



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Energía y Ambiente

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO EN LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y
CONTAMINACIÓN POR EMISIÓN DE GASES MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN
SISTEMA HÍBRIDO QUE ENERGICE LAS ÁREAS DE *IT* EN FINCAS DEL INGENIO SANTA
ANA**

Ing. Roberto Eduardo Gonzalez Midence

Asesorado por el M. A. Airons Alejandro Retana Esquivel

Guatemala, marzo de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO EN LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y
CONTAMINACIÓN POR EMISIÓN DE GASES MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN
SISTEMA HÍBRIDO QUE ENERGICE LAS ÁREAS DE IT EN FINCAS DEL INGENIO SANTA
ANA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. ROBERTO EDUARDO GONZALEZ MIDENCE
ASESORADO POR EL M. A. AIRONS ALEJANDRO RETANA ESQUIVEL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, MARZO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Ing. Edgar Darío Álvarez Coti
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Ing. César Ariel Villela Rodas
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO EN LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y
CONTAMINACIÓN POR EMISIÓN DE GASES MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN
SISTEMA HÍBRIDO QUE ENERGICE LAS ÁREAS DE IT EN FINCAS DEL INGENIO SANTA
ANA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 23 de agosto de 2021.

Ing. Roberto Eduardo Gonzalez Midence

LNG.DECANATO.OI.135.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL IMPACTO EN LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y CONTAMINACIÓN POR EMISIÓN DE GASES MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO QUE ENERGICE LAS ÁREAS DE IT EN FINCAS DEL INGENIO SANTA ANA**, presentado por: **Roberto Eduardo Gonzalez Midence**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Energía y ambiente después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, marzo de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, marzo de 2022

LNG.EEP.OI.135.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“EVALUACIÓN DEL IMPACTO EN LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y CONTAMINACIÓN POR EMISIÓN DE GASES MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO QUE ENERGICE LAS ÁREAS DE IT EN FINCAS DEL INGENIO SANTA ANA”

presentado por **Roberto Eduardo Gonzalez Midence** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Energía y ambiente** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director



**Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería**



Guatemala, 24 de noviembre 2021

Como coordinador de la **Maestría en Artes en Energía y Ambiente** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“IMPACTO EN LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y CONTAMINACIÓN POR EMISIÓN DE GASES MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO QUE ENERGICE LAS ÁREAS DE IT EN FINCAS DE INGENIO SANTA ANA”** presentado por el Ingeniero Roberto Eduardo González Midence, quien se identifica con carné 100018329.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 2 de noviembre de 2021.

M.A. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí

Director

Escuela de Estudios de Postgrado

Presente

Estimado M.A. Ing. Álvarez Cotí

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: **“EVALUACIÓN DEL IMPACTO EN LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y CONTAMINACIÓN POR EMISIÓN DE GASES MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO QUE ENERGICE LAS ÁREAS DE IT EN FINCAS DEL INGENIO SANTA ANA”** del estudiante **Roberto Eduardo Gonzalez Midence** del programa de Maestría en **Energía y ambiente**, identificado con número de carné: **100018329**.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Alejandro Retana
Ingeniero Electricista
Colegiado 10992

M.A. Ing. Airons Alejandro Retana Esquivel

Colegiado No. 10992

Asesor de Tesis

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por guiarme en mi camino y por permitirme concluir este objetivo.

Mi familia

Por su incondicional apoyo.

AGRADECIMIENTOS A:

Facultad de Ingeniería	Por abrirme sus puertas para formarme como profesional.
Ingenio Santa Ana	Por permitirme llevar a cabo esta investigación dentro de sus instalaciones.
Mi asesor	M.A. Ing. Airons Alejandro Retana Esquivel
Coordinador de la carrera	MSC. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
OBJETIVOS.....	XIX
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXI
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. MARCO REFERENCIAL.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Industria azucarera en Guatemala	5
2.1.1. Proceso de producción de azúcar	6
2.1.1.1. Subproductos del proceso	9
2.2. La energía eléctrica como recurso del proceso productivo de azúcar.....	10
2.3. Tipos de generación de energía eléctrica en Guatemala	11
2.4. Energías renovables.....	12
2.5. Sistemas híbridos de generación eléctrica	13
2.6. Paneles fotovoltaicos.....	13
2.6.1. Tipos de células solares	15
2.6.2. El módulo fotovoltaico.....	16
2.6.2.1. Partes de un módulo fotovoltaico.....	17
2.6.2.2. Generador diésel	19

	2.6.2.3.	Inversor	19
	2.6.2.4.	Gestor energético.....	20
	2.6.2.5.	Regulador de carga.....	20
	2.6.2.6.	Baterías electroquímicas de ciclo profundo	21
2.7.		Demanda eléctrica	23
2.8.		Demanda horaria	23
2.9.		Combustibles fósiles	23
	2.9.1.	Los tipos de combustibles fósiles	24
2.10.		Efecto Invernadero	25
3.		PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	27
3.1.		Objetivo 1. Enumeración de las diferentes alternativas existentes para energizar las áreas de <i>IT</i> en fincas de Ingenio Santa Ana	27
	3.1.1.	Carga eléctrica	27
	3.1.2.	Planta generadora.....	30
	3.1.3.	Paneles fotovoltaicos	31
	3.1.4.	Inversor	31
	3.1.5.	Baterías.....	32
	3.1.6.	Programa para simulación de instalaciones solares HOMER-PRO.....	33
	3.1.6.1.	Parámetros de configuración del programa HOMER.....	34
3.2.		Objetivo 2. Identificación de la rentabilidad de un sistema híbrido fotovoltaico-planta generadora en las áreas de <i>IT</i> sin suministro eléctrico en fincas de Ingenio Santa Ana	39
3.3.		Objetivo 3. Generación de los lineamientos para el diseño de sistemas para energización de centros de cómputo rurales ...	41

3.3.1.	Lineamientos técnicos	42
3.3.2.	Lineamientos operativos	43
3.3.3.	Lineamientos financieros	43
3.4.	Objetivo 4. Estimación de la huella ecológica, la disminución de los gases de efecto invernadero (GEI) producida por los gases de escape	43
3.5.	Objetivo general. Evaluar el impacto en la disminución del consumo de combustible y contaminación por emisión de gases mediante la implementación de un sistema híbrido que energice las áreas de IT en fincas del ingenio Santa Ana.	45
3.5.1.	Implementación	48
3.5.2.	Instalación del modelo reducido	49
3.5.2.1.	Paneles solares	49
3.5.3.	Diagrama esquemático de la instalación	50
3.5.4.	Condiciones climáticas durante el transcurso de la prueba	53
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	55
	CONCLUSIONES	67
	RECOMENDACIONES	69
	REFERENCIAS	71
	APÉNDICES	75
	ANEXOS	81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Medidor de calidad de energía AEMC.....	XXIV
2.	Proceso de producción de azúcar	8
3.	Matriz energética de Guatemala	12
4.	Partes de un módulo fotovoltaico	18
5.	Esquema de un sistema híbrido diésel-fotovoltaico	22
6.	Patrón de la demanda eléctrica horaria en finca La Giganta.....	30
7.	Comparación flujo de caja para sistema propuesto #1 con sistema base	40
8.	Comparación flujo de caja para sistema propuesto #2 con sistema base	40
9.	Comparación flujo de caja para sistema propuesto #3 con sistema base	41
10.	Demanda horaria reducida finca La Giganta.....	47
11.	Torre para instalación de paneles solares.....	49
12.	Equipo de regulación y carga de baterías	50
13.	Diagrama esquemático de la instalación.....	52
14.	Radiación solar en finca la Giganta en W/m ² -día del 16 al 30 de agosto 2021	53
15.	Comparativa de radiación solar contra horas planta eléctrica	54

TABLAS

I.	Cuadro resumen de las variables	XXIII
II.	Demanda de equipos de <i>IT</i> en finca La Giganta.....	28
III.	Patrón del consumo eléctrico horario en finca La Giganta.....	29
IV.	Ciclo de vida de un proyecto híbrido fotovoltaico-planta generadora ...	33
V.	Cargas estacionales ingresadas al simulador HOMER	34
VI.	Diseños eléctricos aplicables en finca La Giganta	37
VII.	Emisiones anuales de CO ₂ por tipo de proyecto.....	44
VIII.	Carga eléctrica reducida finca La Giganta	46
IX.	Demanda horaria reducida finca La Giganta	47
X.	Diseño sugerido por el simulador HOMER para carga reducida	48
XI.	Datos comparativos entre sistema actual y propuesta híbrida.....	60
XII.	Correlación entre las variables	61

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AC	Corriente alterna
DC	Corriente continua
kW-h/m²-día	Kilowatts por hora sobre cada metro cuadrado por día
V	Voltios
Wp	Watts solares requeridos por el sistema

GLOSARIO

ASAZGUA	Asociación de azucareros de Guatemala.
CENGICAÑA	Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar.
Central minihidráulica	Una central minihidráulica o mini hidroeléctrica es un tipo especial de central hidroeléctrica, utilizada para la generación de energía eléctrica en pequeña escala, a partir de la energía potencial o cinética del agua.
CNEE	Comisión nacional de energía eléctrica.
Corriente alterna	Corriente eléctrica en la que la magnitud y el sentido varían cíclicamente.
Corriente continua	Flujo continuo de carga eléctrica a través de un conductor entre dos puntos de distinto potencial y carga eléctrica, que no cambia de sentido con el tiempo.
Electrón	Partícula subatómica con una carga eléctrica elemental negativa.
Energía eólica	Fuente de energía renovable que se obtiene de la energía cinética del viento.

Energía fotovoltaica	Fuente de energía renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del sol.
Energía alternativa	Se consideran energías alternativas a todas aquellas que provienen de recursos naturales y de fuentes inagotables.
Fotón	Partícula portadora de todas las formas de radiación electromagnética, incluidos los rayos gama, los rayos X, la luz ultravioleta, y la luz visible.
GEI	Gases de efecto invernadero.
Generador de Combustión Interna	Generador eléctrico accionado por una máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química de un combustible que arde dentro de la cámara de combustión.
Gestor energético	Dispositivo que controla la generación y el despacho de energía en un sistema híbrido.
ICC	Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.
Irradiancia	Potencia de la radiación solar por unidad de área.

<i>IT</i>	Tecnología de la información. Término genérico referido al campo entero de la tecnología informática, incluyendo hardware, software.
MEM	Ministerio de energía y minas.
Radiación solar	Es la energía emitida por el sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas.
Semiconductor	Elemento que se comporta o bien como un conductor o bien como un aislante dependiendo de diversos factores.
TIR	Tasa interna de retorno.
VAC	Voltios en corriente alterna.
VAN	Valor actual neto.
VDC	Voltios en corriente continua.

RESUMEN

La presente investigación tiene como propósito diseñar e implementar un sistema híbrido, fotovoltaico-planta generadora, para energizar las áreas de *IT* en fincas de Ingenio Santa Ana.

El objetivo general fue la evaluación del diseño e implementación de un sistema híbrido, fotovoltaico-planta generadora, para energizar las áreas de *IT* en fincas de Ingenio Santa Ana, que no poseen suministro de energía eléctrica, y dependen de solamente de generadores de combustión interna, para disminuir el consumo de combustible y la contaminación por gases de escape.

Los datos de demanda eléctrica fueron recolectados con apoyo del personal de la sección eléctrica de Ingenio Santa, utilizando un equipo de medición de calidad de energía marca AEMC modelo 8333. La medición se efectuó por un período de 5 días, analizando las 24 horas del día y la recolección de datos de energía fue integrada en períodos de una hora, resultando dimensionales de Watts-hora.

En finca La Giganta se evaluó la implementación de un modelo reducido en demanda eléctrica, se analizó con un simulador computarizado de redes eléctricas, y se instaló el equipo indicado por el simulador, haciendo las pruebas y evaluación de este modelo por un período de dos semanas. El comportamiento del modelo de prueba fue el pronosticado por el simulador, lográndose ahorros por concepto de combustibles y disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero generados por la planta accionada por motor de combustión interna. El cambio de un sistema convencional de generación eléctrica por medio de una

planta generadora de combustión interna a un sistema híbrido con elementos fotovoltaicos presenta grandes ventajas económicas y ambientales para Ingenio Santa Ana y empresas con instalaciones similares.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Contexto general

La necesidad de uso de equipo de computación y comunicaciones en las oficinas de las regiones agrícolas de Ingenio Santa Ana ha crecido a medida que aumenta la necesidad de los administradores de estas regiones de contar con información exacta y actualizada para la toma de decisiones, al punto que, en estos lugares, recientemente se crearon áreas de *IT* con acceso a internet y a los servidores centrales de la empresa, permitiendo a la administración local el uso de correo electrónico, acceso a los sistemas de informáticos de la corporación, traslado de datos de telemetría y servicios de planta telefónica. El horario de uso del equipo informático es continuo, con al menos 12 horas de lunes a sábado, lo que significa que una planta eléctrica permanece encendida en este horario, con el inherente gasto de combustible, generación de gases contaminantes, gases de efecto invernadero (GEI) y ruido.

En las áreas de *IT* de algunas fincas de Ingenio Santa Ana, no se cuenta con el suministro de energía eléctrica, y dependen solamente de generadores de combustión interna. Con la intención de elevar el nivel de confiabilidad del suministro eléctrico, bajar los costos de operación y disminuir emisión de gases de efecto invernadero, se presentan los aspectos generales sobre el diseño de un sistema híbrido, fotovoltaico-Planta generadora, que energice estas áreas de *IT*.

Descripción del problema

Se desconoce cuál es el diseño más eficiente de un sistema híbrido, fotovoltaico-planta generadora, que suministre energía eléctrica a las oficinas de las regiones agrícolas de Ingenio Santa Ana, por lo que se realizó la evaluación de varias opciones y combinaciones de equipo de regulación y carga de baterías, equipo inversor de corriente, y equipo de gestión energética, tratando de definir cuál será la opción que se adapte mejor a las condiciones específicas del lugar y sea la más adecuada costo-beneficio.

El estudio se realizó en el casco de la finca La Giganta ubicada en el departamento de Santa Rosa, y se limitó a analizar el circuito eléctrico que supe a las instalaciones de tecnología de la información (*IT*) en las oficinas administrativas de la región agrícola número 1, situadas en esta ubicación. No se incluyen en el estudio las instalaciones eléctricas del taller mecánico, ni las instalaciones de la estación de despacho de combustible, que si bien, también son consumidores de energía eléctrica suministrada por plantas generadoras, su ciclo de uso no es continuo y solo permanecen encendidas por períodos cortos en el transcurso del día.

Formulación del problema

Pregunta central

¿Cuál es el impacto en el consumo de combustible y contaminación por emisión de gases al implementar un sistema híbrido, fotovoltaico-planta generadora, que energice las áreas de IT en fincas de Ingenio Santa Ana, las cuales no poseen suministro de energía eléctrica, y que dependen de solamente de generadores de combustión interna?

Preguntas auxiliares

¿Cuáles son las alternativas existentes para energizar las áreas de *IT* en fincas de Ingenio Santa Ana, que disminuyan el consumo de combustible y la contaminación por gases de escape?

¿Cuál es la rentabilidad de un sistema híbrido fotovoltaico-planta generadora?

¿Cuáles son los lineamientos generales para el diseño de sistemas para energización de centros de cómputo rurales, independientes de la red eléctrica nacional?

¿Cuál es la huella ecológica al implementar un sistema híbrido fotovoltaico-planta generadora?

OBJETIVOS

General

Evaluar el impacto en la disminución del consumo de combustible y contaminación por emisión de gases mediante la implementación de un sistema híbrido que energice las áreas de *IT* en fincas del ingenio Santa Ana.

Específicos

- Enumerar las diferentes alternativas existentes para energizar las áreas de *IT* en fincas de Ingenio Santa Ana, para disminuir el consumo de combustible y la contaminación por gases de escape.
- Identificar la rentabilidad de un sistema híbrido fotovoltaico-planta generadora en las áreas de *IT* sin suministro eléctrico en fincas de Ingenio Santa Ana.
- Generar los lineamientos para el diseño de sistemas para energización de centros de cómputo rurales, independientes de la red eléctrica nacional.
- Estimar la huella ecológica, la disminución de los gases de efecto invernadero (GEI) producida por los gases de escape al implementar un sistema híbrido fotovoltaico-planta generadora, para energizar las áreas de *IT* en fincas de Ingenio Santa Ana.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

Características del estudio

El enfoque del estudio fue mixto, por las siguientes razones. Cualitativo porque utilizó la revisión documental cuando se investigaron antecedentes del problema y marco teórico relacionado. Cuantitativo porque se utilizó la medición de variables para el control del proceso, la evaluación y la medición del comportamiento del sistema.

El tipo de estudio que se realizó fue experimental, debido a que se manipularon variables para la obtención de los datos necesarios para la realización del proyecto planteado, fue descriptivo porque se contó con la información necesaria que permitió conocer y evaluar el sistema actual y el propuesto, además se presentaron las capacidades técnicas de cada elemento del sistema. A su vez es un estudio longitudinal, porque en el tiempo se efectuaron varias mediciones al mismo sistema y existe una fecha de inicio y una fecha de fin.

El alcance de la investigación fue descriptivo y no solamente una propuesta ya que se implementó una unidad en tamaño reducido con la intención de evaluar su funcionalidad, es decir, un proyecto piloto.

Unidad de análisis

La unidad de análisis fue el área de tecnología de la información (*IT*) en finca La Giganta de Ingenio Santa Ana, en donde no se cuenta con el suministro

de energía eléctrica, y se depende solamente de generadores de combustión interna.

VARIABLES DE INTERÉS

VARIABLE DEPENDIENTE

Suministro de energía eléctrica por medio del sistema híbrido en kW y kWh a los equipos informáticos instalados en el casco de finca La Giganta, Ingenio Santa Ana.

VARIABLES INDEPENDIENTES

Los siguientes eventos se pueden presentar y pueden interrumpir el suministro de energía eléctrica a los equipos informáticos instalados en el casco de finca La Giganta, Ingenio Santa Ana.

- Suministro de combustible. Pueden ocurrir problemas logísticos que afecten el suministro de combustible para la planta eléctrica. Dimensional: combustible disponible o no disponible
- Radiación solar. La radiación solar el área puede verse disminuida por condiciones climáticas sus dimensionales son $W-h/m^2$
- Fallas en los equipos de generación. Pueden presentarse fallas en los equipos de generación fotovoltaica y en la planta generadora de combustión interna. Dimensional: equipo disponible o no disponible.

Tabla I. **Cuadro resumen de las variables**

Tipo de variable	Descripción de la variable	Dimensional
Variable dependiente	Suministro de energía eléctrica por medio del sistema híbrido	kW y kWh
Variables independientes	Suministro de combustible diésel	Disponible/No disponible
	Radiación solar	W-h/m ²
	Fallas en los equipos de generación	Equipo disponible/No disponible

Fuente: elaboración propia.

Fases de la investigación

A continuación, se presentan las fases llevadas a cabo dentro de la investigación.

Fase I: revisión documental

En la fase de revisión documental se consultaron libros de texto, manuales y documentación de equipos, para recolectar información sobre estudios anteriores relacionados con sistema híbrido fotovoltaico-planta generadora.

Fase II: diseño y validación de instrumentos de recolección de información

Los datos de demanda eléctrica por hora en las instalaciones de tecnología de la información (*IT*) en finca La Giganta fueron recolectados con apoyo del personal de la sección eléctrica de Ingenio Santa, utilizando un equipo de medición de calidad de energía marca AEMC modelo 8333. La medición se efectuó por un período de 5 días, analizando las 24 horas del día y la recolección

datos de energía fue integrada en periodos de una hora, resultandos dimensionales de Watts-hora.

Los datos diarios fueron promediados para obtener el aproximado de la demanda diaria. Esta medición fue realizada para el periodo de zafra en el mes de mayo, y para el periodo de reparación en el mes de junio.

