	1.532.186
Diciembre	511.060	526.218	382.514	129.417	3.930	1.553.139
TOTAL (kWh)	5.456.779	5.824.134	4.422.330	1.370.420	51.240	17.124.903

Tabla 2-3: Energía generada por la central diésel de Inírida.

Fuente: Elaboración propia.

INÍRIDA GUAINÍA						
Mes (2019)	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4	Unidad 5	Total
	2000	2000	1270	2000	2000	
Enero	-	360.760	344.454	587.256	404.892	1.697.362
Febrero	-	236.936	316.227	542.892	508.466	1.604.521
Marzo	17.890	415.550	345.299	634.252	366.902	1.779.893
Abril	-	292.753	297.550	602.378	499.958	1.692.639
Mayo	-	497.911	312.274	420.510	462.148	1.692.843
Junio	-	410.824	265.731	453.104	442.606	1.572.265
Julio	-	578.084	273.725	284.484	467.500	1.603.793
Agosto	-	660.981	331.630	-	648.782	1.641.393
Septiembre	-	474.177	325.004	415.272	520.876	1.735.329
Octubre	-	499.802	343.250	394.712	507.452	1.745.216
Noviembre	-	621.540	378.379	152.502	589.864	1.742.285
Diciembre	460.632	99.669	345.640	308.390	588.776	1.803.107
TOTAL (kWh)	478.522	5.148.987	3.879.163	4.795.752	6.008.222	20.310.646

Del resumen de la generación de energía presentado en la Tabla 2-3 y el consumo de los usuarios del municipio presentado en la Tabla 2-2 se puede observar que existen aproximadamente 3,2 GWh/año que se generan, pero no se distribuyen al usuario, por lo que se asume que son consumidos internamente en la central y en pérdidas de transformación, esta energía equivale al 16% del total de la energía generada en la central diésel.

También se observa que la energía fue generada exclusivamente por la central diésel de Inírida, ya que la granja solar se encuentra en proceso de finalización de su construcción para el año 2019.

2.5 Consumo de combustible

Para el año 2019, la central diésel de Inírida consumió 1.500.362 galones de combustible, lo que representa un promedio aproximado mensual de 125.000

galones de diésel por mes, en la Tabla 2-4 se observa en detalle el consumo por cada una de las unidades y en cada mes del año 2019.

Tabla 2-4: Consumo de combustible diésel en galones para la producción de energía en Inírida.

Fuente: Elaboración propia.

INÍRIDA GUAINÍA						
Mes (2019)	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4	Unidad 5	Total
	2000	2000	1270	2000	2000	
Enero	-	25.820	25.266	42.102	31.114	124.302
Febrero	-	17.181	23.177	38.968	39.147	118.473
Marzo	1.420	29.321	25.327	45.244	27.980	129.292
Abril	-	20.950	22.050	43.712	38.994	125.706
Mayo	-	35.330	22.925	30.013	35.451	123.719
Junio	-	29.271	19.635	32.342	33.973	115.221
Julio	-	41.550	20.306	20.376	36.054	118.286
Agosto	-	48.164	24.534	-	49.926	122.624
Septiembre	-	35.438	23.811	29.843	40.468	129.560
Octubre	-	36.736	25.005	28.478	39.121	129.340
Noviembre	-	46.351	27.501	11.041	45.729	130.622
Diciembre	32.577	7.572	25.240	22.257	45.571	133.217
TOTAL (galones)	33.997	373.684	284.777	344.376	463.528	1.500.362

Luego de obtener los datos de generación de energía consignados en la Tabla 2-3, se compararon con los datos de consumo de combustible de la Tabla 2-4.

Tabla 2-5: Generación de energía Vs Consumo de combustible.

Fuente: Elaboración propia.

INÍRIDA GUAINÍA						
Mes (2019)	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4	Unidad 5	Total
	2000	2000	1270	2000	2000	
TOTAL (galones)	33.997	373.684	284.777	344.376	463.528	1.500.362
TOTAL (kWh)	478.522	5.148.987	3.879.163	4.795.752	6.008.222	20.310.646
Consumo específico de combustible (gal/kWh)	0,07105	0,07257	0,07341	0,07181	0,07715	0,07387

INÍRIDA GUAINÍA						
Mes (2019)	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4	Unidad 5	Total
	2000	2000	1270	2000	2000	
Eficiencia (kWh/gal)	14,08	13,78	13,62	13,93	12,96	13,54

Según la comparación realizada en la Tabla 2-5, se puede observar que, en promedio, para el año 2019, se requerían 0,074 galones de diésel para generar 1 kWh, o lo que es su equivalente, con un galón de diésel se generaron 13,54 kWh. Este resultado, es “más eficiente” que los 0,0801 gal/kWh (12,5 kWh/gal) establecidos en la CREG en la resolución 091 de 2007 que estima para generadores con capacidades entre 1000 y 2000 kW [16].

2.6 Curva de carga diaria

Después de revisar la generación bruta y el consumo neto de energía en el municipio, se procedió a analizar el comportamiento de la demanda en el año 2019, clasificándolo en promedios horarios por días de la semana, buscando la demanda máxima, la mínima y el promedio total, como se muestra en la Tabla 2-6:

Tabla 2-6: Demanda de potencia Inírida Guainía.
Fuente: Elaboración propia.

POTENCIA HORARIA (MW)										
Horas Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo	Promedio	Mínimo	Máximo
0	1,738	1,870	1,807	1,852	1,952	1,868	1,874	1,852	1,060	4,077
1	1,573	1,580	1,598	1,549	1,629	1,604	1,651	1,598	1,019	4,013
2	1,537	1,576	1,597	1,596	1,618	1,624	1,656	1,601	1,179	2,070
3	1,455	1,541	1,547	1,532	1,540	1,561	1,555	1,533	0,528	2,072
4	1,477	1,510	1,505	1,488	1,524	1,497	1,499	1,500	0,816	2,277
5	1,399	1,480	1,492	1,469	1,495	1,454	1,458	1,464	0,814	1,874
6	1,346	1,403	1,424	1,326	1,392	1,357	1,362	1,373	0,407	2,031
7	1,578	1,615	1,645	1,618	1,648	1,524	1,495	1,589	1,091	2,152
8	1,726	1,794	1,795	1,794	1,815	1,585	1,559	1,724	0,660	2,556
9	1,970	1,986	1,952	1,974	1,927	1,765	1,680	1,893	0,528	2,653
10	2,039	2,072	2,088	2,070	2,079	1,920	1,792	2,009	0,836	2,869
11	2,183	2,173	2,134	2,234	2,177	2,025	1,887	2,116	0,766	3,058

POTENCIA HORARIA (MW)										
Horas Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo	Promedio	Mínimo	Máximo
12	2,168	2,246	2,265	2,217	2,165	2,044	1,894	2,143	0,675	3,183
13	2,055	2,080	2,082	2,200	2,054	2,057	1,896	2,061	1,236	3,282
14	2,057	2,121	2,140	2,131	2,053	2,017	1,822	2,049	1,364	3,364
15	2,457	2,491	2,494	2,540	2,461	2,242	1,998	2,383	0,961	3,472
16	2,329	2,382	2,364	2,408	2,387	2,092	1,874	2,262	1,397	3,252
17	2,246	2,316	2,335	2,247	2,275	2,076	1,854	2,193	1,254	3,329
18	2,273	2,273	2,289	2,356	2,278	2,130	1,974	2,225	1,203	4,002
19	2,494	2,552	2,492	2,537	2,470	2,421	2,286	2,464	1,038	3,199
20	2,469	2,426	2,459	2,483	2,401	2,339	2,237	2,402	1,712	3,007
21	2,329	2,359	2,302	2,368	2,297	2,213	2,172	2,291	1,683	3,252
22	2,089	2,066	2,087	2,111	2,034	2,022	1,931	2,049	1,448	3,144
23	2,113	2,168	2,151	2,168	2,139	2,112	2,026	2,125	1,155	3,753

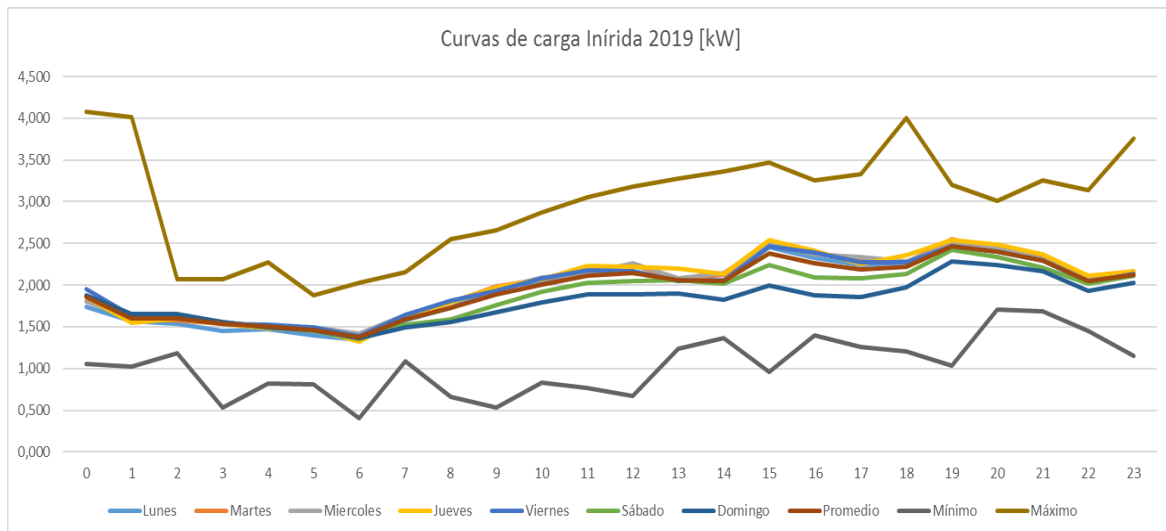


Figura 2-2: Curva de carga Inírida 2019 [kW].

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar en la Figura 2-2 que, sin importar el día de la semana, la curva de la demanda es muy predecible ya que sigue una misma tendencia, con un pico de consumo cerca de las 7 de la noche. Esto puede explicarse por la falta de industria del municipio, por lo que la demanda se compone del sector residencial, comercial y oficial mayoritariamente.

2.7 Recursos Energéticos disponibles.

Como se mostró en la

Tabla 2-3, la generación de Inírida tiene como base la generación a base de combustibles fósiles (Diésel) y se complementa con una granja solar que se espera que aporte el 20% de la energía requerida en el municipio [15].

2.7.1 Recurso solar

Debido a lo anterior, el primer recurso energético a analizar es el solar. Para esto se consultaron dos fuentes: La primera es los datos meteorológicos suministrados por la plataforma de la NASA [17] y la segunda son los datos suministrados por el IDEAM [18], esto se presenta en la Tabla 2-7.

Tabla 2-7: Radiación solar global promedio multianual.
Fuente: Elaboración propia.

Radiación solar global Promedio multianual			
MES	Datos NASA (kWh/m ² *día)	Datos IDEAM Mínimo (kWh/m ² *día)	Datos IDEAM Máximo (kWh/m ² *día)
Enero	5,3	4,5	5
Febrero	5,23	5	5,5
Marzo	5,06	4,5	5
Abril	4,52	4	4,5
Mayo	4,16	3	3,5
Junio	4,03	3	3,5
Julio	4,31	4,5	5
Agosto	4,72	4	4,5
Septiembre	5,12	4,5	5
Octubre	4,96	4	4,5
Noviembre	4,73	3	3,5
Diciembre	4,91	3	3,5
Promedio	4,75	3,92	4,42

De las fuentes consultadas se puede observar lo siguiente:

meteorológica, además HOMER permite importar los datos de esta fuente de información.

