

**DESCRIPCIÓN DEL SUBSISTEMA DE MONITORIZACIÓN  
DE LOS MICROINVERSORES ENPHASE M250.  
CASO: SISTEMA FV DEL EDIFICIO DE  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**EDINSON FABIÁN TARAZONA CALDERÓN  
SERGIO OMAR LÓPEZ NOVA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
DE TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2018**

**DESCRIPCIÓN DEL SUBSISTEMA DE MONITORIZACIÓN  
DE LOS MICROINVERSORES ENPHASE M250.  
CASO: SISTEMA FV DEL EDIFICIO DE  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**EDINSON FABIÁN TARAZONA CALDERÓN  
SERGIO OMAR LÓPEZ NOVA**

**Trabajo de grado para optar por el título de  
Ingeniero Electricista**

**Director:  
German Alfonso Osma Pinto  
Dr. en Ingeniería Eléctrica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2018**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos en primer lugar a Dios por la fortaleza y la perseverancia para culminar esta etapa de nuestras vidas y por permitirnos seguir en busca de nuevos retos.

A nuestro director de trabajo de grado, el Dr. German Alfonso Osma Pinto por la disposición, consejos y conocimiento que nos brindó durante el desarrollo de este trabajo de grado.

A nuestros amigos que compartieron su alegría y apoyo al finalizar este trabajo.

## **DEDICATORIAS**

*A mis padres por darme la oportunidad de estudiar, por su esfuerzo, paciencia, dedicación, confianza y amor que me han brindado para finalizar esta etapa de mi vida.*

*A mi hermana Deisy Carolina Cantillo Calderón, por brindarme su conocimiento, calma y paciencia, por ser mi farol y mi inspiración durante tantos años de mi vida.  
No tengo palabras para agradecerle todo lo que ha hecho por mi vida.*

*A mis amigos y compañeros durante la carrera, por haberme acompañado y compartido durante esta etapa, por brindarme su apoyo, compañía y amistad, lo cual hizo de todo este proceso de aprendizaje una muy agradable experiencia.*

**Edinson Fabián Tarazona Calderón**

*A Dios, quien gracias a Él he logrado alcanzar objetivos trazados. A Él, por la vida, la salud y la sabiduría necesaria para llevar a cabo mis planes.*

*A mis padres, Álvaro y Yolanda quienes me han ayudado muchísimo en este camino y que sin ellos no hubiese sido posible.*

*A mi hermana María Alejandra López Nova, quien me ha brindado su apoyo y hermandad para sobrellevar dificultades durante este proceso.*

*A Andrea Vanessa Otero Gélves por ser siempre un constante y muy valioso apoyo en este y demás proyectos de mi vida. A ella, por mostrarme su real desinterés y por su verdadero impacto en mi vida.*

**Sergio Omar López Nova**

## CONTENIDO

|  | Pág. |
|--|------|
| INTRODUCCION .....   | 17   |
| 1.ASPECTOS GENERALES DE UN SISTEMA FV .....  | 21   |
| 2.CONSTRUCCIÓN DE UNA BASE DE DATOS DEL SUBSISTEMA DE<br>MONITORIZACIÓN .....  | 27   |
| 2.1.CARACTERIZACIÓN DE FUENTES DE INFORMACIÓN.....   | 27   |
| 2.2.DEFINICIÓN DE LOS TEMAS.....   | 28   |
| 2.3.RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN .....  | 29   |
| 3.DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SUBSISTEMA DE<br>MONITORIZACIÓN DE LOS MICROINVERSORES ENPHASE M250 EN SU<br>COMUNICACIÓN, CONFIGURACIÓN Y VISUALIZACIÓN ..... | 31   |
| 3.1.UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA FV .....   | 31   |
| 3.2.MICROINVERSORES ENPHASE M250.....  | 37   |
| 3.3.ENVOY R Y SU FUNCIONAMIENTO .....  | 42   |
| 3.4.ENLIGHTEN MANAGER Y MY ENLGIHTEN .....   | 46   |
| 3.5.INSTALACIÓN DEL SISTEMA GRIPV #2 .....   | 55   |
| 4.RECOLECCIÓN DE DATOS Y ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE.....   | 57   |
| 4.1.GENERALIDADES DE LA MEDICIÓN .....   | 57   |
| 4.2.METODOLOGÍA DE LA MEDICIÓN .....   | 58   |
| 4.2.1. AcuRev 2000 .....   | 58   |
| 4.2.2. Enlighten.....  | 59   |
| 4.3.ESTRUCTURACIÓN DE LOS DATOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA<br>INCERTIDUMBRE DE MEDIDA .....  | 60   |
| 4.4.ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA.....  | 62   |
| 4.5.ANÁLISIS DE INDICADORES Y ESTRATIFICACIÓN DE LAS POTENCIAS<br>POR SEMANA.....  | 65   |
| 5.CONCLUSIONES .....   | 72   |

|                        |    |
|------------------------|----|
| 6.RECOMENDACIONES..... | 73 |
| 7.OBSERVACIONES.....   | 74 |
| BIBLIOGRAFIA.....      | 75 |
| ANEXOS.....            | 78 |

## LISTA DE FIGURAS

|  | Pág. |
|--|------|
| Figura 1. Metodología del proyecto.....  | 19   |
| Figura 2. Microinversor M250 de Enphase Energy tomada de Enphase.com. ....   | 22   |
| Figura 3. Microinversor Enphase M250 instalado en la terraza del Edificio de Ingeniería Eléctrica. ....                              | 23   |
| Figura 4. Envoy R de Enphase Energy instalado en el Edificio de Ingeniería Eléctrica. ....   | 24   |
| Figura 5. Medidor AcuRev de AccuEnergy instalado en los tableros eléctricos en la terraza del Edificio de Ingeniería Eléctrica. .... | 25   |
| Figura 6. Vista de la caracterización de la información creada. ....   | 28   |
| Figura 7. Vista del sistema FV instalado en el techo verde del Edificio de Ingeniería Eléctrica. ....                                | 32   |
| Figura 8. Seguidor solar ubicado en el 5° piso del Edificio de Ingeniería Eléctrica. ....  | 33   |
| Figura 9. Sistemas GRIPV #1 y #2 del Edificio de Ingeniería Eléctrica. ....  | 33   |
| Figura 10. Datos técnicos microinversores Enphase M250 tomada de LA Ficha Técnica Enphase M250. ....                                 | 34   |
| Figura 11. Tablero de distribución del sistema GRIPV #2. ....  | 36   |
| Figura 12. Configuración de un microinversor, tomado de Google Patents. ....   | 37   |
| Figura 13. Diagrama unifilar del sistema GRIPV #1.....   | 39   |
| Figura 14. Diagrama unifilar del sistema GRIPV #2.....   | 39   |
| Figura 15. Diagrama unifilar del sistema seguidor solar. ....  | 40   |
| Figura 16. Configuración del Gateway, tomado de Google Patents. ....   | 43   |
| Figura 17. Ubicación del Envoy instalado en el Edificio de Ingeniería Eléctrica. ..  | 44   |
| Figura 18. Conexión delta de los microinversores M250 y el Envoy.....  | 45   |
| Figura 19. Pantalla LCD del Envoy. ....  | 45   |

|  |    |
|--|----|
| Figura 20. Comparativo entre My Enlighten y Enlighten Manager. ....  | 46 |
| Figura 21. Sistema de paneles FV del Edificio de Ingeniería Eléctrica en Enlighten.<br>.....                   | 47 |
| Figura 22. Descripción general del sistema FV del Edificio de Ingeniería Eléctrica<br>en My Enlighten. ....    | 48 |
| Figura 23. Funciones principales My Enlighten .....  | 49 |
| Figura 24. Producción del sistema FV del Edificio de Ingeniería Eléctrica en My<br>Enlighten.....              | 50 |
| Figura 25. Funciones principales Enlighten Manager. ....   | 51 |
| Figura 26. Vista de Enlighten Manager del sistema FV instalado en el Edificio de<br>Ingeniería Eléctrica. .... | 51 |
| Figura 27. Gráficos en Enlighten Manager. ....   | 52 |
| Figura 28. Generación de reportes en Enlighten Manager. ....   | 53 |
| Figura 29. Centro de ayuda de Enlighten. ....  | 54 |
| Figura 30. Día de trabajo en la instalación del sistema GRIPV #2.....  | 55 |
| Figura 31. Día de trabajo en la instalación del sistema GRIPV #2.....  | 56 |
| Figura 32. Datos recolectados de AcuRev.....   | 59 |
| Figura 33. Descarga de datos de potencia en Enlighten. ....  | 60 |
| Figura 34. Datos recolectados de Enlighten acometida 8 semana 1. ....  | 60 |
| Figura 35. Tabla datos de Acometida8 AcuRev vs Enlighten. ....   | 61 |
| Figura 36. Grafica de la potencia de AcuRev y Enlighten del microinversor #<br>121525063855 para un día.....   | 67 |
| Figura 37. Grafica de potencia de AcuRev y Enlighten del microinversor #<br>121525063855 para una semana ..... | 68 |
| Figura 38. Grupo 1 Pgen vs Error relativo acometida 8. ....  | 69 |
| Figura 39. Grupo 4 Pgen vs Error relativo acometida 8. ....  | 70 |
| Figura 40. Grupo 5 Pgen vs Error relativo acometida 8. ....  | 70 |

## LISTA DE TABLAS

Pág.

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Información general del sistema FV instalado en el Edificio de Ingeniería Eléctrica. .... | 40 |
| Tabla 2. Estados del Led del microinversor Enphase. ....   | 41 |
| Tabla 3. Generalidades de la medición.....   | 58 |
| Tabla 4 Resumen de Energía en una semana del Microinversor 121525063855 de Acometida 8.....        | 67 |
| Tabla 5.Tabla estratificación de potencias acometida 8. ....                                       | 68 |

## LISTA DE ANEXOS

|   | Pág. |
|---|------|
| Anexo A. TABLAS DE LA MEDIDA DE LA ACOMETIDA .....    | 78   |
| Anexo B. GRÁFICAS ESTRATIFICACIÓN DE LA POTENCIA..... | 81   |

## RESUMEN

**TÍTULO:** DESCRIPCIÓN DEL SUBSISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE LOS MICROINVERSORES ENPHASE M250. CASO: SISTEMA FV DEL EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.<sup>1</sup>

**AUTORES:** SERGIO OMAR LÓPEZ NOVA, EDINSON FABIÁN TARAZONA CALDERÓN.<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVE:** Subsistema de monitorización, microinversores, Envoy, Enlighten, Enphase M250, incertidumbre, potencia.

**DESCRIPCIÓN:** El presente trabajo de grado se realiza bajo el desarrollo investigativo del grupo GISEL en el marco de un proyecto COLCIENCIAS (Convocatoria 745 de 2016, ejecución de noviembre de 2017 a abril de 2019) que describe la monitorización del sistema Enphase M250 instalado en el Edificio de Ingeniería Eléctrica. Con este fin, se aborda y se realiza la caracterización de fuentes de información relacionada al subsistema de monitorización de los microinversores Enphase M250, creando una base de datos en Excel, la descripción del subsistema de monitorización mencionado en su configuración, comunicación y visualización y la estimación de la incertidumbre de la potencia generada por comparación con un medidor de referencia, AcuRev 2000. Adicionalmente, se plantea el análisis del comportamiento en los resultados de las mediciones y una estratificación de los datos de potencia suministrados para estimar la fiabilidad del sistema de monitoreo del Edificio de Ingeniería eléctrica.

Para el desarrollo y ejecución de este trabajo de grado, se empleó una búsqueda profunda de información en Internet, además del uso de Enlighten de Enphase, plataforma web que permite la visualización y monitorización del sistema FV, en la descarga de reportes de potencia, y de recursos como Excel y el medidor AcuRev.

---

<sup>1</sup> Trabajo de investigación.

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: German Alfonso Osma Pinto.

## ABSTRACT

**TITLE:** DESCRIPTION OF THE MONITORING SUBSYSTEM OF THE MICROINVERSORS ENPHASE M250. CASE: PV SYSTEM OF THE ELECTRICAL ENGINEERING BUILDING.<sup>1</sup>

**AUTHORS:** SERGIO OMAR LÓPEZ NOVA, EDINSON FABIÁN TARAZONA CALDERÓN.<sup>2</sup>

**KEYWORDS:** Monitoring subsystem, microinverters, Envoy, Enlighten, Enphase M250, uncertainty, power.

**DESCRIPTION:** The present degree work is carried out under the research development of the GISEL group within the framework of a COLCIENCIAS project (Call 745 of 2016, execution from November 2017 to April 2019) that describes the monitoring of the Enphase M250 system installed in the Building of Electric Engineering. To this end, it is addressed and carried out the characterization of information sources related to the monitoring subsystem of the Enphase M250 microinverters, creating a database in Excel, the description of the monitoring subsystem mentioned in its configuration, communication and visualization and the uncertainty estimation of the power generated by comparison with a reference meter, AcuRev 2000. Additionally, the analysis of the behavior of the results of the measurements and a stratification of the power data supplied to estimate the reliability of the Building of Electric Engineering's motoring system is considered.

For the development and execution of this degree work, a thorough search of information on the Internet was implemented, in addition to the use of Enlighten from Enphase, web platform that allows the visualization and monitoring of the PV system, in the download of power reports; and of resources such as Excel and the AcuRev meter.

---

<sup>1</sup> Trabajo de investigación.

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: German Alfonso Osma Pinto.

## INTRODUCCION

Durante las últimas décadas la preocupación por parte de la sociedad hacia los problemas del medio ambiente ha aumentado, en Colombia se ha creado un interés particular por los diferentes tipos de energías renovables no convencionales, por ejemplo, la implementación de sistemas fotovoltaicos<sup>5</sup>.

Los avances científicos en el campo de la ingeniería hacen que este tipo de energía sea cada vez más atractiva para el uso cotidiano e industrial. Según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), se evidencia un importante crecimiento de proyectos que involucran el uso de energías alternativas tales como la energía solar, esta tecnología se desarrolla en el 88,3% de los proyectos presentados a la entidad<sup>6</sup>.

La Universidad Industrial de Santander por medio del Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL, con apoyo de COLCIENCIAS ha estado promoviendo el estudio sobre el impacto de la generación distribuida en las redes eléctricas de baja tensión, vislumbrando el impacto que tienen estos dispositivos en las redes eléctricas de Colombia. Actualmente, por ejemplo, se encuentra en desarrollo el trabajo de investigación “VIABILIDAD TÉCNICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS (FV) INTEGRADOS CON VEGETACIÓN COMO ESTRATEGIA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y HORTICULTURA EN ENTORNOS URBANOS DE CLIMA CÁLIDO TROPICAL”.

Debido a lo anterior, la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones-E3T decidió incorporar un sistema FV de 10 kW con paneles

---

<sup>5</sup> EL TIEMPO. Nueve de cada 10 proyectos para generar energía usarán paneles solares.

<sup>6</sup> EL TIEMPO. Nueve de cada 10 proyectos para generar energía usarán paneles solares.

FV de aproximadamente 260 W y microinversores Enphase M250 en la terraza del Edificio de Ingeniería Eléctrica. La instalación ha sido fuente para el desarrollo de diferentes trabajos de investigación durante los últimos 3 años, estudios que han permitido fortalecer los conocimientos de los integrantes de la Escuela sobre estos dispositivos.

A pesar de los avances significativos en este ámbito, se ha observado una carencia de información técnica detallada que describa las capacidades de monitorización de los microinversores utilizados, por lo que este trabajo de grado tiene como propósito principal la descripción de la operación de estos dispositivos.

Específicamente este trabajo de investigación busca apropiarse de la dinámica de operación del subsistema de monitorización de los microinversores Enphase M250, instalados en el Edificio de Ingeniería Eléctrica, para lo cual se lleva a cabo la descripción detallada de la comunicación, visualización y configuración de los microinversores y su módulo de gestión. Posteriormente, se realiza una estimación del nivel de incertidumbre de la monitorización de la potencia generada por el sistema.

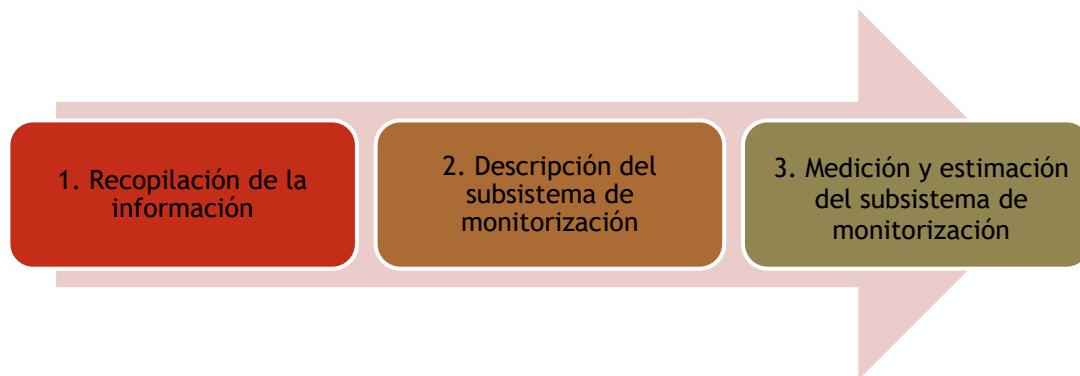
Por consiguiente, el objetivo general del proyecto es: describir las características técnicas y las funciones de monitorización de los microinversores Enphase y Envoy instalados en el sistema FV del Edificio de Ingeniería Eléctrica. Para lo cual se desarrollaron los siguientes objetivos específicos:

- Construir una base de datos a partir de fuentes disponibles (manuales, patentes, artículos científicos, reportes técnicos, etc.) que relacionen la información del subsistema de monitorización de los microinversores Enphase M250.
- Describir la operación del subsistema de monitorización de los microinversores Enphase M250 en su comunicación, configuración y visualización.

