

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



Desarrollo de una plataforma para monitorear el comportamiento de la  
generación eléctrica y cuantificar el impacto económico/ambiental del  
Complejo Solar del TEC en Cartago

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en  
Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Joseph Sánchez Solís

Cartago, Noviembre de 2022

# ÍNDICE GENERAL

|   |           |
|---|-----------|
| ÍNDICE DE FIGURAS   | 6         |
| ÍNDICE DE TABLAS  | 7         |
| Declaratoria de autenticidad  | 8         |
| Resumen   | 9         |
| Abstract  | 10        |
| <b>1 Introducción</b>   | <b>11</b> |
| 1.1 Entorno del proyecto . . . . .  | 11        |
| 1.2 Planteamiento del problema . . . . .  | 13        |
| 1.3 Objetivos . . . . .   | 15        |
| 1.3.1 Objetivo General . . . . .  | 15        |
| 1.3.2 Objetivos Específicos . . . . .   | 15        |
| 1.4 Estrategia de solución del proyecto . . . . .   | 16        |
| <b>2 Fundamentos teóricos</b>   | <b>18</b> |
| 2.1 Sistema fotovoltaico . . . . .  | 18        |
| 2.1.1 Fundamentos científicos y composición del panel solar . . . . .                         | 20        |
| 2.1.2 Inversores . . . . .  | 22        |
| 2.2 Datos de generación de los sistemas fotovoltaicos . . . . .                               | 24        |
| 2.2.1 Datos de generación eléctrica relevantes para el proyecto . . . . .                     | 25        |
| 2.3 Fuentes de generación eléctrica tradicionales y su impacto en el medio ambiente . . . . . | 27        |
| 2.3.1 Generación de electricidad de manera convencional . . . . .                             | 27        |
| 2.3.2 Uso de combustibles fósiles en la generación de electricidad . . . . .                  | 28        |
| 2.4 Herramienta de programación . . . . .   | 30        |
| <b>3 Comunicación con los inversores</b>  | <b>31</b> |
| 3.1 Protocolo de comunicación Modbus . . . . .  | 31        |
| 3.1.1 ¿Qué es el protocolo Modbus? . . . . .  | 31        |
| 3.1.2 ¿Dónde se usa el protocolo Modbus? . . . . .  | 31        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.1.3    | ¿Cómo se hace el acceso de datos y cuál es el modelo de datos en Modbus? . . . . .                          | 32         |
| 3.1.4    | Transmisión serial por medio del cable EIA/TIA-485 . . . . .  | 34         |
| 3.1.5    | ¿Qué es Modbus RTU y cómo funciona? . . . . .   | 35         |
| 3.2      | Diseño e implementación de los scripts . . . . .  | 36         |
| 3.2.1    | Adquisición de los datos de generación eléctrica de los inversores . . . . .                                | 37         |
| 3.2.2    | Almacenamiento de los datos . . . . .   | 51         |
| <b>4</b> | <b>Estimación del ahorro económico y de la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero</b>    | <b>55</b>  |
| 4.1      | Estimación del ahorro económico . . . . .   | 55         |
| 4.2      | Estimación de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero . . . . .                            | 56         |
| 4.3      | Diseño e implementación del algoritmo que permite el cálculo de las estimaciones . . . . .                  | 57         |
| <b>5</b> | <b>Desarrollo de la plataforma de monitoreo</b>   | <b>62</b>  |
| 5.1      | Método de análisis gráfico . . . . .  | 62         |
| 5.2      | Diseño de la plataforma de monitoreo . . . . .  | 64         |
| 5.2.1    | Selección de los componentes que integran la plataforma . . . . .   | 66         |
| <b>6</b> | <b>Análisis de resultados</b>   | <b>70</b>  |
| 6.1      | Comunicación con los inversores . . . . .   | 70         |
| 6.1.1    | Sungrow . . . . .   | 71         |
| 6.1.2    | Growatt . . . . .   | 77         |
| 6.1.3    | Solar Edge . . . . .  | 82         |
| 6.2      | Estimación del ahorro económico y de la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero . . . . . | 85         |
| 6.2.1    | Ahorro económico diario . . . . .   | 85         |
| 6.2.2    | Reducción diaria de emisiones de gases de efecto invernadero . . . . .                                      | 88         |
| 6.3      | Plataforma de monitoreo . . . . .   | 91         |
| 6.3.1    | Método de análisis gráfico . . . . .  | 91         |
| 6.3.2    | Interfaz de visualización de datos . . . . .  | 94         |
| <b>7</b> | <b>Conclusiones y recomendaciones</b>   | <b>100</b> |
| 7.1      | Conclusiones . . . . .  | 100        |
| 7.2      | Recomendaciones . . . . .   | 100        |
|          | <b>Bibliografía</b>   | <b>102</b> |
|          | <b>Anexos</b>   | <b>106</b> |
|          | Hoja de información del proyecto . . . . .  | 106        |
|          | Evaluación de las características del proyecto . . . . .  | 107        |