2.7.2 Recurso hídrico

Aunque el departamento de Guainía es denominado tierra de muchas aguas, no se aprovecha este recurso para la generación de energía eléctrica y no se observan proyectos en el futuro cercano. Según la investigación en pequeñas centrales en Colombia, presentado en la revista Ingenio Libre, no existe ningún proyecto sobre el municipio de Inírida [20]. Esto puede explicarse porque la mayoría del territorio del Guainía se compone de extensiones planas por lo que las cuencas de los ríos son anchas y de caudales considerablemente bajos y alturas despreciables [21].

Por lo anterior, no se considera el recurso hídrico como relevante para ser aprovechado en el municipio de Inírida en este momento.

2.7.3 Recurso eólico

Para revisar el recurso eólico se utilizaron los datos meteorológicos de la NASA, específicamente, el promedio mensual de velocidad del viento en metros sobre segundo a 10 metros de altura como se observa en la Tabla 2-8:

Tabla 2-8: Velocidad del viento a 10 metros (m/s).
Fuente: NASA [17].

MES	Wind Speed Range at 10 Meters (m/s)
JAN	0,96
FEB	0,96
MAR	0,92
APR	0,84
MAY	0,83

MES	Wind Speed Range at 10 Meters (m/s)
JUN	0,89
JUL	0,93
AUG	0,93
SEP	0,96
OCT	0,98
NOV	0,97
DEC	0,98
PROMEDIO	0,93

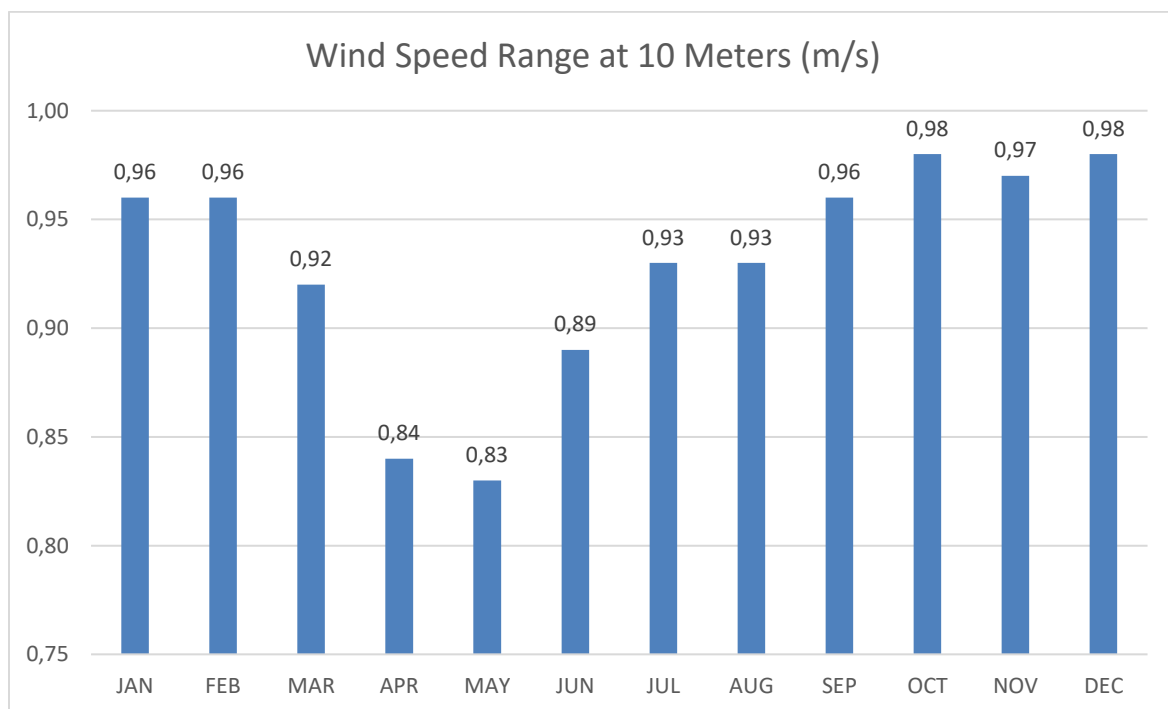


Figura 2-4 Velocidad del viento a 10 metros (m/s).

Fuente: NASA [17].

Se puede observar en la Figura 2-4 que todos los datos mensuales son menores a 1 m/s, estos valores son bajos para pensar en implementar algún tipo de generación eólica, por lo que no se considera un recurso aprovechable en el municipio de Inírida.

2.7.4 Otros recursos.

Después de revisar los recursos de las fuentes no convencionales más utilizadas, se procedió a buscar otras fuentes de información que permitan evidenciar otros recursos energéticos que puedan ser utilizados en el dimensionamiento, encontrando en la base de datos de la UPME, los proyectos inscritos de generación de energía para el municipio de Inírida. Los proyectos registrados en esta base de datos, corresponden a una granja solar de 2470 kWp (proyecto en ejecución) y un aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos del municipio, con una capacidad de generación de 360 kW, como se puede ver en la Tabla 2-9.

Lastimosamente no se cuenta con información del recurso de gas utilizado para dimensionar el proyecto de aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos, solo se indica la capacidad de potencia instalada para aprovechar este recurso, por lo que será utilizado como base del dimensionamiento.

Tabla 2-9: Proyectos inscritos UPME.
Fuente: UPME [22].

Código Proyecto	Fecha Proyecto	Nombre Proyecto	Tipo	Recurso	Tecnología	Capacidad MW
981	28/10/2016	Residuos sólidos Inírida	Biomasa	Residuos agrícolas	Termoquímico	0,36
123	13/06/2018	Granja solar municipio de Inírida	Solar	Sol	Fotovoltaico	2,47

2.7.5 Acumulación de energía

La debilidad de los sistemas de distribución de potencia eléctrica es la capacidad de almacenamiento, especialmente cuando la fuente de energía es intermitente y aislada de los centros de consumo, como en el caso de las microrredes [23]. Es

por esto, que para este dimensionamiento se debe tener en cuenta acumulación de energía.

Para el caso de estudio planteado y debido a las condiciones logísticas del área del municipio de Inírida, se utilizarán baterías convencionales que permitirán corregir problemas de calidad de potencia (Flickers, sags, swells) y que facilite el control y la integración de las fuentes de energía a utilizar.

De acuerdo a lo anterior, las tecnologías que se deben seleccionar en este momento para dimensionar la microrred del municipio de Inírida deben ser:

- Generación solar fotovoltaica.
- Generación con Biogás.
- Generación con diésel.
- Acumulación con baterías.

3. Simulación sistema actual

Para realizar la simulación del sistema actual de Inírida Guainía, se utilizó el software HOMER ENERGY PRO®, este software permite optimizar el diseño de microrredes en todos los sectores, tanto en pequeños poblados, en islas o locaciones conectadas a un sistema interconectado. En esencia, Homer es un modelo para realizar simulaciones, intentando simular un sistema viable para todas las combinaciones posibles de equipos que se consideren, realizando cientos o miles de simulaciones de diferentes sistemas [11].

Además de lo anterior, el software HOMER ENERGY PRO®, ha sido usado en diferentes artículos que se han utilizado como referencia de este trabajo con buenos resultados. En la Tabla 3-1, se presenta el nombre del artículo y una breve descripción del mismo.:

Tabla 3-1: Ejemplos de trabajos simulados con HOMER.
Fuente: Elaboración propia.

Artículo	Descripción
Sizing and Analysis of Grid-Connected Microgrid System for Assiut University Using HOMER Software[24]	Este artículo analiza el dimensionamiento del sistema fotovoltaico como una aplicación de microrred que se conecta a la red de la Universidad de Assiut. El modelo de optimización híbrida para el software eléctrico renovable (HOMER) se ha utilizado para un proceso de dimensionamiento óptimo. Este estudio analiza la estrategia de dimensionamiento del sistema de microrred considerando configuraciones de demandas de carga centralizada y distribuida para reducir el costo y el tamaño del sistema. Los resultados muestran que el tamaño del sistema se ve afectado por la configuración de la carga demandada y el diseño basado en la configuración de la carga demandada centralizada tiene el costo y el tamaño mínimos.
Optimization analysis of Microgrid using HOMER — A case study [25]	En este trabajo de investigación se diseñó y optimizó una microrred descentralizada de generación distribuida renovable con HOMER como plataforma para analizar los datos dinámicos en tiempo real. Las variables de decisión críticas como el tamaño de la matriz fotovoltaica, el número de turbinas eólicas, el tamaño de la celda de combustible, la presencia del sistema hidroeléctrico, el número de baterías, el tamaño de los convertidores, la estrategia de envío, los tamaños de los generadores tienen el peso debido en el proceso de optimización utilizando datos del departamento meteorológico de la NASA. Las incertidumbres de los recursos de energía renovable, como la velocidad

Artículo	Descripción
	del viento por hora, la vida útil de la matriz FV, los conjuntos de datos por hora de carga o los recursos renovables se han tenido debidamente en cuenta para obtener el análisis de sensibilidad, que es una ventaja adicional de utilizar HOMER. El objetivo de probar una microrred como una fuente de energía limpia en el bosque Kondapalli en los montículos Indrakeeladri de Vijayawada considerando todos los factores ambientales resultó fructífero con una emisión negativa de carbono de 17.2 kg en un solo año.
Developing a Microgrid for Tafelkop Using HOMER[26]	En este documento, se propone una fuente de energía renovable para dos zonas en una comunidad rural con el fin de eliminar la conexión de la carga de la red nacional de servicios públicos, centrándose en la comunidad de Tafelkop, minimizando el costo de las fuentes de energía mientras se consideran las emisiones ambientales. Para el análisis se utilizó el software de Optimización Híbrida de Múltiples Recursos Energéticos (HOMER) para resolver las complejidades de la microrred. Los resultados mostraron una mejora de la potencia de carga constante a un costo reducido de energía para cada hogar.
Optimization & sensitivity analysis of microgrids using HOMER software- A case study [27]	En este artículo, se están estudiando dos microrredes reales, una interconectada y otra autónoma. Ambos sistemas están ubicados en el sitio piloto de Meltemi, un campamento junto al mar en Rafina, cerca de la costa de Atenas. Las microrredes se simulan y analizan utilizando el software de optimización de energía HOMER (Modelos de Optimización Híbrida para Recursos Energéticos). Los resultados del análisis técnico económico y de sensibilidad sugieren la integración de nuevos generadores distribuidos o nuevos patrones de operación de los existentes.
Sizing of microgrids for Indian systems using HOMER[28]	Este documento ofrece un modelo perfecto de una microrred con un tamaño optimizado de energía eólica, solar, generador diésel y batería utilizando el software HOMER. Se lleva a cabo un análisis de costos detallado y el sistema diseñado se compara con solo el sistema de generadores distribuidos en términos de emisión, consumo de combustible y costo del sistema durante los próximos 15 años.
Modelling and Cost Optimization of an Islanded Microgrid with an Existing Microhydro using HOMER Software[29]	El objetivo principal de este documento es presentar un análisis de optimización de costos de una microrred híbrida ubicada en un área remota. Este estudio se basa en los datos de un área remota en Mahadevsthan del distrito de Dhading en Nepal, donde una micro hidroeléctrica existente de 26 kilovatios (kW) no puede satisfacer la creciente demanda de energía de esa comunidad. En este documento, se modela una microrred híbrida que consta de la micro hidroeléctrica existente junto con otras fuentes de energía renovable disponibles en el sitio y se realiza un análisis de costos. La energía solar es la otra fuente de energía disponible en el sitio. Los generadores diésel y las baterías se utilizan como respaldo para proporcionar energía continua y confiable a la comunidad. El modelado y análisis de sensibilidad del sistema híbrido se realiza utilizando el software HOMER. Este se utiliza para encontrar la configuración más óptima entre todos los resultados posibles que se pueden simular para lograr el menor costo de energía posible.

