



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA  
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE EMERGENCIA DE ENERGÍA ELÉCTRICA SOLAR  
FOTOVOLTAICO EN LOS SITIOS DE TELECOMUNICACIONES PINARES DE SAN  
CRISTOBAL Y PACHALUM**

**Paulo César Paniagua García**

Asesorado por el M.A. Ing. Josué Miguel Ramírez Lemus

Guatemala, julio de 2022



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA  
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE EMERGENCIA DE ENERGÍA ELÉCTRICA SOLAR  
FOTOVOLTAICO EN LOS SITIOS DE TELECOMUNICACIONES PINARES DE SAN  
CRISTOBAL Y PACHALUM**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**PAULO CÉSAR PANIAGUA GARCÍA**  
ASESORADO POR M.A. ING. JOSUÉ MIGUEL RAMÍREZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, JULIO DE 2022



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

|            |                                      |
|------------|--------------------------------------|
| DECANA     | Ing. 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**

|            |                                    |
|------------|------------------------------------|
| DECANO     | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos    |
| EXAMINADOR | Ing. Julio Rolando Barrios Archila |
| EXAMINADOR | Ing. Armando Gálvez Castillo       |
| EXAMINADOR | Ing. Saúl Cabezas Durán            |



## **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:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA  
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE EMERGENCIA DE ENERGÍA ELÉCTRICA SOLAR  
FOTOVOLTAICO EN LOS SITIOS DE TELECOMUNICACIONES PINARES DE SAN  
CRISTOBAL Y PACHALUM**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 12 de enero de 2022.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'P. Paniagua', with a long horizontal stroke extending to the right.

**Paulo César Paniagua García**



**EEPFI-PP-0012-2022**

Guatemala, 12 de enero de 2022

**Director**

**Armando Alonso Rivera Carrillo**

**Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica**

**Presente.**

**Estimado Ing. Rivera**

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

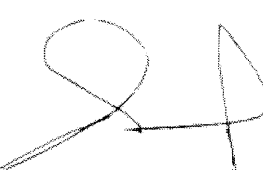
El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE EMERGENCIA DE ENERGÍA ELÉCTRICA SOLAR FOTOVOLTAICO EN LOS SITIOS DE TELECOMUNICACIONES PINARES DE SAN CRISTOBAL Y PACHALUM.**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Gestión y uso eficiente de la energía - Aspectos técnicos, económicos y ambientales en el uso y aprovechamiento de recursos energéticos**, presentado por el estudiante **Paulo César Paniagua García** carné número **200413369**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Energía Y Ambiente.

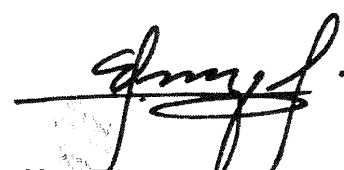
Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Mtro. Josué Miguel Ramírez Lemus  
Asesor(a)

  
Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque  
Coordinador(a) de Maestría

  
Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería




EEP-EIME-0012-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE EMERGENCIA DE ENERGÍA ELÉCTRICA SOLAR FOTOVOLTAICO EN LOS SITIOS DE TELECOMUNICACIONES PINARES DE SAN CRISTOBAL Y PACHALUM.**, presentado por el estudiante universitario **Paulo César Paniagua García**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo Director  
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, enero de 2022

Decanato  
Facultad de Ingeniería  
24189101- 24189102  
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.515.2022

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 Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE EMERGENCIA DE ENERGÍA ELÉCTRICA SOLAR FOTOVOLTAICO EN LOS SITIOS DE TELECOMUNICACIONES PINARES DE SAN CRISTOBAL Y PACHALUM**, presentado por: **Paulo César Paniagua García**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada  
Decana

Guatemala, julio de 2022

AACE/gaoc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por haberme permitido tener la experiencia de la vida, nutrirme de conocimientos y ser un profesional.

### **A mi madre**

Luz Floridalma García Alvisurez, por haberme traído al mundo y ser una guía, gracias a su esfuerzo y comprensión tengo la oportunidad de convertirme en un profesional, estoy eternamente agradecido.

### **A mi padre**

Cesar Augusto Paniagua Hernández (q. d. e. p.), por su apoyo y consejos.

### **Mis hermanos**

José y David Paniagua, por su apoyo, consejos y compañía durante mi vida.



## AGRADECIMIENTOS A:

|                                               |                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b> | Por ser la <i>alma mater</i> que me permitió adquirir conocimientos y experiencias en el área académica.                                   |
| <b>Facultad de Ingeniería</b>                 | Por proporcionarme los conocimientos para desarrollarme profesionalmente y permitirme estar en sus aulas en los años que curse la carrera. |
| <b>Mis amigos y familia</b>                   | Por haberme acompañado y ayudado durante la carrera.                                                                                       |
| <b>Mi asesor</b>                              | M.A. Ing. Josué Miguel Ramírez Lemus, por haberme guiado durante el trabajo de graduación.                                                 |
| <b>Novia</b>                                  | Vicky Hernández, te agradezco haberme animado a concluir mis estudios y ser un apoyo en mi vida.                                           |



## ÍNDICE GENERAL

|                                                    |      |
|----------------------------------------------------|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....                      | V    |
| LISTA DE SIMBOLOS .....                            | VIII |
| GLOSARIO .....                                     | IX   |
| RESUMEN .....                                      | XI   |
| <br>                                               |      |
| 1. INTRODUCCIÓN .....                              | 1    |
| <br>                                               |      |
| 2. ANTECEDENTES .....                              | 5    |
| <br>                                               |      |
| 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                | 11   |
| 3.1. Descripción del problema .....                | 11   |
| 3.2. Pregunta principal.....                       | 13   |
| 3.3. Preguntas auxiliares .....                    | 13   |
| 3.4. Delimitación del problema .....               | 13   |
| <br>                                               |      |
| 4. JUSTIFICACIÓN .....                             | 15   |
| <br>                                               |      |
| 5. OBJETIVOS .....                                 | 19   |
| 5.1. General.....                                  | 19   |
| 5.2. Específicos .....                             | 19   |
| <br>                                               |      |
| 6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN..... | 21   |
| <br>                                               |      |
| 7. MARCO TEÓRICO.....                              | 25   |

|        |                                                                 |    |
|--------|-----------------------------------------------------------------|----|
| 7.1.   | Fuentes alimentación en nodos de telecomunicaciones .....       | 25 |
| 7.1.1. | Fuentes de alimentación primarias.....                          | 26 |
| 7.1.2. | Fuentes de alimentación secundarias .....                       | 26 |
| 7.2.   | Grupos electrógenos .....                                       | 27 |
| 7.3.   | Clasificación de los grupos electrógenos .....                  | 28 |
| 7.3.1. | Potencia auxiliar de emergencia STP (STANDBY) .                 | 28 |
| 7.3.2. | Potencia principal por tiempo limitado (LTP) .....              | 30 |
| 7.3.3. | Potencia principal de tiempo ilimitado (PRP).....               | 31 |
| 7.3.4. | Potencia operativa continua (COP) .....                         | 32 |
| 7.4.   | Luz solar.....                                                  | 33 |
| 7.4.1. | Irradiancia e irradiación .....                                 | 34 |
| 7.4.2. | El valor estándar de referencia hora solar pico<br>(HSP).....   | 35 |
| 7.4.3. | Potencial solar en Guatemala .....                              | 36 |
| 7.5.   | Paneles solares fotovoltaicos.....                              | 36 |
| 7.5.1. | Características básicas de un módulo fotovoltaico..             | 37 |
| 7.5.2. | Orientación del panel solar .....                               | 39 |
| 7.5.3. | Tipos de celdas solares.....                                    | 41 |
| 7.6.   | Configuraciones de sistemas solares fotovoltaicos .....         | 41 |
| 7.6.1. | Sistema solar fotovoltaico aislado .....                        | 42 |
| 7.6.2. | Sistema solar fotovoltaico conectado a la red<br>eléctrica..... | 43 |
| 7.6.3. | Sistema solar fotovoltaico híbrido.....                         | 44 |
| 7.7.   | Elementos de un sistema solar fotovoltaico .....                | 45 |
| 7.7.1. | Baterías .....                                                  | 45 |
| 7.7.2. | Regulador de carga.....                                         | 46 |
| 7.7.3. | Inversores (Convertidores CC/CA).....                           | 46 |
| 7.8.   | Conceptos eléctricos .....                                      | 47 |
| 7.8.1. | Potencia eléctrica .....                                        | 47 |

|        |                                                                          |    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.8.2. | Energía eléctrica.....                                                   | 47 |
| 7.8.3. | Eficiencia .....                                                         | 48 |
| 8.     | PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....                                  | 49 |
| 9.     | METODOLOGÍA.....                                                         | 53 |
| 9.1.   | Características del estudio .....                                        | 53 |
| 9.2.   | Unidades de análisis .....                                               | 53 |
| 9.2.1. | Variables.....                                                           | 53 |
| 9.3.   | Fases del estudio .....                                                  | 55 |
| 9.3.1. | Fase 1: Exploración bibliográfica .....                                  | 55 |
| 9.3.2. | Fase 2: Medición y recopilación de datos .....                           | 56 |
| 9.3.3. | Fase 3: Dimensionamiento del sistema solar<br>fotovoltaico.....          | 58 |
| 9.3.4. | Fase 4: Beneficios ambientales .....                                     | 60 |
| 9.3.5. | Fase 5: Viabilidad económica .....                                       | 61 |
| 9.3.6. | Fase 6: Dimensionamiento del banco de baterías..                         | 61 |
| 9.3.7. | Fase 7: Discusión de resultados, conclusiones y<br>recomendaciones ..... | 61 |
| 10.    | TÉCNICAS DE ANALISIS DE INFORMACIÓN.....                                 | 63 |
| 11.    | CRONOGRAMA.....                                                          | 65 |
| 12.    | FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....                                           | 67 |
| 13.    | REFERENCIAS.....                                                         | 69 |



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

|     |                                                                                                       |    |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.  | Sistema de energía AC y grupo electrógeno como fuente secundaria para nodo de telecomunicaciones..... | 25 |
| 2.  | Grupo electrógeno abierto.....                                                                        | 28 |
| 3.  | Potencia auxiliar de emergencia (Standby) .....                                                       | 29 |
| 4.  | Potencia principal por tiempo limitado (LTP) .....                                                    | 30 |
| 5.  | Potencia principal de tiempo ilimitado (PRP) .....                                                    | 32 |
| 6.  | Potencia operativa continua (COP) .....                                                               | 33 |
| 7.  | Radiación solar difusa, directa y global .....                                                        | 35 |
| 8.  | Curvas características de una celda solar.....                                                        | 38 |
| 9.  | Trayectoria del sol en junio y diciembre .....                                                        | 40 |
| 10. | Inclinación y orientación de un captador solar .....                                                  | 40 |
| 11. | Sistema solar fotovoltaico aislado. ....                                                              | 42 |
| 12. | Instalación básica FV conectado a la red.....                                                         | 43 |
| 13. | Sistema híbrido conexión en paralelo con acoplamiento c.a.....                                        | 44 |
| 14. | Monitor de energía Eyedro.....                                                                        | 57 |
| 15. | Diagrama de conexiones de un analizador de energía. ....                                              | 58 |
| 16. | Promedio histórico de radiación global.....                                                           | 59 |
| 17. | Cronograma de actividades y fases de la investigación.....                                            | 65 |

### TABLAS

|     |                                                 |    |
|-----|-------------------------------------------------|----|
| I.  | Tipos de células de silicio cristalino.....     | 41 |
| II. | Características de baterías convencionales..... | 45 |

|      |                                                                |    |
|------|----------------------------------------------------------------|----|
| III. | Matriz de conceptualización.....                               | 54 |
| IV.  | Registro del consumo de energía de los equipos en placa.....   | 56 |
| V.   | Tiempo de operación de grupos electrógenos de emergencia ..... | 60 |
| VI.  | Disponibilidad del recurso.....                                | 67 |
| VII. | Presupuesto.....                                               | 67 |

## LISTA DE SIMBOLOS

| Símbolo | Significado          |
|---------|----------------------|
| \$      | Dólar estadounidense |
| H       | Horas                |
| =       | Igual                |
| kW      | Kilovatio            |
| Kwh     | Kilovatio-hora       |
| >       | Mayor que            |
| <       | Menor que            |
| m       | Metro                |
| %       | Porcentaje           |
| W       | Vatio                |



## GLOSARIO

|                         |                                                                                                                          |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>COP</b>              | Potencia operativa continua.                                                                                             |
| <b>GEI</b>              | Gases de efecto invernadero.                                                                                             |
| <b>HSP</b>              | Hora solar pico.                                                                                                         |
| <b>LTP</b>              | Potencia principal de tiempo limitado.                                                                                   |
| <b>Potencia STANDBY</b> | Suministro de energía de emergencia durante un periodo de tiempo limitado en un corte de energía de la fuente principal. |
| <b>PRP</b>              | Potencia principal de tiempo ilimitado.                                                                                  |
| <b>PVGis</b>            | <i>Photovoltaic Geographical Information System</i>                                                                      |
| <b>STP</b>              | Potencia auxiliar de emergencia.                                                                                         |
| <b>TIR</b>              | Tasa interna de retorno.                                                                                                 |
| <b>VAN</b>              | Valor actual neto.                                                                                                       |
| <b>VRLA</b>             | <i>Valve Regulated Lead Acid.</i>                                                                                        |

.