Figura 1. **Medidor de calidad de energía AEMC**



Fuente: [Fotografía de Roberto Gonzalez]. (Escuintla. 2021). Colección particular. Guatemala

Fase III: trabajo de campo

Se realizó un estudio completo de las cargas que se generan día con día en la sección de *IT* de las instalaciones situadas en el casco de la finca La Giganta, situación por la cual se revisaron los equipos que están en uso diario para determinar eficientemente las cargas, esto implica revisar computadoras, impresoras, proyectores, equipo de comunicaciones y radio transmisión.

Con la finalidad de poder diseñar un sistema fotovoltaico más exacto se tomaron en cuenta los siguientes pasos:

- Analizar las cargas eléctricas que se desean abastecer mediante el sistema híbrido fotovoltaico, monitoreando los equipos por hora o tiempo de trabajo.

- Determinar la energía consumida diariamente, tomando en cuenta los días de autonomía del sistema y horas de generación con planta eléctrica.
- Analizar la ubicación geográfica del lugar, como primera aproximación se colocan los módulos con un ángulo de inclinación 15° , esto debido a la latitud del sitio.
- Realizar un estudio sobre la radiación solar presente en el área donde se ubicó el sistema híbrido fotovoltaico.
- Realización del cálculo de cantidad y dimensión de paneles necesarios para el abastecimiento, capacidades del inversor, y el controlador de carga, así como la capacidad y cantidad de baterías. Considerando los datos anteriormente mencionados, así como la posibilidad que el sistema deba abastecer algún elemento por las noches, ya que durante este tiempo no hay presencia de sol que suministre energía eléctrica, ni personal que supervise el arranque de la planta eléctrica.

Fase IV: redacción del informe final

Después de analizar los documentos de apoyo para el estudio y la fase de campo con información ordenada y analizada se redactó el informe final con sus respectivas conclusiones y recomendaciones de acuerdo con los logros y limitaciones del estudio.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio es una innovación porque propone un modelo mejorado para abastecer de energía eléctrica a las áreas de tecnología de la información (IT) de las fincas del Ingenio Santa Ana, que no están conectadas a la red y cuyo suministro eléctrico se basa en plantas generadoras que utilizan combustibles fósiles.

Las plantas eléctricas accionadas por combustibles fósiles generan gases de escape, los cuales en general son contaminantes atmosféricos.

Al usar el sistema híbrido solar-diésel, más técnicamente llamado fotovoltaico-diésel se obtiene un ahorro en combustibles y una disminución en la contaminación por gases de escape además de disminuir anualmente un consumo de 6161 galones de combustible diésel, y dejar de emitir a la atmosfera 62.71 toneladas métricas de CO₂, principal gas de efecto invernadero generado por los motores de combustión interna.

El aporte principal de esta investigación es el impacto en la disminución de combustible y contaminación por emisión de gases mediante la implementación de un sistema híbrido, fotovoltaico-planta generadora, para energizar las áreas de IT en fincas de Ingenio Santa Ana. Con fines de evaluación e implementó un estudio piloto en finca La Giganta por un período de 15 días. Este fue un modelo reducido del proyecto de implementación de un sistema híbrido fotovoltaico-planta generadora. Para este efecto se redujo la demanda eléctrica a un 38 %, pudiéndose comprobar que durante los trece días hábiles en los que funcionó el sistema, disminuyeron las horas de operación de la planta eléctrica en un 94 %,

transmitiendo ese mismo porcentaje en la reducción del combustible consumido y gases de efecto invernadero emitidos a la atmosfera. Este modelo viene a proponer una mejora tanto en lo económico y lo ambiental a la gestión energética de estos centros de información, al disminuir los costos asociados al consumo de combustibles, y consecuentemente, esta disminución en el consumo de combustibles conlleva a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmosfera, lográndose esto con la introducción de tecnologías, modernas y amigables con el medioambiente, como la energía solar fotovoltaica.

Las fases de investigación llevadas a cabo fueron la revisión documental; diseño y validación de instrumentos de recolección de información; trabajo de campo donde se realizó un estudio completo de las cargas que se generan día con día en la sección de *IT* de las instalaciones situadas en el casco de la finca La Giganta.

En el informe final de la investigación se estructuro en tres capítulos. El primero se refiere al marco teórico donde se describen los aspectos que tienen relación con el sistema híbrido, energías renovables, paneles solares enfocado en fotovoltaico-planta generadora.

En el segundo capítulo se exponen los resultados obtenidos del diseño e implementación de este sistema como una mejora tanto en lo económico y lo ambiental a la gestión energética de estos centros de información,

En el tercer capítulo se presenta la discusión de resultados con el análisis interno y externo del estudio relacionando diferentes autores. De acuerdo con los objetivos propuestos se presentan las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

1. MARCO REFERENCIAL

En 1839, el físico francés Edmundo Becquerel fue el primero en constatar el efecto fotoeléctrico. Más tarde, Willoughby Smith en 1873 y Lenard en 1900 verifican su existencia bajo diferentes condiciones. En 1921 Albert Einstein gana el Premio Nobel de Física gracias a un trabajo en el que se describe la naturaleza de la luz y el efecto fotoeléctrico y en el cual está basada la tecnología fotovoltaica. En 1920 el físico norteamericano Millikan corroboró totalmente la teoría de Einstein. Sin embargo, fue en 1954 cuando se construye el primer módulo fotovoltaico en los Laboratorios Bell y es tratado como un experimento científico ya que su coste era demasiado elevado para su utilización a gran escala. (Gálviz y Gutiérrez, 2013, p. 29)

A nivel mundial, la energía solar fotovoltaica se destaca por abastecer sistemas eléctricos cotidianos en países europeos con gran éxito, y de los cuales dependen debido a que no cuentan con reservas petroleras.

Alemania es el país emblemático con respecto a este tema, ya que sus iniciativas vienen financiándose por el gobierno alemán desde 1991. Ya cerca del año 2000 se inició la cuarta fase del programa “100.000 Tejados Solares”, que buscó incentivar el mercado de los paneles solares a base de créditos a bajo interés. Ese mismo año se agregó la Ley de Energías Renovables al país. Estos sistemas son aplicados en edificaciones de cualquier tamaño, del tipo administrativo y residencial, o de local comercial, son bastante populares en Europa, y atractivos arquitectónicamente. (Gálviz y Gutiérrez, 2013, p. 30)

En Guatemala se han realizado diversos estudios e investigaciones relacionados con el uso de energía solar como fuente generadora, los que dan a conocer que desde hace algún tiempo hay inquietud de desarrollar proyectos relacionados con la energía fotovoltaica y entre los que, por mencionar algunos, se cita el diseño de un sistema solar fotovoltaico aislado, para el suministro de energía eléctrica a la comunidad rural Buena Vista, San Marcos y la aplicación de la energía solar en las aldeas de Huite, Zacapa, como modelo de sistema energético descentralizado basado en tecnología fotovoltaica para electrificación de poblaciones rurales aisladas.

El Ministerio de Energía y Minas consciente de la problemática energética del país, lanzó un plan piloto de iluminación exterior en las instalaciones del mismo ministerio, reutilizando paneles solares, con la finalidad de demostrar y promover las energías renovables limpias. Hoy existe un mercado abierto para la implementación de sistemas de energía renovable, estimulados con incentivos de orden fiscal y legal.

La generación distribuida posee diversas aplicaciones y ventajas, dentro de las cuales se tiene; ventajas técnicas, económicas y ambientales, derivado que esta puede satisfacer significativamente la demanda energética, mediante el uso y aprovechamiento de la energía renovable y tecnologías de ahorro (Tecnalia, 2007). La generación distribuida renovable se enfoca en el uso integrado de pequeñas fuentes de energía con pequeñas unidades de generación, unidades ubicadas en el interior de las instalaciones del usuario o directamente conectadas al circuito de distribución según sea la necesidad del propietario. Ya que las fuentes necesitan ser conectadas a las redes de distribución, trabajar en isla o conectarse al punto más cercano de su generación, el sistema eléctrico convencional ha cambiado sus características en lo concerniente a la estructura y aprovechamiento operacional (Tecnalia, 2007).

El Ministerio de Energía y Minas (MEM) y su ente técnico la Comisión nacional de energía eléctrica (CNEE), son los encargados de emitir la normativa técnica, que define las acciones para promover el crecimiento de la generación distribuida con energías renovables.

La red de estaciones meteorológicas del ICC cuenta con 30 estaciones automáticas localizadas en la vertiente del Pacífico de Guatemala y 3 en El Salvador, las cuales generan información de precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar, humedad de la hoja, velocidad y dirección del viento cada 15 minutos, que para la presente investigación aportó datos de utilidad para el cálculo de producción de energía fotovoltaica (ICC, 2021).

Guatemala se encuentra en un lugar estratégico para la generación utilizando energía solar fotovoltaica, debido a su posicionamiento geográfico, el valor promedio de radiación solar global para todo el país de 5.3 kWh/m² al día, es mucho más alto que el de muchos de los países que cuentan con programas exitosos de aprovechamiento de la energía solar.

El recurso solar es abundante en el país y la generación eléctrica por medio de recurso solar fotovoltaico ha ido creciendo desde que se instaló la primera planta fotovoltaica en comercial en el año 2015 (Ministerio de Energía y Minas [MEM], 2015).

Con base en estos estudios previos y en el exitoso desarrollo de varios proyectos que involucran energías fotovoltaicas, como el de la comunidad rural Buena Vista, San Marcos, se inició la presente investigación tomando como referencia estos modelos ya en funcionamiento.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Industria azucarera en Guatemala

La industria del azúcar de Guatemala tiene sus inicios en el siglo XVII, la caña de azúcar se comenzó a cultivar en Guatemala en el año de 1,536, los trapiches que inicialmente se construyeron en Guatemala, fueron construidos en el valle central de esta ciudad y a la vez en el departamento de Baja Verapaz, durante el siglo XVI. En el siglo XVII se dio un incremento en el número de trapiches, pero a mediados del siglo XIX, Guatemala comenzó a exportar una pequeña cantidad de azúcar (CENGICAÑA, 2012).

En 1957 fue fundada la asociación de azucareros de Guatemala (AZASGUA), con el fin de resolver problemas en la elaboración de azúcar y desarrollar programas para fomentar la mejora, tecnificar y hacer eficiente la industria azucarera del país. En 1960 Guatemala obtiene su primera asignación para exportar azúcar hacia Estados Unidos, fue de esa manera como la industria del azúcar de Guatemala cambió de ser una industria de comercialización local, convirtiéndose en una industria de exportación y pasó a formar parte de las actividades agrícolas industrializadas más importantes para el país (CENGICAÑA, 2012).

La industria azucarera de Guatemala es una de las más productivas en la región, en los inicios de la ampliación del subsector eléctrico y apertura de sus puertas a la inversión privada, estos fueron parte de los pioneros a participar y aportar en el crecimiento y abastecimiento de energía eléctrica al sistema

nacional interconectado, debido a que estos contaban con infraestructura y recursos para su explotación como parte de su proceso productivo.

“La Agroindustria Azucarera Guatemalteca ha venido creciendo permanentemente desde 1960 hasta llegar a ubicar a Guatemala como el quinto país exportador de azúcar a nivel mundial, el segundo en Latinoamérica” (CENGICAÑA, 2012, p. IX).

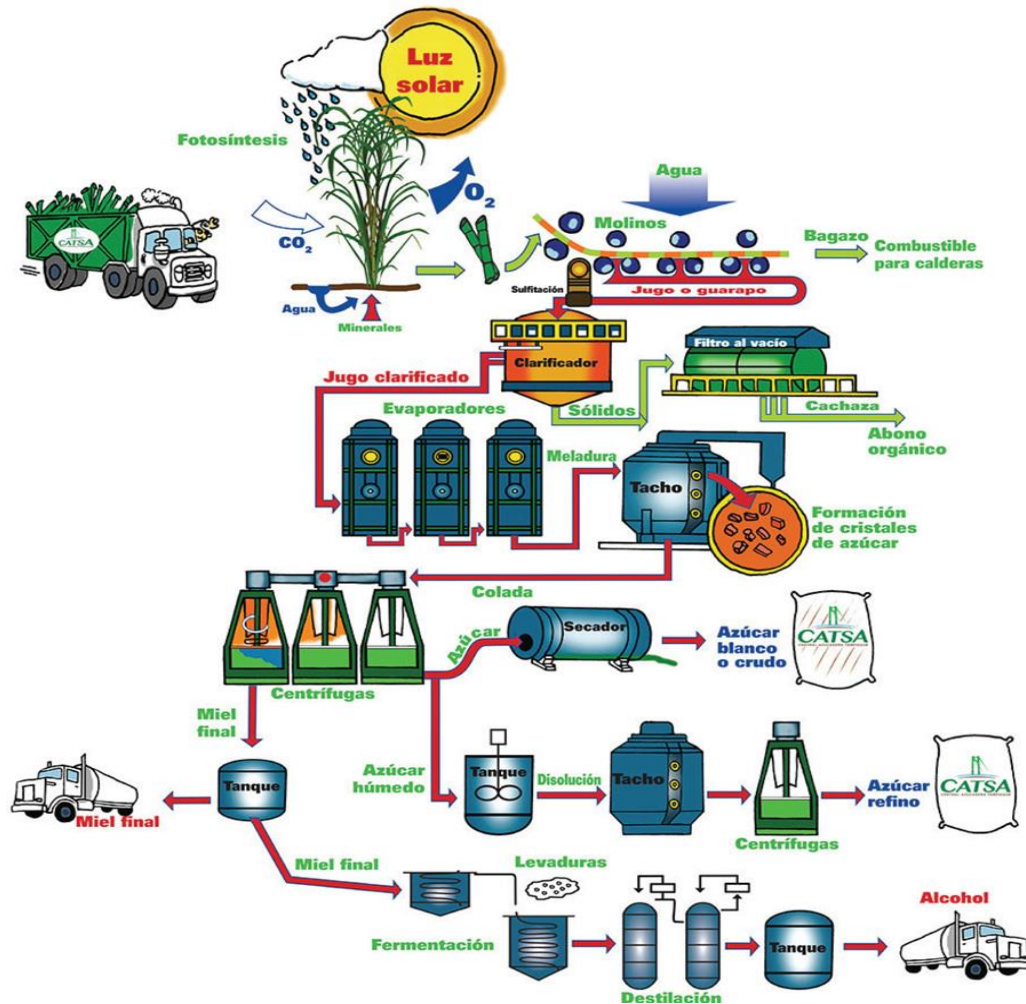
Ingenio Santa Ana constituye un complejo agroindustrial que produce una diversidad de productos que son reconocidos a nivel mundial por sus altos estándares de calidad. Ingenio Santa Ana se dedica a la producción de caña de azúcar, elaboración de azúcar y generación de energía eléctrica. También comercializa subproductos como la melaza, bagazo y cachaza y diversos productos y servicios conexos. Ingenio Santa Ana contribuye con el desarrollo de Guatemala, produciendo cerca de 6.5 millones de quintales de azúcar por año y con capacidad de generación de 128 MW de energía eléctrica. Parte de esta energía eléctrica se vende al Sistema Nacional Interconectado (Gonzalez, 2007).

2.1.1. Proceso de producción de azúcar

La producción de azúcar da inicio en los trabajos para la preparación del suelo, luego realizar la siembra y posteriormente el corte de la caña, es en esta etapa bajo las condiciones climatológicas, cantidad y tipo de nutrientes en el suelo y las atenciones o cuidados que se den al cultivo, se verán reflejados en la calidad de la caña y la cantidad de azúcar contenida en la caña. En Guatemala, la época de cosecha de la caña (Zafra) comprende del mes de noviembre de cada año, hasta el mes de mayo del año siguiente aproximadamente, durante el período de zafra se desarrolla el proceso de la extracción y transformación de la sacarosa o comúnmente llamada azúcar de la caña.

El proceso de extracción y recuperación del azúcar dentro de las instalaciones del ingenio, inicia con la recepción de la caña en grandes contenedores metálicos acondicionados para su transporte, seguro y eficiente, conocidos como jaulas, haciéndola pasar por básculas donde se pesa para poder cuantificar la cantidad de caña recibida en un período determinado y así medir el ritmo de molienda diaria, que es uno de los indicadores principales que se manejan dentro de la industria azucarera nacional, con esto poder determinar la capacidad del proceso de cada ingenio y a su vez determinar el tamaño o capacidad de producción. Se describe el proceso de fabricación de azúcar como comúnmente se conoce, al proceso industrial de elaboración de azúcar en 8 grandes etapas principales, como se ilustra en la siguiente figura.

Figura 2. Proceso de producción de azúcar



Fuente: CATSA. (2020) *Proceso del azúcar*. Consultado el 5 de junio de 2021. Recuperado de <https://www.catsa.net/>

A continuación, se resume el proceso observado en la figura anterior

- Recepción de caña
- Lavado de caña (limpieza de materiales extraños)
- Preparación de caña (picado y/o desfibrado)
- Extracción (molinos)
- Clarificación de jugo

- Evaporación
- Cristalización (Concentración de sacarosa y formación de cristal de azúcar)
- Centrifugado (separación del cristal de azúcar de las mieles)

Cada una de las etapas listada anteriormente lleva una serie de procedimientos complejos, los cuales implican, cálculos y diseños de ingeniería.

2.1.1.1. Subproductos del proceso

Los subproductos que se obtienen del proceso de la fabricación de azúcar son diversos. Estos subproductos debido a los avances tecnológicos y estudios realizados por parte de la industria azucarera a nivel mundial se han sabido aprovechar, optimizando de esta manera los recursos y disminuyendo los efectos adversos al medio ambiente.

Desde la utilización y aprovechamiento del bagazo de la caña, producto del proceso de molienda y extracción, este subproducto tiene una cantidad de energía calorífica que es usada como combustible en calderas para la generación de vapor, donde este es aprovechado para la producción de electricidad, evaporadores y cristalizadores, (Chen, García, y Álvarez, 1991).

El producto conocido como cachaza para producir compost, para la fertilización del suelo y la cogeneración para el abastecimiento de los procesos de la fábrica. Los subproductos se listan a continuación:

- Bagazo de caña (biomasa)
- Cachaza
- Miel final
- Vapor de agua

- Energía eléctrica
- Alcohol
- Gas metano

2.2. La energía eléctrica como recurso del proceso productivo de azúcar

Como toda industria, la agroindustria en especial los ingenios utilizan energía eléctrica en grandes proporciones.

En esta época la electricidad se ha convertido en los países desarrollados en una forma imprescindible de energía y con una gran cantidad de usos, aplicaciones y beneficios, debido a su gran control y limpieza en el sitio de consumo. En el ambiente residencial se emplea para proveer servicios, desde los básicos hasta a los asociados al ocio y a un sinnúmero de comodidades. El uso de la energía eléctrica está extendido en los ámbitos comercial e industrial; alumbrado, climatización, máquinas eléctricas con muchas aplicaciones en industrias. (Abur, *et al.*, 2002).

Para los ingenios azucareros en Guatemala, la electrificación ha sido uno de los avances tecnológicos importantes que se ha tenido, debido al uso de grandes cantidades de energía que se necesitan para su proceso, en su aplicación como fuerza motriz, para los movimientos y transmisión de potencia a los equipos con que se procesa la caña.