- Estimar el nivel de incertidumbre en la medición de la potencia generada a partir de la comparación con un medidor clase 0,5.

A partir de los objetivos, la metodología se definió mediante tres fases, como se observa en la Figura 1. La primera fase consistió en la recopilación de la información, para luego realizar la descripción y documentación del subsistema de monitorización y, por último, efectuar la medición de la potencia para la estimación del nivel de incertidumbre de medida del subsistema.

Figura 1. Metodología del proyecto.



La fase de recopilación de la información se desarrolló mediante una búsqueda de trabajos, manuales, artículos científicos, patentes, reportes técnicos, etc. Esta búsqueda permitió recolectar información actualizada acerca de los subsistemas de monitorización de los microinversores Enphase M250 y Envoy.

Se creó un archivo en Excel donde se clasificó la información encontrada por subtemas. Seguidamente, se procedió a la depuración de la información recolectada, identificando la información más relevante para la comprensión del funcionamiento de los subsistemas de monitorización.

En la segunda fase se describe la instalación y el modo de operación del subsistema de monitorización del techo verde. Esta fase se enfoca en la descripción de:

- Comunicación entre el microinversor Enphase M250 y el Envoy vía PLC.
- Visualización de la información suministrada por el subsistema.
- Configuración y mantenimiento del subsistema de monitorización.

Luego de organizar la información se inició su documentación, de tal manera que se construyó una guía de la operación del subsistema de monitorización. El contenido de la guía contempla las tres operaciones mencionadas, se incluye textos, mapas conceptuales, gráficos y ayudas visuales.

En la última fase se llevó a cabo la medición de la potencia generada por dos paneles FV a partir de un medidor de clase 0,5. Luego con los datos obtenidos, se procedió a la estimación de la incertidumbre de medida del subsistema de monitorización.

## 1. ASPECTOS GENERALES DE UN SISTEMA FV

La generación distribuida tiene como principal característica la ubicación estratégica de sistemas de energías renovables no convencionales cercanos a la red de distribución. Esta actividad permite la reducción de pérdidas, mejoras en la calidad de la energía, menos interrupciones y mayor eficiencia. Sus principales prácticas son los sistemas solares FV, eólicos y geotérmicos<sup>7</sup>.

Las instalaciones solares FV contienen dos grandes grupos: sistemas aislados, los cuales son sistemas con autonomía propia que no están conectados a la red pública y sistemas conectados a la red eléctrica<sup>8</sup>. Estos sistemas constan de paneles FV, microinversores, cuadro de protecciones y medidores.

“Un panel FV es una placa rectangular, formada por un conjunto de células FV protegidas por un marco de vidrio y aluminio anodizados. La función principal de un panel FV es la de soportar mecánicamente a las células FV y de protegerlas de los efectos degradables de la intemperie. La vida útil de un panel FV puede llegar a los 30 años, aunque los fabricantes otorgan garantías de 20 años. El mantenimiento típico consiste de una limpieza del vidrio para prevenir que las células FV no puedan capturar la radiación solar”<sup>9</sup>.

Por otra parte, los microinversores contribuyen al aumento en el rendimiento y confiabilidad del sistema. Un microinversor tiene como principal función transformar la energía de corriente continua, la cual es entregada por los módulos solares, en energía de corriente alterna que es consumida o alimentada a las cargas<sup>10</sup>.

---

<sup>7</sup> CREG. La generación distribuida y su posible integración al sistema interconectado nacional.

<sup>8</sup> RODRÍGUEZ, Julieta *et al.* Energías Renovables y Eficiencia Energética. Canarias, España: 2008, 66p.

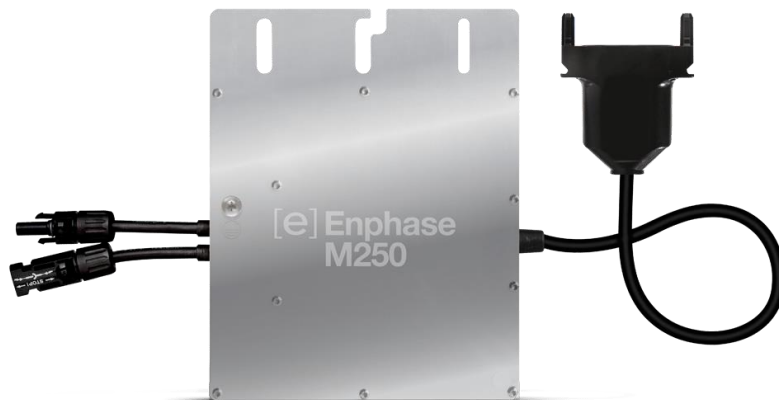
<sup>9</sup> PILCO, Diego y JARAMILLO, Jorge. Sistemas fotovoltaicos para iluminación: paneles fotovoltaicos

<sup>10</sup> ENPHASE ENERGY.

El microinversor de Enphase cuenta con un algoritmo capaz de maximizar la producción de energía, es denominado algoritmo de registro de punto máximo de potencia (MPPT). Esta configuración permite que un MPPT individual controle cada módulo fotovoltaico, lo que asegura que exporte la potencia máxima disponible a la red eléctrica, teniendo en cuenta las condiciones climáticas y eventos como la suciedad o sombras; independientemente del rendimiento de los otros módulos fotovoltaicos del conjunto de paneles<sup>11</sup>.

El modelo Enphase M250, que se observa en las figuras 2 y 3, cuenta con un sistema de comunicación y monitorización, el cual permite que el microinversor sea capaz de enviar información de la operación, a través del cableado eléctrico PLC, hacia una puerta de enlace de comunicaciones denominado Envoy, que a su vez tiene la capacidad de recopilar y compilar esta información para transmitirla periódicamente vía Internet a la plataforma de monitorización denominada Enlighten de Enphase.

Figura 2. Microinversor M250 de Enphase Energy tomada de Enphase.com.



---

<sup>11</sup> ENPHASE ENERGY. Manual de Instalación y Funcionamiento Microinversores Enphase M250.

Figura 3. Microinversor Enphase M250 instalado en la terraza del Edificio de Ingeniería Eléctrica.



Estos microinversores hacen parte de la cuarta generación de Enphase, por lo que se caracterizan por tener un sistema de tierra integrado y aislado de corriente continua (IG). Este sistema le permite a los microinversores detectar fallas a tierra en el conductor DC positivo o negativo del módulo FV. Otra de las características importantes de los microinversores Enphase es su protección contra sobretensiones incorporada<sup>12</sup>.

El Envoy apreciado en la Figura 4, es un dispositivo que permite la programación y actualización de los microinversores, la adquisición y reporte de información de éstos durante su activación, el monitoreo del sistema para mantenimiento y el procesamiento de las garantías de Enphase. Este aparato se comunica con un máximo de 600 microinversores y permite la comunicación con la página web Enlighten, que registra y reporta las acciones realizadas por el sistema; durante los

---

<sup>12</sup> ENPHASE ENERGY. Manual de Instalación y Funcionamiento Microinversores Enphase M250.

tiempos de producción de energía cero (noche) reduciendo de igual manera el uso de banda ancha de Internet. Por lo general, el Envoy consume 2.5 W de potencia<sup>13</sup>.

Figura 4. Envoy R de Enphase Energy instalado en el Edificio de Ingeniería Eléctrica.



El software Enlighten presenta dos tipos de interfaces para la monitorización del sistema FV instalado, denominados My Enlighten y Enlighten Manager. El primero es utilizado por los propietarios de sistemas que solo desean realizar un seguimiento de su producción de energía, monitorear el estado del sistema y compartir los datos con otras personas; el segundo, por los profesionales de energía solar interesados en una administración de datos más sencilla e inteligente<sup>14</sup>.

Otros dispositivos de gran importancia y utilidad en un sistema FV son los medidores, ya que éstos permiten una segunda monitorización en las mediciones

<sup>13</sup> ENPHASE ENERGY. Manual de Instalación y Funcionamiento Envoy Communications Gateway.

<sup>14</sup> ENPHASE ENERGY .productos-y-servicios. Enlighten-y-aplicaciones.

aparte de las tomadas por el sistema Enphase. De esta manera, se pueden comparar las mediciones obtenidas por parte de los medidores con las de la plataforma Enlighten y así favorecer el correcto comportamiento del sistema FV.

El medidor AcuRev de la empresa AccuEnergy es un equipo de medición en tiempo real de variables eléctricas como tensión, corriente, potencia, factor de potencia y frecuencia, mide el consumo de energía y supervisa parámetros de calidad de la energía de máximo 18 circuitos monofásicos (o 6 circuitos trifásicos) en una unidad. Asimismo, este medidor de clase 0.5 tiene su propio software para la descarga de datos medidos en un período determinado, transformadores de corriente integrados y una memoria de 8 MB<sup>15</sup>. La Figura 5 muestra este dispositivo.

Figura 5. Medidor AcuRev de AccuEnergy instalado en los tableros eléctricos en la terraza del Edificio de Ingeniería Eléctrica.



La incertidumbre es un parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza<sup>16</sup>. En

<sup>15</sup> ACCUENERGY. AcuRev 2000 Multi-circuits Networked Multifunction Power Energy Meter.

<sup>16</sup> VIM. Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados.

otras palabras, la incertidumbre es la desconfianza que se tiene sobre la veracidad de una magnitud que se determina midiendo.

## **2. CONSTRUCCIÓN DE UNA BASE DE DATOS DEL SUBSISTEMA DE MONITORIZACIÓN**

Para realizar la caracterización de fuentes de información relacionada al subsistema de monitorización de los microinversores Enphase M250, se creó una base de datos en Excel de forma matricial, donde se seleccionó y se clasificó información disponible encontrada en manuales, patentes, videos, artículos científicos, reportes técnicos y lecturas fundamentadas en el tema en particular. A continuación, se describen los pasos para la elaboración de la base de datos.

### **2.1. CARACTERIZACIÓN DE FUENTES DE INFORMACIÓN**

La matriz denominada caracterización de fuentes de información presenta 10 temas principales relacionados con el presente proyecto: Enlighten, Microinversor (Enphase M250), Mantenimiento, Comunicación, Envoy, Medición, Instalación, Reportes, Rendimiento, Configuración.

En la parte izquierda de la matriz, bajo cada tema se puede realizar un filtro por color negro, lo cual permite conocer los archivos relacionados con el mismo, 37 archivos en total. Seguido de su título, los respectivos enlaces a las páginas web para su visualización y/o lectura y, por último, se encuentra el tipo de documento del archivo, es decir, si este es Manual, Patente, Informe Enphase, Informe de Ingeniería o Video. En la Figura 6 se evidencia lo anterior.

Cabe aclarar la diferencia entre Informe de Enphase e Informe de Ingeniería, el primero hace alusión a informes desarrollados por Enphase e informes encargados a laboratorios especializados, y la segunda a informes y conferencias de personas ajenas a Enphase que realizaron sus estudios y análisis con los dispositivos de ésta.

Figura 6. Vista de la caracterización de la información creada.

|   | ENLIGHTEN | INVERTIDOR MICROINVERSOR | COMUNICACIÓN ENVYO | MANTENIMIENTO | RECOMENDACIONES | CONFIGURACIÓN | TÍTULO  | ARCHIVO   | DESCRIPCIÓN   |
|---|-----------|--------------------------|--------------------|---------------|-----------------|---------------|---|---|---------------|
| 1 |           |                          |                    |               |                 |               | MANUAL DE INSTALACIÓN Y FUNCIONAMIENTO                                    | <a href="https://enphase.com/sites/default/files/downloads/support/M250-M250-manual-ES-1.6C.pdf">https://enphase.com/sites/default/files/downloads/support/M250-M250-manual-ES-1.6C.pdf</a>                       | MANUAL        |
| 2 |           |                          |                    |               |                 |               | Hoja de datos M250  | <a href="https://enphase.com/sites/default/files/downloads/support/M250-DS-ES.pdf">https://enphase.com/sites/default/files/downloads/support/M250-DS-ES.pdf</a>   | FICHA TÉCNICA |
| 3 |           |                          |                    |               |                 |               | METHOD AND APPARATUS FOR CONVERTING DIRECT CURRENT TO ALTERNATING CURRENT | <a href="https://patentimages.storage.googleapis.com/3a/15/1e/1a26ab023e0c10e/US8717780.pdf">https://patentimages.storage.googleapis.com/3a/15/1e/1a26ab023e0c10e/US8717780.pdf</a>                               | PATENTE       |
| 4 |           |                          |                    |               |                 |               | MANUAL DE INSTALACION Y FUNCIONAMIENTO ENVYO                              | <a href="https://enphase.com/sites/default/files/downloads/support/Envoy_Manual_de_instalacion_60Hz_ES.pdf">https://enphase.com/sites/default/files/downloads/support/Envoy_Manual_de_instalacion_60Hz_ES.pdf</a> | MANUAL        |

La mayoría de los artículos, patentes y videos se presentan en inglés. En el caso que no se cuente con conexión a internet o se deshabiliten los enlaces, se decidió crear un archivo soporte con los archivos relacionados en la matriz. La Tabla de caracterización de la información junto con los archivos se encuentra en el Anexo del CD (Bibliografia.rar).

## 2.2. DEFINICIÓN DE LOS TEMAS

La definición de los temas se hizo a partir de la experiencia de trabajos realizados en el techo verde del edificio y reuniones con los encargados de la puesta en marcha del sistema FV. Lo anterior tuvo como propósito responder a las posibles dudas que pueden surgir por parte de los ingenieros interesados en este sistema. A continuación, se enlistan los temas tratados:

1. Enlighten:
2. Microinversor:
3. Envoy:
4. Mantenimiento: Recomendaciones de Enphase para solucionar problemas y mantenimiento a los dispositivos.

5. Comunicación: Contiene todos los documentos que hacen referencia a la forma de comunicarse entre dispositivos y plataforma.
6. Medición: Incluye documentos lo cuales hablan de las formas de medir del subsistema y algunos algoritmos de monitorización de la medida.
7. Instalación: Trata de la instalación física de todos los dispositivos.
8. Reportes: Hace referencia a como visualizar y generar reportes en la plataforma.
9. Rendimiento: Son los documentos que avalan la eficiencia y vida útil de los dispositivos.
10. Configuración: Hace referencia a la puesta en marcha de los dispositivos y su programación.

### **2.3. RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN**

Definido el uso, la estructura y los temas que conformarían la matriz caracterización de fuentes de información se procedió a realizar el trabajo de campo para llenar dicha matriz. Los criterios de búsqueda utilizan dos filtros: 1) Información relacionada con los equipos instalados en el techo verde y 2) Archivos que abordan con los 10 temas expuestos en el numeral 2.2.

La búsqueda de fuentes de información se realizó principalmente desde la web de Enphase Energy en los apartados de Latinoamérica, Estados Unidos, Australia y Reino Unido. En dichas plataformas la búsqueda se centró en apartados de soporte para profesionales e instaladores, vendedores y patentes. De las 144 patentes encontradas en la plataforma de Enphase, se seleccionaron aquellas que tenían mayor impacto y fechas de publicación cercanas al Envoy y el microinversor M250<sup>17</sup>.

---

<sup>17</sup> Leyendo el documento desde Google patentes.

La selección se realizó de esta forma, debido a que Enphase no referencia las patentes usadas en sus productos<sup>18</sup>.

También se realizaron búsquedas en IEEEExplorer y Google académico, donde las principales palabras clave usadas fueron: Enphase Energy, *Microinverter M250 Y M215*, Envoy Enphase.

---

<sup>18</sup> A pesar del intento de entablar contacto con esta empresa para obtener más información de la relación entre las patentes y productos, esto no fue posible.

### **3. DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SUBSISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE LOS MICROINVERSORES ENPHASE M250 EN SU COMUNICACIÓN, CONFIGURACIÓN Y VISUALIZACIÓN**

Se realiza la descripción del subsistema de monitorización de los microinversores Enphase M250 del sistema FV instalado en el Edificio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander, UIS.

#### **3.1. UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA FV**

El sistema FV objeto de estudio se encuentra ubicado en el techo verde del Edificio de Ingeniería Eléctrica, de la Universidad Industrial de Santander. El montaje y puesta en marcha del sistema comenzó en el año 2015.

Este sistema tiene tres características fundamentales:

- Uso de microinversores que permiten la conversión de corriente continua a corriente alterna de manera más eficiente.
- Permite la comunicación en tiempo real entre los microinversores y el mando central, es decir, el Envoy.
- Emplea una plataforma virtual que facilita el análisis y la generación de reportes del sistema general.