## **RESUMEN**

En el contexto mundial se impulsa que las empresas en sus procesos reduzcan o tengan neutralidad con su huella de carbono, para reducir su contribución al cambio climático. Los proveedores de servicios de telecomunicaciones nacionales deben buscar alternativas para reducir la contaminación que generan en sus operaciones

Por esta razón este estudio busca determinar la factibilidad técnica y económica de la implementación de un sistema solar fotovoltaico de emergencia en sitios de telecomunicaciones, esto con el fin de cambiar los grupos electrógenos de combustión interna. Para ello, se calcularán los beneficios ambientales que se obtienen al sustituir los grupos electrógenos del tipo potencia auxiliar de emergencia y potencia principal de tiempo limitado que son los que habitualmente están instalados en sitios de telecomunicaciones como celdas y unidades remotas.

Asimismo, se determinará que tecnología de bancos de baterías es la más adecuada para la implementación de un sistema solar fotovoltaico de emergencia en un sitio de telecomunicaciones y se ampliará a nivel nacional las investigaciones sobre la utilización de sistemas solares fotovoltaico en aplicaciones industriales.



## **1. INTRODUCCIÓN**

Los sistemas secundarios de emergencia de energía eléctrica en sitios de telecomunicaciones tienen una gran importancia, estos garantizan la continuidad del suministro de energía hacia los equipos de telecomunicaciones. En caso de un corte del suministro de la red eléctrica comercial el primer sistema de distribución de energía de respaldo son los bancos de baterías; si no se restablece el servicio de energía eléctrica entra a alimentar al sistema de distribución un grupo electrógeno.

En la actualidad los sistemas de emergencia de energía eléctrica tienen como fuente principal de energía a los grupos electrógenos, estos son poco eficientes, generan gases de efecto invernadero, desechos sólidos y contaminación auditiva. A nivel nacional no hay estudios enfocados en sustituir a los grupos electrógenos como la principal fuente de energía eléctrica para sistemas de emergencia.

En la actualidad hay una tendencia a tener sistemas de generación de energía renovables, que sean amigables con el medio ambiente y el entorno. El estudio pretende determinar si es factible de forma técnica y económica la utilización de un sistema de emergencia fotovoltaico en sustitución de los grupos electrógenos de potencia auxiliar de emergencia (STP) y potencia principal de tiempo limitado (LTP) en los sitios de telecomunicaciones pinares de San Cristóbal y Pachalum. Además, el estudio identificará en qué condiciones el sistema fotovoltaico puede reemplazar al grupo electrógeno, determinará qué tecnología de bancos de baterías se debe instalar en un sistema de respaldo de energía eléctrica utilizando paneles solares fotovoltaicos y por último se realizará

la estimación del beneficio ambiental si se cambian los grupos electrógenos por sistemas de generación fotovoltaicos.

Para realizar la investigación se obtendrán los datos de consumo de energía eléctrica en los sitios de telecomunicaciones pinares de San Cristóbal y Pachalum. Se realizará una auditoría energética donde se obtendrá la potencia nominal de cada equipo, se registrará el comportamiento de la demanda con un monitor de energía y se obtendrá el consumo de energía promedio mensual con el histórico de la facturación.

Se utilizará La ubicación exacta de cada sitio, se obtendrá la irradiación global solar y el ángulo óptimo de orientación de los módulos solares fotovoltaicos. Con los datos obtenidos se realizarán los cálculos para dimensionar el sistema solar fotovoltaico, siempre teniendo en consideración las necesidades energéticas del sitio de telecomunicaciones en estudio.

Utilizando los conceptos de TIR y el VAN se determinará si es económicamente viable la implementación de un sistema de respaldo utilizando paneles solares y bancos de baterías. Se contabilizará los GEI y desechos sólidos generados por el grupo electrógeno y se realizará una comparación por la contaminación generada por el sistema solar fotovoltaico.

El estudio se realiza con la visión de fomentar la implementación de energías renovables y reducir la contaminación generada por los grupos electrógenos de emergencia. El estudio se realizará con financiamiento propio, los permisos de acceso a los sitios en estudio están autorizados por el encargado del área, las mediciones las realizara el investigador con equipo especializado.

En el capítulo uno se realizará una revisión bibliográfica sobre los fundamentos teóricos para la realización de la investigación. Se aborda temas como: sistemas de emergencia de energía eléctrica en telecomunicaciones, aplicaciones y tipos de grupos electrógenos, sistemas solares fotovoltaicos, configuraciones de sistemas solares fotovoltaicos y temas que sean pertinentes para la realización de la investigación.

En el capítulo dos se recolectarán datos para la realización de la investigación. Con un monitor de energía se registrará el comportamiento de la demanda durante las 24 horas por 7 días, se realizará una auditoría de las cargas en el sitio de telecomunicaciones y se determinará el promedio de consumo de energía eléctrica mensual con el histórico de facturación; la radiación solar del sitio en estudio se obtendrá con los históricos de página web como la de PVGIS, se dimensionará el sistema solar fotovoltaico que sea equivalente a un grupo electrógeno de emergencia del tipo potencia auxiliar de emergencia (STP) y potencia principal de tiempo limitado (LTP).

En el capítulo tres se analizarán los resultados de la viabilidad de la utilización de sistemas de emergencia solar fotovoltaica, la tecnología y especificaciones del banco de baterías a utilizar para este tipo de aplicación y los beneficios ambientales asociados a una futura implementación de un sistema solar fotovoltaico de emergencia. Al final se darán conclusiones y recomendaciones del estudio



## 2. ANTECEDENTES

A continuación, se presentan antecedentes de la implementación de sistemas solares fotovoltaicos, beneficios ambientales y operación de bancos de baterías:

En el artículo *Operational Characteristics of VRLA Batteries Configured in Parallel Strings* (Cole, Schmitt , y Szymborski, 1998):

Se enfocan en proporcionar los datos característicos del funcionamiento normal de las baterías VRLA que son las que se utilizan con más frecuencia en la industria de las telecomunicaciones, para realizar las pruebas conectan los bancos de baterías en paralelo bajo diferentes condiciones de carga y descarga.

Realizaron pruebas con baterías de diferente dimensiones, desgaste y capacidad nominal. De las pruebas relajadas concluyeron que la práctica de operar baterías en paralelo puede ser una forma eficaz de aumentar la capacidad de respaldo en respuesta al aumento de las demandas de las cargas. A pesar de que se utilizaron cables con diferente resistencia las baterías en paralelo dividen la corriente de forma uniforme tanto en la carga como en la descarga en proporción a su capacidad hasta cierto rango de operación.

Los datos que presentados en el artículo muestran que los bancos en paralelo operan satisfactoriamente en una amplia gama de condiciones de carga y descarga. En conexiones de baterías en paralelo se distribuye la corriente en la carga y descarga de manera uniforme a la capacidad disponible en cada banco.

En la tesis de *Evaluación técnica y económica de la implementación de sistemas fotovoltaicos para la electrificación de radio bases remotas de CNT* (Ortiz y Puma , 2018):

Realizaron la evaluación técnica y económica para la electrificación de cuatro radios bases remotas en el Ecuador. Evaluaron tres casos: sistemas de respaldo con paneles solares fotovoltaicos, sistema de respaldo con un grupo electrógeno diésel y por último un sistema de distribución híbrido; calcularon el precio de generación de energía eléctrica USD/KWh.

Concluyeron que es viable reemplazar a los grupos electrógenos por sistemas fotovoltaicos, teniendo en consideración que los sitios que se estudiaron tienen como fuente principal a la empresa distribuidora de energía y un sistema de respaldo con bancos de baterías flotante que alimenta a los equipos de telecomunicaciones en caso de cortes de energía. El costo de generación de energía es menor en el sistema solar fotovoltaico en comparación a la generación realizada por el grupo electrógeno, mientras mayor sea el costo por traslado de combustible se hace más rentable el sistema solar fotovoltaico.

En el artículo *Comparative Analysis of Solar-Wind Hybrid System with Diesel Generator System in Powering Remote Telecom Towers of Nepal using HOMER* (Shree, Jagan, y Shree, 2014):

En Nepal el suministro de electricidad es errático y no está disponible durante todo el día, los generadores diésel han sido la elección como sistemas de alimentación primaria para los operadores de telecomunicaciones a pesar de su mayor operatividad, gasto y huella de carbono. El estudio propone la comparación de un grupo electrógeno con baterías y un sistema híbrido solar-eólico; por antecedentes en otros países utilizaron el programa *HOMER*, este

puede realizar el balance energético y cálculos para cada configuración del sistema que se consideran importantes.

Luego determinaron una configuración factible, es decir, si puede satisfacer la demanda eléctrica bajo condiciones específicas, y estimar el costo de instalar y operar el sistema durante la vida útil del proyecto como solución optimizada. Utilizaron los siguientes condicionantes para el estudio, cargas de telecomunicaciones de 15 kWh / día, radiación solar fija 5.75kWh / m<sup>2</sup> / día, velocidad del viento (5,01 m / s) y precio diésel \$ 1.1 / litro.

Concluyeron que el grupo electrógeno tiene un enorme costo operativo de \$ 15,128/ año, con costo de energía de \$ 3.282 / kWh, mientras que el sistema híbrido solar-eólico tiene un costo operativo de \$ 423/año, con costo de energía de \$ 0.326 / kWh. La implementación de un grupo electrógeno con respaldo de bancos de baterías tiene un costo de \$ 142,795, en comparación un sistema híbrido fotovoltaico- eólico tiene un costo menor de \$ 12,433. Con la implementación de un sistema solar-eólico en sustitución de los grupos electrógenos, tendrán beneficios ambientales como la no emisión de 19,52 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> por año, según el análisis financiero puede ser un buen negocio para los operadores de telecomunicaciones la implementación de sistemas híbridos solar- eólico.

En la tesis *Análisis de sistemas híbridos para el suministro de energía eléctrica en equipos de telecomunicación de bajo consumo*. (Tagüite, 2020):

Realiza una investigación de carácter teórico, propone la utilización de sistemas híbridos para la alimentación de radio bases, para la investigación propone que el sistema que alimente a las radio bases sea de 16 KW, en sitios poco accesibles donde el servicio de energía eléctrica no es continuo, y en

lugares donde no se cuenta con el servicio de energía eléctrica propone potencias de 3.5 KW, además evalúa los costos de implementación y operativos bajo el supuesto que el sistema no estará funcionando más de 12 años.

En la evaluación económica concluye que el costo asociado a la implementación de un sistema híbrido se recupera antes de 12 años, con el sistema híbrido se estima los beneficios ambientales con la eliminación de 47.2 toneladas de CO<sub>2</sub> anuales.

En la publicación del *Estudio de la viabilidad técnica y económica de un sistema de suministro fotovoltaico con respaldo en la red eléctrica en la empresa El Chalán S.A.C.* (Uriol , 2020) :

En el año que realizó el estudio no existía el marco jurídico para la utilización de medidores bidireccionales para tener en consideración la venta de los excedentes de energía eléctrica generada. Para definir el perfil de carga utilizó los históricos de facturación de la empresa El Chalán, determinó que la demanda no es uniforme, debido a que en verano sus productos tienen mayor demanda por la naturaleza del negocio, la demanda mensual promedio mínima es de 8792.95 KWh en junio y máxima de 29,934.60 KWh en enero.

El estudio propone que la mejor ubicación para instalar los paneles solares sea en el techo del edificio. Para determinar el valor de la radiación solar promedio se utilizó un *software* especializado, el cual tiene registros de la radiación solar a nivel mundial, Ingreso los datos del perfil de consumo en el *software*, por medio de iteraciones y las condiciones del estudio el *software* determinó como óptimo la utilización de 78 paneles monocristalinos de 400 Wp, este número de paneles es para no generar excedentes de energía e inyectarlos a la red sin recibir remuneración.

Concluyo que el proyecto es viable económicamente, el retorno de la inversión se da a los 14.06 años con un VPN positivo de 14,249 dólares, quedando pendiente la medición de un factor subjetivo como mejorar la imagen de la empresa por la adopción de energía renovable y el impacto que causa ese factor en las ventas. También resulta viable el proyecto con un apalancamiento financiero a 12 años, con el análisis económico da un valor ligeramente menor en el VPN, pero en la TIR es muy superior, lo que da mayor factibilidad ante tasas de interés cambiantes y posibles problemas económicos.



### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **3.1. Descripción del problema**

En la actualidad se busca reducir el consumo de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica, para esto se impulsa a nivel mundial la utilización de energías renovables. “La energía es el factor que contribuye principalmente al cambio climático, y representa alrededor del 60 % de todas las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero” (Organización de las Naciones Unidas, 2015, p.1). La Agencia Internacional de Energía (AIE) estima que en el año 2018 se generaron a nivel mundial por producción de electricidad y calor 13978Mt de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). (International Energy Agency, 2021)

En Guatemala la generación solar representa el 2 % aproximadamente de la matriz de generación de energía eléctrica; este dato indica que no se aprovecha el potencial solar para generar energía eléctrica. “El valor promedio anual de radiación solar global para el país es de 5.3KWh/m<sup>2</sup>/día” (Instituto de Investigación y Proyección sobre Ciencia y Tecnología de la Universidad Rafael Landívar, 2018, p.108).