3.1 Datos de entrada HOMER ENERGY PRO

Como se dijo anteriormente, el software que se utilizará en la simulación es el HOMER ENERGY PRO. Este software es fácil de usar y requiere unos datos de entrada básicos sobre los sistemas a simular. Primero deben conocerse los datos económicos del proyecto a evaluar, luego plantear una arquitectura del sistema ingresando cada una de las características de las tecnologías de generación y la carga. En la Tabla 3-2 se presenta un resumen de las variables básicas requeridas para realizar la simulación con el software HOMER ENERGY PRO.

Tabla 3-2: Datos de entrada HOMER ENERGY PRO.

Fuente: Elaboración propia.

Ubicación HOMER	Variable	Descripción
Inicio	tasa de descuento	Tasa de descuento: es usada para convertir los costos entre una línea de tiempo y los costos anuales
	Inflación	Tasa de inflación esperada en el proyecto
	Escasez de capacidad	Escasez de capacidad. Déficit que ocurre entre la capacidad operativa requerida y la cantidad real de capacidad operativa que el sistema puede proporcionar
	Duración del proyecto	Duración del proyecto en años
Generador (diésel, biogás)	Capacidad	Capacidad de cada generador
	Capital	Costo total de los componentes instalados en el principio del proyecto UNIDAD 1250 kW
	Costo de reemplazo	Costo de reemplazar un componente al final de su vida útil
	O&M	Costo asociado con la operación y mantenimiento del componente
	porcentaje de carga mínimo	% de carga permitido por el fabricante
	Mínimo tiempo de arranque	Tiempo mínimo de arranque
	Tasa de recuperación de calor para cogeneración	Tasa de recuperación de calor para cogeneración
	Precio del combustible	Precio del combustible en dólares por litro
Recurso Combustible	Vida útil	Vida útil del generador en horas de operación
	Combustible	Tipo de combustible
	Energía liberada	Energía liberada por kg consumido
	Densidad	Densidad en kg/m3
	Contenido de carbón	Porcentaje de contenido de carbón
	Contenido de sulfuro	Porcentaje de contenido de azufre
	Tipo de combustible	Tipo de combustible -convencional -hidrógeno almacenado -biomasa
Limite disponible de combustible	Limite disponible de combustible	

Ubicación HOMER	Variable	Descripción
Emisiones	Monóxido de carbono	Cantidad de emisión de monóxido de carbono
	Hidrocarburo sin quemar	Hidrocarburo sin quemar
	Material particulado	Material particulado
	Proporción del azufre del combustible convertido en material particulado	Proporción del azufre del combustible convertido en material particulado
	Óxido nitroso	Óxido nitroso
Mantenimiento	Procedimiento	Descripción del mantenimiento
	Intervalo	Tiempo entre mantenimientos
	Tipo	Seleccionar por calendario o por horas de operación
	Tiempo de parada de mantenimiento	Tiempo de parada de mantenimiento
	Costo	Costo del mantenimiento
	Costo marginal	Costos adicionales al mantenimiento por kW según la capacidad del generador
	Calendario	Programación de despacho: Se puede forzar su inicio se puede forzar su parada Optimizado por HOMER
Generación solar	Tipo	Generic Flat plate PV
	Capacidad	Capacidad del generador
	Capital	Costo de total de inversión
	Costo de reemplazo	Costo de reemplazar un componente al final de su vida útil
	O&M	Costo asociado con la operación y mantenimiento del componente
	Vida útil	Tiempo de vida útil
Baterías	Capacidad	Capacidad del generador
	Capital	Costo de total de inversión
	Costo de reemplazo	Costo de reemplazar un componente al final de su vida útil
	O&M	Costo asociado con la operación y mantenimiento del componente
	Vida útil	Tiempo de vida útil
Convertidor de potencia	Capacidad	Capacidad del generador
	Capital	Costo de total de inversión

Ubicación HOMER	Variable	Descripción
	Costo de reemplazo	Costo de reemplazar un componente al final de su vida útil
	O&M	Costo asociado con la operación y mantenimiento del componente
	Vida útil	Tiempo de vida útil

3.2 Parámetros utilizados en la simulación.

Para iniciar la simulación, como se indicó en la Tabla 3-2 se deben incluir parámetros básicos como la localización del proyecto, duración, tasa de inflación, capacidad de los generadores, combustible, recursos disponibles, entre otros.

Para los parámetros económicos, como la tasa de inflación, la tasa de descuento, los valores de los equipos y los costos de operación y mantenimiento se utilizaron los valores encontrados en las resoluciones de la Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG vigentes y aplicables a zonas no interconectadas en la Tabla 3-3 se consignan las resoluciones CREG que se utilizan de referencia para obtener los datos de simulación y su descripción.

Tabla 3-3: Documentos CREG.

Fuente: Elaboración propia.

Documento CREG	Descripción
Resolución 091-2007	Por la cual se establecen las metodologías generales para remunerar las actividades de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica, y las fórmulas tarifarias generales para establecer el costo unitario de prestación del servicio público de energía eléctrica en Zonas No Interconectadas
Documento CREG 005-2018	Remuneración proyecto solar fotovoltaico con capacidad de generación de 2,47 MWp en el Municipio de Inírida
Documento CREG 075-2007	Marco regulatorio para la prestación del servicio de energía en las zonas no interconectadas
Resolución 012 - 2018	Por la cual se resuelve una solicitud de remuneración para un proyecto solar fotovoltaico interconectado a la red de distribución del municipio de Inírida con una capacidad de generación de 2,47 MWp de la empresa Gestión Energética S.A E.S.P. EXP:2017 0132
Resolución 135 -2019	Por la cual se modifica el artículo 1 de la resolución CREG 012 DE 2018

Luego de recopilar la información requerida, se inicia la simulación del sistema, para esto, los datos iniciales requeridos son los parámetros económicos, que se ingresaron como se muestra en la Tabla 3-4 y se indica la fuente de información utilizada.

Tabla 3-4: Parámetros iniciales.
Fuente: Elaboración propia.

Localización: Inírida Guainía			
Parámetro	Valor	Unidad	Fuente
Tasa de descuento	12,18	%	Documento CREG 075-2007
Tasa de inflación	2,50	%	Documento CREG 075-2007
Vida útil del proyecto	25	años	Estimado para evaluación

Después de ingresar los parámetros iniciales, se procede a continuar con el registro de la información de la generación actual del municipio y datos de la carga. Los datos de los generadores diésel, se deben registrar uno a uno y se registran como se puede ver en la Tabla 3-5:

Tabla 3-5: Parámetros generadores diésel.
Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4	Unidad 5	Fuente/ Observaciones
Capacidad [kWh]	2.000	2.000	1.270	2.000	2.000	-Potencia Stand by -Informe mensual telemetría CNM IPSE Junio 2020
Capital [USD]	525.000	525.000	317.500	525.000	525.000	Documento CREG 075-2007
Costo de reemplazo [USD]	525.000	525.000	317.500	525.000	525.000	Documento CREG 075-2007
Operación y mantenimiento [USD/horas de operación]	80	80	51	80	80	Resolución 091- 2007
Mínimo porcentaje de carga [%]	30	30	30	30	30	Hoja de datos Grupos electrógenos Cummins
Vida útil [horas de operación]	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	Documento CREG 075-2007

Parámetro	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4	Unidad 5	Fuente/ Observaciones
Tiempo mínimo de arranque [min]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	Hoja de datos Grupos electrógenos Cummins
Costo Biodiesel [USD/Litro]	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	Resolución 091-2007
Tipo de combustible	Biodiesel	Biodiesel	Biodiesel	Biodiesel	Biodiesel	-

La resolución CREG 091 de 2007 [16], en su capítulo IV, denominado Cargos regulados para la remuneración de la actividad de generación, establece valores en \$/kWh, para remunerar la inversión y el mantenimiento. Para convertir estos valores a dólares por hora de operación, se realizaron los cálculos mostrados en la Tabla 3-6. Se destaca que se usa la TRM promedio del año 2019 y se calcula la energía por unidad de acuerdo a su capacidad.

Tabla 3-6: Inversión y mantenimiento Unidades diésel según CREG 091-2007 durante la vida útil del proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

Unidad	Potencia	% Capacidad	Energía por unidad	Total inversión \$	Total Mantenimiento \$	Total Inv+Mtto \$	Total Inv+Mtto USD	USD/h
Unidad 1	2.000	22%	4.382.016	815.639.927	298.613.690	1.114.253.617	339.599	80
Unidad 2	2.000	22%	4.382.016	815.639.927	298.613.690	1.114.253.617	339.599	80
Unidad 3	1.270	14%	2.782.580	519.675.764	184.569.209	704.244.973	214.638	51
Unidad 4	2.000	22%	4.382.016	815.639.927	298.613.690	1.114.253.617	339.599	80
Unidad 5	2.000	22%	4.382.016	815.639.927	298.613.690	1.114.253.617	339.599	80
Total COP/USD				3.782.235.470	1.379.023.970	5.161.259.441	1.573.032	74
TRM PROMEDIO 2019				3281,09				

Después de completar los datos básicos de los generadores diésel, se procede a ingresar los datos de la granja solar de Inírida como se muestra en la Tabla 3-7.

Para la granja solar, también se agregó la información del recurso solar disponible, según los datos de la NASA, como se dijo en el numeral 152.7.1 Recurso solar.

Tabla 3-7: Parámetros Granja Solar Inírida.

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Granja solar Inírida	Fuente/ Observaciones
Capacidad [kWh]	2.470	Resolución CREG 012 – 2018
Capital [USD]	5.263.904	
Costo de reemplazo [USD]	5.263.904	
Operación y mantenimiento [USD/horas de operación]	112.636	
Vida útil [años]	25	

En la Tabla 3-8 se agregaron los tipos de mantenimiento de los generadores diésel y la periodicidad de los mismos, para que HOMER incorpore esto en el despacho de las unidades ya que también se incluye el tiempo de parada para cada tipo de mantenimiento:

Tabla 3-8: Tipos de mantenimiento y periodicidad.

Fuente: Elaboración propia.

HR	TIPO DE MANTENIMIENTO				M0: MANTENIMIENTO TIPO 0 (DIARIO)	
	M1	M2	M3	M4		
250	X				Revisar Pre Lub	Revisar las Correas del Motor
500	X				Drenar separador de Agua - Combustible	Revisar filtro de Combustible
750	X				Revisar Nivel de Aceite	Revisar Mangueras
1000	X				Revisar Nivel de Refrigerante	Revisar por olor a combustible
1250	X				Revisar filtro de Agua	Revisar por fugas
1500	X	X			Revisar tubería de admisión de aire	Inspeccionar por cambios de color en el motor
1750	X				Revisar el indicador de restricción del filtro de aire	Revisar por códigos de falla
2000	X				Revisar filtro de aceite	Revisar Baterías y cables de Baterías
2250	X				M1: MANTENIMIENTO TIPO 1 (250 Horas)	
2500	X				Ejecute Mantenimiento M0	Inspeccionar correa del alternador para reúso
2750	X				Cambio filtro de combustible	Cambio de aceite y filtros
3000	X	X			Cambio de filtro de agua	Limpieza externa del radiador
3250	X				Revisar Ventilador	Inspeccionar por ruidos anormales
3500	X				Revisar Concentración de SCA	Revise voltaje en el alternador
3750	X				Revisar por tornillos sueltos	Revisar tapa del radiador
4000	X				Revisar por soportes del motor	Revisar motor de arranque
4250	X				Revisar el soporte frontal del motor	Cambio de filtro de aire de acuerdo a la restricción