# ÍNDICE DE FIGURAS

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <b>Figura 1.1</b>  | Diagrama de concepto para la solución del proyecto . . . . .   | 17 |
| <b>Figura 2.1</b>  | Celda solar [18]. . . . .  | 20 |
| <b>Figura 2.2</b>  | Panel solar o módulo fotovoltaico [18]. . . . .  | 20 |
| <b>Figura 2.3</b>  | Cristal de Silicio dopado con Fósforo para la capa N y con Boro para la capa P [15]. . . . .             | 21 |
| <b>Figura 2.4</b>  | Efecto Fotoeléctrico [17]. . . . .   | 22 |
| <b>Figura 2.5</b>  | Esquema eléctrico de un inversor DC - AC [12]. . . . .   | 23 |
| <b>Figura 2.6</b>  | Curva IV característica de un modulo fotovoltaico . . . . .  | 25 |
| <b>Figura 2.7</b>  | Esquema de conexión de las cadenas de paneles . . . . .  | 26 |
| <b>Figura 3.1</b>  | Estructura general de los paquetes de información en Modbus. [29]  | 33 |
| <b>Figura 3.2</b>  | Solicitud y respuesta de datos a los registros de retención [29]. . .                                    | 33 |
| <b>Figura 3.3</b>  | Solicitud y respuesta de datos a los registros de entrada [29]. . .                                      | 33 |
| <b>Figura 3.4</b>  | Modelo de datos para la comunicación por medio de Modbus [29].   | 34 |
| <b>Figura 3.5</b>  | Estructura de los paquetes de información en Modbus RTU [30].  | 35 |
| <b>Figura 3.6</b>  | Diagrama de flujo para la adquisición y el almacenamiento de los datos de generación eléctrica . . . . . | 37 |
| <b>Figura 3.7</b>  | Ejemplo de uso de la librería [33]. . . . .  | 38 |
| <b>Figura 3.8</b>  | Propiedades del instrumento [33]. . . . .  | 39 |
| <b>Figura 3.9</b>  | Lectura de múltiples instrumentos [33]. . . . .  | 39 |
| <b>Figura 3.10</b> | Conexión en cadena de los inversores Sungrow por medio del cable RS-485 . . . . .                        | 40 |
| <b>Figura 3.11</b> | Configuración por defecto de los inversores Sungrow para el uso del estándar RS-485 . . . . .            | 40 |
| <b>Figura 3.12</b> | Consideraciones que se deben tener al momento de adquirir los datos de los inversores Sungrow . . . . .  | 41 |
| <b>Figura 3.13</b> | Tabla de registros Modbus para los inversores Sungrow parte 1 .  | 42 |
| <b>Figura 3.14</b> | Tabla de registros Modbus para los inversores Sungrow parte 2 .  | 42 |
| <b>Figura 3.15</b> | Inicio y condición de entrada para la ejecución del script . . . . .                                     | 43 |
| <b>Figura 3.16</b> | Función que permite la adquisición de datos en los inversores Sungrow . . . . .                          | 44 |
| <b>Figura 3.17</b> | Conexión en cadena de los inversores Growatt por medio del cable RS-485 . . . . .                        | 45 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 3.18</b> Configuración por defecto de los inversores Growatt para el uso del estándar RS-485 . . . . .   | 45 |
| <b>Figura 3.19</b> Tabla de registros Modbus para los inversores Growatt parte 1 .   | 46 |
| <b>Figura 3.20</b> Tabla de registros Modbus para los inversores Growatt parte 2 .   | 46 |
| <b>Figura 3.21</b> Tabla de registros Modbus para los inversores Growatt parte 3 .   | 47 |
| <b>Figura 3.22</b> Función que permite la adquisición de datos en los inversores Growatt . . . . .   | 47 |
| <b>Figura 3.23</b> Conexión en cadena de los inversores Solar Edge por medio del cable RS-485 . . . . .  | 48 |
| <b>Figura 3.24</b> Configuración por defecto de los inversores Solar Edge para el uso del estándar RS-485 . . . . .  | 48 |
| <b>Figura 3.25</b> Tabla de registros Modbus para los inversores Solar Edge parte 1  | 49 |
| <b>Figura 3.26</b> Tabla de registros Modbus para los inversores Solar Edge parte 2  | 49 |
| <b>Figura 3.27</b> Función que permite la adquisición de datos en los inversores Solar Edge . . . . .  | 50 |
| <b>Figura 3.28</b> Estructura del sistema de archivos para el almacenamiento de los datos . . . . .  | 51 |
| <b>Figura 3.29</b> Función que permite la verificación de la existencia de un elemento por medio de su ruta de acceso . . . . .                              | 52 |
| <b>Figura 3.30</b> Función que permite almacenar los datos en archivos formato CSV   | 54 |
| <b>Figura 4.1</b> Tarifas vigentes de electricidad para el año 2022 según ARESEP [35]. . . . .   | 56 |
| <b>Figura 4.2</b> Factores de emisión de gases de efecto invernadero para el sector energía [36]. . . . .  | 57 |
| <b>Figura 4.3</b> Diagrama de flujo para obtener la estimación del ahorro económico y la reducción en la emisión de gases de efecto de invernadero . . . . . | 58 |
| <b>Figura 4.4</b> Lista modelo para el nombramiento de los encabezados del documento CSV. . . . .  | 59 |
| <b>Figura 4.5</b> Algoritmo para estimar el ahorro económico y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero . . . . .                            | 61 |
| <b>Figura 5.1</b> Importación de las librerías necesarias para realizar los gráficos. .  | 63 |
| <b>Figura 5.2</b> Código implementado para obtener un gráfico de líneas en 2 dimensiones. . . . .  | 64 |
| <b>Figura 5.3</b> Barra de navegación y su código en Python [42]. . . . .  | 66 |
| <b>Figura 5.4</b> Tarjetas y su código en Python [42]. . . . .   | 67 |
| <b>Figura 5.5</b> Desplegable y su código en Python [42]. . . . .  | 67 |
| <b>Figura 5.6</b> Pestañas y su código en Python [42]. . . . .   | 68 |
| <b>Figura 5.7</b> Entrada de texto y su código en Python [42]. . . . .   | 69 |
| <b>Figura 5.8</b> Calendario y su código en Python [42]. . . . .   | 69 |
| <b>Figura 6.1</b> Pantalla principal del inversor 1. . . . .   | 72 |

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <b>Figura 6.2</b>  | Datos de generación eléctrica en CD del inversor 1. . . . .                        | 72 |
| <b>Figura 6.3</b>  | Datos de generación eléctrica en AC del inversor 1. . . . .                        | 72 |
| <b>Figura 6.4</b>  | Resumen de la generación eléctrica del inversor 1. . . . .                         | 73 |
| <b>Figura 6.5</b>  | Datos de generación eléctrica del inversor 1 obtenidos mediante el script. . . . . | 73 |
| <b>Figura 6.6</b>  | Pantalla principal del inversor 2. . . . .   | 75 |
| <b>Figura 6.7</b>  | Datos de generación eléctrica en CD del inversor 2. . . . .                        | 75 |
| <b>Figura 6.8</b>  | Datos de generación eléctrica en AC del inversor 2. . . . .                        | 75 |
| <b>Figura 6.9</b>  | Resumen de la generación eléctrica del inversor 2. . . . .                         | 76 |
| <b>Figura 6.10</b> | Datos de generación eléctrica del inversor 2 obtenidos mediante el script. . . . . | 76 |
| <b>Figura 6.11</b> | Pantalla principal del inversor 5. . . . .   | 78 |
| <b>Figura 6.12</b> | Datos de generación eléctrica del inversor 5 obtenidos mediante el script. . . . . | 78 |
| <b>Figura 6.13</b> | Pantalla principal del inversor 6. . . . .   | 79 |
| <b>Figura 6.14</b> | Datos de generación eléctrica del inversor 6 obtenidos mediante el script. . . . . | 80 |
| <b>Figura 6.15</b> | Pantalla principal del inversor 7. . . . .   | 81 |
| <b>Figura 6.16</b> | Datos de generación eléctrica del inversor 7 obtenidos mediante el script. . . . . | 81 |
| <b>Figura 6.17</b> | Pantalla principal del inversor 8. . . . .   | 82 |
| <b>Figura 6.18</b> | Pantalla principal del inversor 8. . . . .   | 82 |
| <b>Figura 6.19</b> | Datos de generación eléctrica del inversor 8 obtenidos mediante el script. . . . . | 83 |
| <b>Figura 6.20</b> | Pantalla principal del inversor 8. . . . .   | 84 |
| <b>Figura 6.21</b> | Pantalla principal del inversor 8. . . . .   | 84 |
| <b>Figura 6.22</b> | Datos de generación eléctrica del inversor 8 obtenidos mediante el script. . . . . | 84 |
| <b>Figura 6.23</b> | Ahorro económico diario del inversor 1 retornado por el algoritmo.                 | 85 |
| <b>Figura 6.24</b> | Ahorro económico diario del inversor 2 retornado por el algoritmo.                 | 85 |
| <b>Figura 6.25</b> | Ahorro económico diario del inversor 5 retornado por el algoritmo.                 | 86 |
| <b>Figura 6.26</b> | Ahorro económico diario del inversor 6 retornado por el algoritmo.                 | 86 |
| <b>Figura 6.27</b> | Ahorro económico diario del inversor 7 retornado por el algoritmo.                 | 86 |
| <b>Figura 6.28</b> | Ahorro económico diario del inversor 8 retornado por el algoritmo.                 | 87 |
| <b>Figura 6.29</b> | Ahorro económico diario del inversor 9 retornado por el algoritmo.                 | 87 |
| <b>Figura 6.30</b> | Reducción diaria de emisiones del inversor 1 retornado por el algoritmo. . . . .   | 88 |
| <b>Figura 6.31</b> | Reducción diaria de emisiones del inversor 2 retornado por el algoritmo. . . . .   | 88 |
| <b>Figura 6.32</b> | Reducción diaria de emisiones del inversor 5 retornado por el algoritmo. . . . .   | 88 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 6.33</b> Reducción diaria de emisiones del inversor 6 retornado por el algoritmo. . . . .   | 89 |
| <b>Figura 6.34</b> Reducción diaria de emisiones del inversor 7 retornado por el algoritmo. . . . .   | 89 |
| <b>Figura 6.35</b> Reducción diaria de emisiones del inversor 8 retornado por el algoritmo. . . . .   | 89 |
| <b>Figura 6.36</b> Reducción diaria de emisiones del inversor 9 retornado por el algoritmo. . . . .   | 90 |
| <b>Figura 6.37</b> Comportamiento de la potencia y la temperatura durante el día 19 de octubre del año 2022. . . . .  | 92 |
| <b>Figura 6.38</b> Valor de la potencia en DC a las 11:03am según el gráfico. . . . .   | 92 |
| <b>Figura 6.39</b> Valor de la potencia en AC a las 11:03am según el gráfico. . . . .   | 92 |
| <b>Figura 6.40</b> Valor de la temperatura a las 11:03am según el gráfico. . . . .  | 92 |
| <b>Figura 6.41</b> Valor de la potencia en DC a las 11:17am según el gráfico. . . . .   | 93 |
| <b>Figura 6.42</b> Valor de la potencia en AC a las 11:17am según el gráfico. . . . .   | 93 |
| <b>Figura 6.43</b> Valor de la temperatura a las 11:17am según el gráfico. . . . .  | 93 |
| <b>Figura 6.44</b> Datos de generación eléctrica almacenados para el día 19 de octubre del año 2022. . . . .  | 94 |
| <b>Figura 6.45</b> Diseño final de la barra de navegación. . . . .  | 94 |
| <b>Figura 6.46</b> Diseño final de las tarjetas que contienen los valores estimados y la generación eléctrica total diaria. . . . .                             | 95 |
| <b>Figura 6.47</b> Diseño final de los gráficos de barras y circulares que muestran la distribución del aporte energético diario. . . . .                       | 95 |
| <b>Figura 6.48</b> Diseño final de los gráficos de potencia en DC y AC, así como de la temperatura del inversor. . . . .  | 96 |
| <b>Figura 6.49</b> Diseño final de los gráficos de tensión en DC. . . . .   | 96 |
| <b>Figura 6.50</b> Diseño final de los gráficos de corriente en DC. . . . .   | 97 |
| <b>Figura 6.51</b> Diseño final de los gráficos de tensión en AC. . . . .   | 97 |
| <b>Figura 6.52</b> Diseño final de los gráficos de corriente en AC. . . . .   | 97 |
| <b>Figura 6.53</b> Diseño final de las tarjetas que contienen los valores estimados y la generación eléctrica diaria por inversor. . . . .                      | 98 |
| <b>Figura 6.54</b> Diseño final de las tarjetas que contienen los valores estimados y la generación eléctrica total histórico del Complejo Solar. . . . .       | 98 |
| <b>Figura 6.55</b> Diseño final de los gráficos de barras y circulares que muestran la distribución del aporte energético histórico del Complejo Solar. . . . . | 99 |