Dependiendo del nivel de electrificación que se haya alcanzado en los procesos, este puede rondar los 26 kW-h/TC (26 kilowatts*hora por cada tonelada de caña procesada). Para un ingenio con un ritmo de molienda de 775 toneladas de caña en una hora se puede calcular la alta demanda energía de

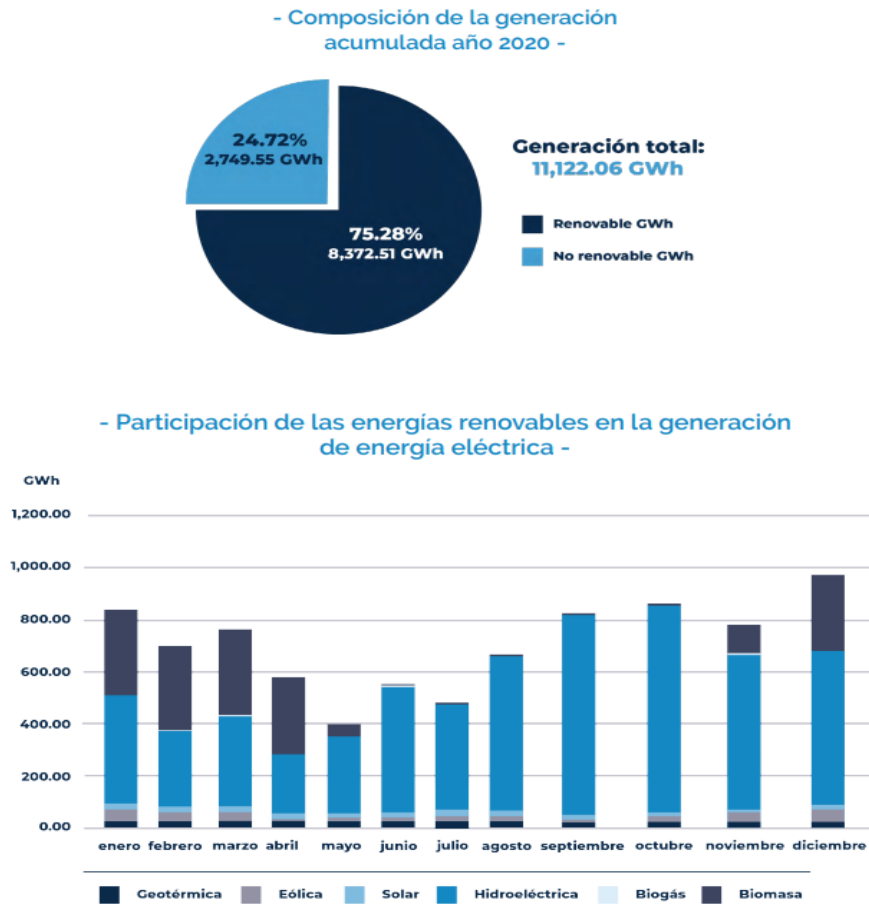
este ingenio (26 kW-h/TC) * (775 TC) = 20,150kW-h, siendo esto 20.150MW-h consumida. Los datos operados muestran un estimado para un ingenio con un ritmo de 18,600 toneladas de caña molida diariamente.

2.3. Tipos de generación de energía eléctrica en Guatemala

Guatemala cuenta con una matriz diversa de generación eléctrica, está principalmente constituida con más del 60 % de generación hidráulica.

La matriz eléctrica en Guatemala se denomina hidro-térmica, debido que la generación para abastecer la demanda está compuesta principalmente por energía hidráulica como generación base, alcanzando hasta un 65 %, y generación térmica con una participación aproximadamente de un 30 %, además cuenta con energías renovables variables como la fotovoltaica y eólica, ambas tecnologías nuevas en la matriz de generación (Ministerio de Energía y Minas [MEM], 2017).

Figura 3. **Matriz energética de Guatemala**



Fuente: MEM. (2021) *Composición de la generación acumulada año 2020*. Consultado el 4 de febrero de 2022. Recuperado de <https://mem.gob.gt/wp-content/uploads/2021/02/Informe-MEM-2020.pdf>

2.4. Energías renovables

Se les reconoce como energías renovables a las fuentes de energía primaria que se consideran inagotables, o que su recuperación o regeneración se da en un período muy corto de tal manera que mantiene un abastecimiento continuo.

En Guatemala se reconocen como tecnologías con recursos renovables a aquellas que utilizan la energía geotérmica, biomasa, solar, eólica, entre otras que el Ministerio de Energía y Minas determine (Ministerio de Energía y Minas, 2018).

2.5. Sistemas híbridos de generación eléctrica

Según Alarcón (2015), sistema híbrido es aquel que combina en una instalación varias fuentes energéticas, conectadas a una mini-red de distribución. Están compuestos por fuentes renovables y generación fósil, un sistema de control, y pueden incluir baterías para acumular la energía producida.

A continuación, se explica el funcionamiento de un sistema híbrido diésel-fotovoltaico. El sistema híbrido que se evalúa está compuesto por una planta diésel, un sistema fotovoltaico, un regulador de carga, un inversor, un arreglo de baterías, un gestor de energía y las cargas del sistema. Seguidamente se describe la función de los componentes del sistema híbrido, en la que se explica la función de cada uno de estos.

2.6. Paneles fotovoltaicos

La conversión de la energía solar a energía eléctrica es un fenómeno llamado efecto fotovoltaico. Consiste en el cambio de luz solar a electricidad, a través de un dispositivo llamado celda solar, que funciona de la manera siguiente:

Cuando la luz incide sobre ciertos materiales semiconductores, los fotones que lo forman transfieren su energía a los electrones de la capa de valencia de este material, rompiendo así el enlace que los mantiene unidos a sus respectivos

átomos. Por cada enlace perdido se libera una partícula negativa (e^-) para moverse dentro del sólido.

La ausencia de un electrón en un enlace roto, se llama agujero (hueco), y puede desplazarse en forma libre por la parte interior del sólido, transfiriéndose entre átomos debido al movimiento del resto los electrones(e^-) de enlace. Los agujeros se comportan como partículas con carga + similar a la del electrón(e^-).

El desplazamiento de los agujeros y electrones en direcciones contrarias genera una corriente en el semiconductor con la capacidad de circular por un circuito y liberar la energía aportada por los fotones al generarse los pares electrón-agujero. A fin de separar los electrones de los agujeros e impedir que restauren el enlace, se aplica un campo eléctrico, o su consecuente diferencia de potencial, que hace que estos dos circulen en direcciones contrarias, generando así una corriente en la dirección del campo eléctrico.

En las células solares este campo eléctrico se obtiene en la unión de dos regiones de un semiconductor, con distinto tipo de conductividad. Si el material semiconductor fuera silicio (Si), una de las regiones, ha sido dopada (llamada tipo N), con fósforo (P), que tiene cinco electrones en la capa de valencia, o sea uno más que el silicio (Si), y es una región con una concentración de electrones mayor que la de agujeros.

La otra región, llamada tipo P, ha sido dopada con Boro (B), que tiene tres electrones en la capa de valencia, o sea uno menos que el Silicio (Si), y es una región con un número mayor agujeros que la de electrones. La gran concentración de electrones y agujeros entre estas dos regiones crean, para permanecer ligadas, un campo eléctrico con dirección de la región N a región P, que es la responsable, de separar los electrones y agujeros extras que son producidos cuando a la célula llega luz incidente.

La mayoría de las celdas disponibles están constituidas por una unión N-P como la anteriormente explicada. En las celdas solares fabricadas de Silicio (Si), que son las más comunes, la unión se obtiene con la difusión de una capa de Fósforo(P) en una base de Silicio (Si) que originalmente está impurificada con Boro(B).

La unión eléctrica sobre el lado iluminado, que será el lado difundido, habrá de fabricarse de forma tal que se deje descubierta la mayor parte de su superficie, con el fin que la luz penetre en el semiconductor, y proporcione, simultáneamente, una baja resistencia eléctrica. La solución casi siempre adoptada se basa en instalar contactos en forma de peine. Contrariamente, la unión eléctrica sobre la cara sin iluminación cubre la totalidad del área.

Es habitual que se cubra también el lado iluminado con una capa no reflectante, para maximizar el porcentaje de radiación solar absorbida.

2.6.1. Tipos de células solares

Comercialmente, existen tres tipos de celdas solares dependiendo del tipo de Silicio (Si) utilizado, pueden ser, policristalino, monocristalino, y amorfo.

Las células de silicio monocristalino(M-Si). Están construidas a partir de un único cristal de Silicio (Si) con estructura muy uniforme. Garantizan un mayor rendimiento comparadas con el resto de las tecnologías debido a que los átomos de Silicio (Si) están totalmente alineados facilitando de esta forma la conductividad.

Las celdas solares de Silicio (Si) policristalino (P-Si), están formadas por muchos cristales de silicio. Son más económicas, pero tienen un rendimiento marcadamente inferior.

Las celdas solares amorfas o de lámina fina son también llamadas celdas solares de segunda generación. La gran ventaja de estas celdas consiste en que necesitan muy pocos materiales para su fabricación.

Los materiales de lámina fina tienen la capacidad de absorber con mucha más eficiencia los fotones (con coeficientes de absorción mayores a 100 veces en comparación con las células (M-Si) o (P-Si). Por lo tanto, es suficiente un espesor de 9 micras comparado con las 200 micras de espesor requeridas para las células monocristalinas o policristalinas.

2.6.2. El módulo fotovoltaico

El módulo fotovoltaico genera los niveles de corriente y voltaje y correctos para cada uso, protege a las celdas ante los daños causados por la exposición a la intemperie, las aísla eléctricamente del exterior y confiere fuerza mecánica al conjunto.

La vida de un módulo fotovoltaico, en condiciones de operación normales, debe ser mayor a veinte años y lo determina la duración de la cobertura exterior que tiene que ser impermeable y resistente a abrasión y al daño térmico.

A través de soldadura las células se conectan entre ellas. El material utilizado es una aleación plata-estaño o plomo-estaño. Este es un procedimiento muy delicado ya que una sobre presión en los contactos o un calor en exceso pueden producir algún daño en las celdas. Para aumentar el voltaje, las celdas

se conectan en serie. El voltaje de circuito abierto de una celda es de hasta 600mV bajo condiciones de sol. Se hace necesario conectar en un circuito serie entre 30 y 36 celdas para obtener voltajes del orden de los 20 voltios, sin embargo, se establece un voltaje por módulo de 12 V. El exceso de voltaje es necesario para compensar las pérdidas entre terminales del panel causadas por el aumento de la temperatura al estar expuestas estas a la radiación solar y la caída de tensión en las cargas y conductores.

2.6.2.1. Partes de un módulo fotovoltaico

Las partes de un módulo fotovoltaico son las siguientes:

Marco de aluminio: las secciones de aluminio se diseñan para ser extremadamente rígidas, ligeras y con la capacidad de soportar esfuerzos y cargas de viento fuertes. Juegan un papel importante al proteger el borde de la sección laminada en donde se alojan las celdas y proporcionar una estructura rígida para montar el panel solar en su lugar.

Vidrio templado: debe maximizar la transmisión de energía solar. Tiene alta resistencia mecánica y alta transmisividad debido a su bajo contenido de hierro.

Encapsulante: frecuentemente es de silicón o de EVA (*etilen-vinil-acetato*). Es esencial que no quede disminuido en su transparencia por la prolongada exposición a la radiación del sol, buscándose también un índice refractario similar al del cristal protector para mantener sin alteración las condiciones de la radiación incidente.

Celdas solares: las celdas fotovoltaicas de Silicio (Si) convierten la luz solar que incide directamente en corriente continua.

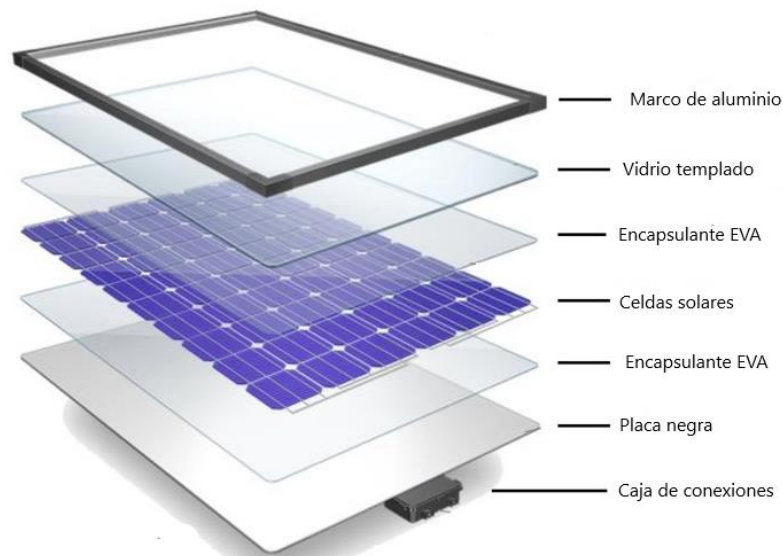
Placa negra: importante para dar protección y rigidez contra las agresiones atmosféricas. Comúnmente se utilizan láminas constituidas por varias capas de materiales, de características diversas.

Cableado y bornes de conexión: comunes en los sistemas eléctricos, deben ser resguardados de la intemperie a través de cajas herméticas.

Diodo de protección: protege al módulo contra sobre tensiones y otras alteraciones de funcionamiento.

En la siguiente figura se pueden observar las partes de un módulo fotovoltaico:

Figura 4. **Partes de un módulo fotovoltaico**



Fuente: Chacón, S (2019). *Construcción de paneles solares*. Consultado el 5 de 7 de 2021.

Recuperado de <https://solar.eyr.mx/construccion-de-paneles-solares/>

2.6.2.2. Generador diésel

Un generador diésel tiene como función transformar la energía mecánica en electricidad, es el componente base del sistema, y es indispensable que esté siempre disponible. Proporcionará la electricidad que la instalación fotovoltaica sea incapaz de producir debido a poca radiación solar, por uso nocturno o condiciones climáticas. Por esto, se tendrá especial cuidado con el generador diésel, tratando que su resguardo físico sea el recomendado por el fabricante y que su funcionamiento sea con carga óptima. La mayoría de las fábricas de generadores diésel sugieren un nivel mínimo de carga cercano al 30 %. Por sobre este nivel el generador opera en un estado óptimo, mientras que por debajo de este nivel no es recomendado que funcione durante periodos largos de tiempo, ya que la vida útil del generador se reducirá. Uno de los objetivos del sistema será alternar las dos clases de generación, tratando que el generador diésel trabaje siempre sobre ese 30 % de carga.

2.6.2.3. Inversor

Un inversor es un aparato electrónico formado por un conjunto de dispositivos semiconductores que tiene como fin generar corriente alterna a partir de una fuente de corriente continua.

Existen dos clases de inversores que pueden ser utilizados en un sistema híbrido: inversores fotovoltaicos e inversores aislados. La diferencia principal entre las dos clases es que el inversor fotovoltaico solamente convierte la corriente continua proporcionada por los paneles en corriente alterna que pueda ser consumida por las cargas, en cambio, el inversor aislado soporta la gestión del banco de baterías. En este caso de estudio, el inversor que se utilizará es del tipo, aislado ya que en el sistema propuesto se utilizará un banco de baterías.

2.6.2.4. Gestor energético

El gestor de energía o gestor energético es el centro del sistema, es el componente que controla la generación y el despacho de energía, encargándose que el inversor trabaje a su máxima potencia, aprovechando así la energía solar y que el generador diésel opere con carga óptima. Estas son las funciones de un gestor energético, pero en realidad realiza muchas otras a nivel de protección de equipos, y monitoreo de todo el sistema por parte del usuario.

2.6.2.5. Regulador de carga

Un regulador de carga tiene como objetivo principal proteger a las baterías frente a cargas o descargas profundas. Controla todo el tiempo el nivel de carga de las baterías y el nivel de descarga, aumentando en muchas horas tiempo de vida de estas.

Al funcionar con sistemas solares, los reguladores permiten abrir o cerrar el circuito de paneles solares a las baterías, sin que éstas sufran daño alguno. Cuando las baterías de ciclo profundo llegan a su nivel total de carga, el regulador, restringe de manera gradual, el paso de la energía generada por los paneles solares.

De un regulador de carga, las características importantes son: voltaje nominal (12, 24 o 48 VDC), corriente máxima, voltaje de corte por sobre descarga o por sobre carga.

2.6.2.6. Baterías electroquímicas de ciclo profundo

Las baterías electroquímicas tienen un papel muy importante cuando forman parte de sistemas aislados. Las baterías almacenan la energía eléctrica en forma electroquímica, y luego ceden esta energía a una carga eléctrica cuando sea requerida.

El tiempo que tarda una batería en llegar a su descarga mínima para luego cargarse hasta el máximo de su capacidad se conoce como "ciclo". Las baterías utilizadas en sistemas fotovoltaicos se conocen como baterías de ciclo profundo porque están fabricadas para resistir ciclos de descarga de hasta un 80 % de su capacidad total sin sufrir daño.

Existen diferentes clases de baterías electroquímicas. Las más conocidas son de plomo+ácido, iones de litio (Li-ion), níquel+cadmio (Ni-Cd) y las de hidruro de metal de níquel (Ni-MH). Las baterías de ciclo profundo más utilizadas corresponden a las del tipo plomo+ácido, puesto que son fáciles de mantener y se adaptan de manera excelente a sistemas híbridos aislados de la red eléctrica.

Las baterías electroquímicas poseen una vida útil cercana a los 2000 ciclos de carga-descarga. Las causas que determinan la vida útil de una batería son: condiciones de uso, mantenimientos realizados, y la más importante, la profundidad de descarga a que haya sido sometida a lo largo del tiempo.

A continuación, se mencionan un grupo de parámetros que permiten definir una batería y sus características:

Tensión de carga: es la tensión para superar la resistencia de la batería a ser cargada.

Capacidad nominal (Ah): corresponde a la cantidad de energía que se obtiene al realizar una descarga total de una batería totalmente cargada

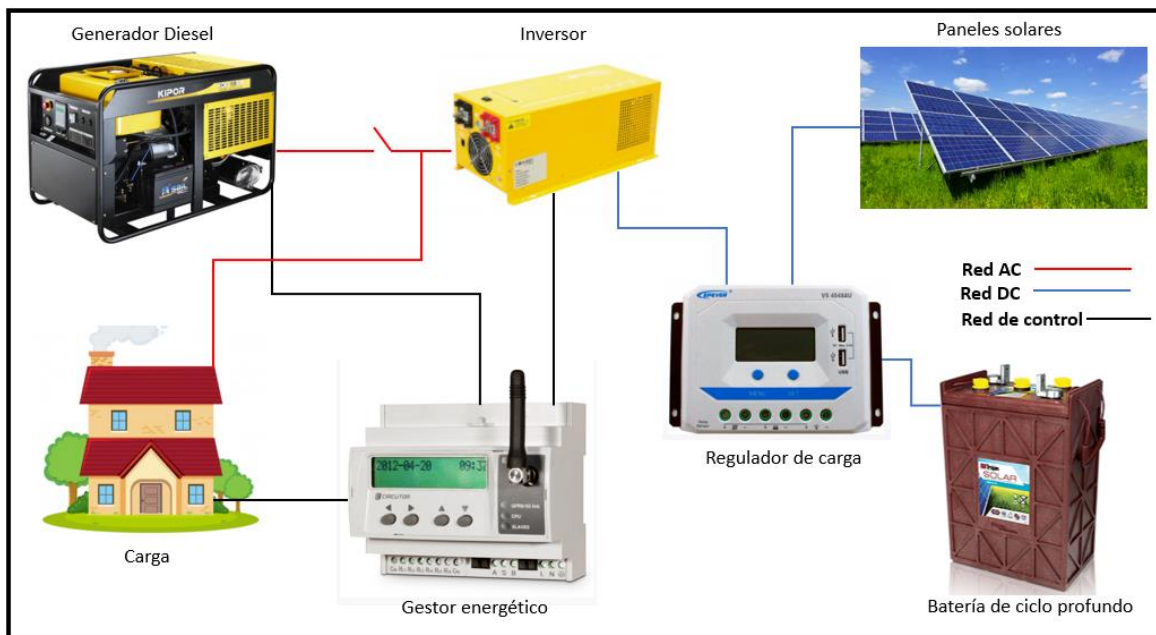
Profundidad de descarga (DOD): es el porcentaje de energía eléctrica utilizada [0] tomando en cuenta la capacidad total de la batería

Estado de carga (SOC): es el porcentaje de energía acumulada tomando en cuenta capacidad total de la batería. (0 %: descargada; 100 %: con carga total).