En el contexto mundial se impulsa que las empresas en sus procesos reduzcan o tengan neutralidad con su huella de carbono, para reducir su contribución al cambio climático. Los proveedores de servicios de telecomunicaciones nacionales deben buscar alternativas para reducir la contaminación que generan en sus operaciones.

El proveedor de servicios de telecomunicaciones debe garantizar la continuidad de todos los servicios que presta, para esto cuenta en sus instalaciones con sistemas de alimentación de energía eléctrica primarios y secundarios (emergencia), estos sistemas garantizan un suministro de energía eléctrica constante y sin interrupciones. La fuente de alimentación primaria generalmente la suministra las distribuidoras locales de energía eléctrica. Las fuentes de energía secundarias son grupos electrógenos de combustión interna, estos pueden ser de diésel, gas natural o propano.

Los grupos electrógenos son básicamente motores de combustión interna acoplados a un generador eléctrico, estos durante su funcionamiento generan gases de efecto invernadero y sustancias tóxicas, tales como: óxidos de nitrógeno, hollín, monóxido de carbono, hidrocarburos, compuestos de azufre y plomo. Las emisiones de gases de efecto invernadero tiene consecuencias directas sobre la atmósfera, el aire que respiramos, agua, fauna y vegetación del entorno (Leizán, Cervantes, Cisnero, Medina, y Melchor, 2008).

El proveedor de servicios de telecomunicaciones debe evaluar alternativas para mitigar los daños ambientales ocasionados por los grupos electrógenos de emergencia en sitios de telecomunicación y evaluar la utilización de energías renovables que son tecnologías amigables con el medio ambiente, una alternativa puede ser la energía solar fotovoltaica.

De lo anterior surgen las siguientes preguntas que se buscan resolver en este estudio:

### **3.2. Pregunta principal**

¿Sera factible técnica-económicamente implementar un sistema de emergencia de energía eléctrica solar fotovoltaico en los sitios de telecomunicaciones Pinares de San Cristóbal y Pachalum?

### **3.3. Preguntas auxiliares**

¿En qué condiciones el sistema fotovoltaico puede reemplazar al grupo electrógeno en los sitios de telecomunicaciones Pinares de San Cristóbal y Pachalum?

¿Qué tecnología de bancos de baterías se debe instalar en un sistema de emergencia de energía eléctrica solar fotovoltaico en los sitios de telecomunicaciones Pinares de San Cristóbal y Pachalum?

¿Cuál es el beneficio ambiental que se obtiene al cambiar los grupos electrógenos de emergencia por sistemas de generación solar fotovoltaicos en los sitios de telecomunicaciones Pinares de San Cristóbal y Pachalum?

### **3.4. Delimitación del problema**

Los proveedores de servicios de telecomunicaciones de Guatemala en sus nodos actualmente cuentan con sistemas de emergencia de energía eléctrica, los sistemas de emergencia están compuestos por grupos electrógenos del tipo potencia auxiliar de emergencia (STP) el cual se diseña para brindar un respaldo de operación máxima de 200 horas anuales y los grupos electrógenos del tipo potencia principal de tiempo limitado (LTP) que están diseñados para operar de 200 horas a 500 horas anuales. Los grupos electrógenos generan GEI), residuos

tóxicos y contaminación auditiva, además de los costos asociados al mantenimiento y transporte del combustible hasta el sitio de comunicaciones. El estudio se realizará en los sitios de telecomunicaciones Pinares de San Cristóbal y Pachalum. Se busca determinar la viabilidad de sustituir a los grupos electrógenos del tipo STP y LTP por un sistema solar fotovoltaico que garantice el tiempo de respaldo de los grupos electrógenos.

## **4. JUSTIFICACIÓN**

La realización de este estudio se fundamenta en las líneas de investigación gestión y uso eficiente de la energía y energías renovables, esto dentro de la maestría de energía y ambiente. Este trabajo hace énfasis en temas como diseño de proyectos solares, aspectos técnicos, económicos y ambientales en el uso y aprovechamiento de los recursos energéticos.

En la actualidad los sistemas de emergencia de energía eléctrica en nodos de telecomunicaciones son grupos electrógenos, estos sistemas no son eficientes ya que los motores de combustión interna en el mejor de los casos tienen eficiencia en el orden del 45 %, estos equipos generan gases de efecto invernadero, contaminación auditiva y “desechos tóxicos como: óxidos de nitrógeno, hollín, monóxido de carbono, hidrocarburos, compuestos de azufre y plomo” (Leizán et al., 2008, p.60). Además, hay que tener en cuenta los potenciales daños ambientales que se podrían tener por derrames de combustible en el transporte y trasiego hacia el nodo de telecomunicaciones.

La contaminación que generan los grupos electrógenos tiene consecuencias de forma directa sobre la atmosfera, el aire que respiramos, agua, fauna, vegetación y la población de la comunidad donde están instalados. Por los motivos expuestos es importante tener estudios que propongan alternativas de sistemas de generación de energía eléctrica de emergencia que sean menos contaminantes.

El estudio determinara la factibilidad técnica y económica de la implementación de un sistema solar fotovoltaico de emergencia en sitios de

telecomunicaciones, esto con el fin de cambiar los grupos electrógenos de combustión interna, se calcularán los beneficios ambientales que se obtienen al sustituir los grupos electrógenos del tipo potencia auxiliar de emergencia y potencia principal de tiempo limitado que son los que habitualmente están instalados en sitios de telecomunicaciones como celdas y unidades remotas.

Se determinará que tecnología de bancos de baterías es la más adecuada para la implementación de un sistema solar fotovoltaico de emergencia en un sitio de telecomunicaciones y se ampliara a nivel nacional las investigaciones sobre la utilización de sistemas solares fotovoltaico en aplicaciones industriales.

La realización de esta investigación tiene relevancia social, beneficiará a la población en general y los ecosistemas del área, ya que se propone la sustitución de los grupos electrógenos de emergencia por sistemas solares fotovoltaicos, con lo que se podría reducir los gases de efecto invernadero, residuos tóxicos y contaminación auditiva generada por los grupos electrógenos de emergencia, además la imagen del proveedor de servicios de telecomunicaciones se fortalece por promover la utilización de energías renovables que son menos contaminantes en comparación con los grupos electrógenos.

El estudio propuesto es pertinente en el ámbito de la maestría, ya que propone la implementación de un sistema solar fotovoltaico de emergencia, actualmente no hay investigaciones a nivel nacional que se enfoquen en sustituir los grupos electrógenos de emergencia que de forma general son fuentes de energía eléctrica secundarias. Los grupos electrógenos son utilizados de forma habitual como sistemas de respaldo en aplicaciones como hospitales, industrias y otras instituciones que requieren del servicio de energía eléctrica sin

interrupciones; esto hace necesario el estudio de fuentes alternativas de emergencia que sean menos contaminantes y amigables con el medio ambiente.



## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Determinar la factibilidad técnica-económica de un sistema de emergencia de energía eléctrica solar fotovoltaico en los sitios de telecomunicaciones Pinares de San Cristóbal y Pachalum.

### **5.2. Específicos**

- Identificar en qué condiciones el sistema fotovoltaico puede reemplazar al grupo electrógeno de emergencia en los sitios de telecomunicaciones Pinares de San Cristóbal y Pachalum.
- Establecer qué tecnología de bancos de baterías se debe instalar en un sistema de respaldo de energía eléctrica utilizando paneles solares fotovoltaicos en los sitios de telecomunicaciones Pinares de San Cristóbal y Pachalum.
- Estimar el beneficio ambiental si se cambian los grupos electrógenos de emergencia por sistemas de generación fotovoltaicos en los sitios de telecomunicaciones Pinares de San Cristóbal y Pachalum.



## **6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN**

Los proveedores de servicios de telecomunicaciones deben garantizar la continuidad de los servicios que brindan, en la actualidad estos servicios son de alta relevancia en diversos ámbitos como los de seguridad, laborales, económicos, académicos, entre otros. Para esto es necesario un suministro de energía eléctrica constante y sin interrupciones hacia los diferentes equipos que existen e los nodos de telecomunicaciones. Para mantener el suministro constante de energía eléctrica hacia los equipos de telecomunicaciones se utilizan sistemas principales de energía eléctrica con el respaldo de sistemas secundarios de emergencia. Los sistemas de emergencia están compuestos por grupos electrógenos del tipo potencia auxiliar de emergencia (STP) y potencia principal de tiempo limitado (LTP). Los grupos electrógenos cuentan con motores de combustión interna, estos son contaminantes ya que tienen baja eficiencia, generan GEI, desechos sólidos y contaminación auditiva.

El trabajo pretende proponer un sistema solar fotovoltaico de emergencia en sitios de telecomunicaciones, determinar si es viable técnica y económicamente la sustitución de los grupos electrógenos de emergencia del tipo potencia auxiliar de emergencia (STP) y potencia principal de tiempo limitado (LTP). Definir que tecnología de bancos de baterías es el ideal para un sistema solar fotovoltaico de emergencia en sitios de telecomunicaciones. Y determinar los beneficios ambientales que se generarían si se sustituyeran los grupos electrógenos de emergencia por sistemas solares fotovoltaicos.

El estudio se realizará en los sitios de telecomunicaciones Pinares de San Cristóbal y Pachalum. Se realizará una auditoría energética de los sitios de

telecomunicaciones en estudio, anotando los valores nominales como potencia (W), tensión (V) y corriente (A). Se revisará los históricos del consumo de energía y se determinará el perfil de carga con un monitor de energía, con estos datos se podrá determinar cómo se comporta el consumo de energía de forma precisa.

Se dimensionará un sistema solar fotovoltaico de emergencia equivalente a los grupos electrógenos STP y LTP en cada sitio donde se realiza el estudio de perfil de carga, para dimensionar el sistema solar fotovoltaico se necesita la irradiancia solar promedio en el sitio de estudio y los parámetros de funcionamiento del panel solar, banco de baterías, inversor, y perfil de carga de cada sitio en estudio. Los parámetros de funcionamiento de los elementos del sistema solar fotovoltaico los proporciona el fabricante, se utilizará la radiación solar promedio de páginas especializadas. Para determinar qué tipo y tecnología de bancos de baterías se debe utilizar en esta aplicación, se revisará el estado del arte y estudios previos para determinar el más adecuado para un sistema solar fotovoltaico de emergencia.

Se utilizará herramientas financieras como la TIR y el VAN para determinar si es viable económicamente la sustitución de los grupos electrógenos del tipo STP y LTP por un sistema solar fotovoltaico en los sitios de telecomunicaciones en estudio. En el análisis financiero se tomarán todos los posibles costos asociados como mantenimientos, acarreo de combustible, tiempo de vida útil, costos de implementación y operación.

Se calcularán los beneficios ambientales de la implementación de un sistema solar fotovoltaico en sustitución de los grupos electrógenos del tipo STP y LTP en los sitios de telecomunicaciones en estudio, para esto se revisará el estado del arte, en base a investigaciones previas se realizará la comparación de

los GEI, desechos sólidos y contaminación auditiva, generadas por ambas tecnologías.

Actualmente no existen investigaciones publicadas a nivel nacional que propongan la sustitución de los grupos electrógenos de emergencia por un sistema solar fotovoltaico, el estudio es pertinente dentro del ámbito de la maestría ya que involucra temas como energía solar fotovoltaica, sustitución de generación a base de combustibles fósiles y beneficios ambientales.

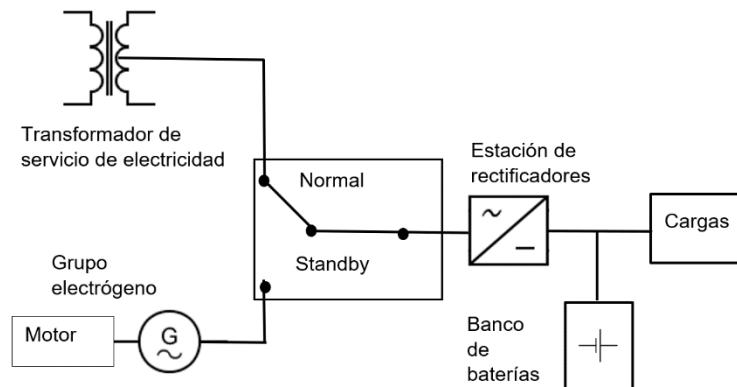


## 7. MARCO TEÓRICO

### 7.1. Fuentes alimentación en nodos de telecomunicaciones

Las fuentes de alimentación en nodos de telecomunicaciones se dividen en primarias y secundarias (emergencia), estas son las encargadas de la continuidad del suministro de energía eléctrica hacia los equipos, además se cuenta con bancos de baterías que son medios de almacenamiento de energía que operan en el cambio de fuente de alimentación y mantienen constante el suministro de energía hacia los equipos (Reeve, 2007). En la figura 1 se muestra el diagrama de las fuentes de alimentación.

Figura 1. **Sistema de energía AC y grupo electrógeno como fuente secundaria para nodo de telecomunicaciones**



Fuente: elaboración propia, realizado con draw.io.

### **7.1.1. Fuentes de alimentación primarias**

Las fuentes de alimentación primaria generalmente son confiables, este servicio lo brindan las distribuidoras de energía eléctrica locales, estas se diferencian por ser confiables por las regulaciones del sector y tener menos costos en comparación con otras formas de suministro de energía. Las distribuidoras de energía son confiables en áreas urbanas, aunque esto no es cierto el 100 % del tiempo, en ocasiones existen cortes del suministro de energía por diversas razones como fallas en la red, mantenimientos, intervención humana y fenómenos (Reeve, 2007).