# ÍNDICE DE TABLAS

|                   |  |    |
|-------------------|--|----|
| <b>Tabla 3.1</b>  | Bloques del modelo de datos Modbus [30]. . . . .   | 32 |
| <b>Tabla 6.1</b>  | Porcentaje de error de los datos de generación eléctrica recopilados con respecto a los presentes en el inversor 1. . . . .  | 74 |
| <b>Tabla 6.2</b>  | Porcentaje de error de los datos de generación eléctrica recopilados con respecto a los presentes en el inversor 2. . . . .  | 77 |
| <b>Tabla 6.3</b>  | Porcentaje de error de los datos de generación eléctrica recopilados con respecto a los presentes en el inversor 5. . . . .  | 79 |
| <b>Tabla 6.4</b>  | Porcentaje de error de los datos de generación eléctrica recopilados con respecto a los presentes en el inversor 6. . . . .  | 80 |
| <b>Tabla 6.5</b>  | Porcentaje de error de los datos de generación eléctrica recopilados con respecto a los presentes en el inversor 7. . . . .  | 82 |
| <b>Tabla 6.6</b>  | Porcentaje de error de los datos de generación eléctrica recopilados con respecto a los presentes en el inversor 8. . . . .  | 83 |
| <b>Tabla 6.7</b>  | Porcentaje de error de los datos de generación eléctrica recopilados con respecto a los presentes en el inversor 9. . . . .  | 84 |
| <b>Tabla 6.8</b>  | Porcentaje de coincidencia entre los datos estimados de ahorro económico de gases de efecto invernadero y los valores retornados por el algoritmo. . . . .           | 87 |
| <b>Tabla 6.9</b>  | Porcentaje de coincidencia entre los datos estimados de reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero y los valores retornados por el algoritmo. . . . . | 90 |
| <b>Tabla 6.10</b> | Comprobación de la coincidencia entre los datos almacenados y los mostrados en los gráficos para el día 19 de octubre del 2022 a las 11:03am. . . . .                | 91 |
| <b>Tabla 6.11</b> | Comprobación de la coincidencia entre los datos almacenados y los mostrados en los gráficos para el día 19 de octubre del 2022 a las 11:17am. . . . .                | 91 |

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

**ACTA DE APROBACIÓN**

**Defensa del Trabajo Final de Graduación  
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica  
Grado Académico de Licenciatura  
Instituto Tecnológico de Costa Rica**

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del Trabajo Final de Graduación denominado Desarrollo de una plataforma para monitorear el comportamiento de la generación eléctrica y cuantificar el impacto económico/ambiental del Complejo Solar del TEC en Cartago, realizado por el señor Joseph Alejandro Sánchez Solís y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

**Miembros del Tribunal Evaluador**

JAVIER  
MAURICIO PEREZ  
RODRIGUEZ  
(FIRMA)

Firmado digitalmente  
por JAVIER MAURICIO  
PEREZ RODRIGUEZ  
(FIRMA)  
Fecha: 2022.11.22  
09:01:47 -06'00'

---

Ing. Javier Pérez Rodríguez

Profesor lector

Firmado digitalmente por LEONARDO  
ELIAS SANDOVAL CASCANTE (FIRMA)  
Fecha: 2022.11.22 10:49:02 -06'00'

---

Ing. Leonardo Sandoval Cascante

Profesor lector

Firmado por SERGIO ARTURO MORALES HERNANDEZ (FIRMA)  
PERSONA FISICA, CPF-02-0455-0934.  
Fecha declarada: 21/11/2022 04:33 PM  
Esta representación visual no es fuente  
de confianza. Valide siempre la firma.

---

Ing. Sergio Morales Hernández

Profesor asesor

Cartago, 21 de noviembre, 2022

# Declaratoria de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado, en su totalidad, por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado material bibliográfico, he procedido a indicar las fuentes mediante citas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



---

Joseph Sánchez Solís  
Cédula: 1 1658 0760

# Resumen

El Complejo Solar del TEC es sin duda uno de los proyectos más ambiciosos que se han desarrollado en los últimos años en la institución. Este posee una extensión de más de 2,400 metros cuadrados, y su estructura cuenta con más de 1,200 paneles.

Debido al gran tamaño que posee el Complejo Solar y la relevancia que este presenta para el Instituto Tecnológico de Costa Rica es que surge la necesidad de desarrollar una plataforma que permita monitorear el comportamiento con respecto a la generación de electricidad y cuantificar el ahorro económico, así como la cantidad de gases de efecto invernadero que se dejan de emitir al medio ambiente de manera diaria.

El presente documento muestra el proceso que se llevó a cabo para cumplir con este objetivo. Primeramente, se inició con el desarrollo de scripts que permitieron la recolección y el almacenamiento de las variables eléctricas de cada uno de los inversores, haciendo uso del sistema embebido llamado Raspberry Pi y el lenguaje de programación Python. Luego, se estimaron los valores del ahorro económico y la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero, mediante el diseño y la implementación de un algoritmo. Para finalizar, se implementó un método de análisis gráfico de los datos almacenados, que permite visualizar por medio de gráficas el comportamiento de cada una de las variables eléctricas.

De acuerdo con el análisis de resultados, las variables eléctricas recolectadas y almacenadas presentaron menos de un 5% de error con respecto a los valores medidos por los inversores. Asimismo, los resultados obtenidos mediante el algoritmo poseen un 100% de coincidencia con los cálculos realizados, utilizando como datos de entrada valores de generación eléctrica reales.