Eficiencia global: corresponde a la relación entre la energía que absorbe en el proceso de carga y la energía que entrega la batería en la descarga.

En la siguiente figura se observa el esquema de un sistema híbrido diésel-fotovoltaico.

Figura 5. **Esquema de un sistema híbrido diésel-fotovoltaico**



Fuente: elaboración propia.

2.7. Demanda eléctrica

Se entiende por demanda eléctrica la cantidad de electricidad que una serie de consumidores necesitan para abastecer sus necesidades. Por tanto, la demanda de un área de *IT* de una finca de Ingenio Santa Ana es el resultado de la suma de toda la electricidad necesaria para dar suministro a todos equipos eléctricos utilizados en esta área (Twenergy, 2019).

2.8. Demanda horaria

La demanda eléctrica horaria de un sistema es la potencia eléctrica, relativa a un de tiempo específico, que absorbe una carga para funcionar. Ese tiempo se conoce como intervalo de demanda.

Los intervalos de demanda son típicamente de 15, 30 o 60 minutos. El intervalo de 60 minutos permite construir patrones de carga diarios para el análisis de consumo de energía, determinar el rendimiento de dispositivos, y también para elaborar un completo plan de expansión del sistema de distribución de energía eléctrica (Alvarado, 2017).

2.9. Combustibles fósiles

Los combustibles fósiles son fuentes de energía no renovable, su uso es finito, por lo que están amenazadas permanentemente por el riesgo de desaparición si se produce una sobreexplotación continuada. Se les llama así porque provienen de depósitos de organismos fósiles que en el pasado estuvieron vivos. debido a un proceso que se extienden durante muchos siglos, se forma el combustible fósil a través de las uniones que se producen entre el carbono(C) y el hidrógeno(H) a partir de la descomposición de la materia

orgánica, es decir, de todos aquellos restos de animales o plantas que después de morir se han ido transformando por la acción de la propia naturaleza. Según las Naciones Unidas, comprenden el 80 % de la demanda actual de energía primaria a nivel mundial.

2.9.1. Los tipos de combustibles fósiles

Carbón, petróleo y gas natural son los más conocidos. El carbón es probablemente el combustible fósil más abundante, se estima que, al ritmo actual de la demanda, el planeta todavía posee reservas para, al menos, los próximos 2 siglos.

El petróleo, se extrae en plataformas de perforación, transformándose mediante refinación. Es de decir, que es una mezcla de hidrocarburos desde el más sencillo como el metano, hasta clases muy complejas con cuarenta átomos de carbono(C) en su estructura, pero se tiene que transformar por medio de un proceso de destilación para ser útil.

La problemática radica en que tanto su extracción como su uso provocan elevados niveles de contaminación. El petróleo es más frecuentemente utilizado como combustible doméstico e industrial, carburante para motores, lubricantes, y como materia prima básica en petroquímica. Es responsable de cerca del 60% de los productos químicos de esta industria, tales como plásticos, explosivos, solventes y fertilizantes por poner algunos ejemplos.

Según BBVA (2020) la combustión de este tipo de combustibles genera emisiones de gases tales como dióxido de carbono, monóxido de carbono y otros gases que han contribuido y aún contribuyen a generar y potenciar el efecto invernadero, la lluvia ácida, la contaminación del aire, suelo y agua. Los efectos

contaminantes no sólo están vinculados a su combustión sino también al transporte y a los subproductos que originan (hidrocarburos y derivados tóxicos). La situación complica cuando se considera la creciente demanda de energía, bienes y servicios, debido al incremento de la población mundial y los hábitos de consumo.

2.10. Efecto invernadero

Los gases en mayor concentración encontrados en la atmósfera, oxígeno y nitrógeno no actúan mayormente sobre el clima. Si estos gases fueran los únicos componentes de la atmósfera, la tierra sería totalmente inhóspita debido a que el promedio de su temperatura sobre la superficie sería aproximadamente -18 grados centígrados.

Algunos gases presentes en cantidades minoritarias actúan en forma tal que permiten que la radiación del sol penetre hasta la superficie de la tierra y se atrape la radiación infra roja ascendente irradiada por la tierra, que de otra forma escaparía al espacio. Así es como se genera un fenómeno llamado efecto invernadero, por semejanza a lo que ocurre en los invernaderos, en los que el cristal permite el paso de la radiación del sol y retiene la radiación infrarroja emitida dentro del mismo invernadero.

De esta manera es que el comportamiento de algunos gases de la atmósfera frente a la radiación del sol y terrestre producen calentamiento del aire cercano a la superficie de la tierra, elevando la media de la temperatura de todo el planeta a +15 grados Celsius.

El efecto invernadero es un fenómeno que ocurre naturalmente en la atmósfera. Sin embargo, su beneficioso efecto puede ser modificado por

actividades humanas que suben la concentración en la atmósfera de algunos de los gases que lo producen.

El fuerte aumento observado desde la época industrial en la concentración de la mayoría de los gases de invernadero estaría altamente vinculado con el aumento registrado en la temperatura media global del último siglo. Por lo tanto, el hombre a través de sus actividades es capaz de alterar un fenómeno beneficioso como es el efecto invernadero y provocar modificaciones en el clima, generando múltiples efectos en el equilibrio de los ecosistemas. Los gases de efecto invernadero más importantes son: vapor de agua, dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄). (Moran y Moran, 1994, p. 102)

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con los objetivos propuestos se presentan los siguientes resultados.

3.1. Objetivo 1. Enumeración de las diferentes alternativas existentes para energizar las áreas de IT en fincas de Ingenio Santa Ana

Se exponen las diferentes alternativas existentes para energizar de una forma segura y confiable el área de IT de finca La Giganta, tomando en consideración factores financieros, de aseguramiento de suministro eléctrico y de viabilidad física, las cuales proporcionan mejores relaciones entre el producto (energía eléctrica) y el impacto económico y ambiental, en relación a la generación de energía en este momento utilizada aplicando herramientas de análisis financiero y cálculo de emisión de gases de efecto invernadero de motores diésel.

A efecto de determinar la combinación óptima entre costos, y rendimiento, se utilizó el programa informático *HOMER*, el cual nos permite, basado en las necesidades energéticas (eléctricas), información técnica, información de costos, información económica e información climática, la visualización de los resultados financieros y ambientales durante la vida del proyecto.

3.1.1. Carga eléctrica

Partiendo desde el inventario de equipo conectado a la red de alimentación eléctrica local y la demanda eléctrica horaria de las instalaciones de IT en finca

La Giganta, las cuales fueron medidas en los dos escenarios anuales, época de zafra, del 3 al 7 de mayo y época de reparación, del 14 al 18 de junio de 2021, y se exponen en las tablas I y II, se determinaron los datos de consumo eléctrico.

Tabla II. **Demanda de equipos de *IT* en finca La Giganta**

Cantidad	Descripción	Demanda unitaria (W)	Demanda total (W)
5	Computadora portátil	110	550
1	Impresora de tinta	40	40
1	teléfono IP	20	20
1	Equipo de comunicaciones	60	60
1	Proyector	250	250
1	Equipo de red local	60	60
1	Radiocomunicación	220	220
1	Lámpara de mesa	20	20
1	Lámpara de techo	20	20
5	Monitor de 22 pulgadas	180	900
		Total	2140

Fuente: elaboración propia.

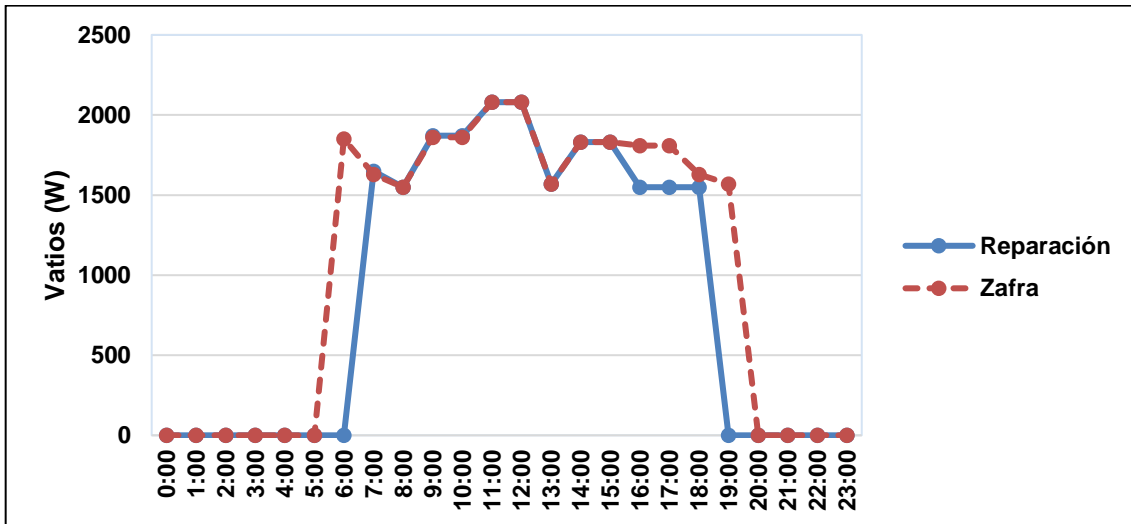
El patrón de consumo eléctrico por horas se elaboró a partir del promedio de mediciones tomadas cada hora en el transcurso de 15 días típicos de trabajo. No se tomaron en cuenta días atípicos, como fines de quincena o feriados. Esto tanto para el escenario de época de zafra como de reparación.

Tabla III. **Patrón del consumo eléctrico horario en finca La Giganta**

Horario	Reparación (W)	Zafra (W)
0:00	0	0
1:00	0	0
2:00	0	0
3:00	0	0
4:00	0	0
5:00	0	0
6:00	0	1851
7:00	1652	1632
8:00	1550	1552
9:00	1875	1864
10:00	1869	1863
11:00	2085	2081
12:00	2083	2080
13:00	1571	1574
14:00	1830	1832
15:00	1832	1830
16:00	1550	1811
17:00	1555	1812
18:00	1553	1635
19:00	0	1572
20:00	0	0
21:00	0	0
22:00	0	0
23:00	0	0
Total, Wh/día	21005	24989
Promedio W-h	875.21	1041.21

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Patrón de la demanda eléctrica horaria en finca La Giganta



Fuente: elaboración propia.

La línea base para el cálculo de la carga eléctrica

Wh/día	24,989
Wh promedio	1,040
Watts Máximos	2,081

3.1.2. Planta generadora

La planta generadora instalada, es una planta marca *Power-Link*, modelo GMP31C6 accionada por combustible diésel, con capacidad de 30 kW, selección de voltajes 127 o 220 voltios y frecuencia de 60 Hz

Datos para análisis proporcionados por la placa de la planta eléctrica, así como datos del fabricante y de la estación de combustible de Ingenio Santa Ana.

Planta eléctrica marca	<i>Power Link</i> modelo GMP31C6
Accionada por:	Combustible diésel
Capacidad:	30 kW

Consumo:	7.64 Litros/hora, 2.02 Galones/hora (Dato proporcionado por Gasolinera de Ingenio Santa Ana)
Costo inicial	Q. 22,500.00
Costo de reemplazo	Q. 35.000.00
Emisión CO ₂ por hora	20.56 Kg

Según EPA y el departamento de transporte de USA. Indicaron que se acordó usar un factor de conversión común de 10,180 gramos de emisiones de CO₂ por galón de diésel consumido (Registro Federal 2010).

3.1.3. Paneles fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos son fabricados por la empresa *Panasonic-Sanyo* modelo VBHN325 con las características siguientes:

Capacidad	325 W
Tecnología de fabricación	Multicristalinos
Precio	Q. 2,500.00
Voltaje de operación	24/48 V
Vida útil	20 años
Medidas	1362mm x 1320mm
Disponibilidad	2 unidades

3.1.4. Inversor

El inversor es parte fundamental del sistema ya que proporciona la energía eléctrica que los equipos de IT necesitan para operar. Se dispone de un inversor marca TRACE Serie DR y un controlador de carga solar genérico con las características descritas a continuación:

Modelo	DR2424
Voltaje de entrada	24 V.
Potencia nominal	2.4kW
Voltaje de salida	120 VAC
Eficiencia	94 %
Precio	Q. 6,500.00
Disponibilidad	1 unidad

Controlador de carga genérico	
Voltaje de entrada	12/24 V.
Capacidad	60A
Precio	Q. 950.00
Disponibilidad	1 unidad

3.1.5. Baterías

Su función es acumular energía eléctrica cuando el sistema está produciendo más energía que la que está utilizando, para poder ser utilizada posteriormente.

Marca	<i>Trojan</i>
Modelo	31 AGM
Capacidad	100 A/h
Tecnología	Plomo-ácido, seca, libre de mantenimiento
Disponibilidad	4 unidades
Precio	Q. 2,500.00

Tabla IV. **Ciclo de vida de un proyecto híbrido fotovoltaico-planta generadora**

Id	Nombre de la tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras
1	Vida del proyecto	3991 días	03/01/2022	20/04/2037	
2	Formulación del proyecto	10 días	03/01/2022	14/01/2022	
3	Exposición del proyecto	1 sem	03/01/2022	07/01/2022	
4	Aprobación del proyecto	1 sem	10/01/2022	14/01/2022	3
5	Proceso de compra	35 días	17/01/2022	04/03/2022	2
6	Cotización de materiales	2 sem.	17/01/2022	28/01/2022	4
7	Análisis de compra	1 sem	31/01/2022	04/02/2022	6
8	Compra y suministro	4 sem.	07/02/2022	04/03/2022	7
9	Proceso de instalación	36 días	07/03/2022	25/04/2022	5
10	Preparación del sitio	4 sem.	07/03/2022	01/04/2022	8
11	Instalación	2 sem.	04/04/2022	15/04/2022	10
12	pruebas y correcciones	1 sem	18/04/2022	22/04/2022	11
13	Entrega	1 día	25/04/2022	25/04/2022	12
14	Utilización	3910 días	26/04/2022	20/04/2037	
15	Vida del proyecto	782 sem.	26/04/2022	20/04/2037	
16	Mantenimiento general 1 (baterías)	1 sem	01/01/2027	07/01/2027	
17	Mantenimiento general 2 (baterías)	1 sem	01/01/2032	07/01/2032	
18	Abandono	1 sem	01/01/2036	07/01/2036	
19	Rescate	2 sem.	07/01/2036	21/01/2036	18

Fuente: elaboración propia.

3.1.6. Programa para simulación de instalaciones solares HOMER-PRO

HOMER software diseñado por la empresa HOMER Energy está enfocado en la optimización del diseño de instalaciones solares en todos los sectores, tanto conectados a la red como aislados de la red. Originalmente desarrollado por el laboratorio nacional de energías renovables de USA. HOMER funciona en todas las versiones del S.O. Windows, soportadas por su fabricante. Esencialmente, HOMER es un simulador de modelos, que trata de simular sistemas viables de todas las posibles combinaciones que puedan hacerse con el equipo disponible, ordenando sus resultados con base en la funcionalidad del sistema y en el valor actual neto, dando con esto relevancia al factor financiero del proyecto. HOMER

simula la operación de proyectos híbridos por el transcurso de un año en lapsos de una hora.

3.1.6.1. Parámetros de configuración del programa HOMER

Carga eléctrica. En la tabla III se ilustran los parámetros de carga ingresados al simulador HOMER.

Tabla V. **Cargas estacionales ingresadas al simulador HOMER**

Patrón del consumo eléctrico horario (Watt)		
Horario	mayo-octubre	noviembre-abril
6:00	0	1851
7:00	1652	1632
8:00	1550	1552
9:00	1875	1864
10:00	1869	1863
11:00	2085	2081
12:00	2083	2080
13:00	1571	1574
14:00	1830	1832
15:00	1832	1830
16:00	1550	1811
17:00	1555	1812
18:00	1553	1635
19:00	0	1572
Total, Wh/día	21005	24989
Promedio W-h	875.21	1041.21

Fuente: elaboración propia.

Localización geográfica del proyecto, necesaria para asignar parámetros de radiación solar.

Coordenadas 14°01'46.67" N, 90°29'25.97" W

Paneles fotovoltaicos

Capacidad	325W
Vida útil	20 años
Precio	Q. 2500.00
Eficiencia	13 %

Planta eléctrica

Capacidad	30kW
Vida útil	15000 horas
Horas a la fecha	7500 horas
Precio de reemplazo	Q. 35,000.00
Costo de mantenimiento	Q. 2.55/h
Precio del combustible	Q. 4.22/litro
Consumo a media carga	7.64 l/h

Inversor

Capacidad	2.5 kW
Vida útil	5 años
Eficiencia	94 %
Precio	Q. 6,500.00

Baterías

Capacidad	100 A/h
Vida útil	5 años
Precio	Q. 2500.00
Carga mínima	20 %

Indicadores económicos

Tasa de interés para Guatemala	7.53 %
Inflación	1.08 %
Tiempo de vida del proyecto	15 años

Resultados obtenidos al efectuar la simulación con los datos anteriormente indicados

Datos de la simulación:

Situaciones simuladas	1,075
Soluciones factibles	897
Soluciones no factibles (inestables)	178

Tabla VI. Diseños eléctricos aplicables en finca La Giganta

Diseño				Panel 325 (kW)	Planta eléctrica (kW)	Baterías 12-105 (número)	Inversor (kW)	Valor actual neto (Q)	Capital inicial (Q)	Costo de energía (Q/kw-h)
fotovoltaico		Inversor	Baterías	1.61 (5 paneles)		4.00	2.50	Q 37,555.41	Q29,950.00	Q 2.44
fotovoltaico	Planta eléctrica	Inversor	Baterías	2.59 (8 paneles)	30.00	6.00	3.50	Q 63,577.11	Q55,261.50	Q 4.04
	Planta eléctrica	Inversor	Baterías		30.00	22.00	5.50	Q 251,615.90	Q91,622.50	Q 15.98
	Planta eléctrica				30.00			Q 1,210,411.00	Q12,000.00	Q 76.88

Diseño				Costo anual de operación (Q)	Combustible total ANUAL (L)	Horas de operación de planta	Producción de planta (kWh)	Costo de MP planta (Q)	Costo de combustible anual (Q)	Autonomía (h)
fotovoltaico		Inversor	Baterías	Q 984.96	0.00					21.28
fotovoltaico	Planta eléctrica	Inversor	Baterías	Q 1,084.96	0.00	0.00	0.00	Q -	Q -	31.92
	Planta eléctrica	Inversor	Baterías	Q 49,832.05	10512.83	1375.00	2242.68	Q 5,476.13	Q 44,356.67	
	Planta eléctrica			Q 169,648.98	23320.74	4681.00	7021.50	Q 18,642.73	Q 151,006.25	

Fuente: elaboración propia.

Referente a las diferentes alternativas existentes para energizar las áreas de *IT* en fincas de Ingenio Santa Ana, los resultados generados por el simulador HOMER, las cuales son las alternativas para energizar las áreas de *IT* de finca La Giganta, después de ingresar las variables que solicita el simulador se generaron los resultados que indican cuatro posibles combinaciones estables. Financieramente el mejor diseño, con el valor actual neto más bajo es la combinación de paneles fotovoltaicos, inversor de corriente y baterías. El valor actual neto de este diseño es de Q. 37,555.41. El segundo diseño es el que contempla la instalación de paneles fotovoltaicos, planta eléctrica, inversor de corriente y baterías. Su valor actual neto es de Q. 63,577.11. La tercera opción en el orden es la que contempla en su diseño una planta eléctrica, inversor de corriente y baterías, cuyo valor actual neto asciende a Q. 251,615.90. Este diseño no incluye energía renovable. La última opción financiera es el diseño que tampoco incluye energía renovable, siendo la alimentación del sistema únicamente por planta eléctrica. El valor actual neto de este último diseño es de

Q. 1,210,411.00. Es de hacer notar que este último diseño es el que se utiliza en este momento.

En lo relativo a consumo de combustible y generación de gases de escape se pudo notar que las opciones 1 y 2 de la tabla no utilizaban combustibles fósiles para su operación. La opción 2 incluye una planta eléctrica solo por razones climáticas no usuales, o de emergencia, permaneciendo normalmente apagada, razón por la cual no existe consumo de diésel y no se producen gases de efecto invernadero derivados del escape de la máquina de combustión interna.