4500	X	X			Cambio de filtro de combustible etapa 1 y etapa 2	Revisar la correa de mando y el tensor
4750	X				Limpiar y revisar el sensor de nivel de aceite	Inspeccionar tubo de desfogue
5000	X				Revisar Bomba de agua (Externa)	Realizar análisis de aceite
5250	X					
5500	X					
5750	X					
6000	X	X	X			
6250	X					
6500	X					
6750	X					
7000	X					
7250	X					
7500	X	X				
7750	X					
8000	X					
8250	X					
8500	X					
8750	X					
9000	X	X				
9250	X					
9500	X					
9750	X					
10000	X			X		
10250	X					
10500	X	X				
10750	X					
11000	X					
11250	X					
11500	X					
11750	X					
12000	X	X	X			

M2: MANTENIMIENTO TIPO 2 (1500 Horas)	
Ejecute Mantenimiento M0	Revisar ensamble del control
Ejecute Mantenimiento M1	Ajuste de Válvulas (Solo a las 1500 horas)
Limpieza del motor a vapor	Inspeccione Turbocargador
Revisar el sistema tensor de la correa	Inspeccione por terminales sulfatados
Revisar el calentador del motor	Inspeccione el dámper para reúso
Revisar el calentador del refrigerante	Inspeccione el arnés del motor

M3: MANTENIMIENTO TIPO 3 (6000 Horas)	
Ejecute Mantenimiento M0	Revise protecciones del motor
Ejecute Mantenimiento M1	Revise presión de aceite
Ejecute Mantenimiento M2	Revise el sistema LTA y su bomba
Calibrar Bomba de Combustible	Lavar Radiador
Cambio de refrigerante y termostatos	Revisar Cubo del ventilador impulsado por banda
Cambio de alternador	Revisar bomba de agua
Calibrar Inyectores	Turbocargador - Inspeccionar Para Reutilizar

M4: MANTENIMIENTO TIPO 4 (10000 Horas)	
Ejecute Mantenimiento M0, M1, M2, M3	Cambio del rodamiento del generador
Revise Cojinetes principales	Mantenimiento del motor de arranque
Top Overhaul	Cambio del sello trasero del cigüeñal
Cambio de mangueras	Cambio del sello delantero del cigüeñal
Cambio de Inyectores	Cambio del tensor
Cambio Bomba LTA	Cambio del empaque de la cubierta de engranes
Cambio del dámper si tiene más de 12000 horas	Cambio del rodamiento del fan drive

Para los parámetros de la carga, HOMER permite importar los datos y dado que se tenían todos los valores hora a hora del año 2019 se cargaron al software en un documento .txt los 8760 datos.

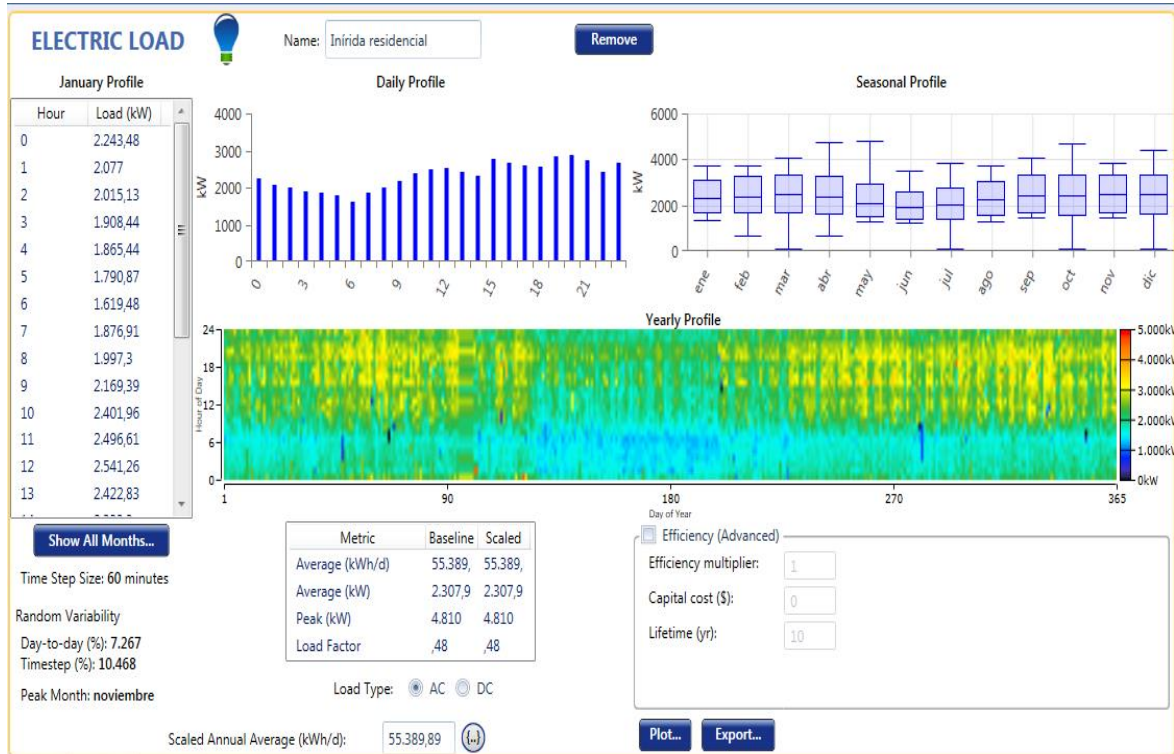


Figura 3-1: Consumo de energía Inirida Guainía.

Fuente: Simulación Homer Energy Pro

En la Figura 3-1 se puede ver de qué manera HOMER procesa los datos de carga recibidos, mostrando el perfil de carga por mes, el perfil diario promedio de carga, la variabilidad por mes, el consumo de energía por día. Todos estos datos permiten ser exportados. De esto se destaca que el consumo promedio día del municipio de Inirida es de 55.390 kWh/día, también se permite ver con un poco más de detalle, el perfil promedio diario como se muestra en la Figura 3-2.

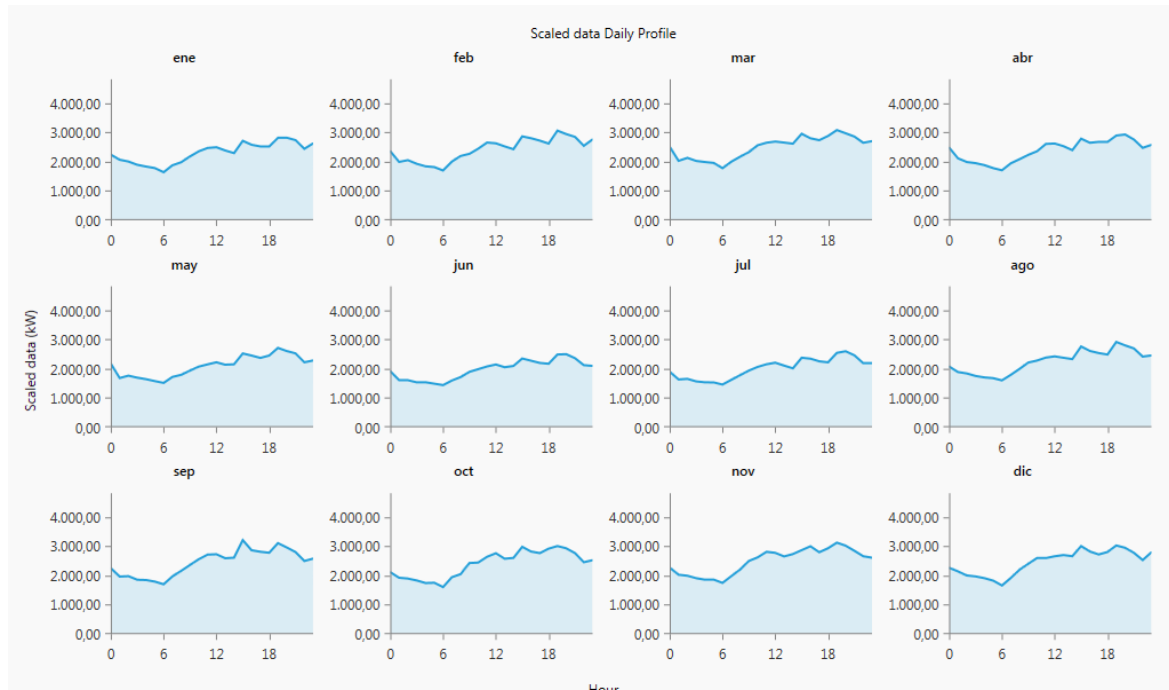


Figura 3-2: Perfiles de carga por mes año 2019.
Fuente: Simulación Homer Energy Pro.

Después de cargar los parámetros se obtiene el diagrama esquemático presentado en la Figura 3-3, donde se puede observar la generación diésel representada por una chimenea y con el número 5, que representa las cinco unidades de generación diésel cargadas al HOMER, luego se representa la Granja solar de Inírida con un panel solar y la carga representado por un bombillo incandescente.

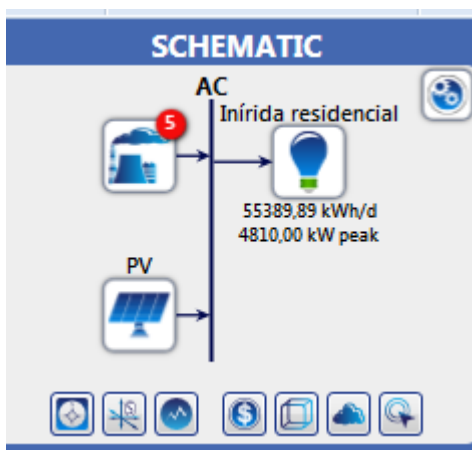


Figura 3-3: Diagrama esquemático de la simulación del sistema de generación actual de Mitú.

Fuente: Simulación Homer Energy Pro.

Para simular el caso actual del sistema de generación de Inírida y su carga, no se seleccionan las opciones de optimización de HOMER, ya que se espera tener la simulación más cercana a lo que se encuentra actualmente en el municipio por lo que se obtiene una sola simulación.

HOMER presenta los resultados categorizados en varios ítems, como costo total, flujo de caja, variables eléctricas, emisiones y las características de generación de cada una de las fuentes. En la Tabla 3-9 se presentan los resultados económicos divididos por los costos de inversión, de reemplazo, de operación y mantenimiento, de combustible, de gastos de salvamento y el total por cada uno de los componentes de generación así como el total de todo el proyecto.

Tabla 3-9: Resultados económicos simulación.
Fuente: Elaboración propia.

Resultados económicos de la simulación [Valor presente Neto]						
Componente	Capital [USD]	Costo de reemplazo [USD]	Operación y mantenimiento [USD]	Combustible [USD]	Gastos de salvamento [USD]	Total [USD]
Unidad 1	\$ 317.500	\$ 789.676	\$ 4.179.443	\$ 8.336.818	(\$ 18.378)	\$ 13.605.059
Unidad 2	\$ 525.000	\$ 1.971.285	\$ 6.027.854	\$ 37.105.244	(\$ 14.231)	\$ 45.615.152
Unidad 3	\$ 525.000	\$ 73.199	\$ 642.560	\$ 3.031.891	(\$ 47.026)	\$ 4.225.623
Unidad 4	\$ 525.000	\$ 0	\$ 16.134	\$ 86.549	(\$ 53.420)	\$ 574.264
Unidad 5	\$ 525.000	\$ 0	\$ 701	\$ 3.521	(\$ 54.932)	\$ 474.290
Granja Solar Inírida	\$ 5.263.904	\$ 0	\$ 1.067.735	\$ 0	\$ 0	\$ 6.331.639
Total	\$ 7.681.404	\$ 2.834.160	\$ 11.934.427	\$ 48.564.023	(\$ 187.987)	\$ 70.826.028

De los resultados económicos presentados en la Tabla 3-9 se destaca un valor presente neto total del proyecto de USD 70.826.028 de los cuales el 68,6% del valor del proyecto está representado en el costo del combustible a lo largo de la vida útil (25 años). Para evidenciar la diferencia entre las componentes y el gran porcentaje del valor del combustible, se muestra en la Figura 3-4 la participación de cada uno de los componentes en el costo total del proyecto.