Por último, al completar los pasos anteriores, y luego de una fase de diseño e implementación, se obtuvo como resultado una plataforma web interactiva que brinda la opción de seleccionar cada uno de los inversores que compone el Complejo Solar, introducir el valor del kWh y el factor de emisión, aunado al día que se desea conocer para mostrar la información de generación eléctrica, así como un resumen del ahorro económico y la reducción de emisiones.

**Palabras clave:** Energía solar, Sistemas Fotovoltaicos, Panel Solar, Inversores, Variables Eléctricas, Modbus, Python, Plataforma de Monitoreo.

# Abstract

The TEC Solar Complex is undoubtedly one of the most ambitious projects that have been developed in recent years in the institution. It has an extension of more than 2,400 square meters, and its structure has more than 1,200 panels.

Due to the large size of the Solar Complex and its relevance for the Instituto Tecnológico de Costa Rica, the need arises to develop a platform to monitor the behavior with respect to electricity generation and quantify the economic savings, as well as the amount of greenhouse gases that are no longer emitted into the environment on a daily basis.

This document shows the process that was carried out to meet this objective. First, we started with the development of scripts that allowed the collection and storage of the electrical variables of each of the inverters, using the Raspberry Pi embedded system and the Python programming language. Then, the values of the economic savings and the reduction in greenhouse gas emissions were estimated, through the design and implementation of an algorithm. Finally, a method of graphical analysis of the stored data was implemented, which allows the behavior of each of the electrical variables to be visualized by means of graphs.

According to the analysis of the results, the electrical variables collected and stored presented less than 5% error with respect to the values measured by the inverters. Likewise, the results obtained through the algorithm have a 100% coincidence with the calculations performed, using real electrical generation values as input data.

Finally, after completing the previous steps, and after a design and implementation phase, the result was an interactive web platform that provides the option to select each of the inverters that make up the Solar Complex, enter the kWh value and the Emission Factor, together with the day you want to know to display the electricity generation information, as well as a summary of the economic savings and emissions reduction.

**Keywords:** Solar Energy, Photovoltaic Systems, Solar Panel, Inverters, Electrical Variables, Modbus, Python, Monitoring Platform.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Entorno del proyecto

En la actualidad, cada vez se hace más evidente que la demanda energética a nivel mundial va en aumento, esto debido a que diariamente se crean dispositivos que si bien, tienen el objetivo de facilitar la vida de las personas, también requieren de algún tipo de alimentación eléctrica para su funcionamiento, ya sea para cargar las baterías que los componen o para alimentarse de manera directa.

Un ejemplo común son dispositivos como los parlantes inteligentes que integran asistentes virtuales controlados por voz, los cuales en la mayoría de ocasiones se mantienen conectados a la red eléctrica todos los días, durante todo el día, y es así, ya que permiten realizar desde funciones básicas como reproducir contenido de audio, hasta acciones más complejas como automatizar el comportamiento de las luces, abrir o cerrar el portón de la casa, establecer alarmas, hacer compras con la voz, etc [1].

Debido a este constante aumento de las necesidades energéticas, el área de la electrónica se ha tenido que adaptar, esto mediante la creación de un campo que estudia los temas relacionados con la potencia, conocido como electrónica de potencia. Este se define como la tecnología que se encarga de la conversión y el control de la energía eléctrica con la ayuda de dispositivos semiconductores de potencia que funcionan en modo de conmutación, logrando que la eficiencia de los aparatos pueda llegar hasta un 98 % - 99 % [2].

Es importante acotar, que se anticipa que la electrónica de potencia interpretará un papel fundamental en esta era, ya que mucha de la energía que va a ser consumida, tendrá que fluir por dispositivos que contengan circuitos de potencia [3].

Por citar algunas de las aplicaciones donde se puede apreciar la influencia de la electrónica de potencia se pueden mencionar: las fuentes de alimentación reguladas, las fuentes de alimentación ininterrumpidas (UPS), los filtros activos, los almacenadores o reservorios de energía, los convertidores de corriente, entre muchos otros [4].

Con respecto a los convertidores de corriente, existe uno que es ampliamente utilizado en las instalaciones modernas de generación, transmisión, distribución, utilización y protección de energía eléctrica. Este es el caso de los convertidores de corriente directa

(CD) a corriente alterna (CA) o mejor conocidos como inversores.

Estos dispositivos son muy comunes, debido a que permiten aprovechar la energía generada por medio de sistemas fotovoltaicos, transformando la corriente directa proveniente de los paneles solares en una señal sinusoidal (CA) necesaria para alimentar los artefactos que se tienen dentro del hogar y que requieren de una conexión eléctrica para funcionar.

Por otra parte, en universidades como el Tecnológico de Costa Rica (TEC), ubicada en el centro de la provincia de Cartago, se forman profesionales en distintos campos de estudio referentes a la ciencia y la tecnología [5].

Además, con el objetivo de minimizar la huella ecológica, las escuelas de esta institución cuentan con laboratorios dedicados a la investigación e implementación, los cuales están equipados con dispositivos especializados que facilitan llevar a cabo procedimientos de interés particular en las distintas áreas, como lo son proyectos que permitan aprovechar la energía proveniente del sol.

Entre los laboratorios más destacados, se encuentra el Laboratorio de Sistemas Electrónicos para la Sostenibilidad (SESLab) que pertenece a la Escuela de Ingeniería Electrónica. Este es un laboratorio de investigación aplicada que se centra en la evaluación, el análisis y el desarrollo de sistemas electrónicos utilizados específicamente en aplicaciones carbono neutral y de bajo impacto ambiental, como los sistemas de energía renovable, el transporte con cero emisiones de carbono y la vigilancia ambiental [6].

## 1.2. Planteamiento del problema

En nuestro país y alrededor del mundo, se llevan a cabo importantes esfuerzos por incrementar la integración y el aprovechamiento de las diferentes formas de energía renovable, esto con el objetivo de disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera [7].

Entre las energías renovables que pueden ser utilizadas para convertirse en energía eléctrica se encuentran la hidráulica, geotérmica, oceánica, bioenergía, eólica y solar.

Ahora bien, con respecto a la energía solar, se puede mencionar que esta es la que ha experimentado un mayor crecimiento en los últimos años, aumentando en aproximadamente 50 GigaWatts al año la capacidad instalada de energía fotovoltaica [8]. Esto en parte es gracias a que alrededor de 173.000 TeraWatts llegan a nuestro planeta cada día, lo que significa más de 10.000 veces las necesidades energéticas totales del mundo [9].

La generación de energía eléctrica por medio de paneles solares posee grandes ventajas como lo es por ejemplo que está disponible en todo el mundo, en mayor o menor medida dependiendo de la zona, pero se puede aprovechar, asimismo, la energía solar no emite gases de efecto invernadero, por lo que contribuye con la reducción de las emisiones de carbono provocadas por los métodos de generación eléctrica tradicionales [10].

También, el aprovechamiento de la energía solar, permite que se lleve a cabo una descentralización de la matriz energética, otorgándole a las personas la oportunidad de generar localmente la electricidad que necesitan.

Sin embargo, es importante mencionar que, a pesar de conseguir implementar la parte correspondiente a la generación, la cual, a grandes rasgos, está compuesta por los paneles solares y el o los inversores, ésta no va a ser suficiente para suplir las necesidades de energía si no existe una administración adecuada. esto debido a que hoy en día se requiere de soluciones integrales que analicen con detalle sus potenciales implicaciones [11].

En otras palabras, si no se realizan los cálculos y los diseños apropiados dependiendo de las necesidades que requiera el proyecto con respecto a la instalación del sistema fotovoltaico, pueden existir escenarios donde la potencia generada va a exceder el consumo mensual del sitio, provocando de esta manera un uso ineficiente de la energía, o por el contrario, pueden haber casos donde la potencia instalada no es suficiente como para justificar el hecho de invertir en un sistema fotovoltaico.