La opción 3 indica que el consumo de diésel por año asciende a 10,512.83 litros, con el equivalente de 2.689 Kg/l de CO₂. Esto genera anualmente la cantidad de 28.27 toneladas métricas de CO₂, gas de efecto invernadero.

La cuarta opción no contempla la instalación de energía renovable ni sistemas a acumulación de energía, lo que hace que la planta trabaje todo el tiempo en que hay demanda eléctrica. Los datos de consumo de diésel por año son de 23,320.7 litros, con una generación de CO₂ de 62.71 toneladas métricas.

En cuanto a la generación de los lineamientos para el diseño de sistemas para energización de centros de cómputo rurales. Los centros de cómputo o centros de manejo de información, en los cascos de las regiones agrícolas de Ingenio Santa Ana, se ha vuelto sumamente importantes para el proceso general de manejo y distribución de datos a todos los niveles de la corporación, haciendo hincapié en que gran parte de estos datos se generan en el campo, fuente de la materia prima, en este caso la caña de azúcar, y alimentan sistemas financieros, logísticos, técnicos y administrativos.

El diseño general de un centro de cómputo sin conexión a la red eléctrica y alimentado por fuentes aisladas de energía, se enfoca en el aprovechamiento máximo de los recursos de generación de energía que tenga instalados, recursos que tienen un alto costo.

El funcionamiento de un centro de cómputo debe ser continuo según su programación de operación, por lo que para garantizar esta continuidad se debe considerar la reserva de una planta eléctrica que supla por lo menos la demanda de los equipos de procesamiento de datos.

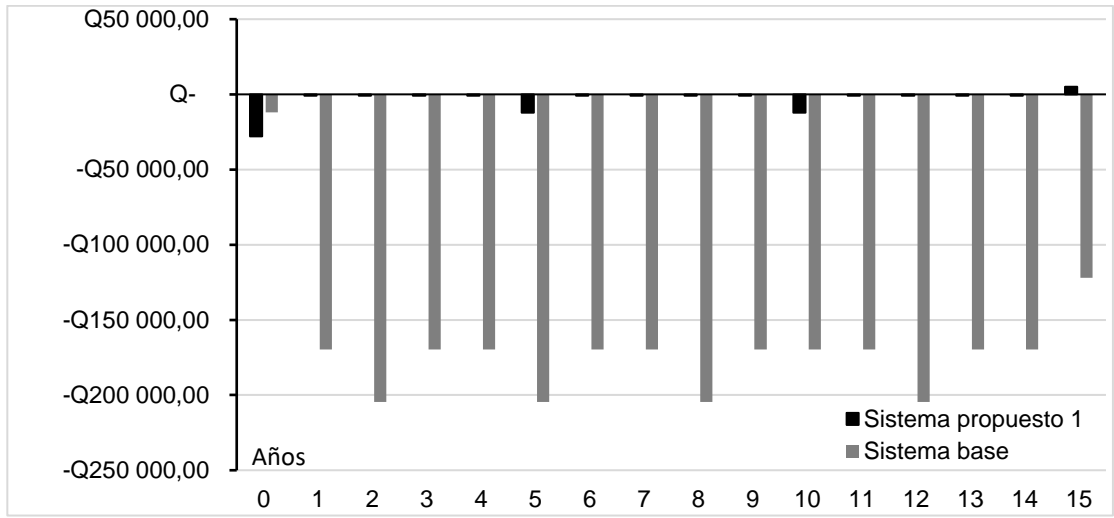
La información y capacitación del personal que opera y utiliza los recursos del centro de cómputo es de importancia, ya que se debe capacitar en prácticas de ahorro energético.

3.2. Objetivo 2. Identificación de la rentabilidad de un sistema híbrido fotovoltaico-planta generadora en las áreas de *IT* sin suministro eléctrico en fincas de Ingenio Santa Ana

Para determinar la rentabilidad del proyecto propuesto se comparó el flujo de caja de la instalación actual la cual se tomó como instalación base y el flujo de caja de la instalación propuesta y su valor actual neto.

Opción 1 combinación de paneles fotovoltaicos, inversor de corriente y baterías. El valor actual neto de este diseño es de Q. 37,555.41.

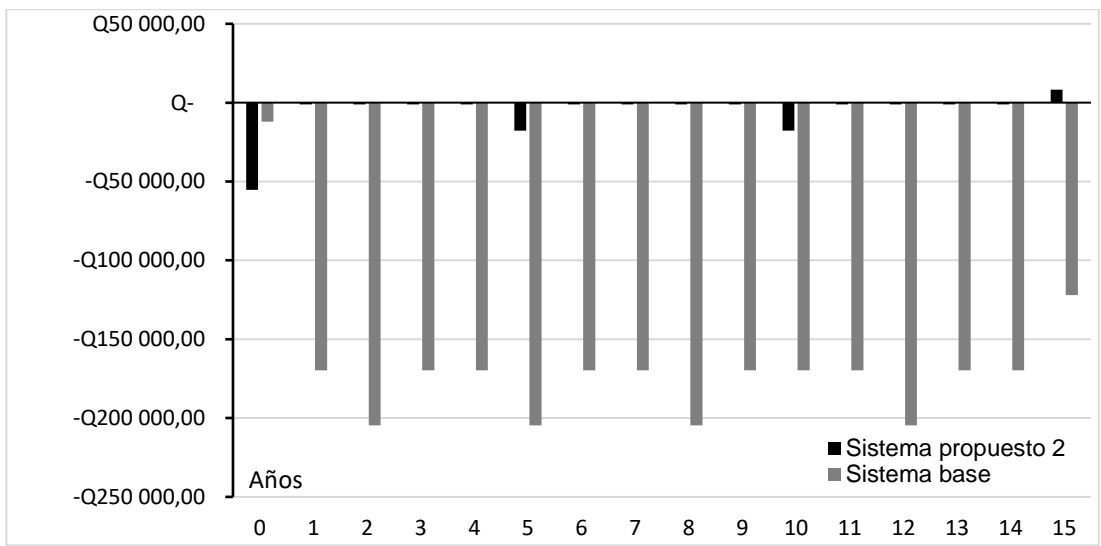
Figura 7. Comparación flujo de caja para sistema propuesto #1 con sistema base



Fuente: elaboración propia.

Opción 2 combinación de paneles fotovoltaicos, inversor de corriente, baterías y planta eléctrica. El valor actual neto de este diseño es de Q. 63,577.11

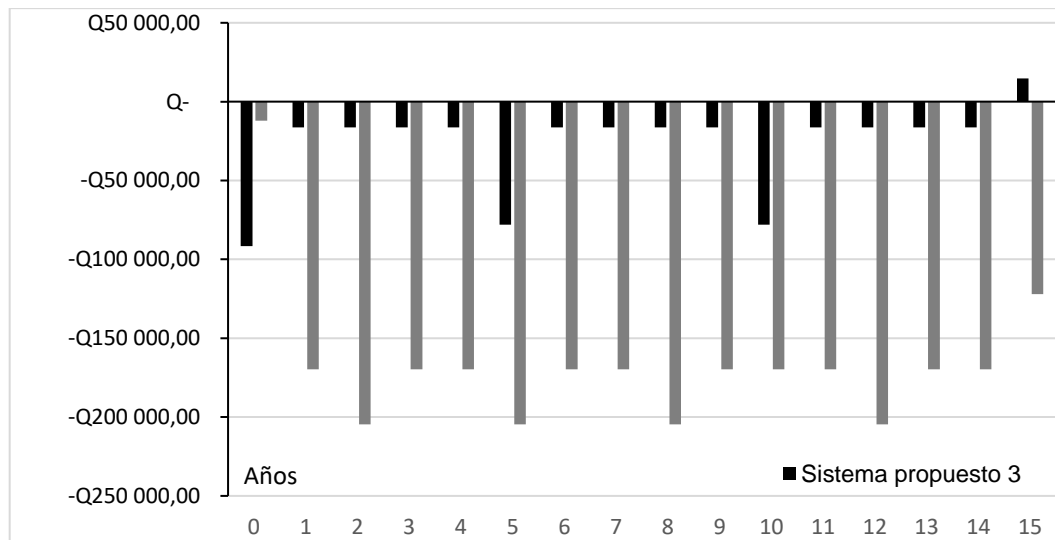
Figura 8. Comparación flujo de caja para sistema propuesto #2 con sistema base



Fuente: elaboración propia.

Opción 3 Inversor de corriente, baterías y planta eléctrica. El valor actual neto de este diseño es de Q. 251,215.90. El concepto en ese diseño radica en que la planta eléctrica produce energía en exceso, la cual es acumulada en las baterías y utilizada posteriormente para alimentar los equipos de IT parte del día sin la planta en operación.

Figura 9. **Comparación flujo de caja para sistema propuesto #3 con sistema base**



Fuente: elaboración propia.

3.3. **Objetivo 3. Generación de los lineamientos para el diseño de sistemas para energización de centros de cómputo rurales**

Se pueden dividir los lineamientos en técnicos, operativos y financieros, los cuales se detallan a continuación.

3.3.1. Lineamientos técnicos

- Mantenimiento de conexiones eléctricas. Es imprescindible que todas las conexiones eléctricas del sistema sean revisadas continuamente por personal calificado, minimizándose pérdidas por falsos contactos ocasionados por corrosión ya que muy difícilmente se instala en estos sitios control de clima.
- Instalación de equipo de cómputo con la mejor eficiencia eléctrica posible. Configurar las estaciones de trabajo para que pasen a modo “ahorro de energía” cuando éstas no estén siendo utilizadas.
- Fuente de energía de respaldo. Una planta eléctrica convencional accionada por combustible diésel o gasolina es indispensable, ya que la fuente energética principal, de cualquier clase que esta sea, puede fallar, en este caso la planta eléctrica puede suplir la energía para la continua operación del centro de cómputo.
- Limpieza de los paneles solares. Se debe asegurar que los paneles solares estén siempre en condiciones óptimas de limpieza, ya que el polvo o materia vegetal acumulada sobre ellos merma su rendimiento, en cuyo caso la energía generada es menor. Una rutina de limpieza diaria es una buena práctica.
- El cuidado de la libre exposición de los paneles solares es indispensable. Se debe asegurar que la radiación solar que llega a los paneles no sea obstruida por ningún crecimiento vegetal o instalación posterior de algún equipo o construcción.

3.3.2. Lineamientos operativos

En los centros de cómputo aislados de la red, la energía eléctrica generada en sitio es un recurso escaso que deber ser utilizado exclusivamente para los fines para los que fue implementada. La continua capacitación a los usuarios del centro de cómputo sobre buenas prácticas de ahorro de energía contribuye a alcanzar exitosamente el aspecto de diseño relativo al tiempo de autonomía del sistema.

Específicamente dos situaciones para evitar son:

- Conectar cargas eléctricas personales no autorizadas, como equipos musicales, equipos de televisión, cafeteras o similares.
- El equipo que no se esté utilizando debe permanecer apagado.

3.3.3. Lineamientos financieros

El costo de operación de planta eléctrica accionada por motor de combustión interna es muy oneroso si se compara con la operación fotovoltaica, ya que implica costos por combustible y operación. Evitar en lo posible que el suministro eléctrico sea por medio de ese recurso, reservándose exclusivamente para situaciones de emergencia.

3.4. Objetivo 4. Estimación de la huella ecológica, la disminución de los gases de efecto invernadero (GEI) producida por los gases de escape

Esta estimación se basa en el factor de conversión que agencias ambientales de USA acordaron el cual es de 10,180 gramos de emisiones de

CO2 por galón de diésel consumido (EPA y el Departamento de Transporte de USA, 2010).

Tabla VII. **Emisiones anuales de CO₂ por tipo de proyecto**

Diseño				Valor actual neto (Q)	Horas de operación de planta	Emisiones de CO ₂ por año (TM)	Autonomía (h)
fotovoltaico		Inversor	Baterías	Q 37,555.41	—	0.00	21.28
fotovoltaico	Planta eléctrica	Inversor	Baterías	Q 63,577.11	0.00	0.00	31.92
	Planta eléctrica	Inversor	Baterías	Q 251,615.90	1,375.00	28.27	—
	Planta eléctrica			Q 1,210,411.00	4,681.00	62.71	—

Fuente elaboración propia.

Los gases emitidos, por el tubo de escape de un motor diésel, son en cantidades aproximadas, nitrógeno 67 %, dióxido de carbono 12 %, agua 11 %, oxígeno 10 % y un 0.3 % de una mezcla de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos no quemados, dióxido de azufre y partículas sólidas.

De estos gases, el principal contribuyente al efecto invernadero es el dióxido de carbono (CO₂). Si bien algunos de los otros gases son nocivos para la salud, su contribución al efecto invernadero es mínima.

El suministro eléctrico para el centro de cómputo en este momento utilizado en finca La Giganta, no incluye energía renovable ni sistemas de acumulación de energía, lo que hace que la planta opere todo el tiempo en que hay demanda eléctrica. Los datos de consumo de diésel por año son de 23,320.7 litros (6,161 gal), con emisiones de CO₂ de 62.72 toneladas métricas. (véase tabla VII).

El diseño sugerido por el simulador, y financieramente más atractivo para la empresa sugiere eliminar por completo la planta eléctrica, convirtiendo la

generación de energía, exclusivamente en energía fotovoltaica, la cual no emitirá gases de efecto invernadero a la atmosfera.

Al eliminar el uso de planta eléctrica accionada por combustible diésel se dejarán de emitir anualmente 62.72 toneladas de CO₂ a la atmósfera. Es de mencionar que la planta eléctrica no se elimina físicamente del sistema, pero se mantiene únicamente como recurso de emergencia, esperando que no se utilice, o se utilice unas pocas horas en el transcurso de la vida del proyecto.

3.5. Objetivo general. Evaluar el impacto en la disminución del consumo de combustible y contaminación por emisión de gases mediante la implementación de un sistema híbrido que energice las áreas de IT en fincas del ingenio Santa Ana

La implementación del mejor sistema híbrido fotovoltaico-planta generadora no demostró ser la mejor opción financiera para el simulador de instalaciones de energía renovable. Claramente el valor actual neto (VAN) del diseño exclusivamente fotovoltaico es casi un 50 % del valor actual neto (VAN) del proyecto híbrido (Q37,335.41 contra Q63,5777.11, ver tabla IV, diseños eléctricos aplicables a finca La Giganta). La mejor opción financiera es la que presenta el menor valor actual neto. En este caso la opción número 1.

Según FAO, (2020) el análisis basado en la tasa interna de retorno (TIR) tiene algunos inconvenientes para analizar algunos proyectos con varios retornos reales y positivos, o proyectos con ningún retorno con sentido económico (caso del presente estudio), y la vuelve inconsistente presentando resultados matemáticos que no tienen sentido económico, razón por la que no se utilizó como herramienta en el presente estudio.

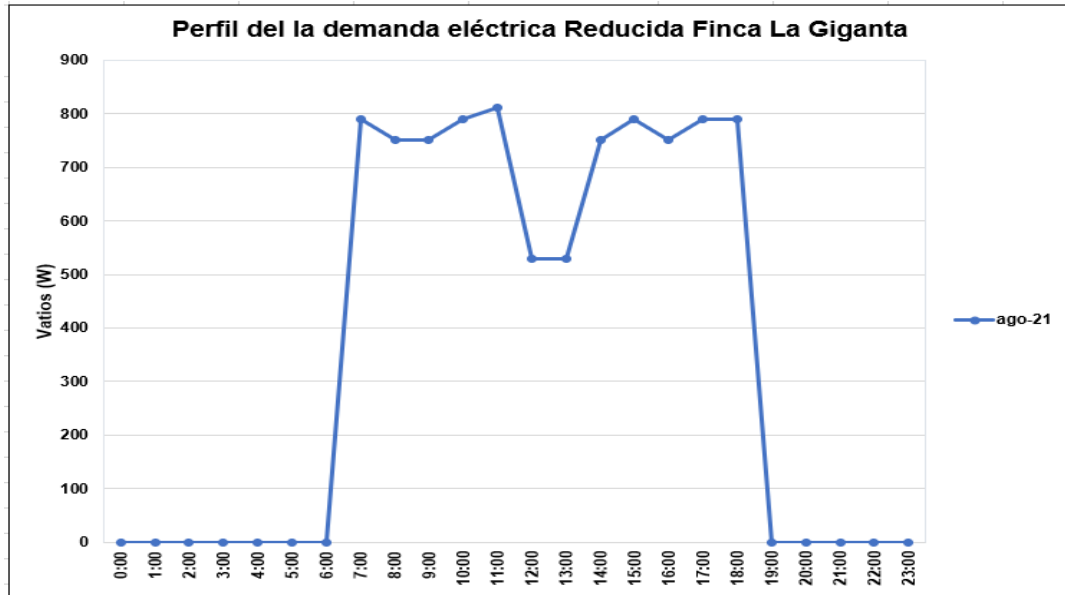
La implementación del proyecto con generación exclusivamente fotovoltaica conlleva a la realización de cambios técnicos, y procedimientos administrativos que la empresa no puede efectuar de forma inmediata, por lo que se adoptó la sugerencia de la dirección de la empresa, para implementar un proyecto piloto a escala reducida, utilizando los materiales que se encuentran en existencia en las bodegas de Ingenio Santa Ana y limitando al mínimo el consumo eléctrico en el centro de cómputo de finca La Giganta.

Tabla VIII. **Carga eléctrica reducida finca La Giganta**

Cantidad	Descripción	Carga unitaria (W)	Carga total (W)
5	Computadora portátil	110	550
1	Impresora de tinta	40	40
1	teléfono IP	20	20
1	Equipo de telecomunicaciones	60	60
1	Lampara de techo	20	20
1	Equipo de red local	60	60
1	Equipo de Radiocomunicación	10	10
1	Lampara de mesa	20	20
Total			780

Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Demanda horaria reducida finca La Giganta**



Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Demanda horaria reducida finca La Giganta**

Patrón del consumo eléctrico horario (reducido) agosto 2021	
Horario	W-h
7:00	791.00
8:00	752.00
9:00	751.00
10:00	789.00
11:00	814.00
12:00	528.00
13:00	527.00
14:00	754.00
15:00	791.00
16:00	749.00
17:00	789.00
18:00	790.00
Total, Wh/día	8825.00
Promedio, W-h	367.71

Fuente: elaboración propia.

Ingresando al simulador el patrón de consumo y los datos de los dispositivos con que se cuenta con:

Paneles solares 2 x 325W C/U marca Panasonic-Sanyo	Q. 2,500.00 C/U
Baterías 4x 100Ah marca <i>Trojan</i> modelo 31AGM	Q. 2,500.00 C/U
Inversor 1 x 2.4 kW marca <i>Trace</i> modelo DR2424	Q. 6,500.00C/U
Regulador de carga genérico 1 x 60A	Q. 900.00 C/U
Ciclo de vida del proyecto	15 años
Tasa de interés para Guatemala	7.53 %
Inflación	1.08 %

Resultados obtenidos al efectuar la simulación con los datos anteriormente indicados. Situaciones simuladas 27, soluciones factibles 11, soluciones no factibles (inestables) 16. Ver tabla X.

Tabla X. **Diseño sugerido por el simulador HOMER para carga reducida**

Diseño			Panel 325 (kW)	Planta eléctrica (kW)	Baterías 12-105 (número)	Inversor (kW)	Valor actual neto (Q)	Capital inicial (Q)	Costo de energía (Q/kw-h)
fotovoltaico	Inversor	Baterías	0.89 (3 paneles)		4	0.922	Q 35,240.00	Q26,900.00	Q 2.69

Diseño			Costo anual de operación (Q)	Combustible total ANUAL (L)	Horas de operación de planta	Producción de planta (kWh)	Costo de MP planta (Q)	Costo de combustible anual (Q)	Autonomía (h)
fotovoltaico	Inversor	Baterías	Q 974.00						25.00

Fuente: elaboración propia.