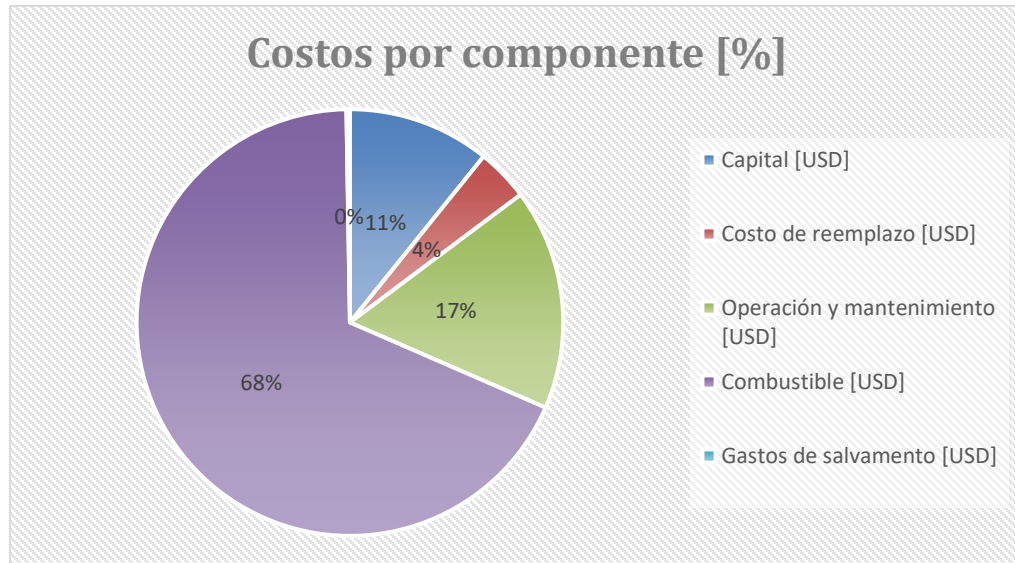


Figura 3-4: Participación en los costos del proyecto por componente [%].
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-10: Generación de energía por componente [kWh/año].
Fuente: Elaboración propia.

Componente	Generación [kWh]	Porcentaje generación total [%]
Granja Solar Inírida	3.440.435	16,8%
Unidad 1	13.199.999	64,5%
Unidad 2	1.051.237	5,1%
Unidad 4	30.411	0,1%
Unidad 5	1.229	0,0%
Unidad 3	2.728.911	13,3%
Total	20.452.222	100,0%

Después de revisar los resultados de costos totales del proyecto, se procede a revisar los resultados de generación de energía presentados por HOMER y resumidos en la Tabla 3-10. Se puede inferir que con la arquitectura de generación actual que se tiene en el municipio de Inírida, el porcentaje de penetración de las energías renovables es del 16,8%. Se observa también que se tienen 3 unidades de generación diésel con un porcentaje menor o igual al 5% de participación en la generación, por lo que se considera el sistema sobredimensionado, que puede obedecer a criterios de confiabilidad, como son, por ejemplo, mantener la

generación del municipio aun cuando existan fallas múltiples hasta en dos unidades de generación de la mayor capacidad de manera simultánea (criterio n-2) [30]. Es acertado pensar en estos criterios de confiabilidad aplicados al sistema de generación de Inírida, debido a la zona del país donde se encuentran y algunos mantenimientos tienen tiempos de parada muy amplios y la logística para trasladar personal especializado y repuestos es compleja en caso de requerir reparaciones.

De la Tabla 3-10 se puede observar que la generación diésel por año resultante en la simulación es de 17.011.787 kWh y un consumo de combustible de 1.082.693 galones. Con esta relación de generación y consumo de combustible se obtiene una eficiencia simulada de 15,71 kWh/galón, superior a los 13,54 kWh/galón que se obtuvieron en la Tabla 2-5 con los datos reales del año 2019. Si se utiliza la relación de eficiencia real de la Tabla 2-5 el consumo de combustible aumentaría a 1.256.409 galones por año.

Este consumo de combustible genera emisiones al ambiente que son cuantificadas por HOMER de la siguiente manera:

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	-87.371	kg/yr
Carbon Monoxide	55.599	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	2.951	kg/yr
Particulate Matter	488	kg/yr
Sulfur Dioxide	0	kg/yr
Nitrogen Oxides	10.656	kg/yr

Figura 3-5: Cantidad de emisiones.
Fuente: Simulación Homer Energy Pro.

Con estos resultados se da por finalizada la simulación actual del sistema, que servirá como base para comparar con los resultados luego de encontrar el dimensionamiento adecuado del sistema. Se destaca que el costo total (En valor presente neto) del proyecto, como se encuentra en este momento en operación es

de USD 70.826.028, destacando que USD 48.564.023 corresponden al valor del combustible requerido.

El reporte de simulación completo de esta parte del trabajo, se puede consultar en el Anexo: Simulación sistema actual.

4. Dimensionamiento Microrred Inírida

Para realizar el proceso de dimensionamiento de una microrred para el municipio de Inírida Guainía, se debe considerar que su operación sea económicamente viable, confiable y de calidad teniendo en cuenta que debe tener el menor impacto ambiental posible [9].

También se debe tener en cuenta otras consideraciones como son, las restricciones ambientales, el área de influencia, los recursos energéticos disponibles, la normatividad y la carga.

Los recursos energéticos disponibles en el Municipio de Inírida, se revisaron en el numeral 2.7 Recursos Energéticos disponibles. de este trabajo.

4.1 Dimensionamiento y simulación

Después de analizar los recursos disponibles, se procede a realizar las simulaciones, pero teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- Simulación completamente optimizada por HOMER.
- Simulación teniendo en cuenta la capacidad de generación existente.
- Simulación sin tener en cuenta toda la actual infraestructura.

La primera simulación se realiza para observar un sistema completamente optimizado por HOMER que garantice el suministro de energía en el municipio de

Inírida, aumentando la penetración de fuentes no convencionales de energía, disminuyendo el consumo de combustibles y las emisiones al ambiente.

La simulación teniendo en cuenta la capacidad de generación existente planteada se realiza ya que se considera que se debe realizar el nuevo dimensionamiento, pero teniendo en cuenta lo existente (Central diésel y granja solar) ya que las inversiones para acomodarse al nuevo dimensionamiento se podrán hacer de manera paulatina.

La simulación sin tener en cuenta toda la actual infraestructura planteada busca un dimensionamiento con menos cantidad de elementos existentes, teniendo en cuenta la mayor penetración de fuentes no convencionales de energía y disminuyendo el consumo de diésel que a su vez disminuirá los costos de operación que son los más representativos del proyecto.

4.1.1 Dimensionamiento optimizado por HOMER

De acuerdo al numeral 2.7 Recursos Energéticos disponibles. para el dimensionamiento se pueden utilizar tecnologías de generación solar, generación con diésel, generación con Biogás y almacenamiento de energía. Para realizar este dimensionamiento solo se tuvo la restricción de limitar la generación con biogás al límite del proyecto inscrito en la UPME a 360 kW como se mostró en la Tabla 2-9.

Con estas consideraciones se construye un diagrama esquemático de la simulación como se muestra en la Figura 4-1, seleccionando en la generación diésel la opción de tamaño automático del grupo electrógeno, en la generación solar, el convertidor de potencia y las baterías se selecciona la opción de optimizador de HOMER y la carga se agrega como se mostró en el numeral 3.2 Parámetros utilizados en la simulación.

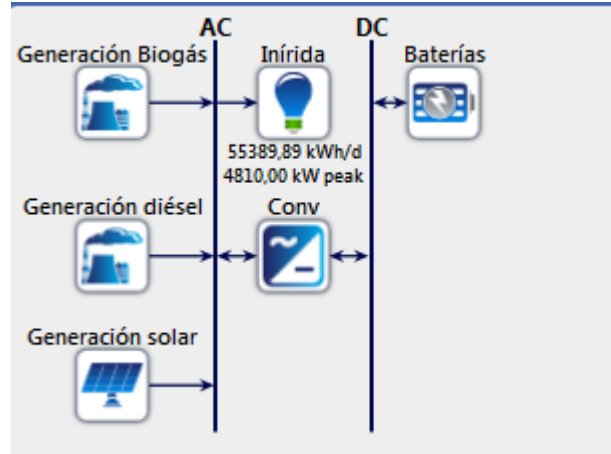


Figura 4-1 Esquema propuesto para dimensionamiento ideal.
Fuente: Simulación Homer Energy Pro.

Para los datos específicos de la generación diésel se usan los ya explicados en la Figura 4-1. Y para los datos del generador fotovoltaico se utilizan los mostrados en la Tabla 3-7 para la granja solar de Inírida.

Para los datos específicos del generador con biogás se utilizarán los datos de la Tabla 4-1. Estos datos son los mismos solicitados para un generador térmico como se mostró en la Tabla 3-2.

Tabla 4-1: Parámetros unidad Biogás.
Fuente Elaboración propia.

Parámetro	Unidad Biogás Residuos sólidos Urbanos	Fuente/ Observaciones
Capacidad [kWh]	360	Registro de proyectos UPME
Capital [USD]	61.500	Documento CREG 075-2007
Costo de reemplazo [USD]	61.500	Documento CREG 075-2007
Operación y mantenimiento [USD/horas de operación]	19,7	Resolución 091-2007
Mínimo porcentaje de carga [%]	30	Hoja de datos Grupos electrógenos
Vida útil [horas de operación]	20.000	Documento CREG 075-2007
Tiempo mínimo de arranque [min]	0,01	Hoja de datos Grupos electrógenos Cummins
Tipo de combustible	Biogás	-

En las tablas Tabla 4-2 y Tabla 4-3 se presentan los datos básicos solicitados por HOMER para las baterías y el convertidor de potencia. Los datos de capacidad y precios asociados a esta capacidad, son de referencia, ya que HOMER realiza la optimización de estos valores como se indicó al principio de este numeral.

Tabla 4-2: Parámetros convertidor de potencia.
Fuente Elaboración propia.

Parámetro	Convertidor de potencia	Fuente/ Observaciones
Capacidad [kWh]	1	Se coloca este valor como base y se selecciona la opción de optimización de HOMER para encontrar la capacidad adecuada
Capital [USD/kWh]	120	NREL (Laboratorio nacional de energía renovable) [31]
O&M [USD/año]	50	NREL (laboratorio nacional de energía renovable) [32]

Tabla 4-3: Parámetros Baterías.
Fuente Elaboración propia.

Parámetro	Baterías	Fuente/ Observaciones
Capacidad [kWh]	100	Se coloca este valor como base y se selecciona la opción de optimización de HOMER para encontrar la capacidad adecuada
Capital [USD]	38000	NREL (laboratorio nacional de energía renovable) [33]

Con estos datos de entrada, HOMER realizó 1.349 simulaciones, encontrando 960 soluciones que clasificó en 5 categorías, según la arquitectura.

Tabla 4-4: Clasificación de resultados según arquitectura.
Fuente: Elaboración propia

Opciones de Arquitectura	Generación solar [kW]	Biogás [kW]	Generación Diésel [kW]	Baterías [kWh]	Convertidor de potencia [kW]
1	43.099	360	5.000	63.600	6.445
2	52.855	360	-	82.000	7.006
3	-	360	5.000	17.400	3.458
4	102.702	360	5.000	-	-
5	-	360	5.000	-	-

En la Tabla 4-4 se observan las 5 opciones de arquitectura que HOMER encontró con los parámetros utilizados como entradas. Se destaca que en tres de las cinco opciones incluye generación solar y solo omite en una de ellas la generación diésel. Las opciones de arquitectura están clasificadas según la optimización del ejercicio, por lo cual la opción 1 es la mejor solución en términos de optimización encontrada por HOMER.