Para la comunidad científica y distintos departamentos del Tecnológico de Costa Rica, conocer el comportamiento del complejo solar con respecto a la generación de energía eléctrica y como influye esto en el impacto económico y ambiental es de gran importancia, ya que esto va a propiciar la creación de nuevas investigaciones en distintos campos y además, aporta datos que son necesarios para la toma de decisiones en aras de mejorar el funcionamiento actual.

Con este fin, es necesario entonces el desarrollo de sistemas que permitan adquirir variables de importancia en la generación de electricidad por medio de energía solar (intensidad de CD, intensidad de CA, tensión CD, tensión CA, etc) con el propósito de

monitorear el comportamiento del complejo solar del TEC.

De igual manera, se convierte en una tarea de interés el seguimiento del impacto en términos económicos y ambientales que representa la existencia del complejo solar.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo General

Desarrollar una plataforma que permita monitorear el comportamiento de la generación eléctrica y cuantificar el impacto económico/ambiental del complejo solar del TEC en Cartago mediante el uso de herramientas de código abierto y acceso libre.

- Indicador: Plataforma de monitoreo que permite visualizar de manera gráfica el comportamiento del complejo solar del TEC.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

1. Desarrollar un script que permita la recolección y el almacenamiento de variables eléctricas relacionadas con los valores de generación eléctrica, así como la temperatura.
  - Indicador: Comparar que los datos almacenados tengan un porcentaje de error menor al 5 % con respecto a los valores presentes en los inversores.
2. Estimar el ahorro económico relacionado con la generación eléctrica además de la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, utilizando las variables eléctricas junto con la temperatura, que se produzcan durante el día.
  - Indicador: Comprobar que los resultados del algoritmo desarrollado coinciden en un 99 % con valores obtenidos mediante cálculos del ahorro económico según la tarifa de ARESEP y la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> de acuerdo con el factor de emisión publicado por el MINAETT.
3. Implementar un método de análisis gráfico del comportamiento de las variables eléctricas aunado a la temperatura, el ahorro económico y el aporte en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.
  - Indicador: Comprobar que el contenido de los gráficos mostrados en la interfaz de visualización de datos, coincida con los valores de generación eléctrica previamente almacenados.

## 1.4. Estrategia de solución del proyecto

Con el propósito de encontrar una solución al problema planteado, es necesario proponer un conjunto de actividades a realizar durante la ejecución del proyecto, de manera que se busque satisfacer lo planteado en el objetivo general. Esto se logra, cumpliendo lo expuesto en los objetivos específicos y sus respectivos indicadores.

Por lo tanto, en primer lugar, se plantea que se lleve a cabo una revisión de literatura, lo que comprende la lectura de los manuales de usuario de cada equipo (inversores), el funcionamiento del protocolo que se utiliza para que estos se comuniquen con el mundo exterior (ModBus), el entendimiento del sistema embebido a utilizar en el proyecto (Raspberry pi) y las técnicas y consideraciones que se deben tomar a la hora de trabajar con Python en este tipo de dispositivos embebidos.

Seguidamente, se tendrá que proponer una estructura que permita comprender como almacenar los archivos que van a contener la información, para proceder a crear los scripts que permiten acceder a los inversores y extraer los datos de generación eléctrica, los cuales corresponden con los valores en corriente directa y alterna de la tensión, la corriente y la potencia, además de la temperatura de trabajo del inversor en ese momento, para luego almacenarlos en un archivo formato CSV siguiendo la estructura planteada previamente. Es importante mencionar que, una vez recopilada la información, se debe verificar que esta sea correcta, con el fin de garantizar la validez de los datos y poder seguir adelante con el procesamiento de estos.

En segundo lugar, una vez recopilada y verificada la información, las actividades del objetivo 2 están enfocadas en programar el algoritmo capaz de procesar los datos contenidos en los archivos CSV de cada inversor y generar una salida que contenga los valores de generación eléctrica totales del complejo solar, lo que implica entonces, que también se pueda conocer de manera más real cuánto es el ahorro en términos monetarios para la institución. Por lo tanto, es entendible que una tarea que conlleva bastante tiempo es comprobar que el algoritmo funcione tal y como se espera.

En tercer y último lugar, se proponen las actividades relacionadas con la creación de los gráficos que van a estar contenidos en la interfaz de visualización de datos, mejor conocida como la plataforma de monitoreo, esto mediante la implementación de librerías de Python que permiten crear gráficas de alta calidad y con diseños profesionales, así como también, facilitan el diseño web al proveer compatibilidad con HTML5 y CSS.

# Diagrama de concepto

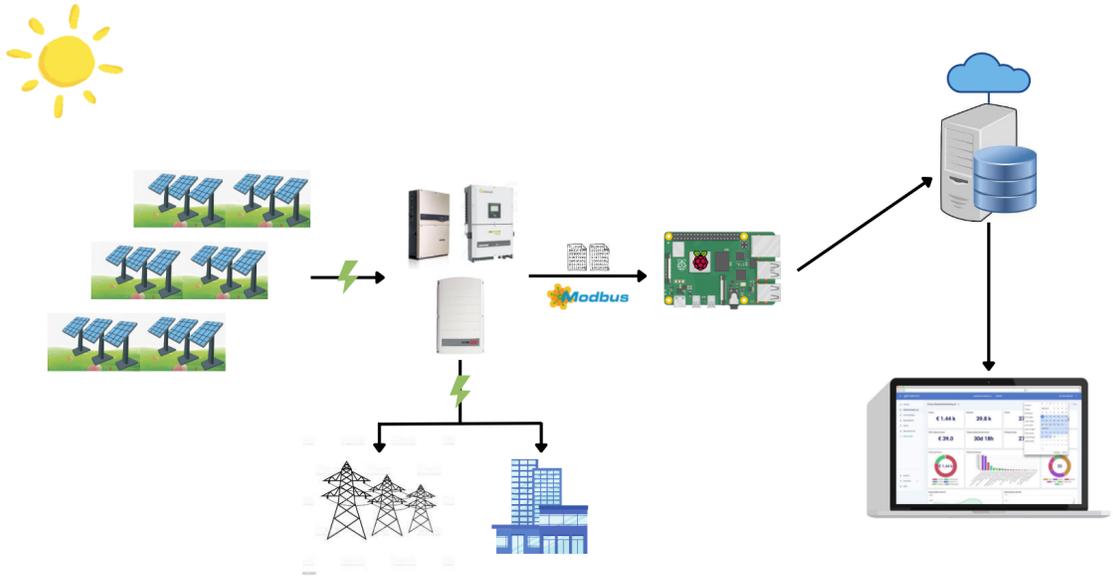


Figura 1.1: Diagrama de concepto para la solución del proyecto

# Capítulo 2

## Fundamentos teóricos

Este capítulo tiene como objetivo proporcionar al lector definiciones necesarias que ayudan a lograr una mayor comprensión del proyecto y su desarrollo.

### 2.1. Sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de equipos eléctricos y electrónicos que producen energía eléctrica a partir de la conversión directa de la radiación solar en electricidad. Esta conversión se realiza a través de la célula o celda solar, unidad básica en la que se produce el efecto fotoeléctrico [12]. Una agrupación de celdas solares, conforman un panel solar. En las figuras 2.1 y 2.2 se puede observar esto de manera gráfica.

Una de las principales características de los sistemas fotovoltaicos y que los diferencia de otras fuentes de energía renovable es que únicamente producen electricidad cuando reciben la luz del Sol (irradiancia solar) aunque no necesitan un sol radiante para funcionar, también lo pueden hacer en días nublados, sin embargo, la cantidad de energía que generan es directamente proporcional a la irradiancia solar que incide sobre la superficie del panel. Por lo tanto, entre más intensa sea la luz, mayor será la corriente generada [13].

Con respecto a la energía solar fotovoltaica, esta es recomendada para un amplio abanico de aplicaciones donde se necesite generar electricidad, bien sea para satisfacer las necesidades energéticas de aquellos que no disponen de la red eléctrica (sistemas fotovoltaicos autónomos o aislados) o para generar energía y disminuir el consumo de la red eléctrica (sistemas conectados a la red).