3.5.1. Implementación

En la implementación del sistema reducido se acordó con la administración de la región agrícola, quien es usuaria del centro de cómputo, efectuar la prueba

reducida por 15 días, partiendo el 16 de agosto y finalizando el 30 de agosto de 2021.

3.5.2. Instalación del modelo reducido

Los equipos en la instalación del modelo reducido se describen en los siguientes apartados.

3.5.2.1. Paneles solares

Se instalaron sobre soportes soldados a una torre ya existente en las cercanías al sitio, la cual no se estaba utilizando. Esto permitió que los paneles solares no tuvieran ninguna interferencia a la radiación solar a ninguna hora del día. Los paneles tienen una inclinación de 15 grados y están dirigidos al Sur.

Figura 11. **Torre para instalación de paneles solares**



Fuente: [Fotografía de Roberto Gonzalez]. (Sta. Rosa. 2021). Colección particular. Guatemala.

Figura 12. **Equipo de regulación y carga de baterías**



Fuente: [Fotografía de Roberto Gonzalez]. (Sta. Rosa. 2021). Colección particular. Guatemala.

3.5.3. Diagrama esquemático de la instalación

El sistema reducido de instalación fotovoltaica en finca La Giganta fue diseñado para aprovechar tanto la energía fotovoltaica, como la energía eléctrica producida por el generador diésel, si este entrara en funcionamiento por condiciones climáticas o de emergencia, aprovechando el sobredimensionamiento de esta unidad.

En condiciones normales de funcionamiento el grupo fotovoltaico V1, suministra energía al regulador solar BC1, este regulador carga el banco de baterías B1 y alimenta el inversor V24 con 24 voltios DC, suministrando este último 110 voltios AC a la carga LOAD1.

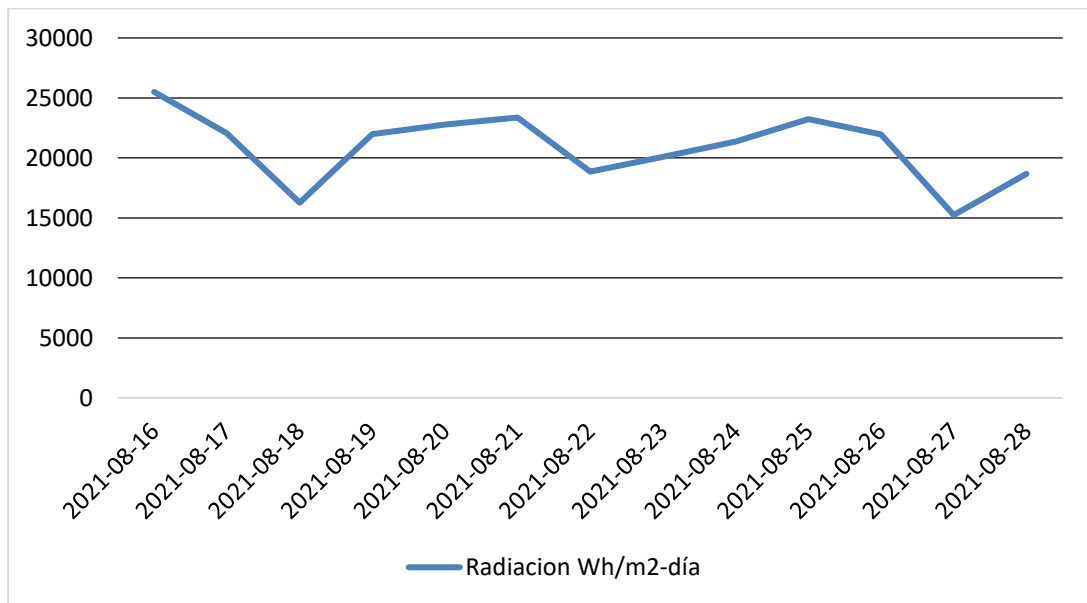
En condiciones de baja carga de baterías, el regulador solar BC1 dispara una alarma audible que indica al operador del sistema que debe arrancar la planta eléctrica V2 la cual alimenta con 110 voltios AC a la fuente de 24 voltios V3 y activa el relevador RL1 que abre el circuito del grupo fotovoltaico y al mismo tiempo cierra el circuito entre la fuente de 24 voltios V3 y el regulador solar BC1, cargándose de esta forma el banco de baterías B1 y alimentándose el inversor V24.

Al recuperarse la carga de las baterías el regulador solar BC1 elimina la alarma, indicando al operador que puede proceder con apagar la planta eléctrica V2, y el sistema vuelve a ser alimentado por energía fotovoltaica

3.5.4. Condiciones climáticas durante el transcurso de la prueba

En la finca La Giganta existe una instalación metrológica que cuenta con medición de radiación solar y permitió descargar los datos recolectados durante el período de la prueba. Se logró graficar el comportamiento de la radiación solar por hora, teniendo en el eje horizontal la radiación solar en Wh/m²y en el eje vertical, la fecha.

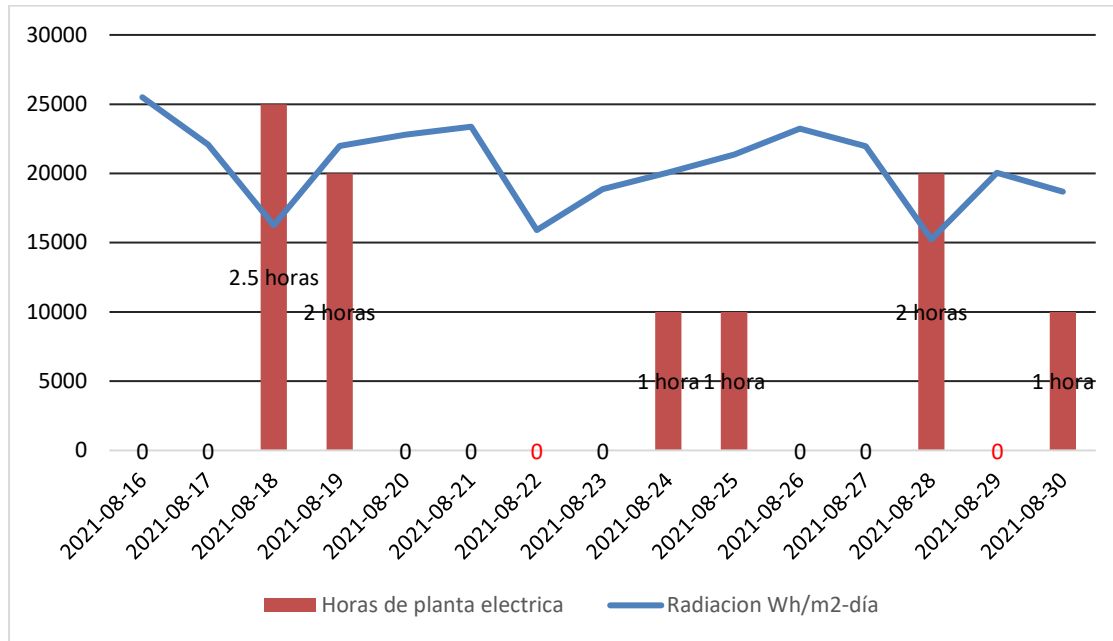
Figura 14. Radiación solar en finca la Giganta en W/m²-día del 16 al 30 de agosto 2021



Fuente: elaboración propia.

Al finalizar el período de pruebas con demanda reducida se pudo apreciar que por motivos climáticos no fue posible prescindir totalmente de la operación de la planta eléctrica, esta operó en el transcurso de 13 días laborales, solamente 9.5 horas. Con la forma actual de operación se hubiera operado la planta por 156 horas.

Figura 15. Comparativa de radiación solar contra horas planta eléctrica



Fuente: elaboración propia.

Los ahorros logrados en la operación con fuente de energía fotovoltaica fueron evidentes. Con la energización eléctrica cubierta solamente con la planta eléctrica diésel esta se hubiera operado por 156 horas con un consumo de (tomando como base el consumo reportado de 2.02 Gal/h) 315.12 galones de combustible, lo que esto que significa un costo de Q. 5,033.31, con la consecuente emisión a la atmosfera de 3.20 toneladas métricas de CO₂

Al incluir generación fotovoltaica en el sistema, se logró reducir las horas de funcionamiento de la planta eléctrica solamente a 9.5 horas, esto es el 6 % con una reducción de costos por combustible de Q. 4,726.80 y Q. 468.80 de costos de operación.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La validez interna y externa del trabajo de investigación, y la validez de los resultados obtenidos es presentada a continuación.

Análisis interno

Referente al objetivo 1, la enumeración de las diferentes alternativas existentes para energizar las áreas de IT en fincas de Ingenio Santa Ana que no poseen suministro de energía eléctrica, y dependen solamente de generadores de combustión interna, se pudo efectuar basándose en un simulador de instalaciones con energía renovable llamado *HOMER*.

Alimentando al simulador con parámetros técnicos tales como el patrón de la demanda eléctrica, la ubicación física del sitio en estudio, las características del suministro eléctrico, y parámetros económicos tales como tasa de inflación, y tasa de interés se obtuvieron resultados muy enfocados a soluciones energéticas tipo renovable dejando como secundarias las opciones que incluían energías convencionales, como es una planta eléctrica diésel.

El orden en el que el simulador entregó las opciones de diseño fue dada respecto a los costos que generaría el proyecto durante su ciclo de vida de 15 años fue priorizando los costos, colocando en primer orden la solución con el menor valor actual neto. El ciclo de vida se redujo de 25 años comúnmente usado en instalaciones urbanas a 15 años, tomando en cuenta que las instalaciones rurales son más afectadas por elementos externos. Entre estos elementos se

puede mencionar, humedad del ambiente, polvo, daños por insectos y roedores, y descargas electro atmosféricas muy frecuentes.

Primer diseño: combinación de paneles fotovoltaicos, inversor de corriente y baterías. El valor actual neto de este diseño es de Q. 37,555.41. Entre sus ventajas aparte del menor costo, es la cero emisión de gases de efecto invernadero.

El segundo diseño es el que contempla la instalación de paneles fotovoltaicos, planta eléctrica, inversor de corriente y baterías. Su valor actual neto es de Q. 63,577.11. Es de hacer notar que, si bien se cuenta con una planta eléctrica, la contribución energética de ésta durante el ciclo de vida del proyecto es cero. La planta eléctrica tendrá una función solamente para la cobertura de emergencias. Esto hace que la huella ecológica sea muy baja ya que los gases de efecto invernadero serán cero, a menos que por alguna razón de fuerza mayor entre en operación la planta eléctrica.

El tercer diseño probable es la combinación de una planta eléctrica, baterías para almacenamiento e inversor de corriente. Claramente este diseño es mejor que el usado en este momento, ya que aprovecha la energía excedente de la planta eléctrica almacenándola en baterías para poder ser utilizada posteriormente. Su valor actual neto asciende a Q. 251,615.00, e implica la operación de la planta eléctrica por 1,375 horas al año, emitiéndose a la atmósfera 28.27 toneladas métricas de CO₂, gas de efecto invernadero.

La cuarta y última opción presentada es la que no contempla la instalación de energía renovable ni sistemas a acumulación de energía, lo que hace que la planta trabaje todo el tiempo que hay demanda eléctrica. Los datos de consumo

de diésel por año son de 23,320.7 litros con una emisión a la atmósfera anual de 62.72 toneladas métricas de CO₂.

En cuanto al objetivo 2 que es la determinación de la rentabilidad de un sistema híbrido, fotovoltaico-planta generadora, que energice las áreas de Tecnología de la información) *IT* en fincas de Ingenio Santa Ana se evaluó únicamente el factor financiero, evaluando los egresos de capital durante la vida del proyecto trasladados al momento presente (concepto del valor actual neto), en donde claramente y por un amplio margen la primera opción compuesta de paneles fotovoltaicos, inversor de corriente y baterías es el más rentable, aunque aquí ya no se aplique el concepto de “sistema híbrido”. El valor actual neto de este diseño es de Q. 37,555.41.

La segunda opción presentada que contempla la instalación de paneles fotovoltaicos, planta eléctrica, inversor de corriente y baterías. Su valor actual neto es de Q. 63,577.11 con la ventaja operativa de contar con una fuente de energía para casos de emergencia o fuerza mayor, pero, aun así, es financieramente la segunda opción.

La tercera y cuarta opciones, respectivamente con montos de valor actual neto de Q. 251,615.90. y Q. 1,210,411.00 están automáticamente descartadas en el análisis financiero, por ser las de mayores costos y ninguna ventaja operativa o ambiental.

Referente al objetivo 3 que es la generación de los lineamientos generales para el diseño de sistemas para energización de centros de cómputo rurales, independientes de la red eléctrica nacional se debe tomar en consideración que la energía eléctrica es un bien escaso el cual hay que destinar a los usos para los que fue diseñado el sistema que la generó. Siguiendo esta premisa se

elaboraron lineamientos técnicos, operativos o financieros, los cuales se detallan continuación.

Lineamientos técnicos, relativos al mantenimiento del sistema eléctrico. La eficiencia de los equipos en uso y la limpieza de los paneles fotovoltaicos contribuyen al eficiente funcionamiento del sistema, y que este mantenga la capacidad de generación con que inicialmente fue diseñado.

Lineamientos operativos relativos a los usuarios del centro de cómputo, sobre buenas prácticas de ahorro de energía, con el fin de alcanzar el tiempo de autonomía diseñado para sistema, evitando conectar cargas eléctricas no autorizadas.

Lineamientos financieros relacionados con el factor que más impacta, el costo de operación de la planta eléctrica accionada por motor de combustión interna. Evitar en lo posible que el suministro eléctrico sea por medio de ese recurso, reservándose exclusivamente para situaciones de emergencia.

Conservar una fuente de energía de respaldo. Una planta eléctrica convencional accionada por combustible diésel o gasolina es indispensable, ya que permitirá la operación continua del centro de cómputo en situaciones de emergencia o fuerza mayor.

Respecto al objetivo 4, para la determinación de la huella ecológica por la disminución de los gases de efecto invernadero (GEI) producida por los gases de escape, al implementar un sistema híbrido, se siguieron las convenciones de algunas agencias ambientales de USA las cuales consideran un factor de conversión de 10,180 gramos de emisiones de CO₂ por galón de diésel consumido. Por lo que al implementar la opción que no contempla planta

generadora accionada por combustible diésel, no habrá emisiones de CO₂ el cual es el mayor contribuyente al efecto invernadero.

Tampoco se emiten monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos no quemados (HC), compuestos de plomo, anhídrido sulfuroso y partículas sólidas en forma de hollín, los cuales son nocivos para la salud.

Respecto al objetivo general, el diseño e implementación de un sistema híbrido, fotovoltaico-planta generadora, para energizar las áreas de IT en fincas de Ingenio Santa Ana, que no poseen suministro de energía eléctrica, y dependen solamente de generadores de combustión interna, se llegó a una solución no esperada, desde el momento en que el simulador no colocó en primer lugar en relación a costos, un sistema que incluyera una planta impulsada por diésel, eligiendo como mejor opción la generación exclusivamente fotovoltaica.

La implementación del proyecto con generación exclusivamente fotovoltaica conlleva a la realización de cambios técnicos y procedimientos administrativos que la empresa no puede efectuar de forma inmediata, por lo que se adoptó la sugerencia de la dirección de la empresa, para implementar un proyecto piloto a escala reducida, utilizando los materiales que se encuentran en existencia en las bodegas de Ingenio Santa Ana y limitando al mínimo el consumo eléctrico en el centro de cómputo de finca La Giganta, esto por un periodo de 15 días.

Así con la orientación del simulador se implementó un sistema capaz de energizar una instalación reducida con consumo pico de 810W, en lugar de la instalación completa con consumo pico de 2140W. Al finalizar el período de pruebas con demanda reducida se determinó que por motivos climáticos no se pudo prescindir totalmente de la operación de la planta eléctrica. Ésta operó en

el transcurso de 13 días laborales, solamente 9.5 horas. Con la forma actual de operación se hubiera operado la planta por 156 horas.

Los ahorros logrados en la operación con fuente de energía fotovoltaica fueron evidentes. Con la energización eléctrica cubierta solamente con la planta eléctrica diésel se hubieran consumido (tomando como base el consumo reportado de 2.04 Gal/h) 315.12 galones de combustible, lo que significa un costo de Q. 5,033.32, con la consecuente emisión de CO₂ a la atmósfera de 3.21 toneladas métricas. Al incluir generación fotovoltaica en el sistema, se logró reducir las horas de funcionamiento de la planta eléctrica durante el período de pruebas solamente a 9.5 horas, esto es el 6 %, con costos por combustible de Q. 306.51 y una emisión de CO₂ a la atmosfera de 0.19 toneladas métricas.

Tabla XI. **Datos comparativos entre sistema actual y propuesta híbrida**
Período 16-8-2021 a 30-8-2021

comparación entre el sistema actual de generación eléctrica y el sistema evaluado		
	Sistema actual	Sistema híbrido
Costos por combustible	Q5,033.32	Q317.85
Costos de instalación	Q0.00	Q26,900.00
Recuperación de la inversión (años)		0.25
CO₂ emitido (TM)	3.21	0.19

Fuente: elaboración propia.

Análisis de correlación de radiación solar contra horas de arranque de planta eléctrica

Se observó que algunos días del período de prueba no fueron soleados (ver figura 20), por lo que se graficó el tiempo de operación de la planta eléctrica contra la radiación solar en Wh/m²-día, eliminado del análisis los días domingo los cuales no eran representativos por no haber personal en el sitio y la totalidad de equipo estuvo apagado.

Al grupo de datos recolectados se le aplicó análisis de correlación para determinar la intensidad de la relación lineal entre las variables tiempo de operación de la planta y radiación solar por día. Para determinar la correlación se recurrió a la ecuación:

$$r = \frac{\sum((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 * \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad Ec. 1$$

En donde r es el coeficiente de correlación, x_i corresponde a los valores de radiación solar, \bar{x} corresponde al promedio de los valores de radiación en el período, Y_i corresponde a las horas de operación de la planta eléctrica y \bar{Y} corresponde al promedio de las horas de operación de la planta eléctrica.

Tabla XII. **Correlación entre las variables**

	Radiacion Wh/m ² -día	Horas de planta electrica (parametrizadas)	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$x_i - \bar{x} * y_i - \bar{y}$
	25500.5	0	4625.04	21390980.77	-7307.69	53402366.86	-33798357.99
	22070.5	0	1195.04	1428116.92	-7307.69	53402366.86	-8732973.37
	16264.1	25000	-4611.36	21264655.24	17692.31	313017751.48	-81585627.22
	21978.8	20000	1103.34	1217355.76	12692.31	161094674.56	14003911.24
	22787.4	0	1911.94	3655508.68	-7307.69	53402366.86	-13971857.99
	23367.9	0	2492.44	6212249.48	-7307.69	53402366.86	-18213973.37
	18866.4	0	-2009.06	4036328.27	-7307.69	53402366.86	14681603.55
	20079.1	10000	-796.36	634191.70	2692.31	7248520.71	-2144050.30
	21360.7	10000	485.24	235456.36	2692.31	7248520.71	1306411.24
	23229.2	0	2353.74	5540084.75	-7307.69	53402366.86	-17200396.45
	21963.3	0	1087.84	1183392.52	-7307.69	53402366.86	-7949588.76
	15242.2	20000	-5633.26	31733635.56	12692.31	161094674.56	-71499088.76
	18670.9	10000	-2204.56	4860091.58	2692.31	7248520.71	-5935357.99
Promedios	20875.46	7307.69					
Sumatoria				103392047.59	0.00	1030769230.77	-231039346.15
Valor de correlacion calculado con la ecuación	-0.70772					Valor calculado por la hoja electronica	-0.70772

Fuente: elaboración propia.