Figura 7. Vista del sistema FV instalado en el techo verde del Edificio de Ingeniería Eléctrica.



Actualmente, el sistema cuenta con 37 paneles FV: uno de ellos se utiliza como seguidor solar, es decir, un dispositivo mecánico capaz de orientar los paneles FV de forma que éstos permanezcan aproximadamente perpendiculares a los rayos solares, siguiendo al sol desde todos los ángulos, está ubicado en el último piso (5to) del edificio, el cual se puede apreciar en la Figura 8. Los 36 módulos restantes, que pueden ser vistos en la Figura 9, están divididos en dos grupos de 18 paneles, llamados GRIPV<sup>19</sup> #1 y GRIPV #2. Cada una de las estructuras de los paneles solares tiene una inclinación de  $10^\circ$  y un acimut de  $180^\circ$ , las marcas y modelos de las estructuras son: Canadian Solar CS6P-255P, Yingli Solar YL255C-30b y Trina Solar TSM-270DC05A.08.

---

<sup>19</sup> Green Roof Integrated Photovoltaics.

Figura 8. Seguidor solar ubicado en el 5° piso del Edificio de Ingeniería Eléctrica.



Figura 9. Sistemas GRIPV #1 y #2 del Edificio de Ingeniería Eléctrica.



El sistema GRIPV #1, cuenta con 9 módulos Canadian Solar, 6 Trina Solar y 3 Yingli Solar; mientras que el sistema GRIPV #2 y el seguidor solar, tienen todos sus módulos de la marca Canadian Solar. Todos los paneles FV instalados se componen de 60 celdas FV.

Los microinversores Enphase M250 presentan una potencia máxima de salida de 250 W en AC y generan una tensión de 208 VAC para conexión trifásica y 240 VAC para conexión monofásica. En la Figura 10 se pueden observar otras características de estos microinversores:

Figura 10. Datos técnicos microinversores Enphase M250 tomada de LA Ficha Técnica Enphase M250.

| <b>Microinversor M250 de Enphase</b>                          |  |  |
|---|--|--|
| <b>DATOS DE ENTRADA (CC)</b>                                  | <b>MODELOS:<br/>M250-60-2LL-S22,<br/>M250-60-2LL-S25</b> | <b>MODELOS:<br/>M250-72-2LL-S22,<br/>M250-72-2LL-S25</b> |
| Combinación de módulos recomendado <sup>1</sup>               | 210 - 350+ W   | 210 - 350+ W   |
| Compatibilidad  | Módulos fotovoltaicos de 60 celdas                       | Módulos fotovoltaicos de 60 y 72 células                 |
| Tensión máxima de DC de entrada                               | 48 V   | 62 V   |
| Tensión máxima de registro de corriente                       | 27 V - 37 V  | 27 V - 48 V  |
| Intervalo de funcionamiento                                   | 16 V - 48 V  | 16 V - 60 V  |
| Tensión de arranque mínima/máxima                             | 22 V/48 V  | 22 V/48 V  |
| Corriente de cortocircuito de CC máxima                       | 15 A   | 15 A   |
| <b>DATOS DE SALIDA (CA)</b>                                   |  |  |
| Potencia máxima de salida                                     | 250 W  |  |
| Potencia de salida (continua) nominal                         | 240 W  |  |
| Corriente de salida nominal                                   | 1,15 A @ 208 V CA<br>1,0 A @ 240 V CA                    |  |
| Tensión nominal/intervalo                                     | 208 V/183-229 V @ 208 V CA<br>208 V/211-264 V @ 208 V CA |  |
| Frecuencia nominal/intervalo                                  | 60,0/57-61 Hz  |  |
| Intervalo de frecuencia extendido <sup>2</sup>                | 57-62,5 Hz   |  |
| Factor de potencia  | >0,95  |  |
| Máximo de unidades por circuito derivado de 20 A              | 24 (208 V CA trifásico)<br>16 (240 V CA monofásico)      |  |
| Corriente máxima de falla de salida                           | 850 mA RMS para 6 ciclos                                 |  |
| <b>EFICIENCIA</b>   |  |  |
| Rendimiento ponderado del CEC                                 | 96,5 %   |  |
| Rendimiento máximo del inversor                               | 96,5 %   |  |
| Rendimiento estático del MPPT (ponderado, referencia EN50530) | 99,4 %   |  |
| Consumo de energía nocturno                                   | máximo de 65 mW  |  |

**Fuente:** ENPHASE. Datos técnicos microinversores Enphase M250. Manual de Instalación y Funcionamiento Microinversores Enphase M250 [imagen].

Los modelos de microinversores comprados para la instalación del sistema fueron:

- Microinversor M250-60-2LL-S22, compatible para paneles de 60 celdas.
- Microinversor M250-72-2LL-S22, compatible para paneles de 60 y 72 celdas

Los anteriores modelos se diferencian principalmente en su tensión de entrada máxima DC (48 V y 62 V) y en su potencia de salida nominal (240 W y 250 W) <sup>20</sup>.

Estos microinversores se encuentran conectados por la parte de debajo de cada panel FV de forma horizontal, siguiendo así la recomendación propuesta por Enphase. La mayoría de los microinversores están conectados mediante un cable Engage, por medio del cual se realizan las conexiones a la acometida.

El modelo Envoy utilizado en el sistema es el Envoy R de clase B y precisión de medida de máximo 5%<sup>21</sup> con número serial 121523006484. Este dispositivo que cumple la norma industrial canadiense ICES-003, tiene la capacidad de enlazar hasta 600 microinversores. En otras palabras, realiza la función de mensajero recibiendo información por parte de los microinversores y enviándola a la plataforma virtual llamada *Enlighten*<sup>22</sup>.

*Enlighten* es proporcionada también por la empresa Enphase, la cual es una página web donde se registran todos los movimientos que los microinversores realizan durante el día. Es un software interactivo de uso sencillo suministrado a los propietarios del sistema FV para facilitar la supervisión del sistema.

---

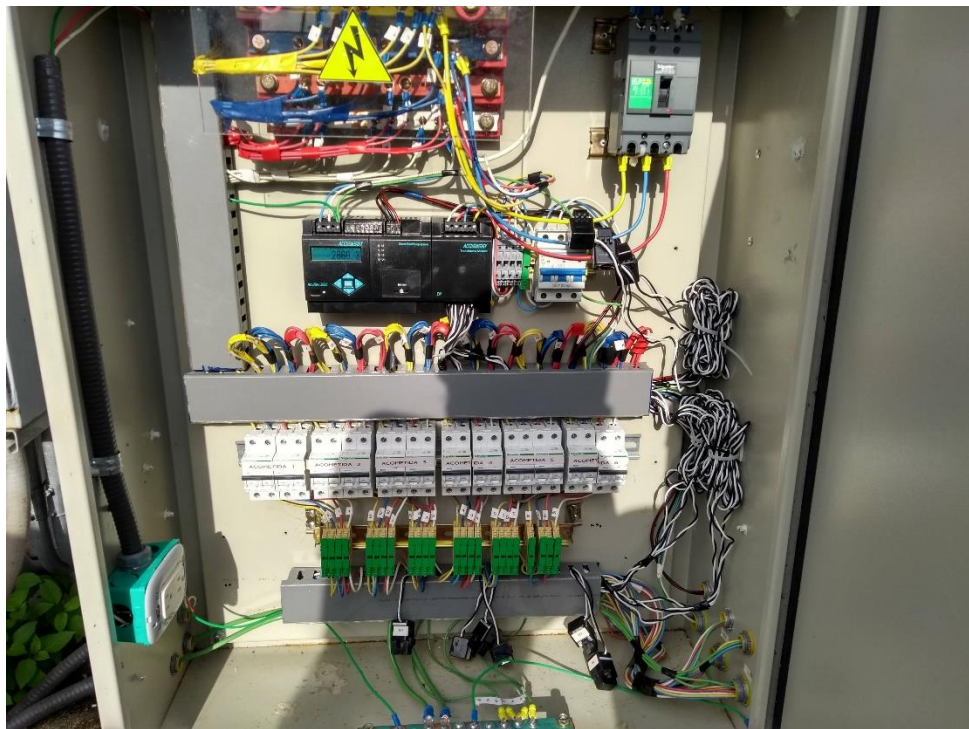
<sup>20</sup> SOLAR DESIGN TOOL. Compare Inverters.

<sup>21</sup> ENPHASE ENERGY. Manual de Instalación y Funcionamiento Envoy Communications Gateway.

<sup>22</sup> [www.enlighten.enphaseenergy.com](http://www.enlighten.enphaseenergy.com)

Además, se cuenta con dos tableros de acometidas o también conocido como tablero de distribución, uno para cada grupo de paneles FV, GRIPV #1 y GRIPV #2, respectivamente. En cada tablero se reúnen todas las salidas de los microinversores, cumpliendo con las normativas colombianas. Cada tablero cuenta con sus respectivas protecciones, medidores y totalizadores. La Figura 11 muestra el tablero de distribución del sistema GRIPV #2.

Figura 11. Tablero de distribución del sistema GRIPV #2.



Se cuenta también con un espacio vegetal verde que permite la experimentación en la horticultura y el desarrollo de estudios de investigación por parte de la Escuela de Biología de la UIS.

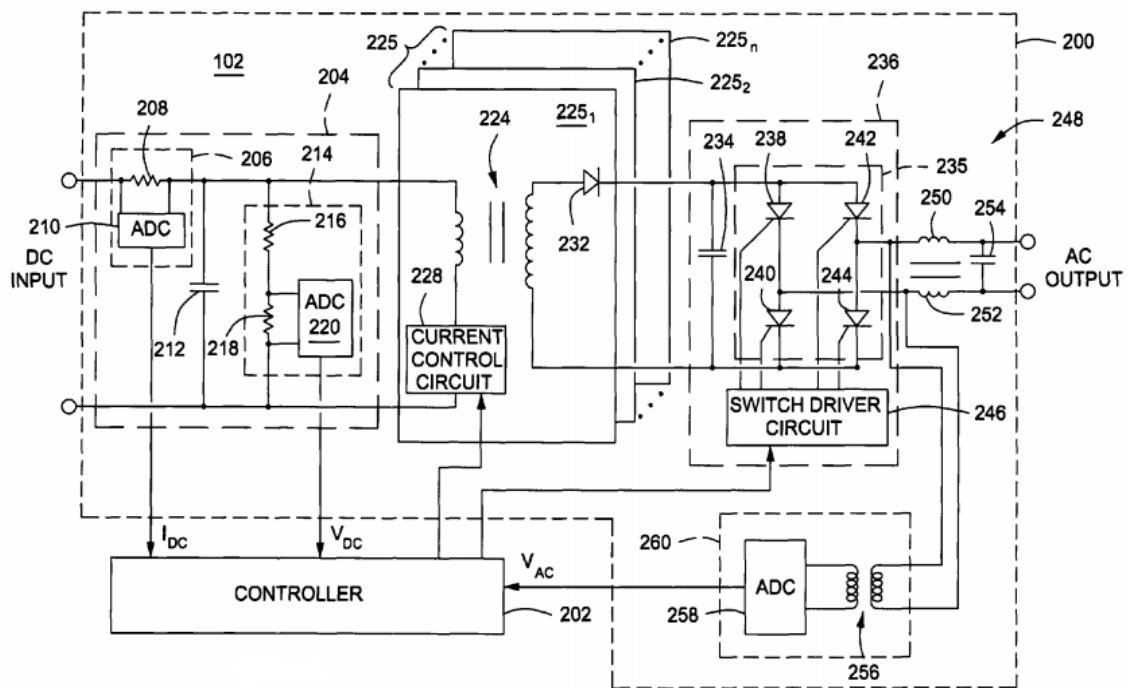
El sistema FV aporta aproximadamente el 20% de la energía necesaria para el desarrollo de las actividades en el Edificio de Ingeniería Eléctrica.

### 3.2. MICROINVERSORES ENPHASE M250

Los microinversores Enphase, en contraste con otras tecnologías similares han demostrado que producen más energía, dado que cada uno es independiente y operan con mayor producción al amanecer, al anochecer, en las sombras y días de poca luz. En adición, a diferencia de los inversores tradicionales, no tienen partes movibles como ventiladores que pueden causar fallos en todo el sistema<sup>23</sup>.

En general, los microinversores están conformados por una serie de elementos electrónicos, tal como lo muestra la Figura 12.

Figura 12. Configuración de un microinversor, tomado de Google Patents.



<sup>23</sup> ENPHASE QUALITY SOLAR INVERTER.

De estos elementos, se encuentra un circuito de entrada DC 204, un circuito de salida AC 236, al menos un circuito de potencia 225, un circuito de filtro de salida 248 y un muestreador de tensión AC 260. El controlador 202 optimiza de manera eficiente la conversión de corriente continua a corriente alterna. En la Figura anterior se pueden apreciar los componentes de cada diagrama de bloque mencionado como resistencias, capacitores, convertidores analógico/digital ADC, diodos, transformadores e inductores<sup>24</sup>.

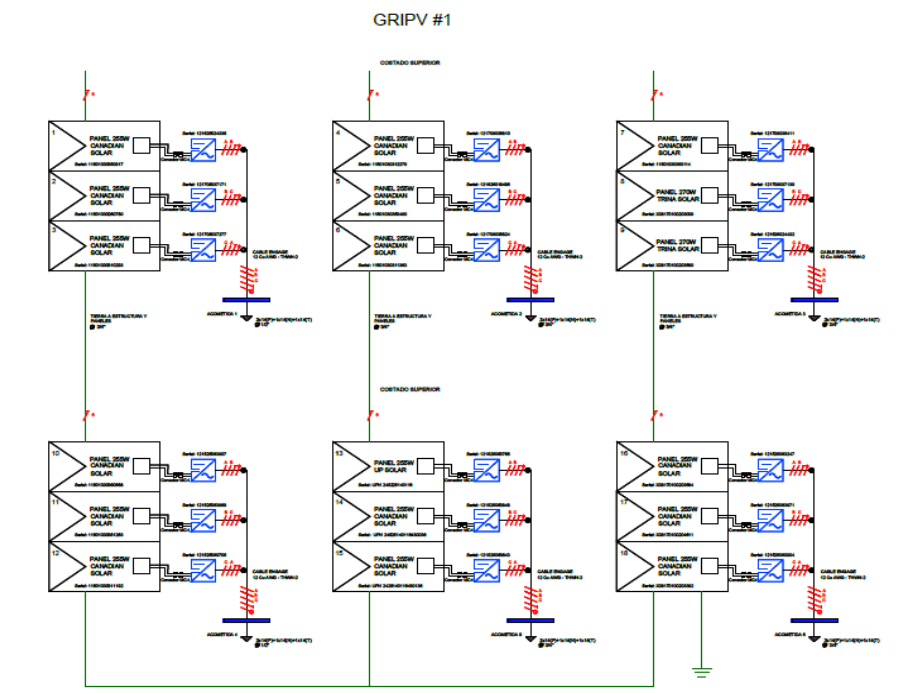
En el sistema FV del Edificio, las conexiones de los microinversores se realizaron según las recomendaciones propuestas por Enphase, las cuales permiten una instalación sencilla, maximizan la captación de energía, aumenta la confiabilidad y hacen de esta manera que el sistema sea seguro, inteligente y productivo.

En el GRIPV #1, hay 6 acometidas trifásicas conectadas en delta, es decir, que por cada grupo de 3 microinversores se obtiene 1 acometida o salida. En el GRIPV #2, el objetivo fue implementar algunas teorías para la experimentación, por lo que se cuentan con 3 acometidas trifásicas en delta y 9 acometidas bifásicas. El seguidor solar está conectado de igual manera con 1 salida bifásica adicional. Las figuras 13, 14 y 15 representan las conexiones de los microinversores en los subsistemas así como la Tabla 1 resume esta información.

---

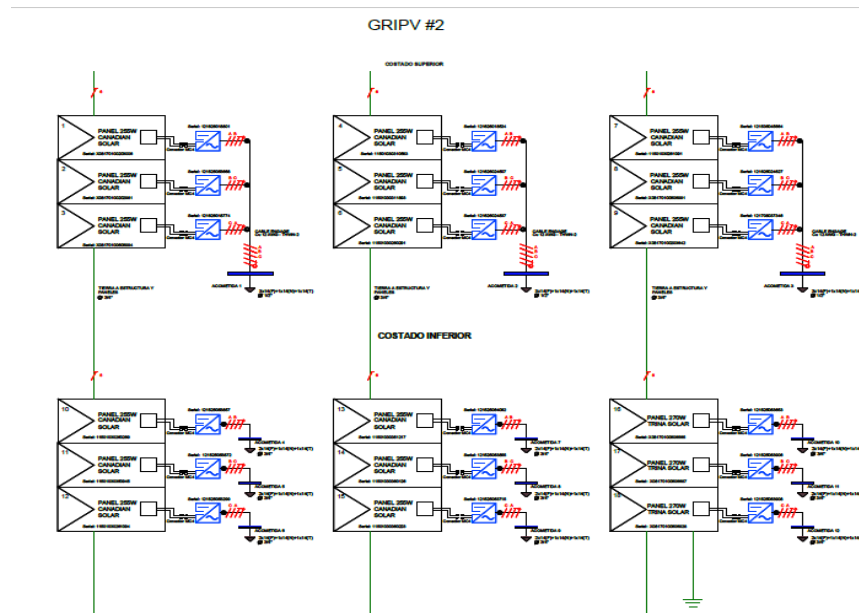
<sup>24</sup> GOOGLE PATENTS. Method and apparatus for converting direct current to alternating current

Figura 13. Diagrama unifilar del sistema GRIPV #1.