Después de seleccionar la opción 1, se revisaron los datos económicos de esta, encontrado un valor total del proyecto de USD 155.321.637, como se puede ver en la Tabla 4-5. Este resultado, es muy costoso, comparado con el sistema de generación actual del municipio analizado el cual arrojó un resultado de USD 70.826.028.

Se puede observar que los costos de combustible de esta solución ideal representan el 1,18% del valor presente neto total de la solución, lo que es una diferencia importante con la simulación del sistema actual, donde se encontró que el combustible representa el 68% del valor total.

Tabla 4-5: Resultados económicos simulación ideal.
Fuente: Elaboración propia

Resultados económicos de la simulación [Valor presente Neto]						
Componente	Capital [USD]	Costo de reemplazo [USD]	Operación y mantenimiento [USD]	Combustible [USD]	Gastos de salvamento [USD]	Total [USD]
Biogás	\$ 61.500	\$ 0	\$ 1.094	\$ 164.911	(\$ 4.784)	\$ 222.721
Generación Diésel	\$ 1.285.000	\$ 0	\$ 19.243.419	\$ 1.673.641	(\$ 115.101)	\$ 22.086.959
Baterías	\$ 31.800.000	\$ 8.213.979	\$ 24.115.891	\$ 0	(\$ 1.110.495)	\$ 63.019.374
Convertidor de potencia	\$ 1.095.696	\$ 283.020	\$ 3.054.902	\$ 0	(\$ 38.263)	\$ 4.395.355
Generación solar	\$ 65.579.466	\$ 0	\$ 17.762	\$ 0	\$ 0	\$ 65.597.228
Total sistema	\$ 99.821.662	\$ 8.496.998	\$ 46.433.068	\$ 1.838.552	(\$ 1.268.643)	\$ 155.321.637

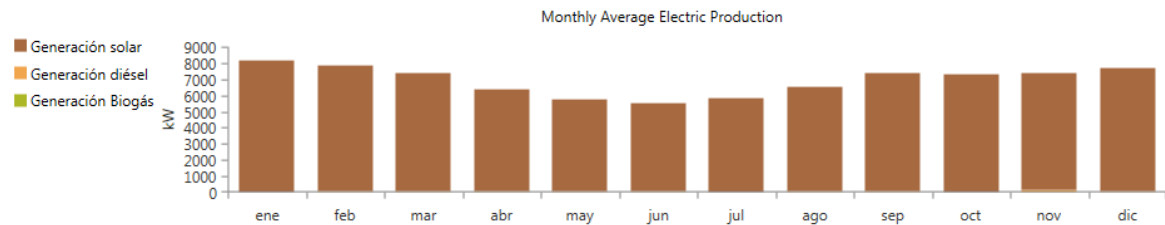
Después de revisar los resultados económicos, se procederá a revisar los resultados energéticos del proyecto para la primera arquitectura.

Production	kWh/yr	%
Generación solar	60.031.540	99,0
Generación Biogás	60.554	0,0999
Generación diésel	532.333	0,878
Total	60.624.426	100

Consumption	kWh/yr	%
AC Primary Load	20.217.309	100
DC Primary Load	0	0
Total	20.217.309	100

Quantity	kWh/yr	%
Excess Electricity	37.984.380	62,7
Unmet Electric Load	0	0
Capacity Shortage	0	0

Quantity	Value
Renewable Fraction	97,1
Max. Renew. Penetration	2.773



*Nota: Los valores de generación diésel y generación biogás son despreciables frente a la generación solar por lo que en la gráfica se evidencian muy sutilmente.

Figura 4-2 Resultados generación de energía.
Fuente: Simulación Homer Energy Pro.

En la *Nota: Los valores de generación diésel y generación biogás son despreciables frente a la generación solar por lo que en la gráfica se evidencian muy sutilmente.

Figura 4-2 se puede observar la manera en que HOMER presenta los resultados de generación de energía del sistema propuesto, se muestra que la generación solar produce cerca de 60 MWh por año, pero el consumo es de aproximadamente 20 MWh por año, por lo que se tienen excedentes de energía de 63% de la generación total.

Es claro que la optimización de HOMER comparada con la situación actual de Inírida Guainía, mejora la penetración de las fuentes no convencionales de energía, siendo la generación solar responsable de casi la totalidad de generación del municipio (97,1%), pero también es claro que su elevado costo hace que esta solución sea muy difícil de implementar.

Es por lo anterior, que se proponen otras simulaciones teniendo en cuenta la infraestructura existente y que no sea un cambio total.

El reporte de simulación completo de esta parte del trabajo, se puede consultar en el Anexo: Simulación nuevo dimensionamiento optimizado por HOMER.

4.1.2 Dimensionamiento de microrred teniendo en cuenta la infraestructura existente.

En el numeral 2.7 Recursos Energéticos disponibles., se identificaron las tecnologías que se pueden utilizar para el dimensionamiento de acuerdo a los recursos disponibles, por considerarse viables en la zona estudiada. Ahora se debe determinar de qué capacidad de potencia será cada tecnología incluyendo el almacenamiento de energía.

Planteando que se utilizará la infraestructura existente, pero aumentando la capacidad de penetración de fuentes no convencionales y adicionando almacenamiento de energía, se propone adicionar una granja solar paralela a la existente escogiendo la opción de optimización para esta segunda granja, se adicionan los 360 kW al parque de generación térmico con un generador a base de biogás según el proyecto presentado a la UPME como se muestra en la Tabla 2-9 y adicionar baterías y un convertidor de potencia también seleccionados en la opción de optimización de HOMER. Este esquema descrito se puede observar en la Figura 4-3.

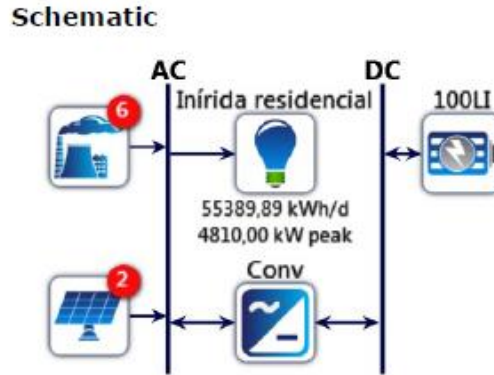


Figura 4-3 Esquema propuesto para dimensionamiento.
 Fuente: Simulación Homer Energy Pro.

Los parámetros económicos usados, son los que se utilizaron en la simulación del sistema actual de la Tabla 3-4. También como se considera el sistema de generación diésel actual y la granja solar actual, se utilizan los datos de Tabla 3-5 y la Tabla 3-7 respectivamente. Los datos de la carga, también se mantienen de la misma manera. Los parámetros del generador de biogás son los datos de la Tabla 4-1, los del convertidor de potencia los de la Tabla 4-2 y los parámetros de las baterías son los de la Tabla 4-3.

Con estos datos, HOMER realizó 557 simulaciones factibles y omitió 205. Estas 557 simulaciones fueron categorizadas en cuatro tipos de sistemas como se muestra en la Tabla 4-6 (Clasificados por su Arquitectura). Lo anterior quiere decir, que esos cuatro resultados que se muestran en la Figura 4-4; corresponden a los mejores resultados en relación a costos por cada categoría, no necesariamente obedecen a los cuatro mejores resultados de la simulación, ya que estos pueden obedecer a una misma arquitectura del sistema

Tabla 4-6: Categorías de arquitecturas según simulación HOMER.
 Fuente: Elaboración propia

Opciones de Arquitectura	Generación solar 1 [kW]	Generación solar 2 [kW]	Biogás [kW]	Generación Diésel [kW]	Baterías [kWh]	Convertidor de potencia [kW]
1	2.470	3.847	360	9.270	3.200	2.305

Opciones de Arquitectura	Generación solar 1 [kW]	Generación solar 2 [kW]	Biogás [kW]	Generación Diésel [kW]	Baterías [kWh]	Convertidor de potencia [kW]
2	2.470	1.731	360	9.270	-	-
3	2.470	-	360	9.270	-	-
4	2.470	-	360	9.270	2	9,4

Optimization Results													Categorized Overall		
Architecture													Cost		
	GSI1 (kW)	GSI2 (kW)	U1 (kW)	U2 (kW)	U4 (kW)	U5 (kW)	U3 (kW)	Bio Gas (kW)	Baterías	Conv (kW)	Dispatch	COE (\$)	NPC (\$)	Operating cost (\$/yr)	
	2.470	3.847	2.000	2.000	2.000	2.000	1.270	360	32	2.305	CC	\$ 0,327	\$ 62,6M	\$ 5,17M	
	2.470	1.731	2.000	2.000	2.000	2.000	1.270	360			CC	\$ 0,346	\$ 66,3M	\$ 6,06M	
	2.470		2.000	2.000	2.000	2.000	1.270	360			CC	\$ 0,350	\$ 67,1M	\$ 6,42M	
	2.470		2.000	2.000	2.000	2.000	1.270	360	2	9,40	CC	\$ 0,351	\$ 67,2M	\$ 6,43M	

Figura 4-4 Resultados según arquitectura.
Fuente: Simulación Homer Energy Pro.

Se escoge el mejor resultado en términos de costos y de penetración de fuentes no convencionales, esta arquitectura se resume en la Tabla 4-7:

Tabla 4-7: Arquitectura seleccionada en la simulación.
Fuente Elaboración propia.

Componente	Potencia instalada (kW)
Unidad 3	1270
Unidad 1	2000
Unidad 2	2000
Unidad 3	2000
Unidad 4	2000
Unidad Biogás	360
Cantidad Baterías (100 kWh)	32
Convertidor de potencia	2305
Granja Solar Inírida	2470
Granja Solar Inírida 2	3847

Con la arquitectura mostrada en la Tabla 4-7, se revisan a detalle los resultados de la simulación.

Tabla 4-8: Resultados económicos de la simulación.
Fuente Elaboración propia.

Resultados económicos de la simulación [Valor presente Neto]						
Componente	Capital [USD]	Costo de reemplazo [USD]	Operación y mantenimiento [USD]	Combustible [USD]	Gastos de salvamento [USD]	Total [USD]
Unidad 3	\$ 317.500	\$ 290.990	\$ 1.907.336	\$ 8.176.040	(\$ 19.999)	\$ 10.671.867
Unidad 1	\$ 525.000	\$ 1.115.868	\$ 3.678.583	\$ 28.066.293	(\$ 24.475)	\$ 33.361.269
Unidad 2	\$ 525.000	\$ 0	\$ 84.880	\$ 632.893	(\$ 46.682)	\$ 1.196.091
Unidad 3	\$ 525.000	\$ 0	\$ 0	\$ 0	(\$ 53.626)	\$ 471.374
Unidad 4	\$ 525.000	\$ 0	\$ 0	\$ 0	(\$ 53.626)	\$ 471.374
Unidad Biogás	\$ 61.500	\$ 18.566	\$ 8.000	\$ 1.387.739	(\$ 749)	\$ 1.475.055
Baterías	\$ 1.216.000	\$ 567.282	\$ 2.275.084	\$ 0	(\$ 111.025)	\$ 3.947.340
Convertidor de potencia	\$ 276.587	\$ 71.443	\$ 1.092.463	\$ 0	(\$ 9.659)	\$ 1.430.834
Granja Solar Inírida	\$ 3.758.389	\$ 0	\$ 1.018	\$ 0	\$ 0	\$ 3.759.407
Granja Solar Inírida 2	\$ 5.853.491	\$ 0	\$ 1.586	\$ 0	\$ 0	\$ 5.855.077
Total	\$ 13.583.467	\$ 2.064.149	\$ 9.048.950	\$ 38.262.966	(\$ 319.842)	\$ 62.639.689

En la Tabla 4-8 se observa el resumen de los resultados económicos encontrados en la simulación con la arquitectura escogida. De este resumen se observa un costo total del proyecto de USD 62.639.689, a simple vista, menor que el presentado en la simulación del sistema actual y la simulación del sistema optimizado por HOMER.