El valor de correlación entre las variables nos indica que no hay una relación perfecta entre la variable radiación solar y las horas planta eléctrica, sin embargo, si hay una relación entre ellas con una dependencia inversa cercana al 70 %, con un R^2 de 0.5

Análisis externo

Los resultados obtenidos indican claramente las ventajas de la energía fotovoltaica sobre la energía obtenida con fuentes accionadas por hidrocarburos. Ventajas económicas, y ambientales; claramente en un proyecto que implique sustitución de energía fósil por energía renovable, específicamente en el caso del presente estudio, la alternabilidad de operación entre plantas accionadas por combustible diésel implica una inversión inicial, que retorna en un período de tiempo estrechamente relacionado con el menor uso de la planta eléctrica. Ante el uso extendido de los combustibles fósiles y el daño al ambiente que los mismos producen es necesario plantear e investigar sobre fuentes alternativas de energía no contaminantes.

La energía fotovoltaica está considerada como una de las que posee mayor aplicabilidad en lo inmediato. La tecnología fotovoltaica, desarrollada inicialmente para aplicaciones espaciales, ha demostrado suficiente madurez, eficiencia y competitividad para su utilización en distintas aplicaciones terrestres. La energía fotovoltaica no es contaminante durante la operación y la contaminación generada durante la producción es insignificante y no plantea grandes problemas en la ocupación de espacios. (Luján, 2012, p.45)

Los resultados obtenidos se pueden generalizar en las 4 regiones agrícolas de Ingenio Santa Ana, que no cuentan con conexión a la red eléctrica ya que las

necesidades energéticas son casi las mismas y en su localización geográfica se presentan casi las mismas condiciones de irradiancia y clima.

Fuera del entorno de Ingenio Santa Ana, la utilización de los datos recabados puede servir como referencia para la instalación de generadores de energía híbridos o fotovoltaicos puros, para energizar equipo de cómputo, comunicaciones o telemetría, cuyos requerimientos energéticos son diferentes a los requerimientos energéticos domésticos.

Los precios de los paneles solares, se ha reducido a más de 10 veces en los últimos 30 años, sin embargo, el costo de la electricidad producida por paneles solares sigue siendo más alta que en el mercado de electricidad conectada a la red. La competitividad de la energía solar fotovoltaica para centros de cómputo rurales depende de una variedad de condiciones locales, siendo las más importantes, el costo de conexión a la red, y la estabilidad del suministro eléctrico.

Reyes y Osorio (2018), consideran que el porcentaje del nivel de penetración solar del sistema híbrido es de un 33.8 %, por lo cual se recomienda utilizar un control de ahorro de combustible para mantener en este rango dicho nivel de penetración solar. Se coincide en que la operación de la planta eléctrica accionada con combustibles fósiles encarece la operación, debiéndose priorizar y extender el uso de energía fotovoltaica.

Gálviz y Gutiérrez (2013), consideran que el proyecto de investigación de uso de energía renovable para soluciones de suministro eléctrico en comunidades que no lo poseen, tiene como fin crear una alternativa energética alineada con la protección ambiental y orientada a solucionar de forma eficaz el problema de cobertura energética de comunidades que no

la poseen, por limitantes económicas y geográficas principalmente. En la Guajira los altos costos de generación originados principalmente en el precio de los combustibles, y los costos de operación y mantenimiento en las distantes zonas remotas, hacen que la generación solar resulte más económica en el largo plazo. Esta evaluación del proyecto de un sistema de generación solar fotovoltaica para la población Wayuu en Nazaret corregimiento del municipio de Uribia, departamento de La Guajira, Colombia coincide con el presente estudio, que llegó a obtener ahorros al cambiar el esquema de generación por medio de combustibles fósiles a generación solar. (p. 18)

Van Campen, Guidi, y Best, (2000), consideran que las telecomunicaciones y equipo informático forman una considerable proporción del mercado de tableros fotovoltaicos, pero la mayor parte de esta proporción se destina a las estaciones repetidoras y a otra infraestructura de apoyo general para las redes de telecomunicaciones. La energía fotovoltaica se prefiere con mucho y es la fuente de energía más fiable para la infraestructura de telecomunicaciones en las zonas más remotas. Se puede hacer funcionar conexiones únicas de radio y teléfonos móviles con tableros solares pequeños (de 10 a 50 Watts). La fiabilidad y facilidad de mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos dan mayor seguridad a estos servicios. Se llegó a conclusiones similares, situando a los sistemas fotovoltaicos como la mejor opción financiera y técnica, por su bajo costo de operación y su alta confiabilidad. (p. 30)

Según Hernández (2016), para países con pocos recursos naturales y no siendo productores de petróleo, es necesario aprovechar toda fuente renovable, tanto convencional como no convencional para diversificar la matriz eléctrica. Los proyectos de energías renovables no convencionales no son inmunes al

riesgo, la degradación del ambiente y el cambio climático influyen en el aprovechamiento de estos recursos. Las políticas de protección al ambiente deben estar a la par del aprovechamiento de recursos naturales.

El uso de las energías renovables no convencionales (ERNC) en general tienen muchos beneficios, pero se hace necesario evaluar cada proyecto en sus características particulares para establecer si producen la rentabilidad mínima esperada. La inversión inicial y el costo de instalación de los proyectos de ERNC debe ser profundamente analizado, ya que, aun cuando son más limpios para el ambiente, en general son más costosos que los proyectos convencionales, sin embargo, las características de durabilidad, plazo de contratos, preferencias de generación y beneficios fiscales los hace rentables, además es muy importante para los inversionistas conocer el funcionamiento de las tecnologías ERNC y las reservas del recurso. La apreciación de los criterios técnicos y la estadística de la capacidad del recurso en el tiempo define en gran parte la toma de decisión.

En forma similar se puede notar que es necesaria una inversión inicial correspondiente a costos de instalación, pero a largo plazo, la inversión se vuelve rentable, situación que se aplica plenamente en el presente estudio. También es importante que los inversionistas, en este caso concreto la dirección de la empresa conozca el funcionamiento básico de las tecnologías de energía renovable, su disponibilidad y costos.

Rodríguez y Sarmiento (2015) indican que:

a través de la simulación se valoraron cuatro opciones de sistemas energéticos para la electrificación rural que emplean como fuente principal de generación la energía solar fotovoltaica y eólica, con un requerimiento de respaldo (aporte) diésel menor del 10 %, obteniéndose un sistema de curvas que reflejan los comportamientos de los cuatro de sistemas

energéticos propuestos para los rangos de recursos energéticos y consumo de energía de un número significativo de comunidades, lo que facilita la selección del sistema más adecuado a cada comunidad. Los sistemas híbridos eólicos fotovoltaicos propuestos presentan menores costos equivalentes de energía respecto a los sistemas de generación diésel convencionales. Se procedió a valorar simultáneamente el aspecto ambiental, en el cual se observó la predominante contaminación que se genera con el empleo de motores diésel por lo que en el aspecto económico (costo equivalente de la energía), como en el ambiental, los sistemas híbridos eólicos-fotovoltaicos propuestos son más competitivos para la electrificación rural. (p. 13)

En total concordancia con los autores anteriores se apoya la selección de energías renovables sobre las convencionales (diésel) tomando en cuenta el aspecto económico y el ambiental al disminuir las horas de operación de plantas generadoras con motor diésel y consecuentemente la contaminación ambiental, al disminuir los gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera.

CONCLUSIONES

1. Por medio del simulador HOMER se identificaron cuatro diferentes diseños estables para energizar las áreas de *IT* en fincas del Ingenio Santa Ana. Partiendo el diseño que depende únicamente de una planta eléctrica de combustión interna, un diseño que contempla acumulación de energía por medio de un banco de baterías, y los dos diseños incluyen energía fotovoltaica, uno de ellos con respaldo de planta eléctrica y el otro fotovoltaico puro; se demostró que la adición de energía fotovoltaica al sistema de generación, logra disminuir los costos en relación directa al aumento del porcentaje de energía fotovoltaica instalada y a la disminución de horas de generación con planta eléctrica.
2. Se identificó la rentabilidad de un sistema híbrido fotovoltaico-planta generadora en donde se establece con base al indicador valor actual neto (VAN), extendiendo la vida del proyecto a 15 años. La solución 100 % fotovoltaica representaba un VAN del 3.10 % en comparación con el VAN del sistema 100 % planta eléctrica utilizado en este momento. La recuperación de capital, la basada en el costo de operación de la planta eléctrica es de 0.25 años.
3. Se generaron los lineamientos para el diseño y la operación de sistemas para energización de centros de cómputo rurales en donde estos se deben basar en la conservación y buen uso de la energía eléctrica producida por los sistemas de generación localmente instalados. Al considerar esta energía como un bien escaso, minimizando el desperdicio de ésta, se logra alcanzar las metas de autonomía fotovoltaica, evitando el uso de combustible fósiles, manteniendo de esta manera los costos de operación

bajos y minimizando las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

4. Se estimó la huella ecológica por la disminución de los gases de efecto invernadero producida por los gases de escape de la planta eléctrica con base en datos de EPA que establece en un factor medio de 10,180 gramos de emisiones de CO₂ por galón de diésel consumido. Se puede calcular específicamente para el sistema de generación eléctrica de finca la Giganta, una emisión diaria de CO₂, de 246.76 kg, cantidad que se acercaría a cero al instalar un sistema híbrido fotovoltaico-planta generadora, utilizando esta planta generadora solo para situaciones de emergencia.

5. Se evaluó el impacto en la disminución del consumo de combustible y contaminación por emisión de gases a través de la implementación de un sistema híbrido. Se logró un ahorro por consumo de combustibles de un 94%, con iguales porcentajes en la disminución de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera, logrando un funcionamiento continuo y estable del sistema de cómputo instalado.

RECOMENDACIONES

1. Al utilizar una opción de generación eléctrica que dependa únicamente de energía fotovoltaica, hace que los costos de operación sean bajos y se imprime una huella ecológica mucho menor. La reserva de una pequeña planta eléctrica para usos de emergencia debe ser tomada en consideración.
2. Un control riguroso de los equipos que se conectan al sistema eléctrico, así como la vigilancia del correcto uso de los equipos eléctricos mantendrá la rentabilidad del proyecto según lo diseñado. Apegando la generación y los consumos al valor de diseño del proyecto, se mantendrá el balance energético y se logrará la meta de autonomía.
3. La capacitación al personal que labora en las áreas un centro de cómputo rural, independiente de la red eléctrica, respecto las limitantes energéticas, y la conservación y buen uso de la energía eléctrica es de suma importancia logrando de esta forma minimizar el desperdicio de este bien.
4. Se hace necesario distribuir una guía general sobre normas de uso de los equipos de cómputo, y establecer una rutina de manteniendo y limpieza a los paneles fotovoltaicos instalados.
5. La adquisición de una planta eléctrica de pequeño tamaño, para substituir la planta eléctrica ahora instalada, cuyo tamaño excede por mucho la demanda de los equipos de las áreas de tecnología de la información (IT) es conveniente. Esto mantendrá bajos los costos, en caso surja la

necesidad de energizar con una planta eléctrica las áreas de *IT* en fincas de Ingenio Santa Ana, por causas de emergencia o fuerza mayor.

REFERENCIAS

1. Abur, A., Alvarado, F., Álvarez, C., Cañizares, C., Cidrás, J., Conejo, A., Usaola, J. (2002, p. 51). *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*. Madrid, España: McGraw-Hill InterAmericana de España, S.A. U.
2. Alarcón, D. (5 de noviembre de 2015). *¿Cuál es la importancia de los sistemas híbridos para América Latina y el Caribe?* [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://blogs.iadb.org/energia/es/cual-es-la-importancia-de-los-sistemas-hibridos-para-america-latina-y-el-caribe/>
3. Alonso, M. (2013). La emisión de aerosoles de partículas y gases en motores de diésel. *Seguridad y salud en el trabajo*. (73), p. 14-26.
4. Alvarado, J. (30 de Abril de 2017). *SectorElectricidad*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.sectorelectricidad.com/17597/carga-demanda-y-energia-electrica-conceptos-fundamentales-para-la-distribucion-de-electricidad/>
5. BBVA. (octubre 2020). *Sostenibilidad*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad>
6. CATSA. (mayo 2020). *CATSA*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.catsa.net/>

7. CENGICAÑA. (2012). *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*. Guatemala, Guatemala: Artemis Edinter.
8. Chacón, P. (22 de febrero de 2019). *solarsystem*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://solar.eyr.mx/construccion-de-paneles-solares/>
9. Chen, J., García, C., y Álvarez, C. (1991). *Manual del azúcar de caña: para fabricantes de azúcar de caña y químicos especializados*. México: Limusa.
10. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2021). *Matriz histórica de generación*. CNEE. Recuperado de <https://www.cnee.gob.gt/wp/matriz-historica-de-generacion/>
11. EPA. (octubre de 2021). *Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculadora-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero-calculos-y>
12. FAO. (2020). *Análisis financiero y preparación de recomendaciones*. FAO.ORG. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a0323s/a0323s09.htm>
13. Gálviz, J., y Gutiérrez, R. (2013). *Proyecto para la implementación de un sistema de generación solar fotovoltaica para la población Wayuu en Nazareth corregimiento del municipio de Uribia, departamento de La Guajira* - Colombia: UNAD.

14. González, R. (2007). *Elaboración de la documentación previa a la certificación ISO 9001, del laboratorio de producción de hongo Metarhizium, en Ingenio Santa Ana.* (Tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
15. Hernández, E. (2016). *Decisiones de inversión en proyectos de energía renovable no convencional.* (Tesis de grado). Universidad de El Salvador. El Salvador.
16. ICC. (2021). *Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.* ICC. Recuperado de <https://icc.org.gt/es/icc-3/>
17. Ministerio de Energía y Minas. (2015). *Recurso solar.* MEM. Recuperado de <http://www.mem.gob.gt>
18. Ministerio de Energía y Minas (2020). *Unidad de planeación energético Minero, Ministerio de Energía y Minas.* Guatemala: Autor.
19. Ministerio de Energía y Minas. (2018). *Las energías renovables en la generación eléctrica en Guatemala.* Guatemala: Dirección General de Energía.
20. Moran, J., y Moran, M. (1994). *Meteorology: The atmosphere and the science of weather.* New York: Macmillan College Publishing Co. Recuperado de <https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/EfecInv.htm>

21. Reyes, A., y Osorio, E. (2018). Implementación de un sistema híbrido solar fotovoltaico-diésel en la municipalidad de puerto Lempira, Gracias a Dios, Honduras. *Innovare: Ciencia y Tecnología*, 17 13-35.
22. Rigali, S. (2012). *Integración arquitectónica de sistemas tecnológicos basados en energías renovables en un edificio público*. Argentina: Universidad Internacional de Andalucía Recuperado de <http://hdl.handle.net/10334/1733>
23. Rodríguez, C., y Sarmiento, A. (2015). Competitividad de los sistemas híbridos eólicos-fotovoltaicos para la electrificación rural. *Ingeniería Mecánica*, 18(1), 12-22. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442015000100002&lng=es&tlng=es
24. Tecnalía, L. (2007). *Guía básica de la generación distribuida*. Madrid: Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid. Recuperado de <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/2195>
25. Twenergy. (27 de agosto de 2019). *La demanda eléctrica*. Twenergy. Recuperado de <https://twenergy.com/eficiencia-energetica/como-ahorrar-energia-casa/la-demanda-electrica-953/>
26. Van Campen, B., Guidi, D., y Best, G. (2000). *Energía solar fotovoltaica para la agricultura y desarrollo rural sostenibles*. Guatemala: FAO.

APÉNDICES

Apéndice 1. Matriz de coherencia

EVALUACIÓN DEL IMPACTO EN LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y CONTAMINACIÓN POR EMISIÓN DE GASES MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO QUE ENERGICE LAS ÁREAS DE IT EN FINCAS DEL INGENIO SANTA ANA						
Problema Principal	Preguntas General	Objetivos General	Metodología	Resultados	Conclusiones	Recomendaciones
Se desconoce el impacto en el consumo de combustible y contaminación por emisión de gases al implementar un sistema fotovoltaico-planta generadora	¿Cuál es el consumo de combustible y contaminación por emisión de gases al implementar un sistema fotovoltaico-planta generadora	Evaluar el impacto en la disminución del consumo de combustible y contaminación por emisión de gases mediante la implementación de un sistema híbrido que energice las áreas de IT en fincas del ingenio Santa Ana.	Se realizó un estudio completo de las cargas que se generan día con día en la sección de IT de las instalaciones y situadas en el casco de la finca La Giganta, por la cual se diseñaron los equipos que están en uso diario para determinar las cargas, esto implica revisar computadoras, impresoras, proyectores, equipo de comunicaciones y radio transmisión.	La implementación del mejor sistema híbrido fotovoltaico-planta generadora no demostró ser la mejor opción financiera para el simulador de renovable. Claramente el valor actual neto (VAN) del diseño exclusivamente fotovoltaico es casi un 50% menor del valor actual neto (VAN) del proyecto híbrido con iguales porcentajes en las (Q37,335.41 Q63,5777.11, ver tabla IV, diseños eléctricos aplicables a finca Giganta). La mejor opción financiera es la que presenta el menor valor actual neto. En este caso la opción número 1.	Se evaluó el impacto en la disminución del consumo de combustible y gases a través de la implementación de un sistema híbrido con iguales porcentajes en la disminución de gases de costos, efecto invernadero emitidos a la atmósfera, logrando un funcionamiento continuo y estable del sistema de cómputo instalado.	La adquisición de una planta eléctrica de pequeño tamaño, planta eléctrica ahora instalada, cuyo tamaño excede por mucho la demanda de los equipos de la información (IT) combustibles de un 94%, es conveniente. Esto surge la necesidad de eléctricos a la atmósfera, logrando un funcionamiento continuo y estable del sistema de áreas de IT en fincas de Ingenio Santa Ana, por causas de emergencia o fuerza mayor.
Se desconocen las alternativas existentes para energizar las áreas de IT en fincas de Ingenio Santa Ana	¿Cuáles son las alternativas existentes para energizar las áreas de IT en fincas de Ingenio Santa Ana que disminuyan el consumo de combustible y la contaminación por gases de escape?	Enumerar las alternativas existentes para energizar las áreas de IT en fincas de Ingenio Santa Ana, para disminuir el consumo de combustible y la contaminación por gases de escape.	Revisión documental consultando libros de texto, manuales y documentación para obtener información sobre alternativas para energizar así mismo se analizaron las cargas de eléctricas que se desean abastecer.	Las diferentes alternativas existentes para energizar las áreas de IT en fincas del ingenio Santa Ana son: carga eléctrica, planta generadora, paneles fotovoltaicos	Se enumeraron las diferentes alternativas existentes para energizar las áreas de IT en fincas del Ingenio Santa Ana donde de las cuatro soluciones obtenidas por medio del simulador HOMER, y teniendo como sistema base el utilizado actualmente, que se compone de un generador de energía solar y una huella de combustión interna, se concluyó que la adición de energía fotovoltaica al sistema de generación, logra disminuir los costos en relación directa al aumento del porcentaje de energía fotovoltaica instalada y a la disminución de horas de generación con planta eléctrica.	Se sugiere utilizar una opción que dependa únicamente de energía fotovoltaica, puesto que los costos de operación son los más bajos y e imprime una huella ecológica menor. La reserva de una pequeña planta eléctrica para usos de emergencia debe ser tomada en cuenta.
Se desconoce la rentabilidad de un sistema híbrido fotovoltaico-planta generadora	¿Cuál es la rentabilidad de un sistema híbrido fotovoltaico-planta generadora?	Identificar la rentabilidad de un sistema híbrido fotovoltaico-planta generadora en las áreas de IT sin suministro eléctrico en fincas de Ingenio Santa Ana.	Se comparó el flujo de caja de la instalación actual la cual se tomó con instalación base y su valor actual neto.	Se encontraron tres opciones siendo estas: opción 1, combinación de paneles fotovoltaicos, inversor de corriente y baterías con un valor neto de Q. 37,555.41; Opción 2 combinación de paneles fotovoltaicos, inversor de corriente, baterías y planta eléctrica. El valor actual neto de este diseño es de Q. 63,577.11; Opción 3 Inversor de corriente, baterías y planta eléctrica. El valor actual neto de este diseño es de Q. 251,215.90.	Se identificó la rentabilidad de un sistema híbrido fotovoltaico-planta generadora donde se establece con base al indicador valor actual neto (VAN), extendiendo la vida del proyecto a 15 años. Se concluyó que la solución fotovoltaica presentaba un VAN 3.10% en comparación con sistema 100% planta eléctrica utilizado actualmente. La recuperación de capital, basada en el costo de operación de la planta eléctrica es de 0.25 años.	Se sugiere un control riguroso de los equipos que se conectan al sistema eléctrico, así como la vigilancia del correcto uso de los equipos eléctricos para mantener la rentabilidad del proyecto según lo diseñado es apegando la generación y los consumos al valor de diseño del proyecto, de tal forma que no se permita alterar el balance energético

Continuación apéndice 1.