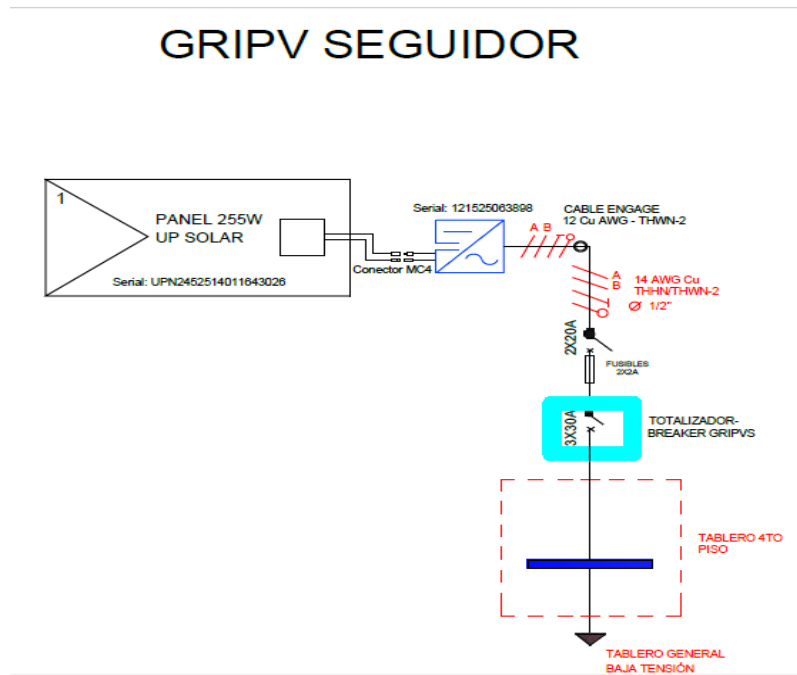
**Fuente:** ROJAS SILVA, César Augusto y PÁEZ RICO, Carlos Arturo. Diagrama unifilar del sistema GRIPV #1 [imagen]. Estudio del comportamiento del sistema de generación fotovoltaico del Edificio de Ingeniería Eléctrica. Trabajo de grado. 2018.

Figura 14. Diagrama unifilar del sistema GRIPV #2.



**Fuente:** ROJAS SILVA, César Augusto y PÁEZ RICO, Carlos Arturo. Diagrama unifilar del sistema GRIPV #1 [imagen]. Estudio del comportamiento del sistema de generación fotovoltaico del Edificio de Ingeniería Eléctrica. Trabajo de grado. 2018.

Figura 15. Diagrama unifilar del sistema seguidor solar.



**Fuente:** ROJAS SILVA, César Augusto y PÁEZ RICO, Carlos Arturo. Diagrama unifilar del sistema GRIPV #1 [imagen]. Estudio del comportamiento del sistema de generación fotovoltaico del Edificio de Ingeniería Eléctrica. Trabajo de grado. 2018.

Tabla 1. Información general del sistema FV instalado en el Edificio de Ingeniería Eléctrica.

| SISTEMA FOTOVOLTAICO E3T            | SISTEMA GRIPV #1 | SISTEMA GRIPV #2 |
|-------------------------------------|------------------|------------------|
| Número de paneles                   | 18               | 18               |
| Número acometida trifásica en delta | 6                | 3                |
| Número acometida bifásica           | -                | 9                |
| Número acometidas totales           | 6                | 12               |

Estas conexiones (trifásica y bifásica) cuentan con un conductor neutro, mediante el cual se envían todas las comunicaciones entre los microinversores y el Envoy. El cableado eléctrico es de tipo PLC, las comunicaciones son realizadas a una frecuencia de 144 kHz <sup>25</sup>.

La comunicación entre los microinversores y el Envoy permite conocer en tiempo real los datos del sistema, por ejemplo, la energía, potencia, tensión, corriente, frecuencia, temperatura y el factor de potencia, apoyando de manera eficiente la toma de decisiones y la detección de posibles fallos. Por otro lado, los microinversores poseen en su parte exterior un Led que indica el estado de operación. Si el Led es de color rojo significa que el microinversor en particular no está enlazado o acoplado con el Envoy o que no está generando energía. Sin embargo, el Led color verde representa el correcto funcionamiento del microinversor, tanto en generación como en comunicación. La Tabla 2 resume con más detalle esta información extraída del manual del microinversor.

Tabla 2. Estados del Led del microinversor Enphase.

| <b>COLOR LED</b> | <b>ESTADO</b>   | <b>DESCRIPCIÓN</b>  |
|------------------|-----------------|---|
| VERDE            | INTERMITENTE    | La red eléctrica AC funciona normal y comunicación normal con el Envoy. |
| NARANJA          | INTERMITENTE    | La red eléctrica AC funciona normal sin comunicación con el Envoy.      |
| ROJO             | INTERMITENTE    | La red eléctrica AC no está activa.                                     |
| ROJO             | NO INTERMITENTE | Existe fallo de inmediata intervención.                                 |

<sup>25</sup> ENPHASE TECHNICAL BRIEF. Microinverter Power Line Communication (PLC) Troubleshooting

### 3.3. ENVOY R Y SU FUNCIONAMIENTO

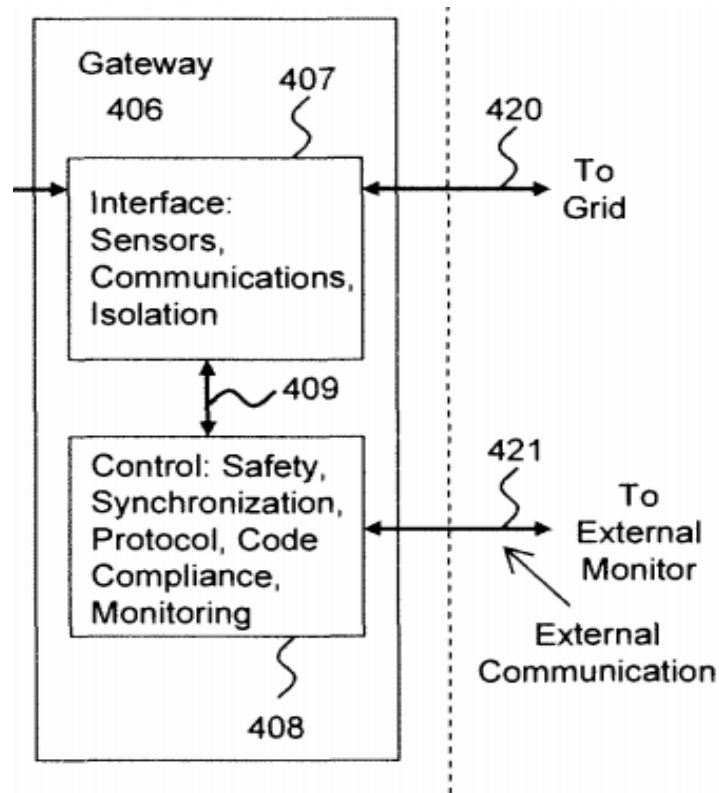
El Envoy, en términos generales, es una puerta de enlace o *Gateway* que proporciona una manera de medir dinámicamente las condiciones de la red como la tensión, la corriente, la potencia, entre otras. Además, tiene la habilidad de recibir y enviar información para y desde los microinversores conectados.

Su configuración interna está dada por una unidad de interfaz y unidad de control. Como podemos observar en la Figura 16, la unidad de interfaz cuenta con una unidad de sensor, una unidad de comunicaciones y una unidad de aislamiento. Por su parte, la unidad de control proporciona seguridad, sincronización, protocolo, cumplimiento de norma y monitorización del sistema<sup>26</sup>.

---

<sup>26</sup> GOOGLE PATENTS. Distributed inverter and intelligent gateway

Figura 16. Configuración del Gateway, tomado de Google Patents.

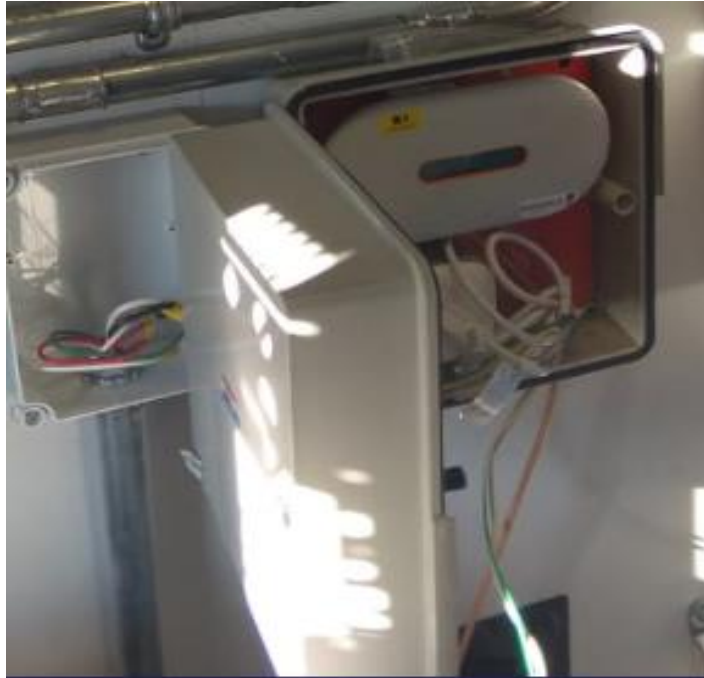


El Envoy es el cerebro de la solución Enphase, realiza un monitoreo en profundidad de la información sobre la energía con capacidades de actualización y administración de carga simplificando la instalación y la supervisión del sistema.

El Envoy recopila y compila datos de producción y rendimiento de los microinversores a través de la comunicación PLC para posteriormente transmitir o enviar detalladamente esos datos a la plataforma Enlighten vía Internet por medio de un módem. El Envoy usado en el sistema del Edificio no permite la conexión vía WiFi, que puede ser lograda con la compra adicional de una antena estilo USB que se conecta por encima de este modelo de Envoy.

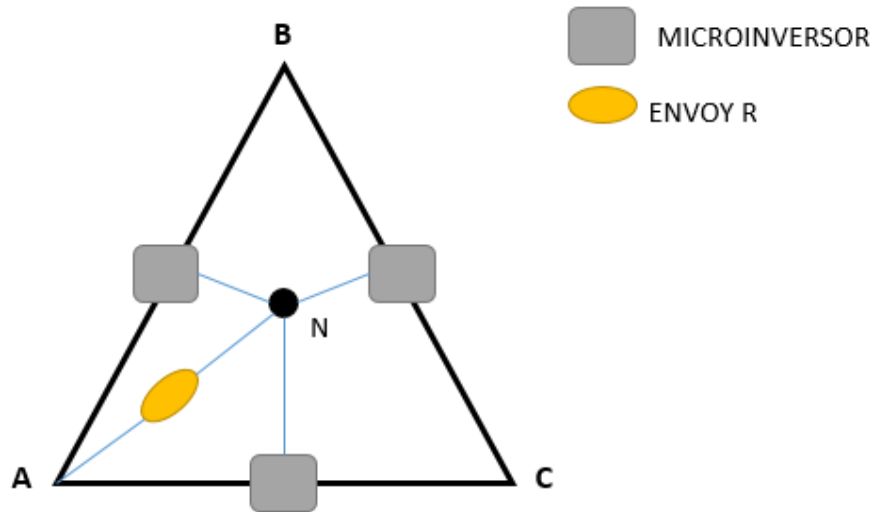
El dispositivo se encuentra ubicado en un cuarto del cuarto piso del Edificio, dentro de una caja que lo protege del ambiente exterior; distancia que logra una intensidad favorable en el enlace con los microinversores.

Figura 17. Ubicación del Envoy instalado en el Edificio de Ingeniería Eléctrica.



La Figura 18 muestra la configuración delta mencionada, la cual está compuesta por tres fases (A, B y C) y un neutro (N); y el Envoy. El Envoy se encuentra ubicado entre una fase y el neutro, permitiendo de esta manera la comunicación entre los microinversores de las fases AB y AC con el Envoy, la comunicación con la fase BC es dada gracias a los filtros pasa-bandas integrados en este tipo de microinversores, que permiten que la comunicación pase a través de éstos hacia el Envoy.

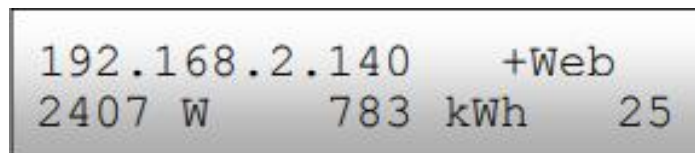
Figura 18. Conexión delta de los microinversores M250 y el Envoy.



En la pantalla LCD del Envoy es posible observar los siguientes datos:

- Dirección IP local
- Indicador de conexión a Internet: +Web, el cual indica si el Envoy está conectado a Enlighten.
- Indicación de la producción de energía actual en Watts.
- Indicación del número de microinversores en línea que están produciendo energía.
- Indicación de los kW/h de vida útil.
- Indicación del número de microinversores en línea que están produciendo energía.

*Figura 19. Pantalla LCD del Envoy.*

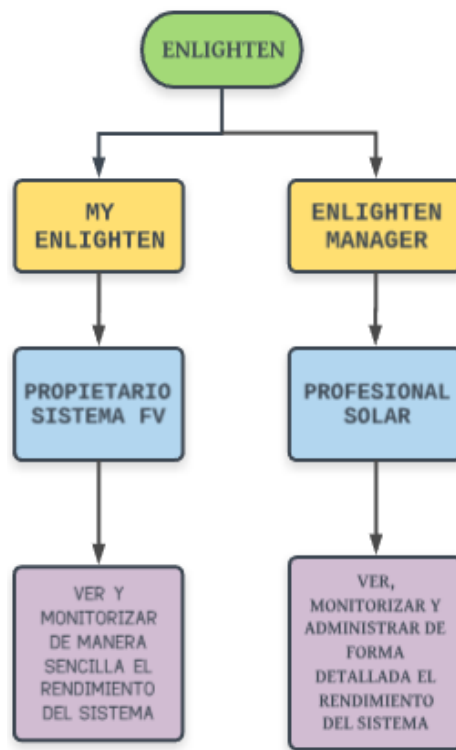


### 3.4. ENLIGHTEN MANAGER Y MY ENLGIHTEN

Existen 2 tipos de interfaces, My Enlighten y Enlighten Manager. My Enlighten es un software de administración y monitoreo donde los propietarios pueden seguir o rastrear su producción de energía, es posible, además, compartir sus datos en las redes sociales al público en general. Enlighten Manager está enfocado para los profesionales, permite visualizar información detallada del rendimiento del sistema como datos de cada panel, gráficas y reportes, tiene la capacidad para administrar varios sistemas fotovoltaicos y resolver los fallos que afectan el rendimiento del sistema.

La Figura 20 muestra un breve comparativo entre *My Enlighten* y *Enlighten Manager*.

Figura 20. Comparativo entre My Enlighten y Enlighten Manager.

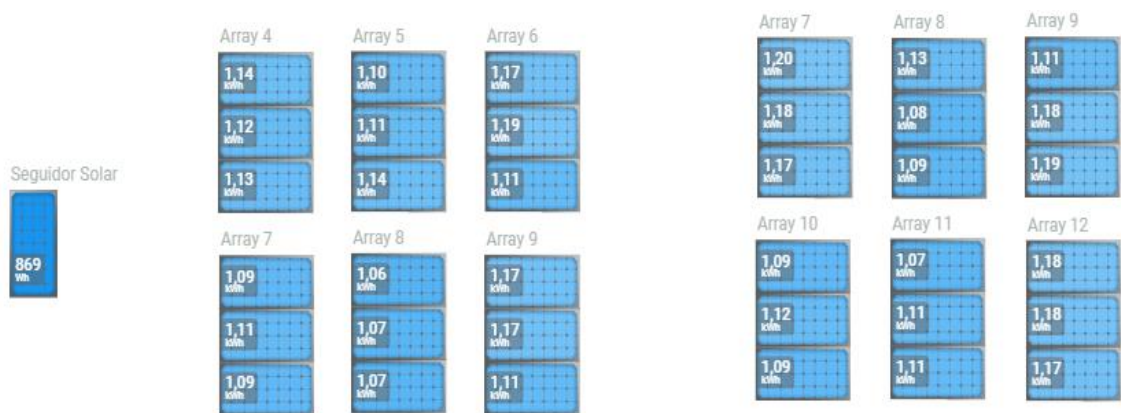


Para comenzar a usar este software, Enlighten ofrece lo siguiente:

- Registrarse como usuario de Enlighten, ingresando todos los datos personales pedidos, así como los detalles de la empresa proveedora de sistemas Enphase.
- Crear su propio sistema FV en la plataforma, donde podrá ingresar el nombre del sistema, el tipo de sistema, la ubicación, nombre del propietario, datos del Envoy, número total y características de los microinversores, fabricante y modelo de los paneles FV, cargar el mapa de instalación, estimación de generación y acceso al sistema a otras empresas.
- Emular su sistema FV, donde mediante bloques que hacen referencia a los paneles FV, se puede organizar y ubicar tal como se encuentra en la instalación real.