En la actualidad, en multitud de aplicaciones el consumo energético se produce independientemente de la radiación solar, por ejemplo, durante la noche, donde lo que se busca es tener energía para alimentar los sistemas de iluminación, lo que conlleva entonces a que en este tipo de aplicaciones sea necesario incluir un sistema de almacenamiento, compuesto principalmente por baterías, que permita acumular la energía producida por los módulos fotovoltaicos. Por otro lado, en el caso de los sistemas conectados a la red, estos no necesitan baterías, ya que la energía producida se acumula en la propia red

eléctrica.

En general, un sistema fotovoltaico está integrado por [14]:

- Generador fotovoltaico
- Baterías (opcional)
- Regulador de carga (opcional)
- Inversores
- La carga

El generador fotovoltaico está formado por varios paneles solares conectados en serie y/o paralelo. La potencia que puede suministrar un panel solar dependerá del número de celdas que posea. Si esta potencia resulta insuficiente para una determinada aplicación, el instalador conecta los módulos necesarios, en serie y en paralelo, hasta obtener la potencia requerida.

La energía producida por el generador fotovoltaico puede ser acumulada en caso de ser necesario, en un sistema de baterías. De este modo la energía producida durante las horas de sol se puede utilizar durante la noche, o en momentos en los que no se disponga de la suficiente radiación solar para generar la energía necesaria.

Por su parte, para controlar los procesos de carga y descarga de la batería se utiliza un regulador de carga. Este elemento es el encargado de proteger la batería contra sobrecargas o sobre descargas excesivas que podrían resultar dañinas para la batería, acortando su vida útil.

Los paneles solares producen corriente continua (DC), que se puede almacenar directamente en baterías. Cuando se extrae potencia eléctrica de las baterías, ésta también es en forma de corriente continua. En caso de que se desee satisfacer determinados consumos en corriente alterna (AC) (como ocurre con la mayoría de los consumos que habitualmente se realizan) es necesario disponer de un inversor, ya que este se necesita dimensionar para soportar los picos de consumo.

El inversor es un dispositivo electrónico encargado de transformar la corriente continua en corriente alterna con el máximo rendimiento posible y cumpliendo con determinados requisitos de tensión eficaz, frecuencia, distorsión armónica de las ondas de tensión y corriente, eficiencia, seguridad eléctrica, etc.

Por último, los consumos o cargas que el sistema fotovoltaico tiene que satisfacer (bombillos, batidoras, radio, TV, motores, etc.), pueden ser DC o AC. Los consumos se consideran como una parte substancial del sistema fotovoltaico ya que con base en estos es que se determina el tamaño del sistema (lo que se conoce como dimensionado del sistema fotovoltaico).

En el caso de algunos sistemas, los consumos se conocen a priori con exactitud, sin embargo, en otros casos resulta difícil predecir el consumo de una instalación, como puede ser una instalación de electrificación rural, donde el consumo está definido por el tiempo

de utilización de las cargas por parte de un determinado usuario. Esta incertidumbre se encuentra asociada a la dificultad de prever el comportamiento del usuario con su instalación.



Figura 2.1: Celda solar [18].

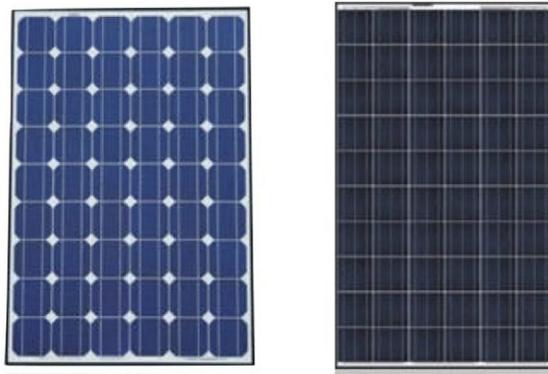


Figura 2.2: Panel solar o módulo fotovoltaico [18].

### 2.1.1. Fundamentos científicos y composición del panel solar

Una celda solar consiste en la unión de un par de capas delgadas conocidas como junta "p-n", compuesta por materiales semiconductores no similares. Las capas "n", se encuentran hechas de silicio cristalino, el cual es dopado con una cantidad pequeña de impurezas aportadas por el Fósforo para generar una gran cantidad de electrones libres. Por su parte, las capas "p", son de silicio cristalino pero dopadas generalmente con Boro, haciendo que estas tengan un déficit de electrones libres (huecos) [12].

El dopaje de semiconductores consiste en introducir de forma controlada impurezas en el cristal. Para las capas 'n', se realiza con átomos de Fósforo los cuales tienen cinco electrones de valencia (uno más que el silicio). Entonces, al impurificar un cristal de silicio con átomos de Fósforo, el quinto electrón no queda bien integrado en la red y, por tanto, este quinto electrón queda libre en la banda de conducción. Por el contrario, en el caso de las capas 'p', se utiliza un átomo de Boro. Los átomos de boro tienen tres electrones de valencia (uno menos que el silicio), y al impurificar un cristal de silicio con átomos de Boro, quedará una vacante en los enlaces en los que participe (hueco). El hueco queda

libre para contribuir a la corriente eléctrica en la banda de conducción. La figura 2.3 muestra un ejemplo gráfico de como queda el silicio una vez dopado.

Al efectuar la unión físicamente de los semiconductores tipo 'p' y 'n', se produce un desequilibrio dada la diferente concentración de electrones y huecos en cada cristal. Para alcanzar el equilibrio, se produce la difusión de portadores mayoritarios, de forma que aparece un movimiento de huecos desde el cristal 'p' al 'n', quedando este cargado negativamente. Simultáneamente, existe un movimiento de electrones desde el cristal 'n' al 'p', quedando este cargado positivamente [15].

Por consiguiente, para conseguir la circulación de corriente a través de esta unión 'p-n', es necesario romper el equilibrio alcanzado. La solución consiste en polarizar la unión 'p-n' aplicando una diferencia de potencial entre los extremos del cristal, de forma que el lado 'p' adquiera una tensión positiva respecto al lado 'n'. Como resultado, la unión 'p-n' está polarizada en directa, esto significa que el equilibrio ya no existe y aparece un flujo neto de corriente.

En 1905 Albert Einstein, publicó un artículo titulado "Un punto de vista heurístico sobre la producción y transformación de la luz", en el cual exponía la tesis de que la emisión de electrones era producida por la absorción de 'cuantos de luz' que más tarde serían llamados fotones. Este efecto fotoeléctrico había sido previamente observado por Heinrich Hertz en 1887, y analizado sucesivamente por Joseph John Thomson en 1889, y Philipp von Lenard en 1902. El trabajo de Einstein predecía que la energía con la que los electrones escapaban del material aumentaba linealmente con la frecuencia de la luz incidente [16].

El efecto fotoeléctrico entonces es el fundamento del funcionamiento de las celdas solares, dispositivos basados en la unión p-n descrita anteriormente, cuyos electrones se desplazan a la banda de conducción por el aporte energético de fotones incidentes contenidos en los rayos del sol [17]. Para un mejor entendimiento se adjunta la figura 2.4 la cual muestra el proceso de este efecto.

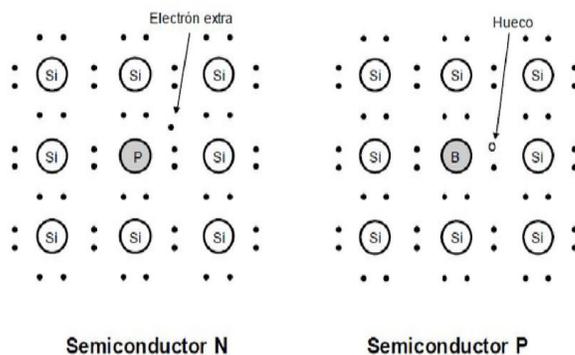


Figura 2.3: Cristal de Silicio dopado con Fósforo para la capa N y con Boro para la capa P [15].