Se considera un corte del suministro de energía cuando se interpreta una caída del nivel de tensión o no cumple con la calidad del suministro de energía eléctrica para el normal funcionamiento de los equipos de telecomunicaciones en un intervalo de tiempo (Reeve, 2007).

En lugares donde la red eléctrica no está disponible se debe utilizar una fuente principal de energía diferente a la distribuidora, estas fuentes alternativas pueden ser grupos electrógenos, sistemas de generación con energías renovables o sistemas híbridos.

### **7.1.2. Fuentes de alimentación secundarias**

Las fuentes de alimentación secundarias (emergencia) por unidad de energía y potencia suelen ser más costosas que las fuentes primarias de energía. Estas se utilizan solo cuando las fuentes de energía primaria fallan, estas por lo general suelen utilizar las mismas tecnologías que las fuentes de energía primarias y están diseñadas para operar por horas, días o hasta semanas (Reeve, 2007).

Las fuentes de energía secundaria por lo general son grupos electrógenos, estos pueden ser de diésel, gas natural o propano. No se utilizan de gasolina por los riesgos que implica transportar y manipular este combustible.

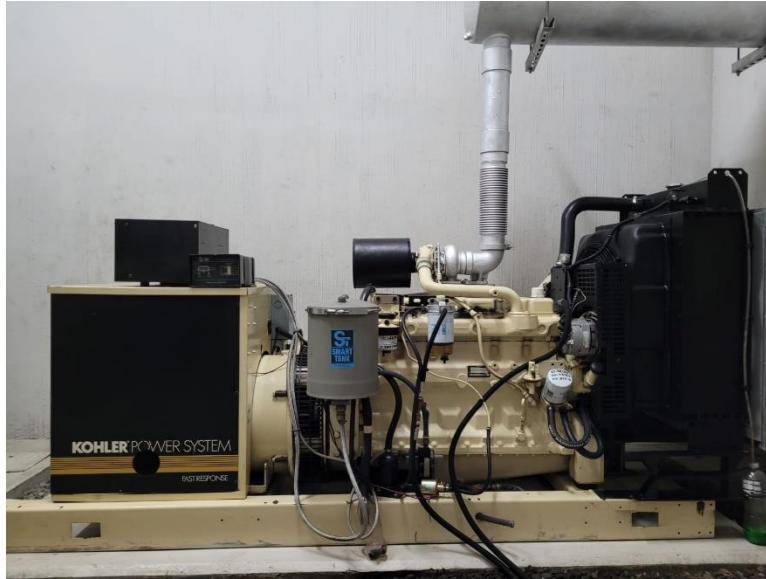
## **7.2. Grupos electrógenos**

Los grupos electrógenos son ampliamente utilizados como sistema de emergencia de energía eléctrica, su característica más importante es la “capacidad de funcionar independiente a la red de suministro eléctrico, siendo su principal utilidad las situaciones en las que no se disponga del servicio de la red eléctrica, bien sea debido a fallos o por falta de instalaciones eléctricas” (Rojas, 2018, p. 1).

El término grupo electrógeno se refiere a una composición de máquinas rotativas, tanto eléctricas como de combustión, acopladas entre sí, en las que se produce una doble conversión de energía: de térmica a mecánica y de mecánica a electromagnética. A los grupos electrógenos también se les denominan plantas eléctricas. (Rojas, 2018, p. 1)

En la figura 2 se muestra un grupo electrógeno abierto que se utiliza en un sitio de telecomunicaciones.

**Figura 2. Grupo electrógeno abierto**



Fuente: [Fotografía de Paulo Cesar Paniagua García]. (Pinares de San Cristóbal, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

### **7.3. Clasificación de los grupos electrógenos**

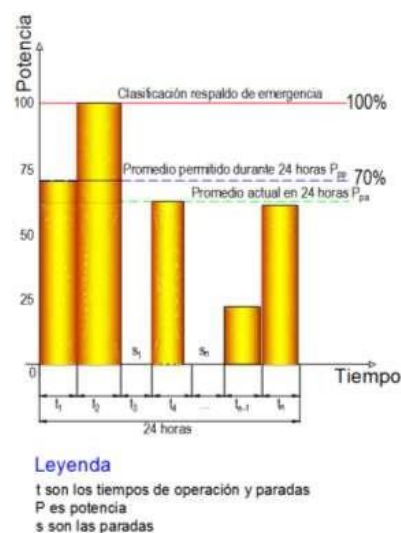
La norma ISO 8528-1 clasifica los grupos electrógenos en 4 categorías: potencia auxiliar de emergencia (STP), potencia principal de tiempo limitado (LTP), potencia principal de tiempo ilimitado (PRP) y potencia operativa continua (COP). Para la clasificación de los grupos electrógenos es necesario tener en consideración el factor de carga promedio, máxima carga requerida, horas de funcionamiento al año, funcionamiento aislado o conectado a la red. (Rojas, 2019, p. 1)

#### **7.3.1. Potencia auxiliar de emergencia STP (STANDBY)**

La clasificación potencia auxiliar de emergencia, conocida como standby entra a operar cuando la fuente principal de energía eléctrica tiene un corte

o no cumple con los estándares de calidad del suministro de energía. El factor de carga del grupo electrógeno en standby durante un periodo de 24 horas no debe superar el 70% de la potencia máxima disponible, esto se debe de cumplir a menos que el fabricante diga lo contrario. La potencia de reserva como la potencia máxima disponible alimentando una carga variable no debe de superar las 200 horas de operación en un periodo de un año. (Rojas, 2019, p. 2)

Figura 3. **Potencia auxiliar de emergencia (Standby)**



Fuente: Rojas (2019). *Guía para la comprensión de las clasificaciones de los grupos electrógenos.*

“Los grupos electrógenos del tipo STP están diseñados para operar como una fuente de secundaria (emergencia), este no está diseñado para operar como una fuente principal de energía eléctrica” (Rojas, 2019, p. 2).

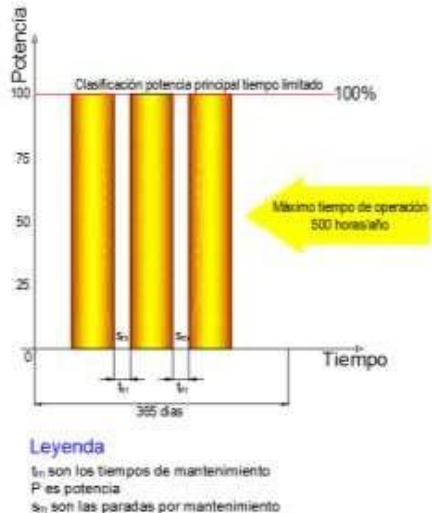
La potencia promedio real se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$Ppa = \frac{\sum_{i=1}^n P_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}$$

### 7.3.2. Potencia principal por tiempo limitado (LTP)

Las aplicaciones de la potencia principal por tiempo limitado son utilizadas para cargas constantes o invariables, “aplicaciones que normalmente involucran utilidades paralelas de operación y donde el tiempo de operación anual no supere las 500 horas. Para cualquier aplicación que requiera más de 500 horas anuales se debe utilizar la clasificación COP” (Rojas, 2019, p. 4).

Figura 4. Potencia principal por tiempo limitado (LTP)



Fuente: Rojas (2019). *Guía para la comprensión de las clasificaciones de los grupos electrógenos.*

La clasificación LTP es utilizada de forma habitual en radio bases ubicadas en lugares recónditos, “el suministro de energía eléctrica es suministrado por la

distribuidora, pero por su lejanía las fallas son atendidas después de horas o días” (Rojas, 2019, p. 4).

### **7.3.3. Potencia principal de tiempo ilimitado (PRP)**

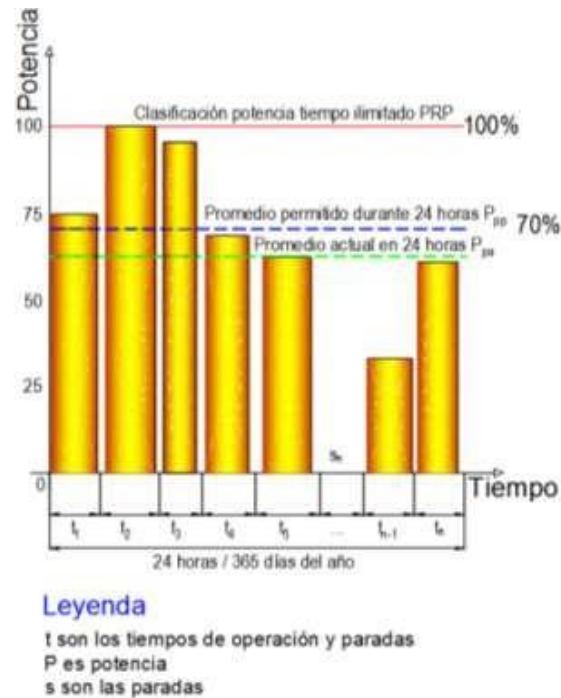
Según Rojas (2019):

El grupo electrógeno del tipo PRP es utilizado para sustituir a la red de distribución de energía eléctrica, en sitios de difícil acceso donde no se cuenta con el servicio. La Norma ISO 8528-1 define la aplicación de PRP, en aplicaciones de carga variable, un número ilimitado de horas al año puede funcionar de forma ininterrumpida y se utiliza en sustitución de la distribuidora de energía eléctrica en donde no se cuente con el servicio. Se establece que el factor de carga promedio durante un periodo de 24 horas no debe exceder el 70% del PRP a menos que el fabricante indique otros parámetros de operación. Adicionalmente se admite el 10% de sobrecarga por una hora cada 12 horas de funcionamiento esto según la norma ISO 3046. (p. 4)

Cálculo de la potencia promedio real  $P_{pa}$  es a través de la siguiente fórmula.

$$P_{pa} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}$$

Figura 5. **Potencia principal de tiempo ilimitado (PRP)**



Fuente: Rojas (2019). *Guía para la comprensión de las clasificaciones de los grupos electrógenos.*

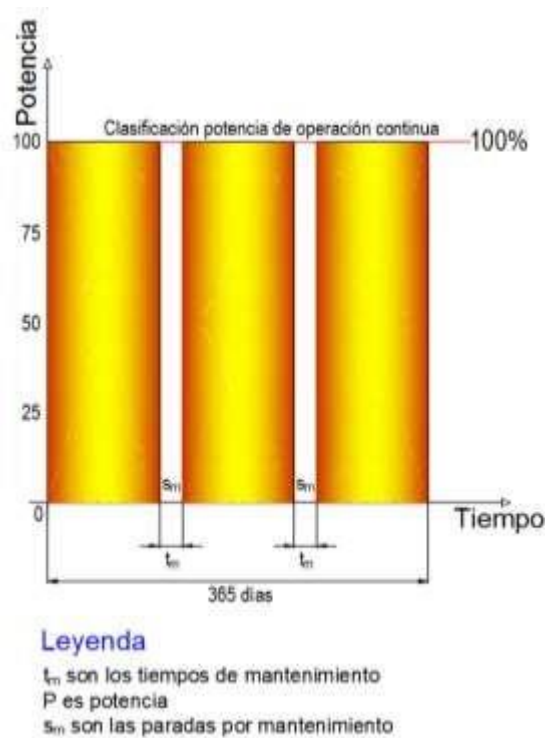
#### 7.3.4. **Potencia operativa continua (COP)**

El estándar ISO 8528-1 define la clasificación COP como “la potencia máxima que un grupo electrógeno es capaz de proporcionar a una potencia constante durante un número ilimitado de horas por año en condiciones de funcionamiento e intervalos de mantenimiento aprobados por el fabricante del grupo electrógeno” (Rojas, 2019, p. 6).

El grupo electrógeno del tipo COP es utilizado como fuente principal de energía eléctrica en lugares donde no se cuenta con el servicio de distribución, “suministra energía de forma continua por horas durante todo el año y se alterna

con los intervalos de mantenimiento que establezca el fabricante, no se debe operar con sobre carga. Esta clasificación se conoce comúnmente como potencia continua” (Rojas, 2019, p. 6).

Figura 6. **potencia operativa continua (COP)**



Fuente: Rojas (2019). *Guía para la comprensión de las clasificaciones de los grupos electrógenos.*

#### 7.4. Luz solar

“El sol se puede considerar como una fuente de energía inagotable (renovable), esta energía es producida por las reacciones nucleares que ocurren en su interior, este flujo de energía llega en forma de radiación electromagnética a la tierra” (Sánchez, Martínez, Santos, Ortega, y Sánchez, 2017, p. 65).

Es importante establecer que el espectro de onda que observamos con nuestros ojos es el denominado espectro visible; por esto solo podemos ver una parte de esta radiación electromagnética, la existencia de otros espectros de onda como el ultravioleta e infrarrojo se aprecia sobre los cuerpos en los que incide, “cuando estas ondas son absorbidas por las superficies los cuerpos elevan la temperatura. Es por lo mencionado que el fenómeno de absorción de radiación implica fenómenos de calentamiento “(Sánchez et al., 2017).