La Figura 21 muestra lo expuesto en el último apartado.

Figura 21. Sistema de paneles FV del Edificio de Ingeniería Eléctrica en Enlighten.



### 3.4.1. MY ENLIGHTEN

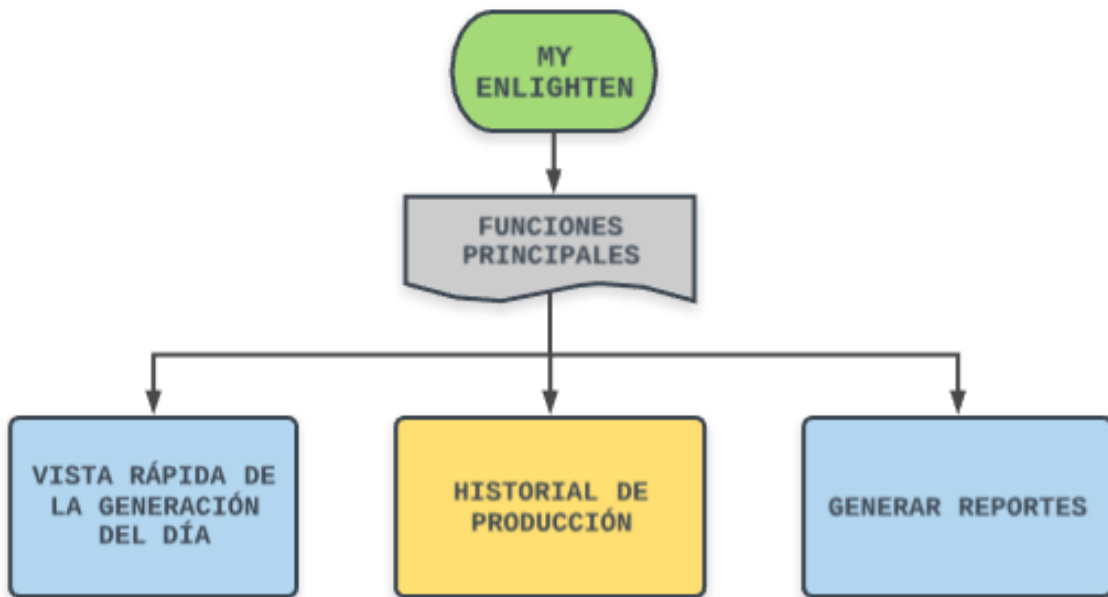
*My Enlighten* es una página web sencilla que ofrece una descripción general en tiempo real de la generación del sistema FV del día y de días anteriores (energía en lo que va del día, potencia máxima del día, lectura de potencia más reciente y el estado del clima actual)<sup>27</sup>. La Figura 22 presenta la interfaz de esta plataforma y la Figura 23 sus principales funciones.

Figura 22. Descripción general del sistema FV del Edificio de Ingeniería Eléctrica en My Enlighten.



<sup>27</sup> ENPHASE ENERGY. Introducción de My Enlighten.

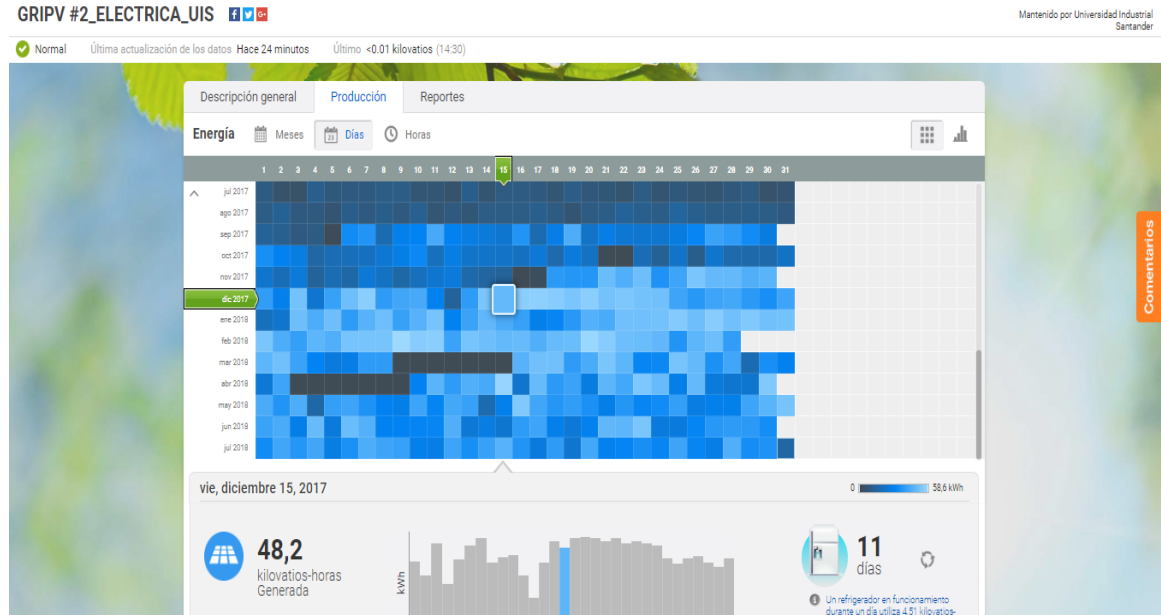
Figura 23. Funciones principales My Enlighten



Proporciona, además, un gráfico de barras que indica información detallada del rendimiento del sistema a lo largo del día durante intervalos de 15 minutos. En la parte inferior de la página se encuentra los detalles del sistema (instalador del sistema y ubicación del sistema), donde se puede añadir una descripción adicional por parte del usuario, así como agregar fotos del sistema, que luego pueden ser compartidas en las redes sociales.

En la sección de producción, es posible consultar el historial de producción de energía del sistema, muestra de un solo vistazo prácticamente un año de producción del sistema, donde los cuadrados representan un día, siendo los de mayor generación los de color celeste y su valor en kW/h aparece debajo, así como se observa en la Figura 24.

Figura 24. Producción del sistema FV del Edificio de Ingeniería Eléctrica en My Enlighten.



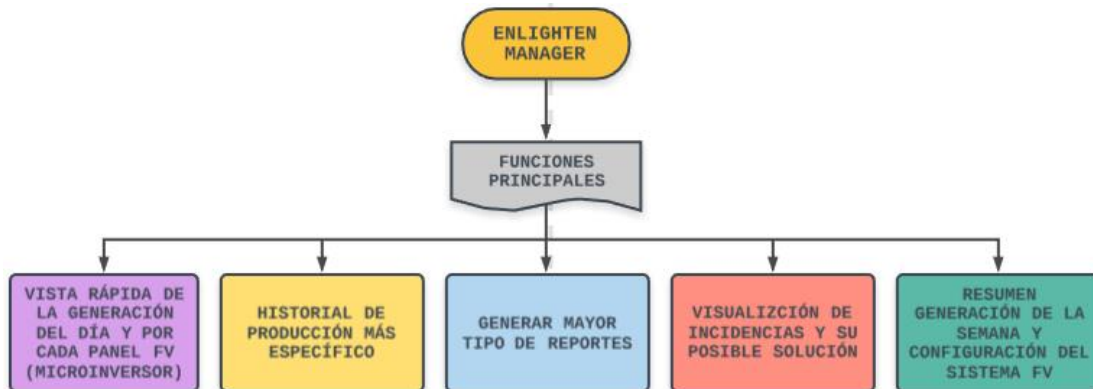
Además, el historial de producción también puede ser visto en gráficas de barras en vez de cuadrados, así como mes a mes o por horas de intervalos de 15 minutos por día.

Es posible generar reportes o informes de generación diaria, generación reciente y generación mensual del sistema FV; éstos se pueden descargar, imprimir o enviar por correo electrónico.

### 3.4.2. ENLIGHTEN MANAGER

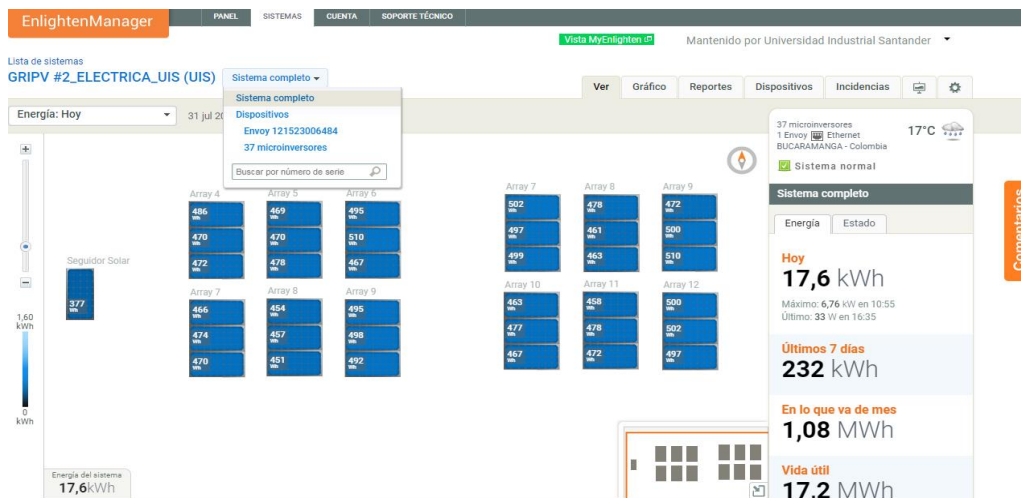
*Enlighten Manager* es una plataforma más compleja y más detallada en información de parámetros eléctricos y de visualización, que permite una administración ágil y eficaz. La Figura 25 muestra sus principales funciones.

Figura 25. Funciones principales Enlighten Manager.



Desde esta interfaz, es posible observar rápidamente el sistema FV completo, donde cada panel a través de su microinversor asociado, muestra su generación de energía o potencia en tiempo real del día actual como de fechas anteriores, lo que permite diagnosticar y analizar problemas en el rendimiento del sistema. Además, se puede elegir ver los dispositivos conectados al sistema, tanto el Envoy como los microinversores. La Figura 26 evidencia lo expuesto.

Figura 26. Vista de Enlighten Manager del sistema FV instalado en el Edificio de Ingeniería Eléctrica.



*Enlighten Manager* ofrece al igual que *My Enlighten*, historial de producción del sistema por medio de gráficos, siendo estos más específicos que facilita lograr una comprensión profunda del estado de los dispositivos para la solución de eventos que afectan al sistema FV; y generación de reportes con una mayor variedad de informes y disponibles a cualquier hora. Las figuras 27 y 28 hacen alusión a lo anterior.

Figura 27. Gráficos en Enlighten Manager.

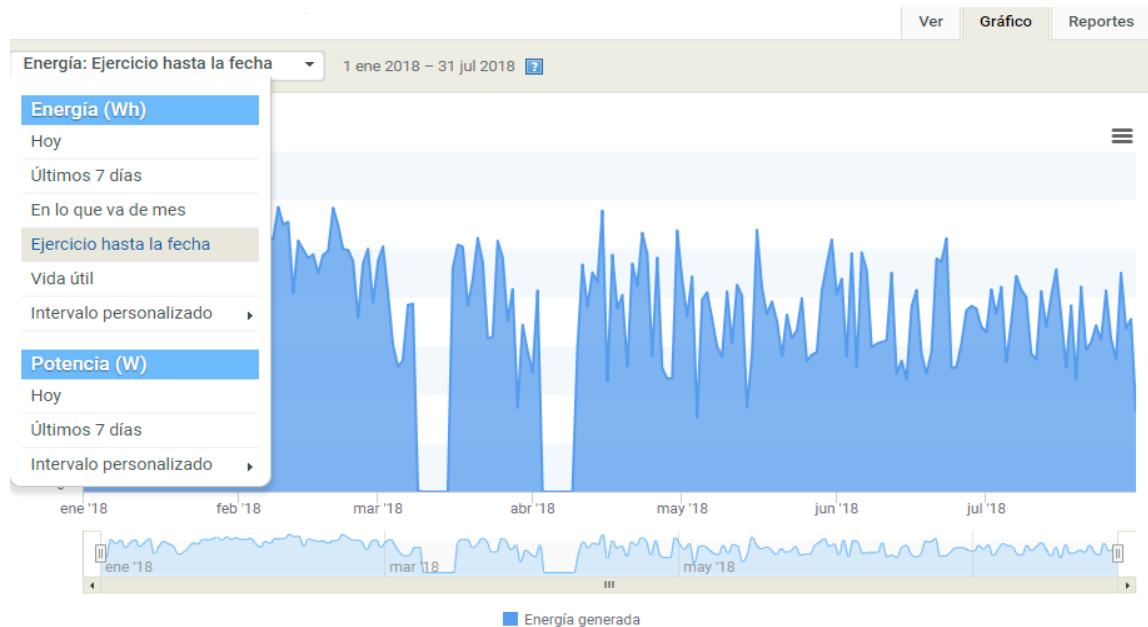
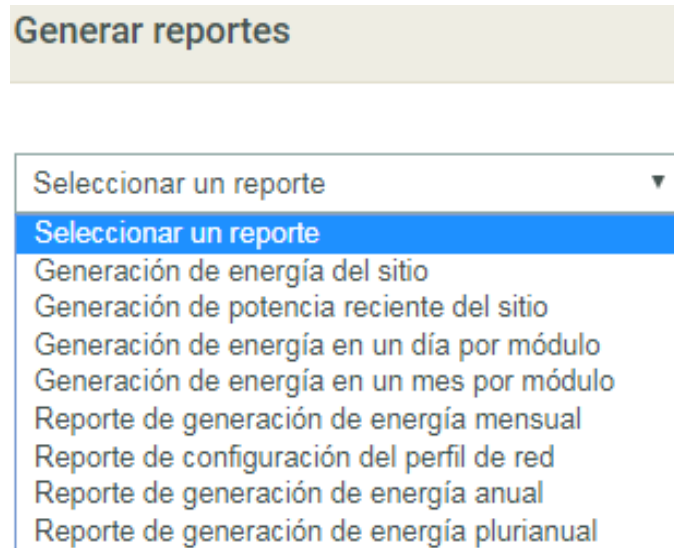


Figura 28. Generación de reportes en Enlighten Manager.



La plataforma cuenta además con una sección de dispositivos, los cuales son enlistados mostrando su número de serie, potencia, estado actual y vida útil. Allí, es posible seleccionar individualmente un dispositivo para observar sus características y estado de éstas.

El apartado de incidencias enumera las irregularidades o problemas que pudiesen existir en un determinado momento en el sistema FV, presenta detalles del problema y propone recomendaciones para su posible solución. Por ejemplo, el Envoy no esté generando reportes. La página permite filtrar las incidencias en resueltas o actuales, así como por su tipo.

Las últimas dos secciones ofrecen:

- Un resumen de la generación de la semana del sistema mediante un gráfico y las ventajas medioambientales que conlleva generar este tipo de energía eléctrica renovable.

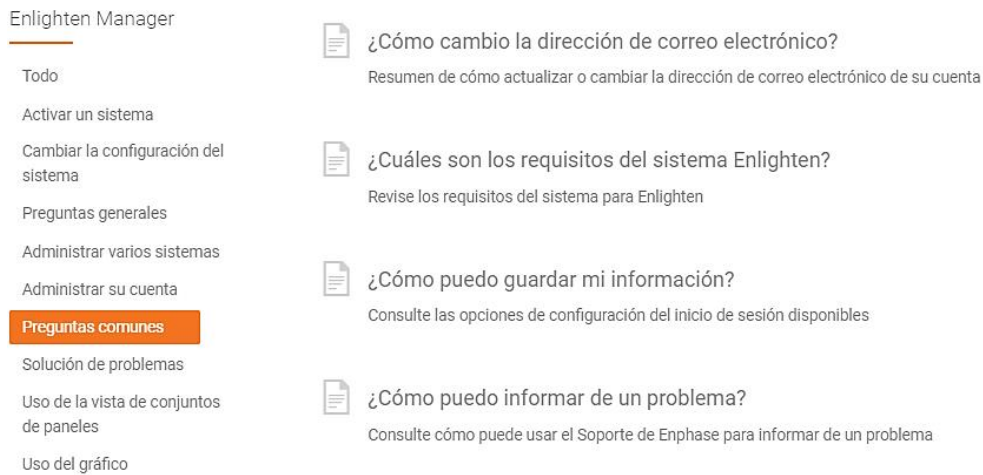
- Configuración del sistema FV como dar acceso a otras empresas y en general, modificar características de visualización del sistema en la plataforma.

*Enlighten Manager* proporciona ayudas o soporte técnico para mayor información en diversas cuestiones sobre la página web. Existen dos maneras:

- Contactar al soporte técnico vía correo electrónico indicando el problema o la duda que se tenga al respecto.
- Centro de ayuda de Enlighten, donde se presentan preguntas comunes realizadas por los usuarios, preguntas generales y una clasificación de eventos comunes.

La Figura 29 evidencia esta información.