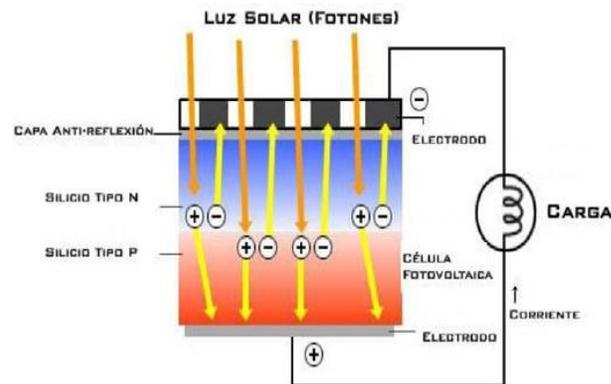


Figura 2.4: Efecto Fotoeléctrico [17].

### 2.1.2. Inversores

El inversor DC/AC es el dispositivo que funciona como puente en los sistemas fotovoltaicos, ya que, como se ha expuesto anteriormente, permite aprovechar la energía producida por los paneles solares. Esto lo logra mediante un proceso que lleva a cabo el equipo donde realiza un acondicionamiento de potencia, que consiste en tomar la señal en corriente continua y convertirla en una señal sinusoidal en corriente alterna, lista para ser inyectada en la red eléctrica convencional.

Con el fin de esclarecer este proceso, a continuación, se detalla el funcionamiento por bloques de un inversor. Asimismo, en la figura 2.5 se adjunta un esquema eléctrico de referencia. [12]:

1. **Filtro de entrada:** Atenúa el rizado que produce la conmutación en la corriente de entrada.
2. **Convertidor DC/DC:** Adecúa (eleva o reduce) la tensión de salida del generador a la tensión necesaria para el puente de conmutación.
3. **Puente inversor:** Realiza la división de la señal continua para convertirla en alterna.
4. **Filtro de salida:** Elimina o atenúa los armónicos no deseados.
5. **Transformador:** Adecua el valor de tensión de salida del puente al de la red y proporciona aislamiento galvánico entre la parte DC y AC.
6. **Control:** Realiza la supervisión de la entrada y salida del convertidor DC/DC y del puente inversor y entrega las consignas correspondientes para localizar y seguir el MPP del generador, y para obtener una señal sinusoidal con bajo contenido en armónicos en la salida del inversor.

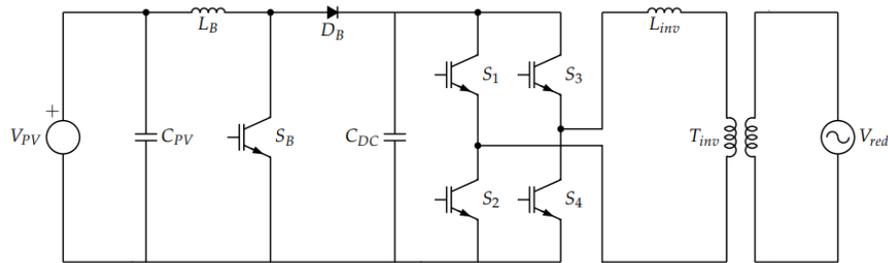


Figura 2.5: Esquema eléctrico de un inversor DC - AC [12].

### Parámetros técnicos de los inversores

Entre las principales características que se pueden mencionar acerca de los inversores y que vienen presentes en las fichas técnicas proporcionadas por los fabricantes se encuentran las siguientes [12]:

- **Potencia nominal y máxima:** Porcentaje de sobrecarga que el equipo es capaz de soportar durante un determinado período de tiempo (indicado por el fabricante).
- **Ventana de búsqueda del Punto de Máxima Potencia (MPP por sus siglas inglés):** Es el rango de tensiones en las que el inversor aplica un algoritmo de búsqueda del MPP del generador fotovoltaico. Configurar un generador de forma que el MPP recaiga fuera de esta ventana con cierta frecuencia no tiene consecuencias adversas para el inversor, pero ocasiona pérdidas energéticas variables según la frecuencia de este hecho.
- **Tensión máxima de entrada:** Es la máxima tensión que el inversor puede aguantar sin sufrir una avería. A diferencia de la ventana de tensiones anterior, sobrepasar esta tensión tiene consecuencias importantes sobre algunos componentes de entrada del inversor.
- **Tensión nominal de salida:** Es la tensión de red a la que se puede conectar el inversor (habitualmente 230 VDC para equipos monofásicos y 400 VAC para equipos trifásicos).
- **Eficiencia máxima:** Máximo valor que toma la relación entre potencia de salida y potencia de entrada. En inversores de calidad la eficiencia es estable en un amplio rango de funcionamiento del equipo y de un valor cercano a la eficiencia máxima.

## 2.2. Datos de generación de los sistemas fotovoltaicos

Existen una serie de parámetros utilizados por los fabricantes de módulos fotovoltaicos para caracterizar el comportamiento de sus dispositivos. Entre ellos se encuentran [19]:

### Condiciones STC

Las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos varían dependiendo de una serie de condiciones, algunas de ellas ambientales, como la temperatura y la irradiancia. Esto quiere decir que, al variar una de estas condiciones, el comportamiento eléctrico del módulo cambia. Por lo tanto, se puede tener una infinidad de comportamientos para un dispositivo dependiendo de la combinación de condiciones a las que esté expuesto. Debido a esto, para reportar las características eléctricas de los módulos, las mediciones se toman bajo unas condiciones específicas, a las que se les llama Condiciones de prueba normalizadas (Standard Test Conditions, STC).

La intensidad solar estándar, mejor conocida como irradiancia solar se establece en  $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$ , esta es una constante y posee un valor cercano al promedio de la irradiación al nivel del mar en la superficie de la tierra. Asimismo, los módulos se clasifican a una temperatura estándar de módulo de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Curva característica de un módulo (curva IV)

Uno de los principales medios para describir el comportamiento de un modulo fotovoltaico es a través de su curva característica. Esta describe la variación de la corriente del modulo en función de la tensión entre sus extremos. Es proporcionada por el fabricante, y es obtenida a partir de los ensayos aplicados al modulo bajo condiciones STC.

Cabe resaltar que estas condiciones no representan una situación típica de operación de un módulo, ya que al tenerse una irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$  la temperatura de las celdas aumenta mucho más de los  $25^\circ\text{C}$ .

### Parámetros técnicos de los paneles solares

Así como en los inversores, para los paneles solares existen una serie de valores de corriente y tensión presentes en la ficha técnica, y que pueden definirse a partir de la curva IV mostrada en la figura 2.6. A continuación, se procede a explicar el significado de cada uno de estos valores [19]:

- **Intensidad de cortocircuito ( $I_{cc}$  o  $I_{sc}$ ):** Es la intensidad máxima de corriente que se puede producir en un módulo y ocurre a una tensión de 0 voltios. Su valor variará en función de las condiciones atmosféricas de medida. Este valor es utilizado para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico en términos de corriente.

- **Tensión de circuito abierto (Vca o Voc):** Es la tensión máxima que puede producir el panel. Se obtiene cuando los terminales están en condiciones de circuito abierto, esto quiere decir que no hay ninguna carga conectada directamente.
- **Corriente en el punto de máxima potencia (Imp):** Es la corriente producida cuando la potencia es máxima, bajo condiciones estándar de medida.
- **Voltaje en el punto de máxima potencia (Vmp):** Tensión producida cuando la potencia es máxima, bajo condiciones estándar de medida.
- **Potencia máxima (Pmax):** Es la potencia máxima que puede suministrar el panel y se mide en watt pico (Wp). Resulta del producto de la corriente con la tensión en su punto máximo, bajo condiciones estándar de medida.

$$P_{mp} = I_{mp} \cdot V_{mp}$$

- **Eficiencia (%):** Este parámetro define la eficiencia de conversión ( $\eta$ ), y es la cantidad de potencia de radiación incidente sobre el panel que es capaz de convertirse en potencia eléctrica.