#### **7.4.1. Irradiancia e irradiación**

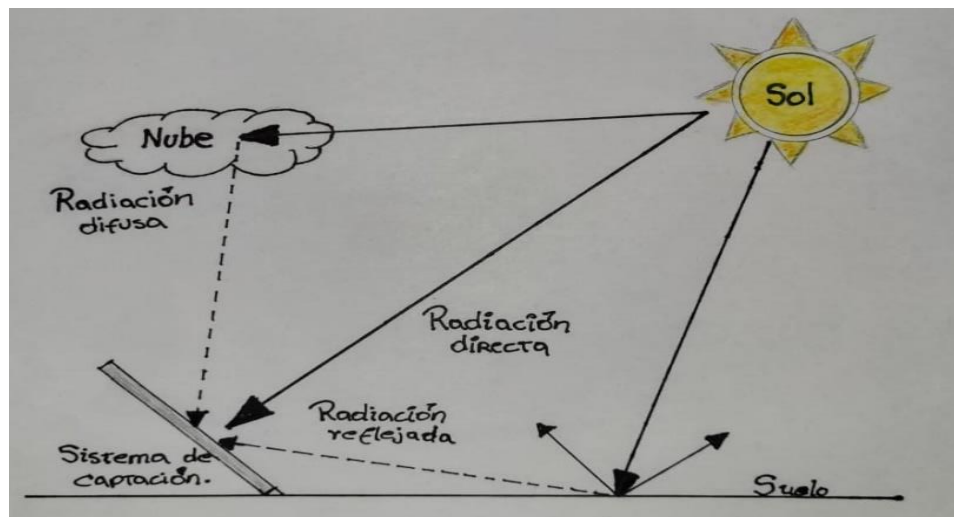
Es importante definir el término de energía y potencia en función de la radiación solar en una superficie. La luz solar es un tipo de energía, en el sistema internacional se mide la energía en Joules. Para poder medir la energía solar en una superficie se establece “el concepto de irradiancia solar ( $G$ ), se define como la energía radiante por unidad de área por unidad de tiempo que atraviesa una superficie imaginaria de área  $S$ , esta superficie es perpendicular a la propagación de la onda” (Sánchez, et al., 2017, p. 67).

La irradiancia  $G$  que es análoga a la potencia en un captador solar, se obtiene de la siguiente forma: “  $G = E/St$ , siendo  $E$  la energía incidente en superficie en determinado tiempo, la energía se define,  $E = Pt$ , entonces, la irradiancia  $G$  estará dada por la siguiente ecuación:  $G = P/S$  , con las dimensionales  $W/m^2$ ” (Sánchez, et al., 2017, p. 67).

La irradiación es un concepto análogo a la energía en un captador solar. Se deduce de la siguiente forma: “la irradiación es la densidad de energía recibida en la unidad de tiempo, entonces: la irradiación  $H_s$ , se expresa con la ecuación  $H_s = Gt$  , la unidad para la irradiación en segundos es  $Ws/m^2$  y en horas es  $Wh/m^2$ ” (Sánchez, et al., 2017, p. 68).

“La radiación solar se divide en tres componentes cuando ingresa en la atmosfera, en radiación solar directa, difusa y reflejada, a la suma de estas componentes en el captador solar se le denomina radiación global” (Sánchez, et al., 2017, p. 71). En la figura 7 se observa las componentes de la radiación.

Figura 7. **Radiación solar difusa, directa y global**



Fuente: elaboración propia.

#### 7.4.2. El valor estándar de referencia hora solar pico (HSP)

Debido a la variabilidad de la radiación solar incidente en un lugar y momento determinado en la tierra, la industria ha fijado un valor de referencia para la prueba de equipos, esta es la hora solar pico H.S.P., esta fue medida bajo las condiciones de “un día despejado, sin partículas suspendidas en el aire, el sol ubicado en el cenit del captador, a nivel del mar, la máxima irradiancia directa que puede recibir el captador solar es ligeramente menor a  $1000 \text{ W/m}^2$ ” (Sánchez, et al., 2017). Por lo anterior, si un módulo solar recibe el pico de

irradiación por una hora, a la energía recibida se le llama por convenio hora solar pico o solamente hora pico. La transformación de unidades sería  $1000\text{Wh/m}^2$ .

#### **7.4.3. Potencial solar en Guatemala**

Actualmente se cuentan con mapas de potencial solar de Guatemala, estos mapas fueron generados por información climatológica de satélites y modelos climáticos globales. Se tiene estimado que el potencial solar de un día promedio en Guatemala es de  $5.3\text{ kWh/m}^2/\text{día}$  (Instituto de Investigación y Proyección sobre Ciencia y Tecnología de la Universidad Rafael Landívar, 2018).

#### **7.5. Paneles solares fotovoltaicos**

“Un panel solar fotovoltaico es un dispositivo que transforma los fotones provenientes del sol en energía eléctrica de corriente continua, esto por medio del efecto fotovoltaico, una celda fotovoltaica está formada por la unión P-N conocida como barrera de potencial” (Uriol, 2020, p. 22). Cuando la luz solar atraviesa la región N e ingresa en la barrera de potencial se produce movimiento de los electrones y huecos, estos al llegar a la barrera de potencial son expulsados de la región P-N, esto se aprovecha al momento de conectar una carga, debido a que se produce un flujo de electrones que se dirige de la zona de menor a la de mayor potencial eléctrico. “El potencial que genera una celda es muy pequeño por lo que se hace necesario conectar varias celdas por los extremos en serie y paralelo” (Carta, Calero, Colmenar, y Castro, 2009, p. 252).

El retorno energético en un panel solar está determinado por el tiempo que tardará el panel solar en recuperar la energía para su fabricación.

La energía solar fotovoltaica ha sido ampliamente estudiada, se mide como los años que tarda el sistema en producir la misma energía consumida en su fabricación. Numerosos estudios han llegado a la conclusión que ese tiempo oscila de 3 a 5 años para C-Si. Para los módulos de capa delgada el período es mucho menor, y puesto que los módulos e instalaciones pueden durar perfectamente hasta 30 años, resulta evidente que son productores netos de energía (NAP, 2002).

#### **7.5.1. Características básicas de un módulo fotovoltaico**

Se puede sacar las características más importantes en un panel solar fotovoltaico superponiendo las curvas I-V y P-V, se aprecian ambas curvas en la figura 8. A continuación se detallan las características básicas más importantes en un módulo solar:

Es la corriente de corto circuito  $I_{sc}$ : es la corriente que produce el módulo cuando es forzado a trabajar a un voltaje cero, es decir, con un cortocircuito en sus contactos de salida. A nivel experimental, se mide con un amperímetro conectado la salida de los bornes del módulo. El valor varía proporcionalmente en función de la radiación solar a la que está expuesto. Es importante saber que esta prueba es destructiva, ya que la intensidad resultante es la máxima que pueden producir las células fotovoltaicas y pueden dañar la célula (Institut Català d'Energia, 2011, p. 59).

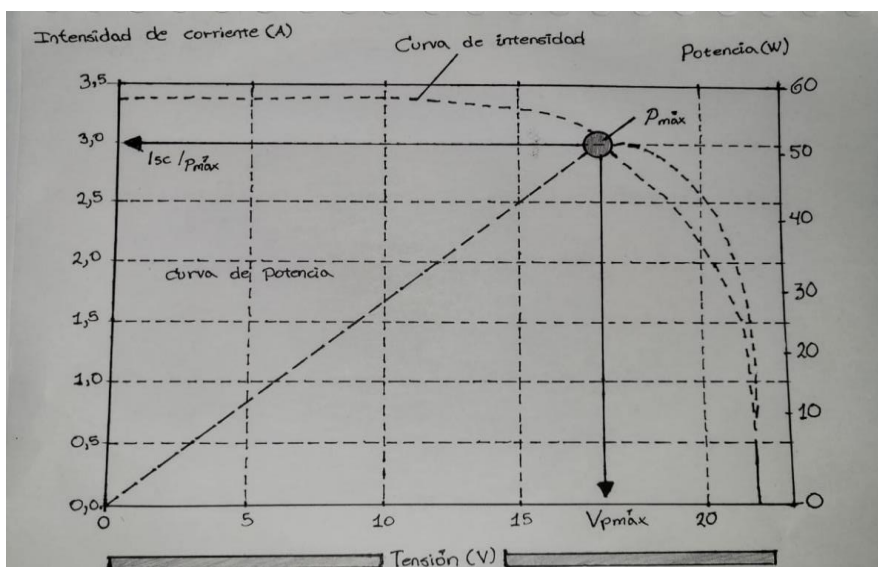
La tensión de circuito abierto,  $V_{oc}$ : es la tensión máxima que puede dar el módulo, es obtenida cuando no existe ninguna carga conectada, está abierto el circuito y la corriente es cero. Este valor se obtiene midiendo con un voltímetro en sus terminales cuando no existe otro elemento conectado. El valor obtenido

puede ser mayor que el valor de la tensión nominal del módulo (Institut Català d'Energia, 2011, p. 59).

Potencia nominal del módulo ( $P_{max}$ ): la potencia nominal del módulo viene determinada por el punto de máxima potencia con el valor estándar para probar y homologar los módulos. “Es el producto de la corriente por la tensión, en condiciones de cortocircuito y en circuito abierto la potencia es 0, por lo que habrá un valor entre 0 y  $V_{oc}$  para el que la potencia será máxima:  $P_{max} = V_{max} * I_{max}$ ” (Carta, et al., 2009, p. 272).

Eficiencia del módulo: es la relación entre la potencia eléctrica que produce el módulo y la potencia de radiación incidente en el propio módulo esta expresada por “  $\eta = \frac{I_{sc} * V_{oc} * F_f}{A * P_{sol}} * 100$ ; donde  $P_{sol}$  es la potencia luminosa por unidad de área que se recibe del sol (condiciones estándar  $100 \text{ Wm/cm}^2$ ) y  $A$  es el área de la célula” (Carta, et al., 2009, p. 272).

Figura 8. **Curvas características de una celda solar**



Fuente: elaboración propia.

### **7.5.2. Orientación del panel solar**

La tierra tiene varios movimientos, para comprender el movimiento del sol los más importantes son el de rotación sobre su eje y el movimiento de traslación con respecto al sol, por estos movimientos la ubicación del sol cambia durante los días y meses del año.

Al momento de instalar los módulos solares fotovoltaicos tenemos que tener en consideración la orientación e inclinación, estos parámetros son importantes porque puede significar captar mayor radiación solar. La elección de la orientación e inclinación depende de la trayectoria del sol, esta se divide en diaria y mensual. Además, depende la ubicación geográfica donde se instala el captador, esto se observa en la figura 9. La inclinación y orientación se observa en la figura 10.

Según Uriol (2020):

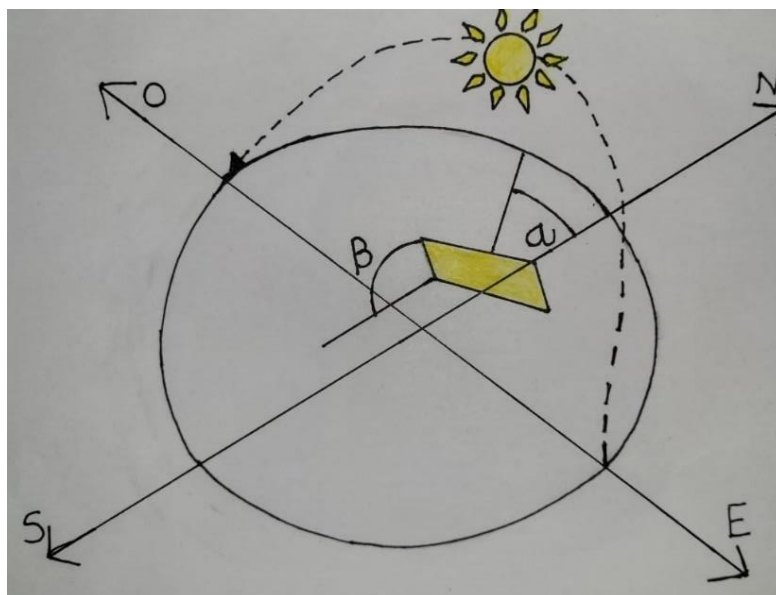
La orientación ( $\alpha$ ) se define a partir del ángulo de acimut, el cual mide el ángulo formado por la proyección en el plano horizontal de la perpendicular a la superficie del módulo con el meridiano en ese lugar; mientras que la inclinación ( $\beta$ ) es la medida del ángulo que forma el plano de la superficie del módulo con el plano horizontal. (p. 28)

Figura 9. Trayectoria del sol en junio y diciembre



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Inclinación y orientación de un captador solar



Fuente: elaboración propia.

### 7.5.3. Tipos de celdas solares

Las características del módulo solar vienen determinadas por el tipo de célula solar, según su naturaleza tenemos diferentes tipos de celdas. En la tabla I se comparan tres tipos de células.

El tipo más común es la célula de silicio cristalino (Si). Las características básicas se establecen bajo unas condiciones universales de trabajo llamadas condiciones estándares de medida (CEM): distribución espectral AM 1.5G, temperatura de la celda fotovoltaica: 25°C e irradiación solar 1000W/m<sup>2</sup>. (Institut Català d'Energia, 2011, p. 56)

Tabla I. Tipos de células de silicio cristalino

| Modulo         | Material              | Rendimiento básico |
|----------------|-----------------------|--------------------|
| Monocristal lí | Silici monocristal lí | 14-17%             |
| Policristal lí | Silicipoli cristal lí | 10- 14%            |
| Amorf          | Silici amorf          | 4- 8%              |

Fuente: Institut Català d'Energia. (2011). *Energía solar fotovoltaica*.