Figura 29. Centro de ayuda de Enlighten.



### 3.5. INSTALACIÓN DEL SISTEMA GRIPV #2

En la primera fase del trabajo de grado se apoyó en instalación y puesta en marcha del sistema GRIPV. El objetivo de este período fue adquirir los conocimientos y mejorar las experiencias obtenidas durante la planificación, compra, montaje, arranque y evolución del GRIPV #1. Se adquirió experiencia práctica en el montaje de los equipos del segundo sistema GRIPV #2. La Figura 30 evidencia el inicio del GRIPV #2.

Figura 30. Día de trabajo en la instalación del sistema GRIPV #2.



La participación en el montaje del segundo sistema permitió conocer información sobre los sistemas FV del techo verde, aprender del equipo encargado del sistema, la configuración del Envoy, acceso, manejo de la plataforma web, se recibió una formación por parte del Ingeniero Electrónico a cargo sobre comunicación vía PLC entre dispositivos y uso de la plataforma Enlighten para la aplicación de todo lo aprendido durante esta práctica. Por otra parte, se adquirió conocimientos en la elaboración de reportes de potencia, análisis y solución de los errores observados por medio de la plataforma. Como resultado de la práctica realizada en el techo

verde, se logró direccionar el trabajo de grado hacia el alcance y cumplimiento de los objetivos.

Figura 31. Día de trabajo en la instalación del sistema GRIPV #2.



## **4. RECOLECCIÓN DE DATOS Y ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE**

Este capítulo presenta el procedimiento de la medición de potencia y la estimación de la incertidumbre de medida del subsistema de monitorización por comparación con un medidor de referencia (AcuRev 2000), con el fin de inferir sobre la fiabilidad de la medida suministrada por Enphase.

Además, se realiza un análisis de los datos obtenidos a partir de los indicadores estadísticos y la estratificación de los datos de potencia.

### **4.1. GENERALIDADES DE LA MEDICIÓN**

Para la estimación del nivel de incertidumbre de la medida de potencia entregada por Enlighten, se seleccionaron los microinversores a medir, el equipo de medida y la duración de la recolección de datos.

Para la medición se escogieron 2 microinversores, acoplados a paneles FV con la misma especificación y, además, conectados en acometidas bifásicas individuales para así realizar una medición desde el tablero de protecciones. La medición se realizó utilizando un medidor AcuRev 2000 de Clase 0.5, ubicado en el tablero de protecciones situado a un costado del sistema GRIVP #2 y, la duración de la medición fue de 4 semanas con datos de potencia cada 10 minutos, con el fin de tener una visión más amplia del comportamiento de los valores de potencia. Lo anterior se ve reflejado en la Tabla 2.

Tabla 3. Generalidades de la medición

|                         |                                 |
|-------------------------|---------------------------------|
| Clase de medida         | 0.5                             |
| Frecuencia de la medida | Cada 10 minutos                 |
| Duración experimento    | 4 semanas                       |
| Micro inversor m250     | serial 121525064062 acometida 7 |
|                         | serial 121525063855 acometida 8 |
| Paneles                 | Canadian Solar 255 W            |

La descarga de datos empezó el martes 27 de marzo del 2018 y finalizó el 30 de abril del 2018. Del 3 de abril al 9 de abril, suspendieron las mediciones, debido al mantenimiento de subsistema de monitorización.

## 4.2. METODOLOGÍA DE LA MEDICIÓN

La medición de la potencia se realizó a partir de los dos medidores: AcuRev 2000 y el subsistema de monitorización; los cuales son presentados a continuación.

### 4.2.1. AcuRev 2000

El AcuRev 2000 cuenta con un juego de transformadores de corriente conectados en el sentido de la carga, es decir, asumiendo un flujo de corriente hacia el edificio, todos ubicados antes de los *breakers* de protección.

Cada descarga se sincronizó la hora del medidor con la hora del computador, evitando así desfases en la medición de los valores de potencia, luego los datos son ordenados en archivos Excel como se muestra en la Figura 32.

Figura 32. Datos recolectados de AcuRev.

| Time            | totales arrojados por el medidor de la acometida 7, canales 2 (R), 5 (S) y 8 (N), d |                           |                          | totales arrojados por el medidor de la acometida 8, canales 6 (S), 9 (T) y 3 (N), d |                           |                          |
|-----------------|---|---------------------------|--------------------------|---|---------------------------|--------------------------|
|                 | R2: Watt Total (CH302/202)  | R2: VAR Total (CH302/202) | R2: VA Total (CH302/202) | R2: Watt Total (CH303/203)  | R2: VAR Total (CH303/203) | R2: VA Total (CH303/203) |
| 23/03/2018 6:00 | 0   | 0                         | 0                        | 0   | 0                         | 0                        |
| 23/03/2018 6:10 | 0   | 0,013                     | 0,022                    | 0   | 0,007                     | 0,011                    |
| 23/03/2018 6:20 | 0,006   | 0,013                     | 0,025                    | 0,006   | 0,012                     | 0,025                    |
| 23/03/2018 6:30 | 0,01  | 0,013                     | 0,032                    | 0,01  | 0,011                     | 0,033                    |
| 23/03/2018 6:40 | 0,012   | 0,013                     | 0,033                    | 0,012   | 0,01                      | 0,034                    |
| 23/03/2018 6:50 | 0,016   | 0,011                     | 0,04                     | 0,017   | 0,01                      | 0,04                     |
| 23/03/2018 7:00 | 0,021   | 0,012                     | 0,044                    | 0,021   | 0,012                     | 0,045                    |
| 23/03/2018 7:10 | 0,03  | 0,014                     | 0,052                    | 0,031   | 0,011                     | 0,053                    |
| 23/03/2018 7:20 | 0,034   | 0,012                     | 0,056                    | 0,035   | 0,012                     | 0,058                    |
| 23/03/2018 7:30 | 0,035   | 0,012                     | 0,059                    | 0,036   | 0,012                     | 0,061                    |
| 23/03/2018 7:40 | 0,043   | 0,012                     | 0,071                    | 0,044   | 0,011                     | 0,074                    |
| 23/03/2018 7:50 | 0,052   | 0,012                     | 0,086                    | 0,054   | 0,011                     | 0,064                    |

Es importante aclarar que, durante el tiempo de las descargas, el AcuRev 2000 deja de medir, motivo por el cual no se poseen los datos del 2, 10, 16, 23 y 30 de abril entre las cinco y seis de la tarde. Este inconveniente es debido a la forma como el software del medidor trabaja. La medición se reanuda tan pronto finaliza la descarga de los datos.

#### 4.2.2. Enlighten

La plataforma de monitorización de Enphase en uno de sus apartados nos permite generar reportes de variables eléctricas de cada microinversor de manera detallada, como se ve en la Figura 33, en este apartado podemos descargar solo los datos de potencia de la semana anterior al día de descarga, así como se observa en la Figura 34. Al igual que AcuRev la descarga se realiza cada martes y la hora se sincroniza automáticamente, pues el subsistema de monitorización siempre está conectado a internet.

Figura 33. Descarga de datos de potencia en Enlighten.



Figura 34. Datos recolectados de Enlighten acometida 8 semana 1.

| Microinversor 121525063855 |                |                   |                |                |                  |                    |
|----------------------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|------------------|--------------------|
| Date/Time                  | AC Voltage (V) | AC Frequency (Hz) | DC Voltage (V) | DC Current (A) | Temperature (?C) | Power Produced (W) |
| 27/03/2018 6:10            | 230,1          | 59,98             | 24,03          | 0,06           | 22               | 1                  |
| 27/03/2018 6:15            | 229,4          | 59,99             | 25,56          | 0,15           | 22               | 2                  |
| 27/03/2018 6:20            | 229,4          | 59,99             | 25,56          | 0,15           | 22               | 2                  |
| 27/03/2018 6:25            | 229,4          | 59,99             | 25,56          | 0,15           | 22               | 2                  |
| 27/03/2018 6:30            | 229,4          | 59,99             | 25,56          | 0,15           | 22               | 2                  |
| 27/03/2018 6:35            | 229,4          | 59,99             | 25,56          | 0,15           | 22               | 2                  |
| 27/03/2018 6:40            | 229,4          | 59,99             | 25,56          | 0,15           | 22               | 2                  |
| 27/03/2018 6:45            | 228,2          | 60,02             | 25,9           | 0,14           | 22               | 4                  |
| 27/03/2018 6:50            | 228,2          | 60,02             | 25,9           | 0,14           | 22               | 4                  |
| 27/03/2018 6:55            | 228,2          | 60,02             | 25,9           | 0,14           | 22               | 4                  |
| 27/03/2018 7:00            | 227            | 59,97             | 26,34          | 0,2            | 22               | 5                  |

### 4.3. ESTRUCTURACIÓN DE LOS DATOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA

Antes de calcular la incertidumbre de medida se necesita organizar los datos y depurarlos. Por consiguiente, en AcuRev se decidió trabajar solo con el dato de potencia calculado por el medidor y guardado en los canales 302/202 y 303/203 de las acometidas 7 y 8 respectivamente. Por otra parte, en el reporte de Enlighten se debe promediar los datos de potencia, debido a que este informe presenta datos de potencia cada 5 minutos y AcuRev los presenta cada 10 minutos.

Los criterios usados para promediar los datos de Enlighten se muestran a continuación:

1. Los reportes se promediaron de tal forma que queden los datos cuya hora sea múltiplo de 10, es decir, 6:00, 6:10, 6:20, etc.
2. Si el primer dato es de una hora múltiplo de 5, este se promediará con el siguiente dato. Por ejemplo, si la potencia a las 5:55 es 0 y a las 6:00 es 4, se anota el promedio de estas a las 6:00.
3. Si el primer dato de potencia es una hora múltiplo de 10, se anota la mitad de este valor, debido a que los anteriores datos son 0.
4. Se tuvieron en cuenta los datos de AcuRev para escoger la hora a la cual empezar la tabla.

En la Figura 35, se pueden observar los resultados de lo anterior.

*Figura 35. Tabla datos de Acometida8 AcuRev vs Enlighten.*

| 27 MARZO A 2 ABRIL |                         |        |           |
|--------------------|-------------------------|--------|-----------|
| Hora               | Accurev                 |        | Enlighten |
| Time               | ∑ kWatt Total (CH303/2) | Watt   | Watt      |
| 27/03/2018 6:20    | 0,000                   | 0,000  | 2,000     |
| 27/03/2018 6:30    | 0,004                   | 4,000  | 2,000     |
| 27/03/2018 6:40    | 0,000                   | 0,000  | 2,000     |
| 27/03/2018 6:50    | -0,001                  | -1,000 | 4,000     |
| 27/03/2018 7:00    | -0,001                  | -1,000 | 4,500     |
| 27/03/2018 7:10    | 0,005                   | 5,000  | 5,000     |
| 27/03/2018 7:20    | 0,004                   | 4,000  | 5,000     |
| 27/03/2018 7:30    | 0,007                   | 7,000  | 5,500     |
| 27/03/2018 7:40    | 0,006                   | 6,000  | 6,000     |
| 27/03/2018 7:50    | 0,005                   | 5,000  | 5,000     |
| 27/03/2018 8:00    | 0,007                   | 7,000  | 6,000     |
| 27/03/2018 8:10    | 0,007                   | 7,000  | 7,000     |
| 27/03/2018 8:20    | 0,011                   | 11,000 | 11,000    |

#### 4.4. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA

Antes de poder realizar la estimación de incertidumbre se enlistan algunos indicadores que permiten analizar de mejor manera los datos:

1. Error absoluto entre las potencias cada 10 minutos:

$$E_{absoluto} = |P_{AcuRev} - P_{Enlighten}| \quad (3.1)$$

2. Error relativo entre las potencias cada 10 minutos:

$$E_{relativo} = \frac{|P_{AcuRev} - P_{Enlighten}|}{P_{AcuRev}} \times 100 \quad (3.2)$$

3. Promedio de los errores relativos de potencia por semana, y el promedio de los errores absolutos de potencia por semana.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.3)$$

4. Desviación estándar experimental y desviación estándar media

$$S(q) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (3.4)$$

$$S(\bar{q}) = \frac{S(q)}{\sqrt{N}} \quad (3.5)$$

Además, se decide incluir otros ítems para evaluar que tanto se alejan las medidas de Enlighten y AcuRev a lo largo de una semana, por ello se calcula de manera aproximada la energía con la siguiente ecuación:

$$E = Pt \quad (3.6)$$

Siendo  $t$  igual a  $\frac{10}{60}$ , y se incluyen los siguientes indicadores:

1. Energía generada por semana- Datos Enlighten.
2. Energía generada por semana- Datos AcuRev 2000.
3. Error absoluto de energía por semana.
4. Error relativo de energía por semana.

Para la estimación de la incertidumbre se tomó como guía el procedimiento para la calibración de medidores de energía del Centro Español de Medida (CEM) <sup>28</sup> y la Guía para Expresión de la Incertidumbre de Medida (GUM por sus siglas en inglés) [18].

El primer paso consiste en definir el mensurando, en el cual se incorporan todos elementos dependientes. En esta ocasión el mensurando es la potencia medida por el subsistema de monitorización. Después se establece un modelo matemático que reproduzca el proceso de medición, es decir, el nexo entre el mensurando y las variables de las que depende.

Generalmente, la incertidumbre en medición depende de varios factores, los cuales se organizan en dos categorías tipo A ( $\mu A$ ) y tipo B ( $\mu B$ ) [19]. Para el cálculo de la incertidumbre tipo A y tipo B se tiene las siguientes expresiones matemáticas:

$$\mu A = \sqrt{(s(\bar{q}) * Coe)^2} \quad (3.7)$$

---

<sup>28</sup> CEM. Procedimiento el -005 para la calibración de medidores de energía eléctrica.

$$\mu B = \sqrt{\frac{\%Precision^2}{\sqrt{3}} + \frac{Up^2}{k} + \frac{Co\Delta t^2}{\sqrt{3}} + \frac{CM\Delta t^2}{\sqrt{3}}} \quad (3.8)$$

Donde:

- $s(\bar{q})$ : Desviación estándar del modelo matemático.
- $Coe$ : Coeficiente de sensibilidad de la variable.
- $\frac{\%Precision^2}{\sqrt{3}}$ : Incertidumbre de resolución del medidor.
- $\frac{Up^2}{k}$ : Incertidumbre de medida del medidor referencia.
- $\frac{Co\Delta t^2}{\sqrt{3}}$ : Incertidumbre de medidas realizadas fuera de la temperatura indicada del patrón.
- $\frac{CM\Delta t^2}{\sqrt{3}}$ : Incertidumbre de medidas realizadas fuera de la temperatura indicada del medidor.

Como recomienda la guía de la CEM, la incertidumbre en equipos de medida viene expresada en errores porcentuales, por lo cual para la estimación de la incertidumbre se usó el error relativo de medida. Debido a la continua variación en los valores de potencia durante este estudio, solo se puede estimar la incertidumbre de medida en pequeñas franjas de operación. En este caso se trabajó con una potencia de 14 W entre las 15h40 y 16h00 del 10 de abril del 2018.

Haciendo uso de la ecuación 3.4 se halla la desviación estándar experimental de los errores relativos para una franja de datos, donde la potencia de AcuRev se mantiene constante  $s(q) = 6,18\%$ , luego se procede a calcular la desviación estándar experimental media (ecuación 3.5) o incertidumbre estándar tipo A según la guía de la GUM, obteniendo el siguiente resultado:

$$s(\bar{q}) = 3,57.$$

Después se calcula la incertidumbre tipo B mediante la ecuación 3.8. Dado que en el presente trabajo no se tuvo en cuenta la incertidumbre producida por la temperatura durante la recolección de los datos, se encontró que la  $\mu_B$  es igual a la incertidumbre de medida aportada por AcuRev,  $\mu_B = 0,0025$ <sup>29</sup>. Según <sup>30</sup>este valor ya incluye la incertidumbre por resolución del medidor.

Para finalizar, se calcula la incertidumbre típica:

$$u(y) = \sqrt{\mu_A^2 + \mu_B^2} \quad (3.9)$$

Obteniendo como resultado  $u(y) = 3,57\%$  para 3 datos. Aunque la incertidumbre de medida se encuentra por debajo del 5% prometido por enphase, no es posible concluir que este dato representa la incertidumbre de medida para toda la operación del microinversor. Lo anterior es debido a que este resultado solo representa una pequeña franja de la medición y puede variar según la potencia a medir. Se aclara que no se calcularon otros valores de incertidumbre ya que hacer un análisis de mayor profundidad o estrictamente correcto implica más información y un ambiente controlado que no fue posible obtener durante el estudio.

#### **4.5. ANÁLISIS DE INDICADORES Y ESTRATIFICACIÓN DE LAS POTENCIAS POR SEMANA**

El análisis realizado se hace solo sobre el microinversor de la acometida 8 ya que presenta un comportamiento similar al otro microinversor. Todas las gráficas del

---

<sup>29</sup> ACCUENERGY. AcuRev 2000 Multi-circuits Networked Multifunction Power Energy Meter.

<sup>30</sup> CEM. Procedimiento el -005 para la calibración de medidores de energía eléctrica

microinversor de la acometida 7 se encuentran en el Anexo A. Por lo anterior, se toma la decisión de presentar solo el análisis de la acometida 8.