Los resultados de la generación eléctrica por componente se presentan en la Tabla 4-6:

Tabla 4-6: Generación por componente y porcentaje de participación.
Fuente Elaboración propia.

Componente	Generación [kWh]	Porcentaje generación total [%]
Granja Solar Inírida	3.440.435	15,2
Granja Solar Inírida 2	5.353.981	23,7
Unidad 1	10.144.988	44,9
Unidad 2	228.418	1,01
Unidad 4	0	0
Unidad 5	0	0
Unidad 3	2.929.920	13
Unidad Biogás	518.588	2,29
Total	22.616.330	100

En la Tabla 4-6 se puede observar que la generación total es de 22 MWh por año aproximadamente, pero el consumo es de 20 MWh por año aproximadamente, por lo que se tienen excesos de energía equivalentes a un 10%.

El reporte de simulación completo de esta parte del trabajo, se puede consultar en el Anexo: Simulación nuevo dimensionamiento conservando la infraestructura existente.

4.1.3 Anexo: Simulación nuevo dimensionamiento conservando la infraestructura existente. Simulación sin tener en cuenta toda la infraestructura actual.

Para plantear esta solución de simulación que permita obtener un dimensionamiento óptimo, se tuvieron las siguientes consideraciones:

- En las simulaciones anteriores, tanto en el estado actual, como la propuesta de dimensionamiento utilizando la infraestructura usada hasta el momento, se observa que la generación diésel se distribuye en 2 generadores, ya que los demás aportan menos del 5 % de la generación total del sistema. Por esto se adicionan solo dos generadores (2000 kW y 1270 kW).
- Se adiciona la generación con biogás con una capacidad de 360 kW de acuerdo a los parámetros usados en la Tabla 4-1.
- Las baterías, el convertidor de potencia y la solución solar fotovoltaica, será seleccionada con los datos optimizados por HOMER con los datos de entrada mostrados en Tabla 4-3, Tabla 4-2 y Tabla 3-7 respectivamente.

De acuerdo a las consideraciones mencionadas, se tiene el diagrama esquemático mostrado en la Figura 4-5, donde se puede identificar los dos generadores diésel con los nombres U1 y U2, la solución solar como GSI, la generación con biogás como Bio Gas, las baterías como 100LI y el convertidor de potencia como Conv. La carga es representada por el bombillo incandescente.

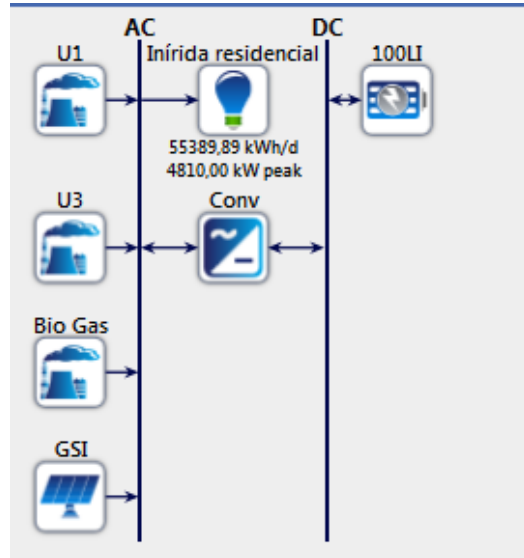


Figura 4-5 Esquemático simulación sin infraestructura existente.
Fuente: Simulación Homer Energy Pro.

Con este esquema, se encontraron 597 simulaciones posibles, resumidas en dos arquitecturas mostradas en la Figura 4-6, una presenta generación solar con una capacidad instalada de 7 MW aproximadamente y 3600 kWh de almacenamiento en baterías y la generación con combustibles fósiles con tres unidades (1270 kW, 2000 kW y 360 kW respectivamente), mientras que la otra no presenta generación solar, conserva las mismas condiciones de generación con combustibles fósiles pero con una cantidad mayor de almacenamiento 7400 kWh.

Architecture										
					GSI (kW)	U1 (kW)	U3 (kW)	Bio Gas (kW)	100LI	Conv (kW)
					6.928	2.000	1.270	360	36	2.264
						2.000	1.270	360	74	1.906

Figura 4-6 Arquitecturas simuladas.
Fuente: Simulación Homer Energy Pro.

La arquitectura que se selecciona debido a que presenta 6.928 kW instalados de generación solar, 3270 kW de generación diésel y 360 kW de potencia instalada con biogás además de un almacenamiento de 3600 kWh y un convertidor de

potencia de 2264 kW, lo que nos indica una mayor penetración de fuentes no convencionales, y presenta un menor valor presente neto (VNP) en costos totales del proyecto, ya que la primera arquitectura tiene un valor de USD 61,7 millones y la segunda arquitectura tiene un valor presente neto de USD 77,4 Millones. Los resultados económicos discriminados por tipo de costo se presentan en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9: Resultados económicos simulación sin infraestructura actual.
Fuente Elaboración propia.

Resultados económicos de la simulación [Valor presente Neto] Simulación sin mantener infraestructura						
Componente	Capital [USD]	Costo de reemplazo [USD]	Operación y mantenimiento [USD]	Combustible [USD]	Gastos de salvamento [USD]	Total [USD]
Generación Solar	10.542.335	-	2.857	-	-	10.545.192
Baterías	1.368.000	654.605	2.559.470	-	(118.972)	4.463.103
Convertidor de potencia	271.669	70.172	1.073.037	-	(9.487)	1.405.392
Unidad 1270	317.500	289.852	1.900.321	8.426.321	(20.415)	10.913.579
Unidad 200	525.000	1.097.908	3.611.942	27.693.035	(31.007)	32.896.879
Unidad Biogás	61.500	18.597	8.011	1.387.464	(733)	1.474.838
Total sistema	13.086.004	2.131.134	9.155.638	37.506.819	(180.613)	61.698.982

Los resultados de generación de energía y la participación de cada una de las tecnologías de generación se presentan en la Tabla 4-10 destacando un porcentaje de participación de la generación solar en un 41,6%.

Tabla 4-10: Generación de energía y participación.
Fuente Elaboración propia.

Componente	Generación [kWh]	Porcentaje generación total [%]
Generación Solar	9.642.701	41,6
Unidad 200	10.013.297	43,2
Unidad 1270	3.027.179	13,0
Unidad Biogás	518.394	2,23
Total	23.201.571	100

El reporte de simulación completo de esta parte del trabajo, se puede consultar en el Anexo: Simulación nuevo dimensionamiento sin mantener infraestructura existente.

5. Comparación de resultados.

Durante el desarrollo del trabajo, buscando el dimensionamiento adecuado para la microrred del municipio de Inírida, se tienen cuatro casos simulados (Estado actual, caso ideal optimizado por HOMER, propuesta de dimensionamiento conservando infraestructura existente, y propuesta de dimensionamiento sin tener en cuenta toda la infraestructura existente) que serán comparados para observar los resultados.

En la Tabla 5-1 se puede observar la comparación de los resultados económicos de las simulaciones, teniendo en cuenta el valor presente neto de cada componente.

Tabla 5-1: Comparación resultados económicos de las simulaciones.
Fuente Elaboración propia.

Caso	Capital [USD]	Costo de reemplazo [USD]	Operación y mantenimiento [USD]	Combustible [USD]	Gastos de salvamento [USD]	Total [USD]
Simulación sistema actual	\$ 7.681.404	\$ 2.834.160	\$ 11.934.427	\$ 48.564.023	(\$ 187.987)	\$ 70.826.028
Simulación optimizada por HOMER	\$ 99.821.662	\$ 8.496.998	\$ 46.433.068	\$ 1.838.552	(\$ 1.268.643)	\$ 155.321.637
Simulación nuevo dimensionamiento manteniendo infraestructura existente	\$ 13.583.467	\$ 2.064.149	\$ 9.048.950	\$ 38.262.966	(\$ 319.842)	\$ 62.639.689
Simulación nuevo dimensionamiento sin mantener la totalidad de la infraestructura existente	\$ 13.086.004	\$ 2.131.134	\$ 9.155.638	\$ 37.506.819	(\$ 180.613)	\$ 61.698.982

Se puede observar que, aunque el costo de inversión es mayor para los dimensionamientos propuestos que para la infraestructura existente, el costo total es menor en los dos dimensionamientos propuestos. Para el caso de la simulación optimizada por HOMER, todos los costos son mayores exceptuando el costo del combustible. El menor costo en los dimensionamientos propuestos se explica en la disminución de costos de combustible al generar con fuentes no convencionales de energía, en este caso, el aumento de penetración de generación solar fotovoltaica.

También se comparan los diferentes tipos de generación y su porcentaje de participación en cada caso como se indica en la Tabla 5-2:

Tabla 5-2: Comparación de generación por caso.
Fuente Elaboración propia.

Caso	Tipo de generación	Potencia instalada [kW]	Generación [kWh]	Porcentaje generación total [%]
Simulación sistema actual	Diésel	9.270	17.011.787	83,2%
	solar	2.470	3.440.435	16,8%
	Biogás	-	-	0,0%
Simulación optimizada por HOMER	Diésel	5.000	532.333	0,9%
	solar	43.099	60.031.540	99,0%
	Biogás	360	60.554	0,1%
Simulación nuevo dimensionamiento manteniendo infraestructura existente	Diésel	9.270	13.303.326	58,8%
	solar	6.317	8.794.416	38,9%
	Biogás	360	518.588	2,3%
Simulación nuevo dimensionamiento sin mantener la totalidad de la infraestructura existente	Diésel	3.270	13.040.476	41,6%
	solar	6.928	9.642.701	56,2%
	Biogás	360	518.394	2,2%

Se evidencia de la Tabla 5-2 que el sistema actual es dominado por la generación de energía con combustible diésel. Los dimensionamientos propuestos aumentan

la participación de la energía solar fotovoltaica en la pequeña canasta energética de Inírida, ya que aumenta su porcentaje de participación a más del 50 % de la generación total del sistema y en el sistema actual, la generación con la granja solar de Inírida no supera el 20%.

Un aspecto importante para la comparación entre los diferentes sistemas simulados es el consumo de combustible, que sirve como base de las emisiones que estos sistemas pueden generar al ambiente, en la Tabla 5-3 se presenta la relación entre cada una de los casos simulados y el consumo de diésel y de biogás.

Tabla 5-3: Consumo de combustible por caso.
Fuente Elaboración propia.

Caso	Consumo de combustible diésel [Litros]	Consumo de biogás [m³]
Simulación sistema actual	4.098.439	-
Simulación optimizada por HOMER	141.243	17.397
Simulación nuevo dimensionamiento manteniendo infraestructura existente	3.111.992	146.393
Simulación nuevo dimensionamiento sin mantener la totalidad de la infraestructura existente	3.048.202	146.364

De la Tabla 5-3 se observa que los sistemas propuestos, presentan menor consumo de diésel que el sistema actual de generación de Inírida, esto se explica por el aumento de la participación de la generación solar fotovoltaica como se muestra en la Tabla 5-2. Con estos resultados de proyección de consumo de combustible para los casos propuestos, y con la ayuda del calculador de emisiones de la UPME se procede a revisar los valores en kilogramos de dióxido de carbono que podría emitir cada una de las soluciones por año, como se puede observar en la Figura 5-1.