Secundarios	Específicas	Específicos	
Se desconocen los lineamientos generales para el diseño de sistemas para energización de centros de cómputo rurales, independientes de la red eléctrica nacional	¿Cuáles son los lineamientos generales para el diseño de sistemas para energización de centros de cómputo rurales, independientes de la red eléctrica nacional?	Generar los lineamientos generales para el diseño de sistemas para energización de centros de cómputo rurales, independientes de la red eléctrica nacional.	Lineamientos técnicos: Mantenimiento de conexiones eléctricas, instalación del equipo de cómputo, fuente de energía de respaldo, limpieza de paneles solares, cuidado de energización de centros rurales donde de la red eléctrica libre exposición; cómputo operativos: estos se deben basar en la conservación y buen uso de limitantes personales no autorizadas, la energía eléctrica producida por los sistemas que se logre equipos de televisión, de generación localmente conservación y buen uso de la energía eléctrica. Se sugiere capacitar al personal que labora en las áreas de sistemas para un centro de cómputo independiente de la red eléctrica con respecto a las energéticas, con el fin de la energía eléctrica que se logre conservación y buen uso de la energía eléctrica. Se estimó la huella ecológica por la disminución de los gases de efecto invernadero producidos por los gases de escape de la planta eléctrica emitidos, por el tubo de escape de un motor diésel 10,180 gramos de emisiones distribuir una guía son dióxido de carbono de CO2 por galón de diésel general sobre normas (CO2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), para el sistema de establecer una rutina de mantenimiento y limpieza a los paneles fotovoltaicos y diáfragma de CO2, de 239.43 kg, fotovoltaicos partículas sólidas en forma de hollín. Se hizo necesario calcular específicamente de cómputo, y establecer un sistema de generación eléctrica de finca de mantenimiento y limpieza a los paneles fotovoltaicos y diáfragma de CO2, de 239.43 kg, fotovoltaicos partículas sólidas en forma de hollín. Se hizo necesario calcular específicamente de cómputo, y establecer un sistema de generación eléctrica de finca de mantenimiento y limpieza a los paneles fotovoltaicos y diáfragma de CO2, de 239.43 kg, fotovoltaicos partículas sólidas en forma de hollín. Se hizo necesario calcular específicamente de cómputo, y establecer un sistema de generación eléctrica de finca de mantenimiento y limpieza a los paneles fotovoltaicos y diáfragma de CO2, de 239.43 kg, fotovoltaicos partículas sólidas en forma de hollín. Se hizo necesario calcular específicamente de cómputo, y establecer un sistema de generación eléctrica de finca de mantenimiento y limpieza a los paneles fotovoltaicos y diáfragma de CO2, de 239.43 kg, fotovoltaicos partículas sólidas en forma de hollín.
Se desconoce cual es la huella ecológica al implementar un sistema híbrido fotovoltaico-planta generadora	¿Cuál es la huella ecológica (GEI) producida al implementar un sistema híbrido fotovoltaico-planta generadora?	Estimar la huella ecológica, la disminución de los gases de efecto invernadero al implementar un sistema híbrido fotovoltaico-planta generadora, para energizar las áreas de IT en fincas de Ingenio Santa Ana.	Se midieron las emisiones anuales de CO2 en proyectos

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Formulario de control de operación de generación de energía

Control de generación eléctrica finca _____						
Fecha del reporte _____			Semana del _____ al _____ de 202__			
Control de fallas						
Falla detectada		si	<input type="checkbox"/>	no	<input type="checkbox"/>	
Se reporto a:		_____				
Fecha	<input type="text"/>	Hora	<input type="text"/>			
Descripción de la falla		_____ _____ _____				
Falla resuelta a la fecha		si	<input type="checkbox"/>	no	<input type="checkbox"/>	
Comentario		_____				
Control de limpieza de paneles		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		lu	ma	mie	ju	vi sa
Cargas adicionales		si	<input type="checkbox"/>	no	<input type="checkbox"/>	Watts <input type="text"/>
Cargas removidas		si	<input type="checkbox"/>	no	<input type="checkbox"/>	Watts <input type="text"/>
Comentario		_____				
Generación con planta eléctrica						
Día	hora inicio	<input type="text"/>	hora fin	<input type="text"/>	Causa	<input type="text"/>
Día	hora inicio	<input type="text"/>	hora fin	<input type="text"/>	Causa	<input type="text"/>
Comentarios		_____ _____ _____ _____				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Datos de energía por hora tomados por el personal de la sección eléctrica en finca La Giganta, periodo de zafra, 3 al 7 de mayo 2021 durante la zafra. Datos base para la tabla III y figura 6. Datos en Watts-hora**

Hora	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Promedios
0:00	0	0	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0	0	0
6:00	183	185	185	186	185	1851
7:00	2	1	5	0	7	1632
8:00	164	164	163	163	160	1552
9:00	0	1	4	7	8	1864
10:00	154	155	154	155	155	1863
11:00	7	9	8	0	6	2081
12:00	186	186	186	185	188	2080
13:00	2	2	1	5	0	2081
14:00	186	186	186	186	186	2080
15:00	0	0	5	8	2	1574
16:00	208	208	208	207	208	1832
17:00	3	4	1	3	4	1830
18:00	208	207	208	208	206	1811
19:00	8	2	2	9	9	1812
20:00	157	156	156	158	158	1635
21:00	0	5	8	3	4	1572
22:00	183	182	183	184	182	0
23:00	0	8	3	0	9	0
	182	182	183	183	183	0
	5	4	2	8	1	0
	181	180	181	181	181	0
	1	7	4	2	1	0
	181	180	182	181	180	0
	8	3	0	9	0	0
	163	164	164	163	162	0
	0	4	1	3	7	0
	156	157	157	157	156	0
	8	1	8	4	9	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Datos de energía por hora tomados por el personal de la sección eléctrica en finca La Giganta, periodo de reparación, 14 al 18 de junio 2021. Durante la reparación. Datos base para la tabla III y figura 6. Datos en Watts-hora**

Hora	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Promedios
0:00	0	0	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0	0	0
6:00	0	0	0	0	0	0
7:00	1631	1640	1633	1625	1731	1652.00
8:00	1543	1553	1547	1545	1562	1550.00
9:00	1857	1868	1867	1869	1914	1875.00
10:00	1868	1870	1855	1869	1883	1869.00
11:00	2072	2079	2076	2087	2111	2085.00
12:00	2071	2086	2071	2079	2108	2083.00
13:00	1579	1579	1574	1575	1548	1571.00
14:00	1831	1823	1840	1835	1821	1830.00
15:00	1824	1821	1825	1838	1852	1832.00
16:00	1808	1805	1808	1818	511	1550.00
17:00	1812	1813	1821	1821	508	1555.00
18:00	1633	1628	1633	1629	1242	1553.00
19:00	0	0	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Datos de energía por hora tomados por el personal de la sección eléctrica en finca La Giganta, 17 al 18 de agosto de 2021. Datos base para la tabla IX y figura 10. Datos en Watts-hora**

Hora	Dia 1	Dia 2	Promedios
0:00	0	0	0
1:00	0	0	0
2:00	0	0	0
3:00	0	0	0
4:00	0	0	0
5:00	0	0	0
6:00	0	0	0
7:00	790	792	791.00
8:00	759	745	752.00
9:00	750	752	751.00
10:00	787	791	789.00
11:00	819	809	814.00
12:00	521	535	528.00
13:00	536	518	527.00
14:00	745	763	754.00
15:00	794	788	791.00
16:00	757	741	749.00
17:00	780	798	789.00
18:00	788	792	790.00
19:00	0	0	0
20:00	0	0	0
21:00	0	0	0
22:00	0	0	0
23:00	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Inversor TRACE modelo 2424



Fuente: [Fotografía de Roberto González]. (Escuintla. 2021). Colección particular. Guatemala

Apéndice 7. Paneles solares *Panasonic-Sanyo VBHN325*



Fuente: [Fotografía de Roberto González]. (Escuintla. 2021). Colección particular. Guatemala

Apéndice 8. Planta eléctrica instalada en finca La Giganta



Planta eléctrica Marca	<i>Power Link</i> modelo GMP31C6
Accionada por:	Combustible diésel
Capacidad:	30 kW
Consumo:	7.64 Litros/hora, 2.02 Galones/hora

Fuente: [Fotografía de Roberto González]. (Escuintla. 2021). Colección particular. Guatemala

ANEXOS

Anexo 1. Hoja técnica de batería Trojan modelo 31-AGM



DATA SHEET



MODEL 31-AGM
VOLTAGE 12
MATERIAL Polypropylene
DIMENSIONS Inches (mm)
BATTERY VRLA AGM / Non-Spillable / Maintenance-Free
COLOR Maroon
WATERING No Watering Required 



12V

PRODUCT + PHYSICAL SPECIFICATIONS

BCI Group Size	Type	Voltage	Terminal Type ⁶	Dimensions ⁵ Inches (mm)			Weight Lbs. ⁷ (kg)
				Length	Width	Height ⁸	
31	31-AGM	12	M8/DT	12.80 (325)	6.81 (173)	9.37 (238)	67 (30)

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Cranking Performance		Capacity ⁴ Minutes		Capacity ³ Amp-Hours (mAh)				Energy kWh	Internal Resistance (mΩ)	Short Circuit Current (A)
C.C.A. ⁹ @ 0°F (-18°C)	C.A. ⁵ @ 32°F (0°C)	@ 25 Amps	@ 75 Amps	5-Hr	10-Hr	20-Hr	100-Hr	100-Hr		
600	720	177	–	82	92	100	111	1.33	4.80	2555

CHARGING INSTRUCTIONS

Charger Voltage Settings (at 77°F/25°C)				
System Voltage	12V	24V	36V	48V
Maximum Charge Current (A)	20% of C ₂₀			
Absorption Voltage (2.40 V/cell)	14.40	28.80	43.20	57.60
Float Voltage (2.25 V/cell)	13.50	27.00	40.50	54.00

Do not install or charge batteries in a sealed or non-ventilated compartment. Constant under or overcharging will damage the battery and shorten its life as with any battery.

CHARGING TEMPERATURE COMPENSATION

Add	Subtract
0.005 volt per cell for every 1°C below 25°C 0.0028 volt per cell for every 1°F below 77°F	0.005 volt per cell for every 1°C above 25°C 0.0028 volt per cell for every 1°F above 77°F

OPERATIONAL DATA

Operating Temperature	Self Discharge
-4°F to 122°F (-20°C to 50°C) At temperatures below 32°F (0°C) maintain a state of charge greater than 60%	Less than 3% per month depending on storage temperature conditions

STATE OF CHARGE MEASURE OF OPEN-CIRCUIT VOLTAGE

Percentage Charge	Cell	12 Volt
100	2.14	12.84
75	2.09	12.54
50	2.04	12.24
25	1.99	11.94
0	1.94	11.64

Fuente: Trojan Battery Company, (2021). Hoja de datos. Consultado el 11 de octubre de 2021.

Recuperado de

www.trojanbattery.com/pdf/datasheets/31AGM_Trojan_Data_Sheets.pdf.

Anexo 2. Hoja técnica de inversor Trace modelo DR-2424-120 VAC/60Hz

Specifications of the DR Inverter

Table A-1 Electrical Specifications for the DR Inverter/Charger^a - 120 Vac/60 Hz Models

Model	DR1512	DR2412	DR1524	DR2424	DR3624
DC Input Voltage (nominal) ^c	12.6 Vdc	12.6 Vdc	25.2 Vdc	25.2 Vdc	25.2 Vdc
DC Input Voltage Range	10.8 to 15.5 Vdc	10.8 to 15.5 Vdc	21.6 to 31.0 Vdc	21.6 to 31.0 Vdc	21.6 to 31.0 Vdc
Auto Low Battery Protection enabled	11 V	11 V	22 V	22 V	22 V
DC Charger Rate (Adjustable)	0 to 70 amps	0 to 120 amps	0 to 35 amps	0 to 70 amps	0 to 70 amps
Common Specifications:					
Voltage Regulation (maximum)	± 5%				
Voltage Regulation (Typical)	±2. 5%				
Waveform	modified sine wave				
Load Power Factor (allowed)	0.5 to 1.0 (leading or lagging)				
Adjustable Load Sensing Range	5 watts minimum to 100 watts maximum				
Series Operation	Yes				
Force Air Cooling	Variable speed fan				
Automatic Transfer Relay	30 amps				
Number of Charging Profiles	10				
Three-stage Charging	Yes (float, absorption, bulk)				
Temperature Comp Probe (BTS)	optional				
Remote Control (RC8) ^d	optional				

a.Specifications subject to change without notice.

b.This is the minimum AC current required to obtain full pass-through and maximum battery charging.

c.Product may not meet voltage regulation specifications at other than "Input Nominal" at full-rated load.

d.Also compatible with the RC4.

Fuente: Trace-Xantrex, (2012) *Hoja técnica*. Consultado el 11 de octubre de 2021. Recuperado de www.xantrex.com

Anexo 3. **Hoja técnica de panel fotovoltaico Panasonic-Sanyo modelo VBHN325**

Model No.	VBHN325S47	VBHN330S47
Warranty		
Product Warranty	10 Years	
Power Warranty	25 Years of 86.2% Output Power	
Electrical Data at STC		
Maximum Power (Pmax)	325 Wp	330 Wp
Voltage at Maximum Power (Vmpp)	57.6 V	58 V
Current at Maximum Power (Impp)	5.65 A	5.7 A
Open Circuit Voltage (Voc)	69.6 V	69.7 V
Short Circuit Current (Isc)	6.03 A	6.07 A
Panel Efficiency	19.7 %	19.4 %
Power Tolerance (Positive)	+ 10 %	+ 10 %
<small>Standard Test Conditions (STC): air mass AM 1.5, irradiance 1000W/m², cell temperature 25°C</small>		

Fuente: ENFSolar. (2021) *Panel fotovoltaico*. Consultado el 11 de octubre de 2021.

Recuperado de www.ensolar.com/

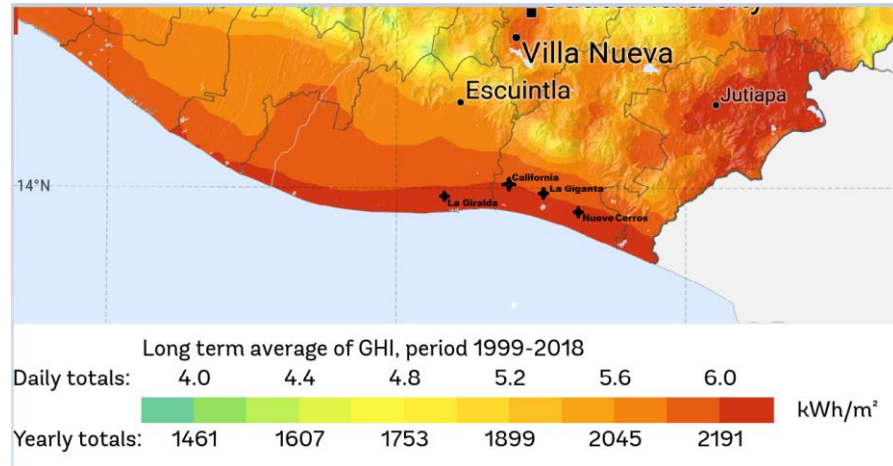
Anexo 4. **Hoja técnica del controlador de carga modelo ML4860**

Parameter	Value
Model	ML4860
System voltage	12V/24V/36V/48V Auto
No-load loss	0.7 W to 1.2W
Battery voltage	9V to 70V
Max. solar input voltage	150V (25°C), 145V (-25°C)
Max. power point voltage range	Battery voltage +2V to 120V
Rated charging current	60A
Rated load current	20A
Max. capacitive load capacity	10000uF
Max. photovoltaic system input power	800W/12V; 1600W/24V; 2400W/36V; 3200W/48V
Conversion efficiency	≤ 98%
MPPT tracking efficiency	> 99%
Temperature compensation factor	-3mv/°C/2V (default)
Operating temperature	-35°C to +45°C
Waterproof level	IP32
Weight	3.6kg
Communication method	RS232 RS485
Altitude	≤ 3000m
Product dimensions	285*205*93mm

Fuente: SolarDepo (2021). *Controlador de carga*. Consultado el 9 de octubre de 2021.

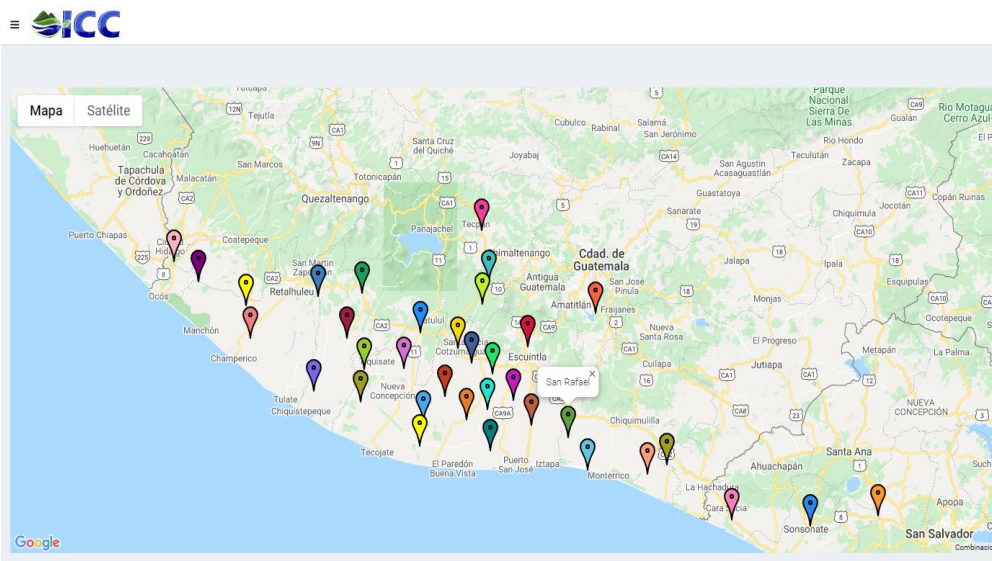
Recuperado de www.solardepo.com

Anexo 5. **Mapa de radiación horizontal y localización de fincas de Ingenio Santa Ana que no están conectadas a la red eléctrica**



Fuente: World Bank Group. (2020). *Potencial fotovoltaico*. Consultado el 4 de octubre de 2021. Recuperado de www.worldbank.org/en/topic/energy/publication/solar-photovoltaic-power-potential-by-country

Anexo 6. **Mapa de la red de estaciones meteorológicas de la red del ICC**



Fuente: Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático. (2020). *Red de estaciones meteorológicas*. Consultado el 6 de octubre de 2021. Recuperado de <https://icc.org.gt/es/red-de-estaciones-meteorologicas-icc/>