En la Figura 36 se observa que el subsistema de monitorización no es eficiente para medir valores de potencia en franjas de tiempo corto pues dista bastante con la medición de AcuRev, sin embargo, se aprecia que los valores de energía generada calculada por semana presentan un error de medida bajo que cumple con el 5% prometido por Enphase, como se observa en la Tabla 4, esto debido a que la diferencia entre las potencias en distintos puntos es positiva y negativa como se ve en la Figura 37, compensándose al final de la semana. Lo anterior, sucede en todas las semanas de estudio.

Otro aspecto a destacar de la Figura 36, es el comportamiento de la curva obtenida a partir de los datos de Enlighten, allí se observa que el sistema de enphase no tiene la capacidad de captar los cambios rápidos de potencia teniendo como consecuencia una curva más suavizada que la presentada por AcuRev y por consiguiente sesga el registro de picos y valles en la generación de potencia. Por lo cual se concluye que el subsistema de monitorización de Enphase es adecuado para un diagnóstico sencillo, pero no se puede tener como un equipo que referencie si se quiere cuantificar el sistema.

Por otra parte, durante las 4 semanas de medición se verifico la ausencia de corriente por el neutro de los microinversores, comprobada la ausencia de corriente por el neutro se deduce que las corrientes del microinversor están a 180 grados una de la otra, esto debido a que la el conductor de neutro es usado para la comunicación vía PLC con el Envoy y los demás microinversores, pero esto podría estar repercutiendo disminuyendo el factor de potencia a la salida de los microinversores durante el inicio y la finalización del día de generación.

Tabla 4 Resumen de Energía en una semana del Microinversor 121525063855 de Acometida 8

|                    | Energía generada (Wh) |           |            | Error relativo |
|--------------------|-----------------------|-----------|------------|----------------|
|                    | Accurev               | Enlighten | Diferencia | %              |
| 27 marzo- 2 abril  | 6143,17               | 6161,33   | 18,17      | 0,30           |
| 10 abril- 16 abril | 7562,67               | 7805,93   | 243,27     | 3,22           |
| 17 abril- 23 abril | 7855,83               | 7864,33   | 8,50       | 0,11           |
| 24 abril- 30 abril | 6775,47               | 6874,05   | 98,59      | 1,46           |

Figura 36. Grafica de la potencia de AcuRev y Enlighten del microinversor # 121525063855 para un día.

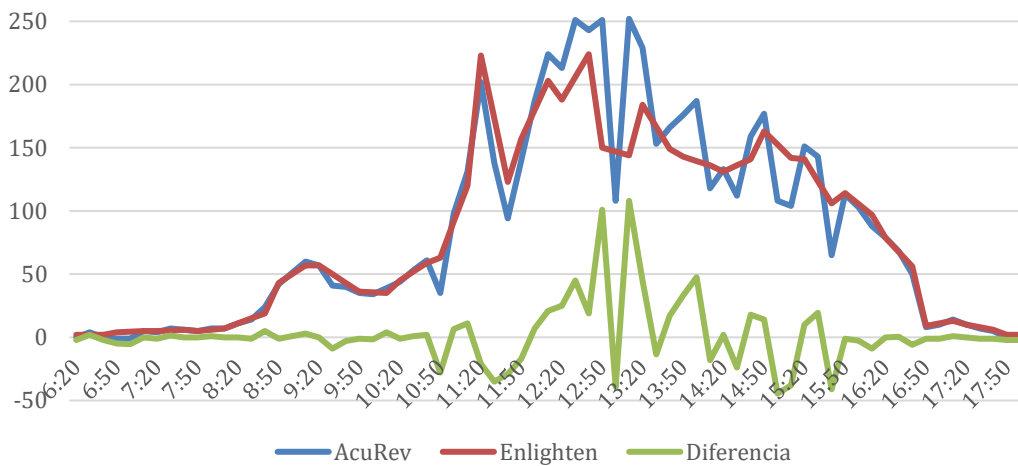
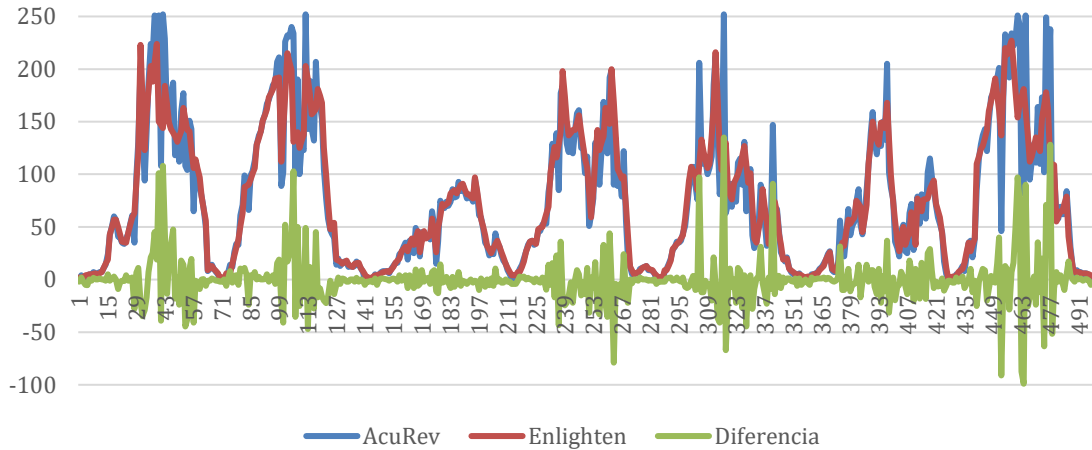


Figura 37. Grafica de potencia de AcuRev y Enlighten del microinversor # 121525063855 para una semana



Se realizó una estratificación de los datos de potencia en 5 grupos como se observa en la Tabla 5 (acometida 8), esto con el propósito de evaluar si existe alguna relación entre la potencia generada y el error relativo. Para la creación de los grupos se tuvo en cuenta que la potencia máxima del panel es de 255 W. En la Tabla 5 se observa también la cantidad de datos en cada una de las escalas de potencia, el promedio de error en cada una de ellas, así como su máximo error encontrado por cada grupo.

Tabla 5. Tabla estratificación de potencias acometida 8.

|         | Escala de potencias [W] | Cantidad de datos | Promedio Er [%] | Máximo error [%] |
|---------|-------------------------|-------------------|-----------------|------------------|
| Grupo 1 | [0-51]                  | 784               | 30,954          | 950              |
| Grupo 2 | (51-102]                | 513               | 21,031          | 142              |
| Grupo 3 | (102-153]               | 323               | 11,74           | 83,5             |
| Grupo 4 | (153-204]               | 232               | 8,41            | 38,79            |
| Grupo 5 | (204-255]               | 137               | 15,74           | 53,78            |

Durante el periodo de estudio, las mediciones fueron realizadas para las dos acometidas, sin embargo, se observa que el comportamiento de los resultados es similar como se puede observar en las diferentes graficas presentadas en el Anexo B. Por lo anterior, se toma la decisión de presentar solo el análisis de la acometida 8.

De los cinco grupos analizados, se seleccionan aquellos que poseen los resultados más significativos, es decir, las figuras 38 y 40 son las 2 de mayor error promedio y la de menor error promedio la Figura 39.

Figura 38. Grupo 1 Pgen vs Error relativo acometida 8.

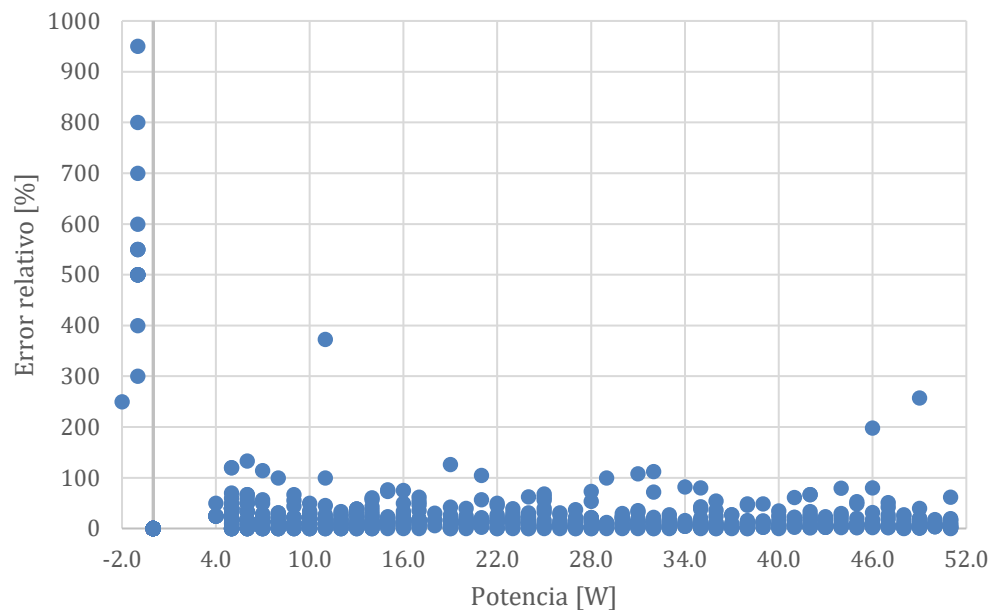


Figura 39. Grupo 4 Pgen vs Error relativo acometida 8.

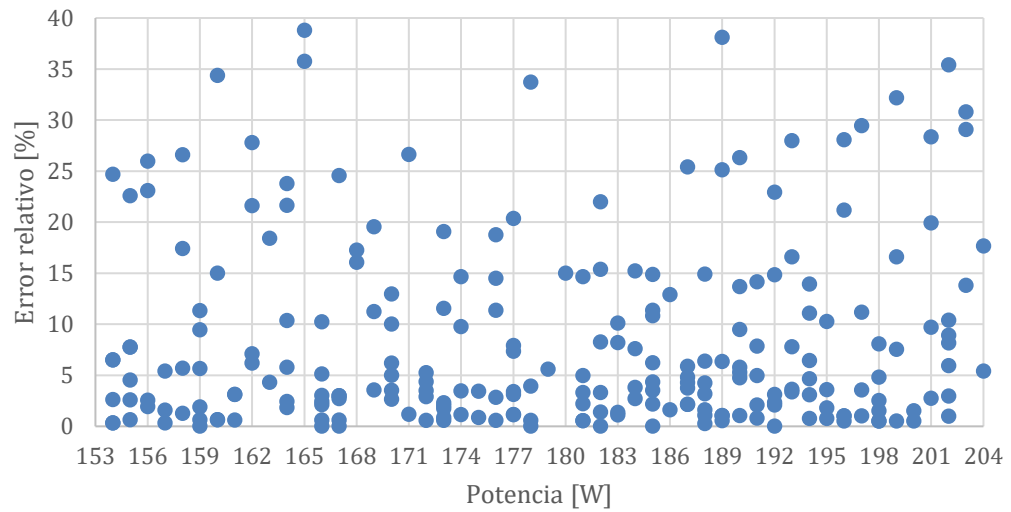
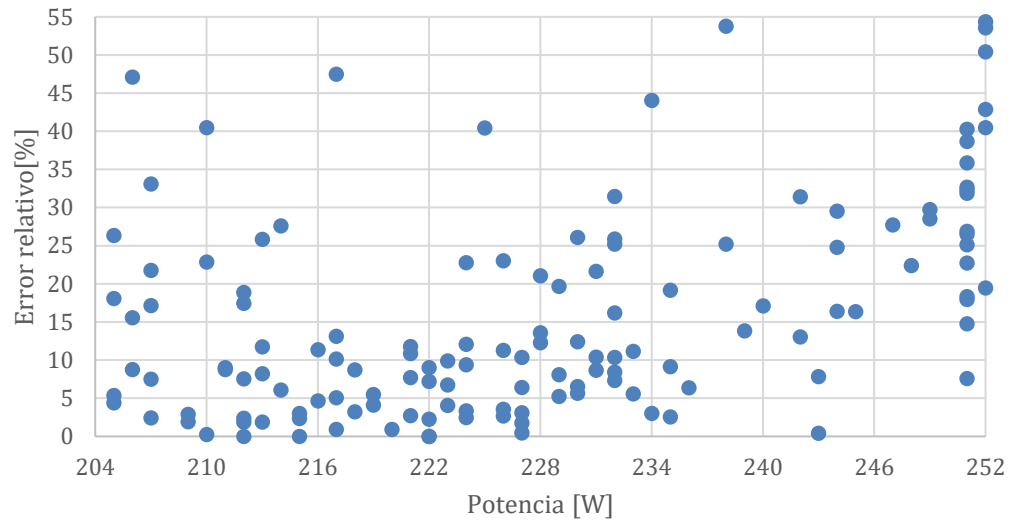


Figura 40. Grupo 5 Pgen vs Error relativo acometida 8.



- De las figuras 38 y 40 se infiere que los errores de medida son mayores en las zonas con potencia baja y alta, estos resultados de error se deben a que el medidor no se encuentra en su zona optima de funcionamiento, es decir, en el primer caso porque no está cerca al valor su nominal de operación y en

el segundo, las altas temperaturas producto de la irradiancia alteran la capacidad de medición. Por otra parte, se observa que en las zonas de baja potencia se producen errores de medida más prominentes que los producidos por la temperatura cuando se realiza la medición.

- En la Figura 39 se observa que en esta franja se presentan los errores de medida más bajo esto debido a se encuentra en una zona más óptima de funcionamiento, es decir la temperatura no es tan elevada y los valores de potencia se encuentran cerca de su valor nominal de trabajo.
- Del grupo 1 al grupo 4 se observa que el promedio del error relativo se reduce gradualmente mientras la potencia generada aumenta. La disminución es de aproximada el 73% en su valor del promedio de los errores, por lo cual se puede decir que existe una relación entre la potencia generada y el error en la medida del subsistema de monitorización.

## 5. CONCLUSIONES

En este capítulo, se enuncian las principales conclusiones de acuerdo al desarrollo y cumplimiento de los objetivos del presente trabajo de grado.

La información que registra Enlighten tiende a ser imprecisa al no captar los valores más bajos y más altos de potencia, contrario al AcuRev que presenta mayor confiabilidad. Por lo anterior, se puede concluir que el subsistema de monitorización es adecuado para unos diagnósticos sencillos mas no como un medidor de referencia para cuantificar el sistema.

En consecuencia, es posible deducir que el subsistema de monitorización de Enphase es útil en casas e industrias donde no sea necesario un control preciso y minucioso de la potencia generada, lugares los cuales es suficiente con reportes estimados semanal o anualmente.

Por otra parte, el conjunto de información recopilada en la creación de la base de datos, es una herramienta implementada para la búsqueda sencilla y rápida en temas relacionados a la monitorización de los microinversores.

Además, se evidencia que es importante la documentación de todos los proyectos que se realicen anteriormente en la escuela, dado que esto conlleva a tener una curva de aprendizaje más rápida y eficiente.

Por último, se concluye que la elaboración de documentos técnicos es un avance importante para el aprendizaje detallado de un tema en particular, ya que permite el desarrollo y apropiación de nuevas tecnologías y/o prácticas.

## 6. RECOMENDACIONES

- Para futuros trabajos se recomienda hacer un estudio de incertidumbre de la medida potencia generada por todo el sistema y compararla con el medidor AcuVin ubicado en el 4 piso del edificio de la Escuela E3T.
- También se recomienda establecer el efecto de las altas temperaturas en el microinversor y en el sistema de monitorización, es decir, si hay alguna afectación en la monitorización en las horas de pico solar.
- Establecer la viabilidad de ampliar la generación en los techos de la Universidad y la viabilidad de instalar un sistema de Enphase más moderno como el Envoy S, Envoy IQ y microinversores IQ.

## **7. OBSERVACIONES**

La semana del 3 al 9 de abril no se realizó descarga de reporte de potencia desde Enlighten debido a un fallo menor en el funcionamiento del Envoy, el cual fue solucionado para la siguiente semana.

## BIBLIOGRAFIA

ACCUENERGY. AcuRev 2000 Multi-circuits Networked Multifunction Power Energy Meter. [Online]. Available: <https://www.accuenergy.com/files/acurev/AcuRev-2000-Multi-Phase-Tenants-Meter-Brochure.pdf> [Accessed 20-Jun-2018]

CEM. Evaluación de datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre de medida Available: <http://www.cem.es/sites/default/files/gum20digital1202010.pdf> [Accessed: 19-Jun-2018]

CEM. Procedimiento el -005 para la calibración de medidores de energía eléctrica. [Online]. Available: [http://www.cem.es/sites/default/files/el-005\\_digital.pdf](http://www.cem.es/sites/default/files/el-005_digital.pdf) [Accessed: 19-Jun-2018]

CREG. La generación distribuida y su posible integración al sistema interconectado nacional. Available: [http://www.creg.gov.co/phocadownload/presentaciones/generacion\\_distribuida\\_sin.pdf](http://www.creg.gov.co/phocadownload/presentaciones/generacion_distribuida_sin.pdf) [Accessed: 30-Jun-2018]

GARCIAS Alfonso, REYES María. “La importancia de la estimación de la incertidumbre en las mediciones y la validación de las hojas de cálculo”. Durango, México, pp. 1-2, 2012.