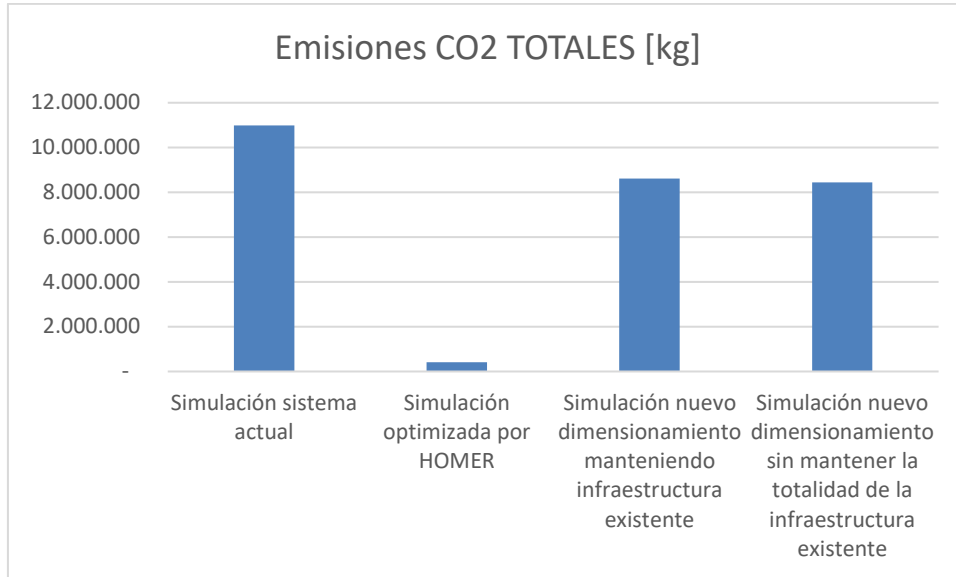


Figura 5-1 Emisiones [kg/año].
Fuente: Elaboración propia.

Con relación a las emisiones, se observa en la Figura 5-1 que el sistema actual genera aproximadamente 10.000 toneladas de CO₂ al año por el consumo de 1.082.694 galones de diese al año.

La simulación optimizada por HOMER es la más eficiente en relación con las emisiones al ambiente, ya que esta solución solo generaría 411 toneladas de CO₂ al año, lo que significa una reducción con el caso base del 96% de las emisiones de CO₂ por año. Las dos simulaciones restantes, también presentan disminuciones importantes de CO₂ con respecto al caso base, la simulación que considera mantener la infraestructura existente reduce el 22% de emisiones, mientras que la simulación que no contempla toda la infraestructura disminuye las emisiones en 2544 toneladas de CO₂ que representan una disminución del 23% con respecto al caso base.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

- La simulación económica del sistema actual se basó en la CREG 091 de 2007, Por la cual se establecen las metodologías generales para remunerar las actividades de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica, y las fórmulas tarifarias generales para establecer el costo unitario de prestación del servicio público de energía eléctrica en Zonas No Interconectadas. Esta simulación del sistema actual tuvo un valor presente neto total de USD 70.826.028, por lo que otro proyecto, que cumpla las condiciones de generación del municipio y que este por debajo de este valor, se puede considerar como viable.
- El dimensionamiento optimizado por HOMER, presenta los mejores resultados en penetración de energías renovables (99%), las emisiones más bajas de los casos simulados (411 Toneladas de CO₂), pero un proyecto con ese dimensionamiento puede considerarse inviable debido al valor presente neto total del proyecto (USD 155.321.637), ya que duplica el valor presente neto del caso base. Es importante anotar que el software permite encontrar soluciones técnicas optimizando la penetración de fuentes no convencionales y disminuyendo las emisiones, pero el usuario debe acotar los resultados según las restricciones se lo permitan, en este caso la regulación en términos de remuneración de los proyectos.

- En los casos simulados, tanto en el actual como en los dimensionamientos propuestos, los costos de combustible, superan el 50% de los valores totales del proyecto. Esto se explica porque la fuente primaria de generación en esta zona del país es el combustible diésel y su costo es muy elevado debido a entre otras razones, al transporte y al almacenamiento. Estos costos elevados del combustible, y de la operación en general, hacen que se pueda considerar soluciones energéticas con fuentes no convencionales de energía que se pueden considerar de alto costo de inversión comparadas con fuentes convencionales de energía usadas típicamente como los grupos electrógenos.
 - El dimensionamiento que contempla el uso de la infraestructura actual (USD 62.639.689) y el que la considera de manera parcial (USD 61.698.982), presentan valores presentes netos totales menores a los que resultaron de la simulación del sistema actual (de USD 70.826.028), por lo que se consideran económicamente viables. Ahora se considera que técnicamente la solución adecuada debe considerar la infraestructura actual, esto debido a que no se deben realizar grandes cambios a la arquitectura actualmente instalada y las adiciones se pueden hacer de manera modular, ya que se propone agregar una solución solar en paralelo a la granja solar actual y adicionar baterías con un convertidor de potencia.

6.2 Trabajos futuros

- El proceso de planificación de microrredes se puede abordar como una secuencia de problemas de optimización, que incluye, la selección de los recursos energéticos disponibles, el dimensionamiento de estos recursos, la ubicación de los recursos en el sistema evaluado, la gestión de los recursos para garantizar la calidad del suministro de energía teniendo en cuenta la minimización de costos y de impactos ambientales y el análisis de la

sensibilidad que se debe realizar a la microrred para evaluar su respuesta ante los cambios en las variables de diseño.

- Este documento, contiene el trabajo que consideró tres alternativas de dimensionamiento de una microrred para el municipio de Inírida, con la finalidad de aumentar la penetración de fuentes no convencionales de energía y la disminución del consumo de combustibles fósiles y las emisiones de gases peligrosos a la atmosfera, por lo que los trabajos futuros deben estar encaminados a completar la planificación de una microrred en el municipio de Inírida Guainía, para garantizar un suministro de energía eficiente a sus habitantes.
- Otra forma de enfocar un complemento del trabajo aquí presentado puede estar encaminado a cuanto le cuesta al estado seguir subsidiando el combustible para la arquitectura que se tiene actualmente y con la quema del mismo cual es el impacto económico, social y ambiental (Enfocado principalmente a cuanto le cuesta al planeta y a sus regiones protegidas continuar la quema de combustibles fósiles).
- Por último, se puede plantear que programas de bonos verdes se pueden emplear con base en este trabajo y para proyectos similares.

A. Anexo: Simulación sistema actual.

**B. Anexo: Simulación nuevo
dimensionamiento optimizado por
HOMER.**

C. Anexo: Simulación nuevo dimensionamiento conservando la infraestructura existente.

**D. Anexo: Simulación nuevo
dimensionamiento sin mantener
infraestructura existente.**

Bibliografía

- [1] C. de Colombia, “Ley 855 De 2003,” *D. Of. No. 45.405*, 18 diciembre 2003, p. 3646, 2003.
- [2] “Inírida Gensa Las fuentes no convencionales de energía ... Inírida Nuestro compromiso está Gensa En Inirida contamos con una central diesel :”
- [3] IPSE, “Informe telemetría mensual de junio,” 2020.
- [4] “Inscripción de proyectos de Generación.”
<http://www.siel.gov.co/Inicio/Generación/InscripcióndeproyectosdeGeneración/tabid/113/Default.aspx> (accessed Dec. 01, 2019).
- [5] S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, and P. Crossley, *Microgrids and active distribution networks*. 2009.
- [6] P. de energización rural Sostenible, “Análisis de tarifas y subsidios para el servicio de energía eléctrica en zonas rurales de nariño.”
- [7] GENSA, “Granja solar Inirida.pdf.”
- [8] C. Schwaegerl and L. Tao, “The microgrid concept,” in *Microgrids: Architectures and Control*, 1st ed., N. Hatziargyriou, Ed. Wiley-IEEE Press, 2014, pp. 1–24.
- [9] J. D. Bastidas-Rodriguez and C. A. Ramos-Paja, “Proceso de Planificación de Microrredes,” *Mundo Eléctrico*, pp. 84–94, 2016.
- [10] A. Chauhan and R. P. Saini, “A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 99–120, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.05.079.
- [11] “HOMER Pro: software de microrredes para diseñar microrredes híbridas optimizadas.” <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html> (accessed Dec. 01, 2019).
- [12] T. Cummins and P. Generation, “Diesel generator set QSK60 series engine,” pp. 15–18, 2015.

- [13] T. Cummins and P. Generation, “Diesel generator set KTA50 series engine,” 2013.
- [14] IPSE, “IPSE - Colombia y Venezuela unidas por una línea de interconexión.” .
- [15] “GRANJA SOLAR INÍRIDA – GENSA SA ESP.” .
- [16] CREG, “Creg091-2007.pdf.” .
- [17] NASA, “<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.” .
- [18] IDEAM, “<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21129/2-Radiaci%C3%B3n+Solar.pdf/1750468d-89bb-46ee-8f20-404433add2a8>.” .
- [19] NASA, “<https://power.larc.nasa.gov/>.” .
- [20] “Fuente : www.aprotec.org/pages/ Fuente : http://hidrica_pico.html Las Microcentrales tiene una capacidad instalada entre 10 y 100 kW , operación a filo de agua , aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas . La planta tí,” pp. 1–15.
- [21] S. G. Lezama, “económica de la inclusión de energía renovable en una de las principales localidades de las ZNI . Análisis de la viabilidad técnico – económica de la inclusión de energía renovable en una de las principales localidades de las ZNI .,” 2017.
- [22] UPME, “Proyectos_semana_26_2020.” .
- [23] J. A. Guacaneme, D. Velasco, and C. L. Trujillo, “Revisión de las Características de Sistemas de Almacenamiento de Energía para Aplicaciones en Microrredes Review of Characteristics of Energy Storage Systems for Microgrid Applications,” vol. 25, pp. 175–188, 2014, doi: 10.4067/S0718-07642014000200020.
- [24] A. A. E. and A. I. A. G. M. Morad, M. Nayel, “Sizing and Analysis of Grid-Connected Microgrid System for Assiut University Using HOMER Software,” *Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. pp. 694–699, 2018.
- [25] K. M. Krishna, “Optimization analysis of Microgrid using HOMER — A case study.” 2011 Annual IEEE India Conference, pp. 1–5, 2011.
- [26] O. A. A. and M. K. J. K. E. Adetunji, “Developing a Microgrid for Tafelkop Using HOMER.” 2018 International Conference on Advances in Big Data, Computing and

- Data Communication Systems (icABCD), Durban, pp. 1–6, 2018.
- [27] G. C. K. and N. D. H. D. I. Papaioannou, C. N. Papadimitriou, A. L. Dimeas, E. I. Zountouridou, “Optimization & sensitivity analysis of microgrids using HOMER software- A case study,” p. pp 1-7, 2014.
- [28] P. V. and U. R. K., “Sizing of microgrids for Indian systems using HOMER.” 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), p. p.p. 1-5, 2016.
- [29] Z. Y. and L. Z. S. Dutta, A. Qian, A. Adhikari, W. Yue, “Modelling and Cost Optimization of an Islanded Microgrid with an Existing Microhydro using HOMER Software.” 2019 2nd Asia Conference on Energy and Environment Engineering (ACEEE), 2019.
- [30] C. J. Zapata, “Confiabilidad De Sistemas Eléctricos De Potencia,” *Confiabilidad Sist. Eléctricos Potencia*, p. 85, 2011.
- [31] R. Fu *et al.*, “U . S . Solar Photovoltaic System Cost Benchmark : Q1 2016 U . S . Solar Photovoltaic System Cost Benchmark : Q1 2016,” no. September, 2016.
- [32] R. Fu, T. Remo, R. Margolis, R. Fu, T. Remo, and R. Margolis, “2018 U . S . Utility-Scale Photovoltaics- Plus-Energy Storage System Costs Benchmark 2018 U . S . Utility-Scale Photovoltaics- Plus-Energy Storage System Costs Benchmark,” no. November, 2018.
- [33] W. Cole, A. W. Frazier, W. Cole, and A. W. Frazier, “Cost Projections for Utility- S cale Battery Storage Cost Projections for Utility- S cale Battery Storage,” no. June, 2019.
- [34] *Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica*. 2013.