### 7.6. Configuraciones de sistemas solares fotovoltaicos

Se establece el tipo de configuración del sistema solar fotovoltaico, dependiendo del tipo de aplicación, disponibilidad de la red eléctrica, perfil de carga, ubicación, entre otras condiciones; las configuraciones que generalmente se utilizan son:

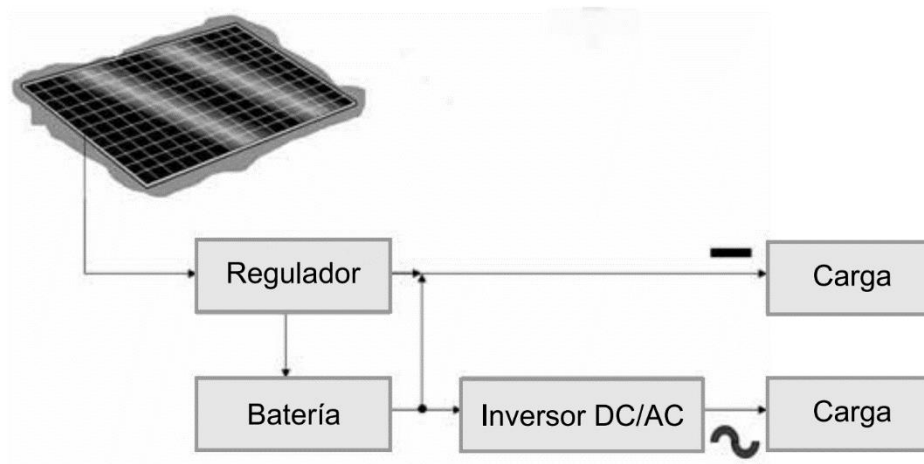
- Sistemas aislados sin conexión eléctrica a la red de distribución (Off-Grid).

- Sistemas con conexión a la red de distribución (On-Grid).
- Sistemas híbridos donde generalmente se tiene otra fuente de energía en paralelo.

### 7.6.1. Sistema solar fotovoltaico aislado

Esta configuración de sistema solar fotovoltaico se instala donde no se tiene servicio de energía eléctrica que generalmente son lugares alejados de los centros urbanos, por ejemplo, una celda de telecomunicaciones ubicada en una montaña. “Son parte fundamental e imprescindible para la garantía del fluido eléctrico y de las comunicaciones. A diferencia de los sistemas conectados a red, los sistemas autónomos requieren de las baterías para almacenar energía que será consumida en los ciclos diarios” (Carta, et al., 2009, p. 272). En la figura 11 se muestra el esquema básico de un sistema solar fotovoltaico aislado.

Figura 11. Sistema solar fotovoltaico aislado

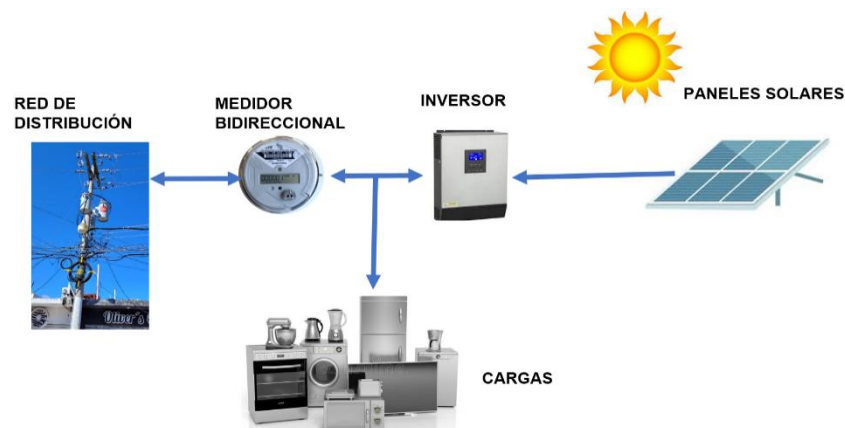


Fuente: Carta, et al. (2009). *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*.

### 7.6.2. Sistema solar fotovoltaico conectado a la red eléctrica

Para instalar este tipo de sistema se necesita que exista la legislación local que regule la implementación de medidores bidireccionales, en esta configuración los paneles fotovoltaicos absorben en el día la radiación solar; por medio de un inversor se transforma la corriente continua (CC) que sale del módulo en corriente alterna (AC), y el sistema se encarga de proporcionar el suministro de energía eléctrica. En días nublados y por las noches la energía eléctrica la proporciona el distribuidor de energía eléctrica local; los excedentes generados por el sistema solar fotovoltaico son inyectados a la red eléctrica y pasan por el medidor reversible, en la facturación mensual se refleja en el consumo la diferencia entre el suministro de energía eléctrica proporcionada por la distribuidora y los excedentes inyectados a la red. “El generador fotovoltaico capta la radiación solar y la transforma en energía eléctrica, en lugar de ser almacenada en baterías, como en los sistemas aislados e híbridos, se puede utilizar directamente en el consumo o entregarla a la red eléctrica” (Carta, et al., 2009, p. 280). La configuración básica se observa en la figura 12.

Figura 12. **Instalación básica FV conectado a la red**

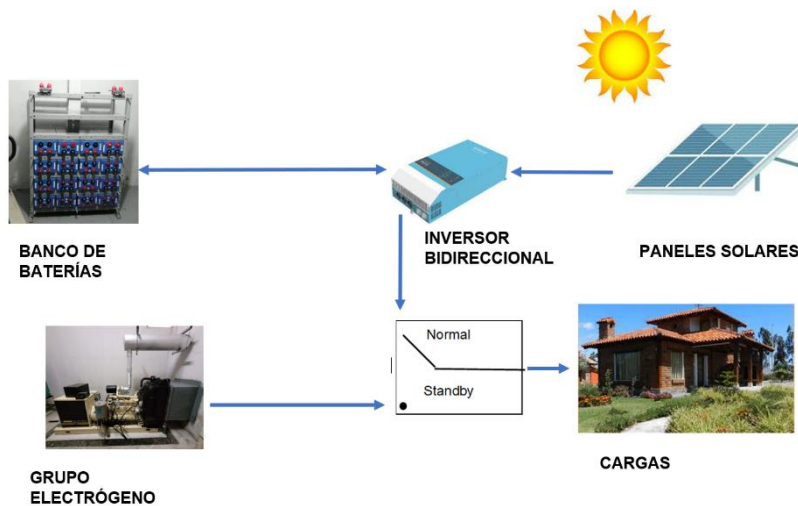


Fuente: elaboración propia.

### 7.6.3. Sistema solar fotovoltaico híbrido

Un sistema híbrido utiliza dos o más fuentes de alimentación de energía, pueden utilizar grupos electrógenos, aerogenerador, paneles solares, la red eléctrica comercial, entre otros. Por ejemplo, si los módulos solares por momentos no tienen la capacidad de alimentar las cargas el grupo electrógeno se activaría y tomaría la carga en paralelo con el sistema solar fotovoltaico. “ Los sistemas híbridos de generación se conectan en paralelo, dentro de la conexión en paralelo, se pueden distinguir dos tipos de configuración: acoplamiento en corriente continua (CC) y acoplamiento en corriente alterna (CA)” (Descalzo , 2014, p. 28). En la figura 13 se muestra un sistema hibrido con un grupo electrógeno y paneles solares.

Figura 13. Sistema hibrido conexión en paralelo con acoplamiento c.a.



Fuente: elaboración propia.

## 7.7. Elementos de un sistema solar fotovoltaico

Los sistemas solares fotovoltaicos se componen de paneles solares para captar la radiación solar y transformarla en energía eléctrica, además se necesitan elementos adicionales para normalizar y garantizar el buen funcionamiento del sistema como: inversores DC/AC, regulador de voltaje, bancos de baterías y controladores.

### 7.7.1. Baterías

Las baterías se encargan de almacenar la energía que el panel solar genera, una batería básicamente transforma energía eléctrica en energía química, o al contrario transforman energía química en energía eléctrica. “El almacenamiento electroquímico es el más utilizado, se caracteriza por tener alta eficiencia de almacenamiento siendo útil donde el almacenamiento de energía se da en el corto plazo, es decir, la batería demanda cargas y descargas con frecuencia” (Uriol, 2020, p. 30). En la siguiente tabla II se comparan características básicas de tres tipos de baterías convencionales las sodio-sulfuro, plomo-ácido, ión -litio, redox vanadio y redox Zn-Br.

Tabla II. Características de baterías convencionales

|                                               | <b>ión-Litio</b> | <b>Plomo -<br/>Ácido</b> | <b>Sodio -<br/>Sulfuro</b> | <b>Redox<br/>Vanadio</b> | <b>Redox<br/>Zn-Br</b> |
|-----------------------------------------------|------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------|
| <b>Densidad de Energía (MJ/m<sup>3</sup>)</b> | 10,8-14,4        | 60 – 180                 | 540                        | 54-65                    | 72-108                 |
| <b>Rango de Energía (MJ)</b>                  | $36 \cdot 10^3$  | $144 \cdot 10^3$         | $172,8 \cdot 10^3$         | $36 \cdot 10^3$          | $36 \cdot 10^3$        |
| <b>Rango de Potencia (MW)</b>                 | 0,1 – 10         | 0,1 – 10                 | 0,1 – 10                   | 0,1 – 100                | 0,1 – 100              |
| <b>Tiempo Carga y Descarga</b>                | H - min          | H - min                  | Horas                      | Horas                    | Horas                  |
| <b>Ciclos de Carga/Descarga</b>               | 4500             | 2500                     | 4500                       | 20                       | 12                     |

Continuación tabla II.

|                                         |     |     |     |     |     |
|-----------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>Rendimiento (%)</b>                  | 94% | 90% | 80% | 90% | 75% |
| <b>Mínimo Estado de Carga (%)</b>       | 10% | 20% | 10% | 5%  | 10% |
| <b>Coste de Instalación (€/kWh)</b>     | 530 | 360 | 285 | 700 | 385 |
| <b>Coste Mantenimiento (€/kWh· año)</b> | 3   | 2   | 3   | 10  | 13  |

Fuente: Hernández (2016). *Análisis económico de un sistema de almacenamiento para la disminución de desvíos de producción en un parque eólico.*

### 7.7.2. Regulador de carga

Este dispositivo es el encargado de regular el nivel de tensión de carga y descarga de las baterías siempre dentro de las condiciones correctas de funcionamiento. El regulador de carga tiene la función de regular la corriente que absorbe la batería para que nunca se sobrecargue. Esta corriente mínima se llama de flotación y se da cuando la batería está a plena carga y recibe sólo la energía suficiente para mantenerla en ese estado, el voltaje de flotación compensará en periodos largos la autodescarga (Institut Català d'Energia, 2011).

### 7.7.3. Inversores (Convertidores CC/CA)

Los realizan la transformación de corriente continua a corriente alterna esto por medio de dispositivos electrónicos. “Los inversores permiten convertir los niveles de tensión 12, 24, 48 V de corriente continua que producen los módulos solares, en corriente alterna de 120 o 220 V, estos se usan normalmente cuando se encuentra el sistema conectado a la red eléctrica convencional” (Institut Català d'Energia, 2011).

## **7.8. Conceptos eléctricos**

Para dimensionar un sistema solar fotovoltaico es necesario conocer conceptos eléctricos como: Energía eléctrica, potencia eléctrica, factor de potencia, eficiencia, entre otros.

### **7.8.1. Potencia eléctrica**

Según la Real Academia de la Lengua Española (RAE) la potencia es la energía producida o consumida por unidad de tiempo. La potencia eléctrica se puede decir que es el consumo o transferencia de energía por medio de un circuito eléctrico hacia una carga en un instante. La fórmula aceptada para medir la potencia eléctrica es  $P = V * I$ , “la unidad eléctrica para la medición de potencia es el Watt (W), este es equivalente a: 1 Watt (W) = 1 Joule/Segundo (J/S). En forma de ecuación está definida como  $P = \frac{W}{t}$ , (Watts)” (Boylestad, 2004, p. 102).

La potencia  $p$  puede tomar valores positivos o negativos según el instante o intervalo de tiempo que se considere. Una potencia  $p$  positiva significa una transferencia de energía de la fuente a la red, mientras una potencia  $p$  negativa corresponde una transferencia de energía de la red a la fuente. (Edminister, 1965, p. 68)

### **7.8.2. Energía eléctrica**

La energía eléctrica es el resultado de la diferencia de potencial eléctrico, que genera una corriente entre dos puntos por un tiempo. Para comprender el concepto de energía partimos que la potencia es la tasa con la que se efectúa un trabajo, para que se produzca conversión de energía en otra forma, la potencia debe ser utilizada durante un periodo, por ejemplo, para mover una carga

determinada un motor tiene una potencia dada en caballos de fuerza, pero a menos que se use el motor en un período determinado existirá conversión de energía. Mientras más tiempo se utilice el motor será mayor la energía utilizada en mover la carga. La fórmula de la energía es:  $W = P * t$  con dimensionales (Watt-Segundo), para propósitos prácticos se expresa en KWh (Boylestad, 2004).

### **7.8.3. Eficiencia**

La eficiencia mide el porcentaje de perdidas en el medio de transformación de energía. “En un sistema siempre la potencia de entrada será igual o mayor a la potencia de salida, una parte de la potencia se consume en pérdidas o almacenamiento, la eficiencia está definida por la ecuación  $Eficiencia = \frac{Potencia\ de\ salida}{Potencia\ de\ entrada}$ , donde la eficiencia se expresa en decimal” (Boylestad, 2004).