EL TIEMPO. Nueve de cada 10 proyectos para generar energía usarán paneles solares. [Online]. Available: <http://www.eltiempo.com/economia/sectores/en-colombia-9-de-cada-10-proyectos-de-energia-usaran-paneles-solares-162616> [Accessed: 22-Jul-2018]

ENPHASE. [Online]. Available: <https://enphase.com/es-lac/productos-y-servicios/enlighten-y-aplicaciones> [Accessed: 30-Jun-2018]

ENPHASE ENERGY. [Online]. Available: <https://enphase.com/es-lac/soporte/como-funciona-el-sistema-de-microinversores-de-enphase> [Accessed: 30-Jun-2018]

ENPHASE ENERGY. Introducción de My Enlighten. [Online]. Available: <https://enphase.com/es-lac/support/introducci%C3%B3n-de-myenlighten> [Accessed: 31-Jul-2018]

ENPHASE ENERGY. Manual de Instalación y Funcionamiento Envoy Communications Gateway. [Online]. Available: [https://enphase.com/sites/default/files/downloads/support/Envoy\\_Manual\\_de\\_Instalacion\\_60Hz\\_ES.pdf](https://enphase.com/sites/default/files/downloads/support/Envoy_Manual_de_Instalacion_60Hz_ES.pdf) [Accessed: 30-Jun-2018]

ENPHASE ENERGY. Manual de Instalación y Funcionamiento Microinversores EnphaseM25 : <https://enphase.com/sites/default/files/downloads/support/M215-M250-manual-ES-LAC.pdf> [Accessed: 30-Jun-2018]

ENPHASE QUALITY SOLAR INVERTER. [Online]. Available: <https://enphase.com/en-us/products-and-services/microinverters/quality-solar-inverter> [Accessed: 12-Jul-2018]

ENPHASE TECHNICAL BRIEF. Microinverter Power Line Communication (PLC) Troubleshooting. [Online]. Available: [https://enphase.com/sites/default/files/downloads/support/PLC-Troubleshooting-EN-UK\\_0.pdf](https://enphase.com/sites/default/files/downloads/support/PLC-Troubleshooting-EN-UK_0.pdf) [Accessed: 12-Jul-2018]

GOOGLE PATENTS. Distributed inverter and intelligent gateway. [Online]. Available : <https://patentimages.storage.googleapis.com/63/1c/a8/128de9209baa4b/US8581441.pdf> [Accessed 31-Jul-2018]

GOOGLE PATENTS. Method and apparatus for converting direct current to alternating current. [Online]. Available: <https://patentimages.storage.googleapis.com/3a/15/1e/a26ab023e0cf0e/US8717780.pdf> [Accessed 31-Jul-2018]

PILCO, Diego y JARAMILLO, Jorge. Sistemas fotovoltaicos para iluminación: paneles fotovoltaicos [Online]. Available: <https://www.utpl.edu.ec/jorgeluisjaramillo/wp-content/uploads/2010/06/renlux-paneles-fv.pdf> [Accessed: 30-Jun-2018]

RODRÍGUEZ, Julieta *et al.* Energías Renovables y Eficiencia Energética. Canarias, España: 2008, 66p. [Online]. Available: <https://www.cienciacanaria.es/files/Libro-de-energias-renovables-y-eficiencia-energetica.pdf>

SOLAR DESIGN TOOL. Compare Inverters. [Online]. Available: [http://www.solardesigntool.com/compare-inverters.html;jsessionid=CCB62906842D1B2D8B575179EF3E8EC7?submit=Compare+Inverters&inverters=673&inverters=431&\\_inverters=on&compare=true](http://www.solardesigntool.com/compare-inverters.html;jsessionid=CCB62906842D1B2D8B575179EF3E8EC7?submit=Compare+Inverters&inverters=673&inverters=431&_inverters=on&compare=true) [Accessed 31-Jul-2018]

VIM. Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados. [Online]. Available: <http://cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf> [Accessed: 30-Jun-2018]

## ANEXOS

### Anexo A. TABLAS DE LA MEDIDA DE LA ACOMETIDA 7

A continuación, se anexan la tabla y las gráficas que resumen todos los valores medidos por semana de la acometida 7:

Tabla A 1. Resumen de Energía por semana AC7.

|                    | Energía generada (Wh) |           |            | Error relativo |
|--------------------|-----------------------|-----------|------------|----------------|
|                    | AcuRev                | Enlighten | Diferencia | %              |
| 27 marzo- 2 abril  | 6023,67               | 5918,92   | 104,75     | 1,74           |
| 10 abril- 16 abril | 7422,17               | 7509,60   | 87,43      | 1,18           |
| 17 abril- 23 abril | 7738,85               | 7602,75   | 136,10     | 1,76           |
| 24 abril- 30 abril | 6661,85               | 6638,88   | 22,96      | 0,34           |

Figura A 1. Gráfica P.Acurev y P.Enlighten semana 1 AC7.

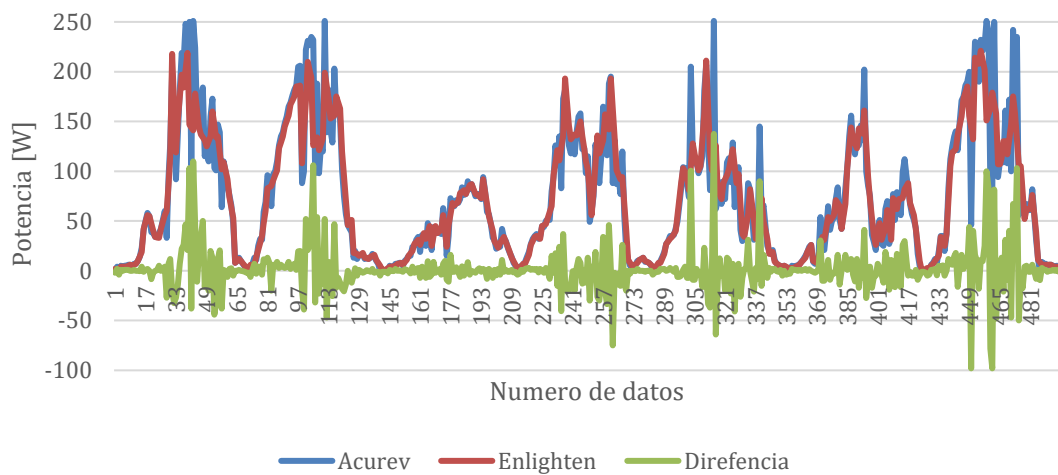


Figura A 2. Gráfica P.AcuRev y P.Enlighten semana 2 AC7.

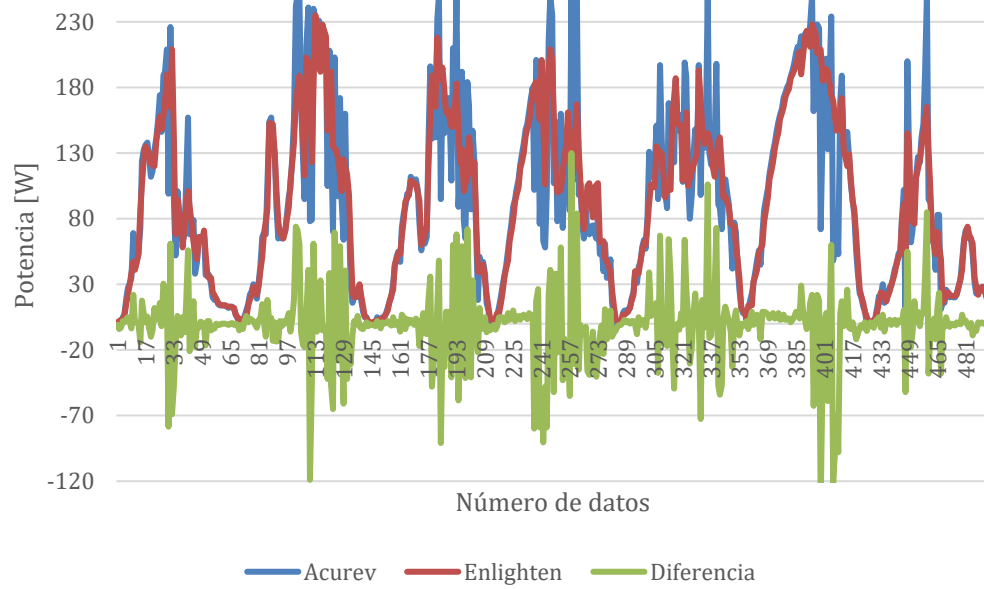


Figura A 3. Gráfica P.AcuRev y P.Enlighten semana 3 AC7.

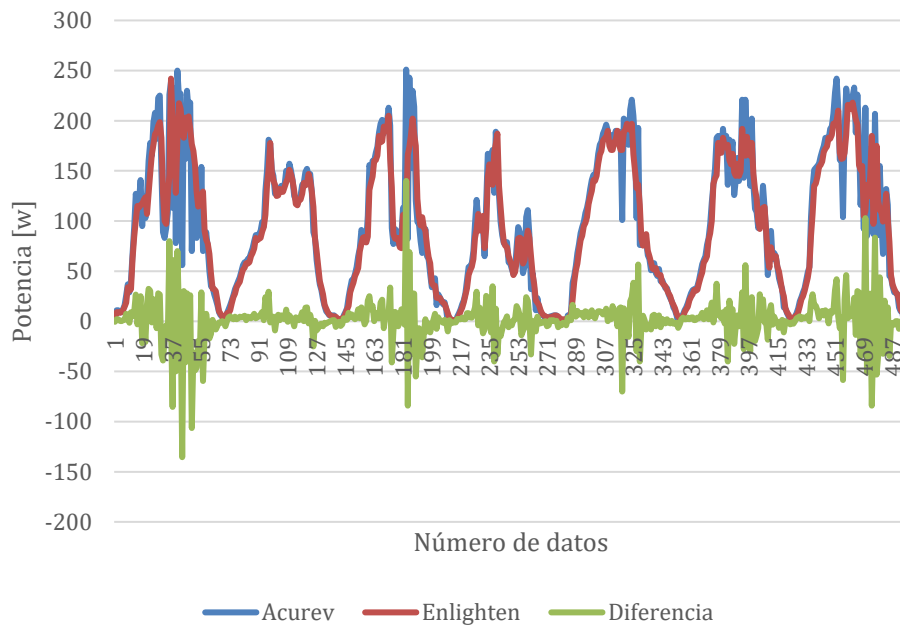
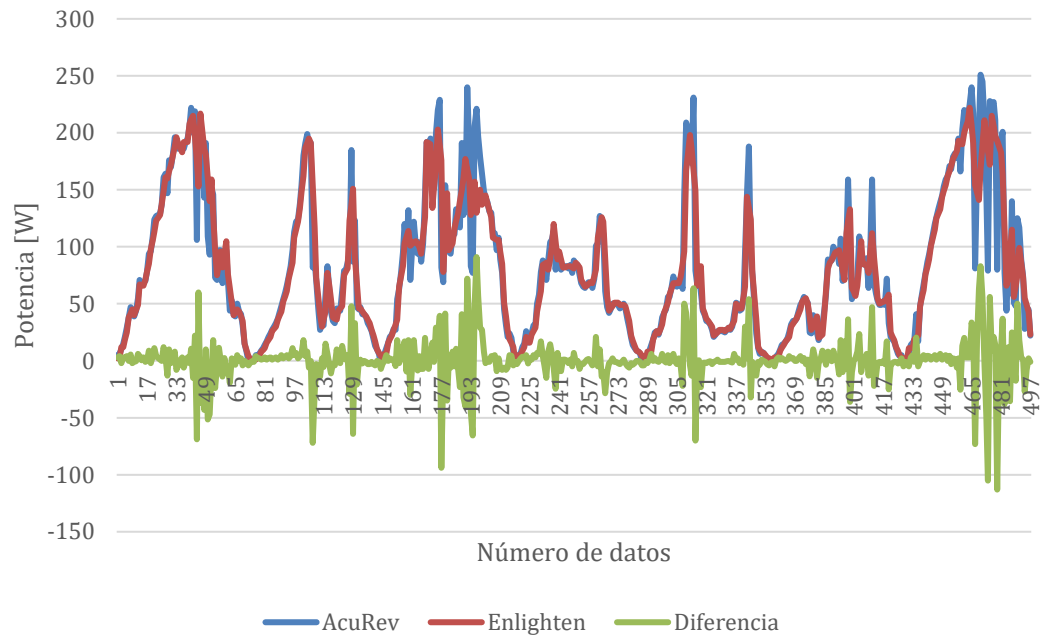


Figura A 4. Gráfica P.AcuRev y P.Enlighten semana 4 AC7.



## Anexo B. GRÁFICAS ESTRATIFICACIÓN DE LA POTENCIA

A continuación, se anexan todas las gráficas y tabla correspondientes a la estratificación de la potencia para las 4 semanas de medida de la acometida 7:

Acometida 7

Tabla B 1. Resumen de la estratificación de la AC7.

|         | Escala de potencias | Cantidad de datos | Promedio Er | Error máximo |
|---------|---------------------|-------------------|-------------|--------------|
| Grupo 1 | [0-51]              | 812               | 29,27       | 950          |
| Grupo 2 | (51-102]            | 513               | 20,022      | 241,964      |
| Grupo 3 | (102-153]           | 320               | 11,784      | 75,664       |
| Grupo 4 | (153-204]           | 232               | 9,826       | 39,13        |
| Grupo 5 | (204-255]           | 129               | 16,374      | 55,777       |

Figura B 1. Gráfica de Potencia vs Error relativo Grupo 1.

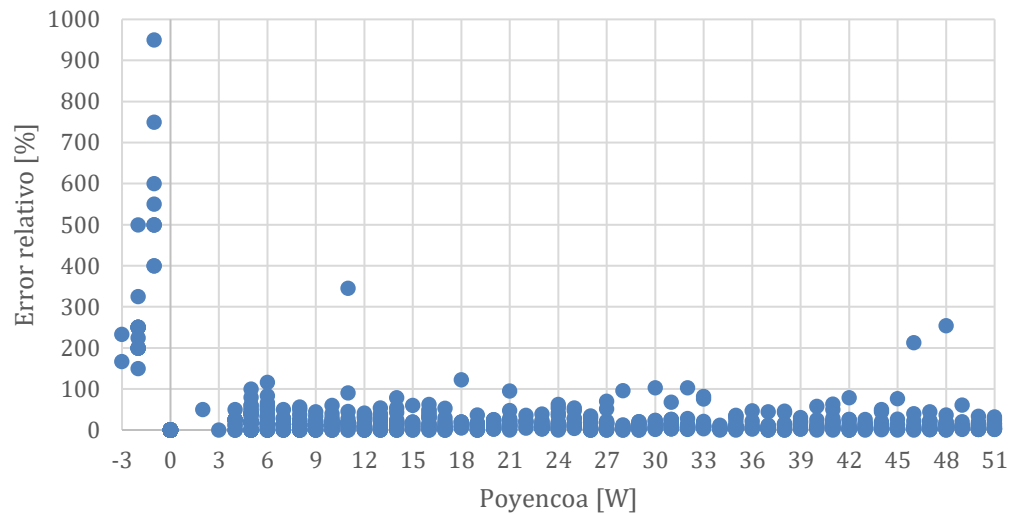


Figura B 2. Gráfica de Potencia vs Error relativo Grupo 4.

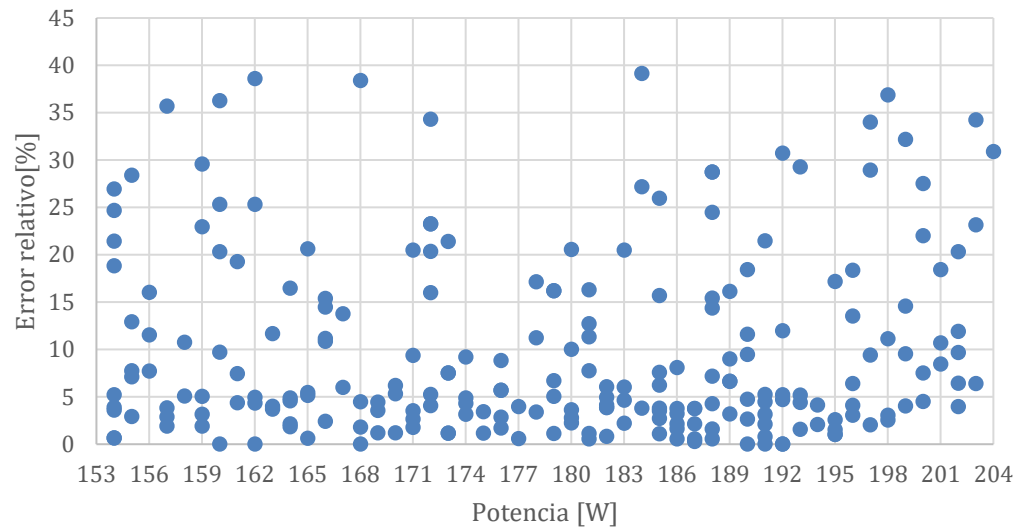


Figura B 3. Gráfica de Potencia vs Error relativo Grupo 5.