## **8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS**

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

### **1. MARCO REFERENCIA**

- 1.1. Estudios previos (recientes)
- 1.2. Antecedentes

### **2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL**

- 2.1. Fuentes alimentación en nodos de telecomunicaciones
  - 2.1.1. Fuentes de alimentación primarias
  - 2.1.2. Fuentes de alimentación secundarias (Sistemas de emergencia)
- 2.2. Grupos electrógenos
- 2.3. Clasificación de los grupos electrógenos
  - 2.3.1. Potencia auxiliar de emergencia (STP)
  - 2.3.2. Potencia principal por tiempo limitado (LTP)
  - 2.3.3. Potencia principal de tiempo ilimitado (PRP)
  - 2.3.4. Potencia operativa continua (COP)
- 2.4. Luz solar

- 2.4.1. Irradiancia e irradiación
  - 2.4.2. El Valor estándar de referencia hora solar pico (HSP)
  - 2.4.3. Potencial solar en Guatemala
- 2.5. Paneles solares fotovoltaicos
  - 2.5.1. Características básicas de un módulo fotovoltaico
  - 2.5.2. Orientación del panel solar
  - 2.5.3. Tipos de celdas solares
- 2.6. Configuraciones de sistemas solares fotovoltaicos
  - 2.6.1. Sistema solar fotovoltaico aislado
  - 2.6.2. Sistema solar fotovoltaico conectado a la red eléctrica
  - 2.6.3. Sistema solar fotovoltaico híbrido
- 2.7. Elementos de un sistema solar fotovoltaico.
  - 2.7.1. Baterías
  - 2.7.2. Regulador de carga
  - 2.7.3. Inversores (Convertidores CC/CA)
- 2.8. Conceptos eléctricos
  - 2.8.1. Potencia eléctrica
  - 2.8.2. Energía eléctrica
  - 2.8.3. Eficiencia
- 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
  - 3.1. Medición y recolección de datos de la demanda.
  - 3.2. Caracterización de la demanda.
  - 3.3. Dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico de emergencia.
- 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS
  - 4.1. Viabilidad técnica
  - 4.2. Viabilidad económica

4.3. Elección de tecnología de banco de baterías

4.4. Beneficios ambientales.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS



## **9. METODOLOGÍA**

### **9.1. Características del estudio**

El presente estudio tiene un enfoque cuantitativo descriptivo, busca determinar la factibilidad de la sustitución de los grupos electrógenos de emergencia por un sistema solar fotovoltaico en sitios de telecomunicaciones. Se realizarán mediciones directas e indirectas de los parámetros eléctricos tensión, corriente, energía y potencia; el diseño del estudio es no experimental ya que no se interviene de forma directa en la medición y no se crean muestras de estudio.

### **9.2. Unidades de análisis**

El estudio se realizará en los sitios de telecomunicaciones Pinares de San Cristóbal y Pachalum, en ambos sitios se debe determinar el comportamiento del consumo energético promedio, y se debe dimensionar sistemas solares fotovoltaico con las características de los grupos electrógenos de emergencia.

#### **9.2.1. Variables**

Las variables del estudio son cuantitativas, para la variable sistema de emergencia de energía eléctrica se debe determinar el consumo de energía con un monitor de energía midiendo los parámetros eléctricos de tensión (V), corriente (A), energía (KWh), tiempo de respaldo(h) y potencia (W), y para dimensionar un sistema solar fotovoltaico se debe tener los históricos radiación solar y el consumo de energía promedio en cada sitio. Con los resultados se

dimensionará un sistema solar fotovoltaico equivalente a los grupos electrógenos del tipo STP y LTP.

Tabla III. **Matriz de conceptualización**

| <b>Variables</b> |                                            | <b>Definición conceptual</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>Dimensiones</b>                      | <b>Indicadores</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| V1               | Sistema de emergencia de energía eléctrica | Estas se utilizan solo cuando las fuentes de energía primaria fallan. Las fuentes de energía secundarias suelen operar en promedio horas durante semanas o meses. Las fuentes de energía secundaria por lo general son grupos electrógenos de combustión interna, estos pueden ser de diésel, gas natural o propano. Los grupos electrógenos son ampliamente utilizados como sistema de emergencia de energía eléctrica, en la ausencia de la energía eléctrica comercial estos equipos suministran energía eléctrica, estos toman la carga por transferencia manual o automática dependiendo de la configuración. | Energía eléctrica<br>Tiempo<br>Potencia | <p>Perfil de carga del sitio telecomunicaciones. Tiempo de respaldo de los grupos electrógenos del tipo STP Y LTP</p> <p>Auditoria de energética para determinar las potencias nominales de los equipos.</p> <p>Características de los sistemas emergencia en nodos telecomunicaciones</p> <p>Contabilizar los daños ambientales y costos asociados al sistema.</p> |
| V2               | Sistema solar foto voltaico                | Un sistema fotovoltaico es un conjunto de dispositivos que aprovechan la energía producida por el sol y la convierten en energía eléctrica. Los sistemas fotovoltaicos se basan en la capacidad de las celdas fotovoltaicas de transformar energía                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Energía<br>Radiación solar<br>Potencia  | <p>Radiación solar promedio en los sitios de estudio.</p> <p>Inclinación y orientación del panel solar.</p> <p>Banco de batería para tiempo de respaldo.</p>                                                                                                                                                                                                        |

Continuación tabla III.

|  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |                                                                                                                             |
|--|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  | <p>solar en energía eléctrica (DC). En un sistema conectado a la red eléctrica esta energía, mediante el uso de un inversor, es transformada a corriente alterna (AC), la cual puede ser utilizada en hogares e industrias.</p> <p>La generación de energía eléctrica dependerá de las horas que el sol brille sobre el panel solar y del tipo y cantidad de módulos instalados.</p> |  | <p>Perfil de carga para realizar el dimensionamiento. Contabilizar los daños ambientales y costos asociados al sistema.</p> |
|--|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Fuente: elaboración propia.

### 9.3. Fases del estudio

El estudio se dividirá en siete fases: exploración bibliográfica, medición y recopilación de datos, dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico, beneficios ambientales, viabilidad económica, dimensionamiento del banco de baterías y discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones.

#### 9.3.1. Fase 1: Exploración bibliográfica

En esta fase se realizará la revisión de la literatura pertinente al estudio como sistemas de emergencia de energía eléctrica, grupos electrógenos, sistemas solares fotovoltaicos, bancos de baterías, herramientas financieras y estudios previos afines a la investigación; con la información obtenida se tendrán las bases para dimensionar un sistema solar fotovoltaico de emergencia con las características de los sistemas de grupos electrógenos del tipo STP y LTP que

garantice el respaldo en los sitios de telecomunicación Pinares de San Cristóbal y Pachulum.

### 9.3.2. Fase 2: Medición y recopilación de datos

El proceso de recolección de datos para determinar el comportamiento de la carga se divide en auditoría energética, histórico de facturación y perfil de carga.

Se realizará una auditoría energética en la unidad remota Pinares de San Cristóbal, obteniendo los datos de consumo en la placa de datos de los equipos del nodo, se anotará la descripción del equipo, la potencia nominal, horas de utilización del equipo. Con la auditoría energética se puede estimar los valores nominales de potencia y energía. Los valores se anotarán en la tabla III.

Tabla IV. Registro del consumo de energía de los equipos en placa

| Descripción | Número | P(W) | Horas / día | Días de uso / semana | Energía (Wh/semana) |
|-------------|--------|------|-------------|----------------------|---------------------|
|             |        |      |             |                      | 0                   |
|             |        |      |             |                      | 0                   |
|             |        |      |             |                      | 0                   |
|             |        |      |             |                      | 0                   |
|             |        |      |             |                      | 0                   |
|             |        |      |             |                      | 0                   |
|             |        |      |             |                      | 0                   |
|             |        |      |             |                      | 0                   |
|             |        |      |             |                      | 0                   |
|             |        |      |             |                      | 0                   |
|             |        |      |             |                      | 0                   |
|             |        |      |             |                      | 0                   |
|             |        |      |             |                      | 0                   |
|             |        |      |             |                      | 0                   |

Fuente: elaboración propia.

Se realizará la revisión del histórico de facturación de energía eléctrica mensual de los últimos años, esta información se descargará de la página de la

distribuidora de electricidad. En una hoja de Excel se tabularán los promedios mensuales.

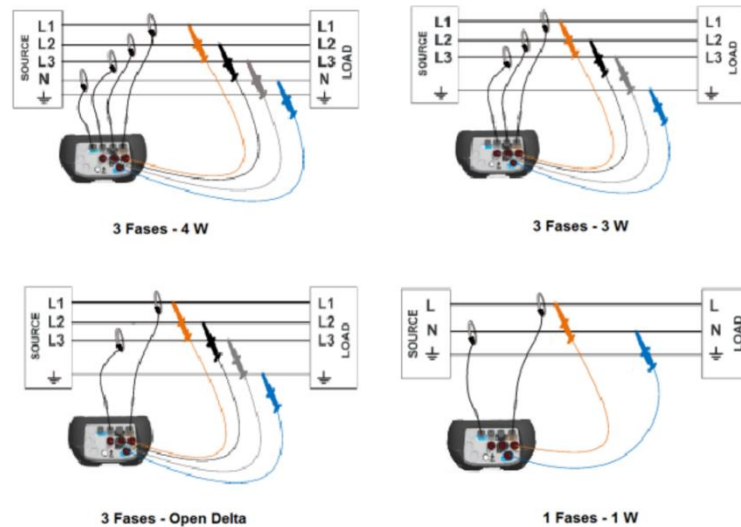
Se utilizará un monitor de energía marca Fluke ® o en su defecto un monitor de energía de otra marca como Eyedro ®, Sense ®, Enporia Vue ®, entre otras marcas. ver figura 7, con el registro de los parámetros eléctricos en el monitor de energía se obtendrá el comportamiento de la carga 24/7, las mediciones se realizarán en el tablero principal del sitio en estudio, el diagrama de conexión de instrumento para las mediciones se observa en la figura 14.

Figura 14. **Monitor de energía Eyedro**



Fuente: Eyedro. *green business*. Consultado el 1 octubre del 2021. Recuperado de <https://eyedro.com/product/ebwem1-lv/>.

Figura 15. Diagrama de conexiones de un analizador de energía



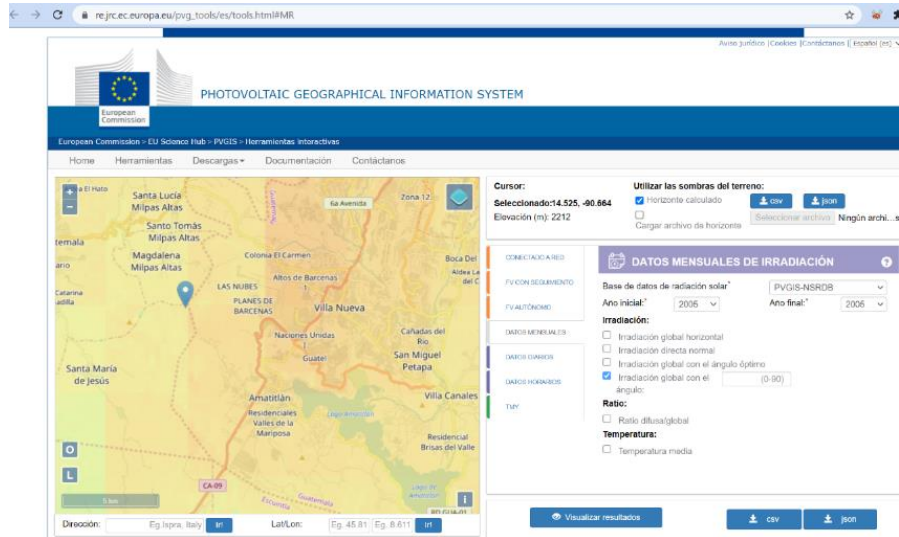
Fuente: Metrel. *Analizador de redes*. (2021). Recuperado de <https://epyme.es/webs/default/media/epyme/descargas/jornadas/Analizadores%20de%20redes%20Metrel%20KPS%202016%20MI2883.pdf>.

### 9.3.3. Fase 3: Dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico

Para dimensionar el sistema solar fotovoltaico equivalente a los grupos electrógenos del tipo STP y LTP, es necesario tener la ubicación de los sitios de telecomunicaciones, con la ubicación se puede determinar la inclinación óptima y la H.S.P.

La inclinación óptima se puede obtener de tablas, esta aumenta la captación de la irradiación solar. Se determina la irradiación global del nodo de estudio, con los datos históricos de radiación solar de estaciones meteorológicas locales, publicaciones especializadas, Nasa Power, páginas web como la de PVGIS y de softwares especializados, etc. Para nuestro estudio utilizaremos la página PVGIS ver figura 13.

Figura 16. Promedio histórico de radiación global



Fuente:

Photovoltaic Geographical Information System. *Datos mensuales de irradiación*. (2021).

Recuperado de <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>.

La hora solar pico se obtiene sustituyendo el valor de irradiación solar global obtenido de la página PVGIS en la siguiente ecuación.

$$H.S.P. = \frac{\text{Irradiación Global}}{1000W/m^2}$$

La fórmula para cálculo de potencia fotovoltaica es la siguiente:

$$\text{Potencia fotovoltaica} = \frac{\text{Consumo Diario}}{H.S.P}$$

La fórmula preliminar para el cálculo de numero de paneles solares se utiliza la siguiente ecuación:

$$No. Modulos = \frac{Potencia Fotovoltaica}{Potencia del Modulo}$$

Con los datos de consumo y teniendo en cuenta la eficiencia de cada equipo, se puede dimensionar el controlador, inversor, protecciones eléctricas y conductores.

Para dimensionar el banco de Baterías se debe tomar en cuenta el nivel de tensión, profundidad de descarga, eficiencia del inversor y el tiempo de respaldo, se utilizará como base de tiempo los parámetros de respaldo de los grupos electrógenos STP y LTP anuales ver tabla IV. Se debe encontrar un modelo que nos permita realizar un equivalente de respaldo en baterías a las horas de funcionamiento anual y que tenga en consideración la radiación solar promedio de cada sitio en estudio.

Tabla V. **Tiempo de operación de grupos electrógenos de emergencia**

| <b>Respaldo de emergencia</b>               | <b>Operación de horas en un año</b> |
|---------------------------------------------|-------------------------------------|
| Potencia auxiliar de emergencia (STP)       | T< 200 horas                        |
| Potencia principal de tiempo limitado (LTP) | 200h<t<500h                         |

Fuente: elaboración propia.

#### **9.3.4. Fase 4: Beneficios ambientales**

Los beneficios ambientales se calcularán de forma teórica, se realizará la contabilidad de los residuos sólidos, GEI y contaminación sonora que generan

los grupos electrógenos del tipo LTP y STP vs sistema solar fotovoltaico equivalente.

#### **9.3.5. Fase 5: Viabilidad económica**

La viabilidad económica se calculará con los costos de implementación, mantenimiento y operación de los grupos electrógenos del tipo STP y LTP, y los costos asociados a la implementación de un sistema solar fotovoltaico de emergencia. Utilizaré herramientas financieras como la TIR y el VAN.

#### **9.3.6. Fase 6: Dimensionamiento del banco de baterías**

Para determinar qué tipo de tecnología de baterías se debe utilizar en un sitio de telecomunicaciones se tiene en consideración: voltaje del sistema, consumo diario, eficiencia, horas de autonomía, profundidad de descarga, el tipo de aplicación.

#### **9.3.7. Fase 7: Discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones**

En esta fase se realizará una discusión de los resultados, se realizará las conclusiones con base a los objetivos planteados y se realizará las recomendaciones pertinentes.



## **10. TÉCNICAS DE ANALISIS DE INFORMACIÓN**

Para realizar la investigación y cumplir con los objetivos propuestos se utilizará estadística descriptiva cuantitativa, se obtendrán y organizarán los datos de las mediciones de los parámetros eléctricos, con esto se obtendrá la caracterización de la demanda.

Variables del estudio:

- Tensión (V)
- Corriente (A)
- Potencia (W)
- Energía (KWh)

La medición de las variables eléctricas del estudio se tomará con un monitor de energía como se describe en la metodología, los parámetros se medirán y registrarán cada 15 minutos. Los promedios de irradiación solar global se obtendrán de la página especializada PVGIS.

Las herramientas estadísticas que se utilizarán son:

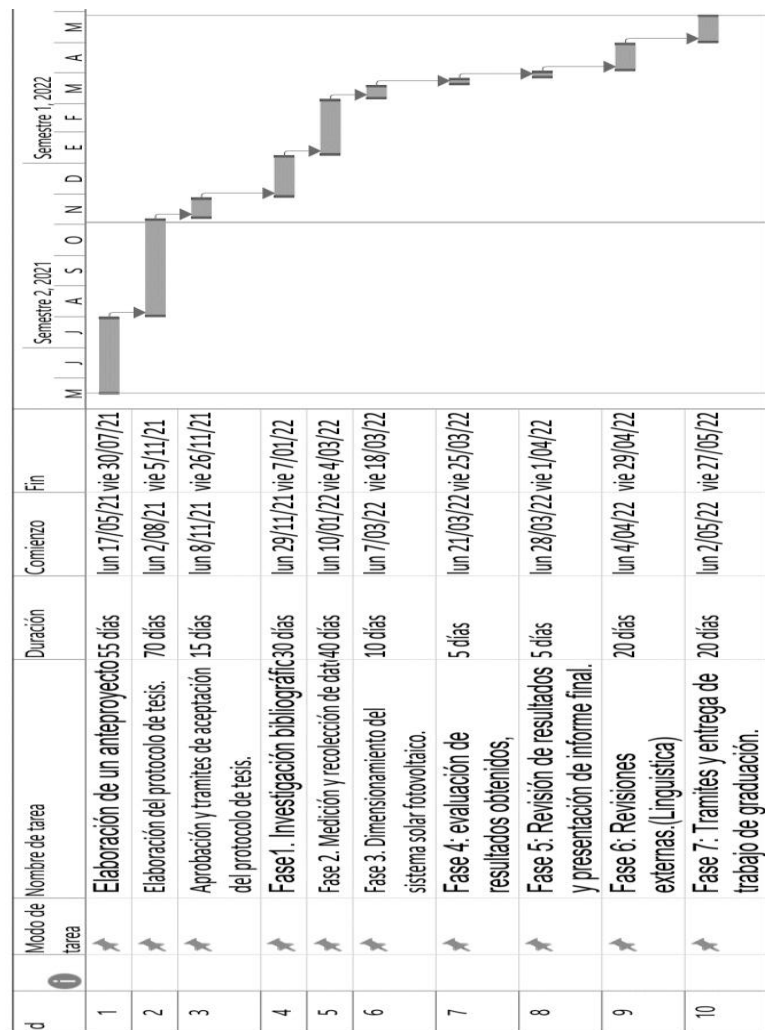
- Promedios del consumo de energía.
- Máximos potencia y energía
- Mínimos de potencia y energía
- Promedios de irradiación global de cada sitio de estudio



## 11. CRONOGRAMA

Para darle un seguimiento al desarrollo del trabajo de graduación se establecieron tiempos para cada fase y actividades relacionadas.

**Figura 17. Cronograma de actividades y fases de la investigación**



Fuente: elaboración propia.



## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para esta investigación se necesitará acceso a los recursos que están en la tabla V y el presupuesto se presenta en la tabla VI.

Tabla VI. **Disponibilidad del recurso.**

| <b>Recurso</b>            | <b>Disponibilidad</b>                                                                                                               |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Humano                    | Investigador: Paulo César Paniagua García.<br>Asesor: MA. Ing. Josué Miguel Ramírez Lemus.                                          |
| Financiero                | Se realizará la adquisición de datos de consumo con un monitor de energía, teniendo un costo de Q5,000.                             |
| Equipo de cómputo         | El equipo de cómputo lo proporcionara el investigador.                                                                              |
| Acceso al sito de estudio | Se tiene los accesos y permisos de tomas de datos en los sitios de telecomunicación por el responsable de operaciones de la región. |
| Fuentes de financiamiento | Financiamiento propio.                                                                                                              |

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Presupuesto.**

| <b>Tipo de recurso</b>    | <b>Costo (Q)</b> |
|---------------------------|------------------|
| Asesor                    | Q 3,000          |
| Transporte y alimentación | Q 2,000          |
| Monitor de energía        | Q 5,000          |
| Fotocopias e impresiones  | Q 300            |
| Gastos imprevistos        | Q 1,000          |
| <b>Total</b>              | <b>Q11,300</b>   |

Fuente: elaboración propia.



### 13. REFERENCIAS

1. Administrador del Mercado Mayorista. (2021). *Despacho de Carga del Sistema Nacional Interconectado*. Guatemala. Recuperado de [https://www.amm.org.gt/portal/?page\\_id=145](https://www.amm.org.gt/portal/?page_id=145).
2. Boylestad, R. L. (2004). *Introducción al análisis de circuitos eléctricos*. Mexico, México: Pearson Education.
3. Carta, J. A., Calero, R., Colmenar, A., y Castro, M. A. (2009). *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*. Madrid, España: Pearson educación, s.a.
4. Cole, B. A., Schmitt , R. J., y Szymborski, J. (1998). *Operational Characteristics of VRLA Batteries*. (IEEE, Ed.) 20th International Telecommunications Energy Conference.
5. De Soria, A. L. (2017). *Análisis de la utilización de baterías de litio en sistemas aislados de la red*. (Tesis de licenciatura). Universidad de Zaragoza, Zaragoza. Recuperado de <https://zaguan.unizar.es/record/64033?ln=es#>.
6. Descalzo, (2014). *Sistema híbrido diésel - fotovoltaico. (Trabajo de licenciatura)*. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid. Recuperado de [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/26418/TFG\\_Jorge\\_Descalzo\\_Sanchez\\_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/26418/TFG_Jorge_Descalzo_Sanchez_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

7. Edminister, J. A. (1965). *Circuitos eléctricos*. Akron, Estados Unidos de América : Schaum publishing Company.
8. Hernández, A. (2016). *Análisis económico de un sistema de almacenamiento para la disminución de desvíos de producción en un parque eólico*. (Trabajo de maestria). Universidad de Sevilla, Sevilla. Recuperado de <https://idus.us.es/handle/11441/49572>.
9. Institut Català d'Energia. (2011). *Energia solar fotovoltaica*. Cataluña, España: Generalitat de Catalunya.
10. Instituto de Investigación y Proyección sobre Ciencia y Tecnología de la Universidad Rafael Landívar. (2018). *Perfil energético de Guatemala: Bases para el entendimiento del estado actual y tendencias de la energía*. Guatemala, Guatemala; Universidad Rafael Landívar. Recuperado de <http://www.infoiarna.org.gt/publicacion/perfil-energetico-de-guatemala/>.
11. International Energy Agency. (6 de Mayo de 2021). *Datos y Estadísticas*. Recuperado: de [https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser/?country=WORLD&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2 BySector](https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser/?country=WORLD&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2%20BySector).
12. Kaderbhai, M. (18 de julio de 2017). *Understanding ISO 8528-1. Power topic #6240 / Technical information from Cummins, Inc*. Recuperado de <https://africa.cummins.com/sites/za/files/9%20September%202018%20-%20Understanding%20Generator%20Set%20Ratings.pdf>.

13. Leizán, I., Cervantes, J., Cisneros, O., Medina, A., y Melchor, C. (2008). *Gases y ruidos, dos contaminantes de los grupos electrógenos. Ciencia en su PC*, volumen (número), 56-65. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/1813/181320254007.pdf>.
  
14. NAP, G. (2002). *Energía Solar Fotovoltaica*. (C. O. Telecomunicación, Ed.) Madrid, España: Inforama S.A.
  
15. Organización de Naciones Unidas. (22 de Marzo de 2015). *Energía asequible y no contaminante*. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>.
  
16. Ortiz, S. E., y Puma, D. (2018). *Evaluación técnica y económica de la implementación de sistemas fotovoltaicos para la electrificación de radio bases remotas de CNT*. (Tesis de licenciatura). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
  
17. Reeve, W. (2007). *DC Power System Design for Telecommunications*. New Jersey, Estados Unidos de América: IEEE Press.
  
18. Rivas, C. A. (2016). *Diseño, montaje e instalación y mantenimiento de un sistema de distribución de energía eléctrica a un voltaje nominal de - 48vdc en sitios típicos de telecomunicaciones*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
  
19. Rojas, G. (abril de 2018). *Grupos electrógenos principios básicos. Boletín técnico* 20. Recuperado de <http://www.gedisa.com.ve/boletin/pdf/20.%20GRUPO%20ELECTROGENOS%20PRINCIPIOS%20BASICOS.pdf>.

20. Rojas, G. (abril de 2019). *La compresión de las clasificaciones de los grupos electrogenos*. *Boletín técnico*, 29. 1-7p. Recuperado de la <http://www.gedisa.com.ve/boletin/pdf/2019/29.%20Guia%20para%20comprension%20de%20clasificaciones%20de%20grupos%20electro%20publicado.pdf>.
21. Sánchez, A., Martínez, D., Santos, R., Ortega, J., y Sánchez, P. A. (2017). *Aplicaciones fotovoltaicas de la energía solar en los sectores residencial, servicio e industrial*. Ciudad de México, México: Instituto de Energías Renovables, UNAM. Recuperado de <http://www.fordecyt.ier.unam.mx/pdf/pdfFotoVoltaico.pdf>.
22. Shree, K., Jagan, N., y Shree, R. (mes, 2014). *Comparative Analysis of Solar-Wind Hybrid System with Diesel Generator System in Powering Remote Telecom Towers of Nepal using HOMER*. *International Conference on TIM & IOE*. Conferencia llevada a cabo en Lalitpur Nepal. Recuperado de <http://conference.ioe.edu.np/ioegc2014/papers/IOE-CONF-2014-58.pdf>.
23. Tagüite, J. A. (2020). *Análisis de sistemas híbridos para el suministro de energía eléctrica en equipos de telecomunicación de bajo consumo*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
24. Uriol, J. (2020). *Estudio de la viabilidad técnica y económica de un sistema de suministro fotovoltaico con respaldo en la red eléctrica en la empresa El Chalán S.A.C.* (Tesis de maestría). Universidad de Piura,

Piura, Perú . Recuperado de  
<https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/4773>.