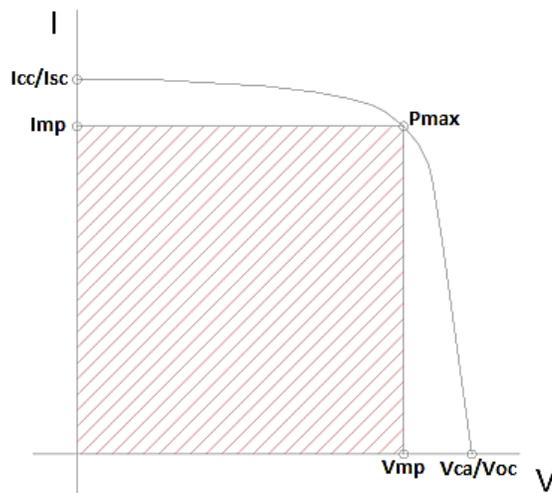


Figura 2.6: Curva IV característica de un módulo fotovoltaico

### 2.2.1. Datos de generación eléctrica relevantes para el proyecto

Una vez abarcados los parámetros que describen el funcionamiento del panel, se hará énfasis en los datos de generación eléctrica de los sistemas fotovoltaicos que van a tener relevancia durante la ejecución del proyecto.

La figura 2.7 ilustra la manera en la que están conectados los módulos solares y va a servir como referencia para la comprensión de la información recopilada.

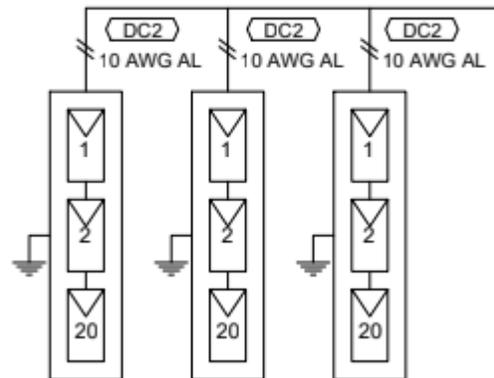


Figura 2.7: Esquema de conexión de las cadenas de paneles

- **Tensión DC:** Es la tensión generada directamente por los paneles solares y que es percibida por el inversor. Corresponde a la suma de tensiones de los paneles que componen 1 rama, en este caso de ejemplo son 20, ya que al estar las ramas conectadas en paralelo, según la teoría todas van a presentar la misma tensión.

Cabe resaltar que la cantidad de módulos conectados por rama está en función de la capacidad de cada inversor con respecto a la tensión máxima de entrada.

- **Corriente DC:** Es la suma de las corrientes provenientes de cada rama. La corriente de cada rama se encuentra definida por la corriente que puede entregar 1 módulo, debido a que en las conexiones en serie, la corriente que fluye por todos los dispositivos es la misma.
- **Potencia DC:** Este valor se obtiene del producto de la tensión DC y la corriente DC total de entrada. Lo que significa que este valor representa la potencia DC total generada por el sistema fotovoltaico y no debe sobrepasar la potencia máxima de entrada soportada por el inversor.
- **Tensión AC:** Esta es la tensión DC de entrada convertida en AC, lista para ser utilizada por los dispositivos o inyectada a la red eléctrica tradicional. Como la salida es un sistema trifásico, se van a obtener 3 valores, uno para cada fase o línea.
- **Corriente AC:** Es la corriente de entrada DC convertida en corriente AC. Al igual que la tensión, aquí hay 3 fases, por lo que se tiene la corriente de cada una.
- **Potencia AC:** Esta es la potencia de salida del sistema fotovoltaico. Su valor depende de la eficiencia del inversor, generalmente ronda el 97 o 98 %.
- **Temperatura interna del inversor:** Como su nombre lo indica, este valor permite conocer la temperatura interna del inversor, gracias a un sensor que el fabricante incorpora. Esto permite monitorear el funcionamiento del inversor.

En resumen, los módulos fotovoltaicos al recibir la radiación solar la convierten en energía eléctrica, no obstante, la electricidad producida es en corriente continua (DC) y hay que recalcar que, en la mayoría de las casas, industrias, equipos, etc., se utiliza electricidad en forma de corriente alterna (AC).

Las instalaciones fotovoltaicas, sin importar su extensión, requieren convertir la corriente continua en alterna, y el equipo encargado de realizar esta conversión es llamado inversor, este es la interfaz que permite conectar los paneles solares con las cargas o la red eléctrica y de esa forma hacer uso de la energía captada por los módulos fotovoltaicos.

Cabe recalcar que los inversores comerciales cuentan ya con un grado de madurez tecnológica y cumplen normas internacionales eléctricas de seguridad y de calidad. Sin embargo, en la actualidad existen aspectos que aún se encuentran bajo investigación en todo el mundo con el fin de mejorar el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica y así optimizar su desempeño al interactuar con la red eléctrica.

Por otra parte, el incremento en la eficiencia del inversor se ha logrado con el uso de nuevos materiales en sus componentes. Aunque, se puede lograr un aumento adicional mediante un buen diseño y un control adecuado de la electrónica de potencia basado en reducción de pérdidas.

## **2.3. Fuentes de generación eléctrica tradicionales y su impacto en el medio ambiente**

### **2.3.1. Generación de electricidad de manera convencional**

El servicio eléctrico que recibe el usuario final (hogares y empresas) corresponde a una cadena productiva altamente especializada que, para efectos de tarifa, se divide en tres etapas o sistemas: Generación, Transmisión y Distribución.

La etapa de Generación involucra la producción de energía eléctrica mediante una planta, la cual está integrada por un eje rotante, sobre el que está montado un poderoso electroimán, que se hace girar dentro de una carcasa de hierro llamada estator. El electroimán girando dentro de un campo de bobinas en el estator, produce electricidad. Cuanto más grande sea el electroimán y el campo estator, más energía eléctrica será generada.

Para lograr la rotación del eje y producir energía eléctrica es necesaria energía mecánica, la cual se obtiene mediante la quema de combustibles fósiles (por lo general diésel, queroseno, gas), la fuerza del viento (energía eólica), energía nuclear y la fuerza del agua, entre otras fuentes. En el caso de una planta hidroeléctrica es la fuerza del agua al caer la que hace girar el eje.

En la etapa de Transmisión lo que se busca es transportar la energía producida por la planta a través de cables a largas distancias. Para realizar este proceso, la empresa eléctrica debe invertir en transformadores cercanos a la planta que eleven la tensión para la transmisión de la energía y en subestaciones reductoras para reducir la tensión para los usuarios finales.

Finalmente, la etapa de Distribución consiste en la red de cableado eléctrico, postes, transformadores “pequeños” y medidores, que facilitan el consumo de la energía por parte de los hogares y empresas. En el sitio de uso de la electricidad, la tensión se reduce nuevamente por el transformador “pequeño” a 110 o 220 voltios. Asimismo, en esta etapa es donde se realiza el cobro al usuario, esto debido a que, dentro de la empresa eléctrica, una unidad de contabilidad y tarifas realizan los cálculos de consumo, envían y cobran los recibos a cada usuario [20].

En Costa Rica, la generación de electricidad la realizan cinco empresas de servicio público y cerca de 30 generadores privados independientes. Las empresas de servicio público generadoras son las siguientes [20]:

- El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)
- La Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), subsidiaria del ICE
- La Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH)
- La Junta Administradora del Servicio Eléctrico de Cartago (JASEC)
- La Cooperativa de Electrificación de San Carlos (COOPELESCA)
- La Cooperativa de Electrificación Rural de Guanacaste (COOPEGUANACASTE)
- La Cooperativa de Electrificación Rural de Los Santos (COOPESANTOS)

Dentro del Sistema Eléctrico Nacional, el ICE es la empresa principal del sector de electricidad con el 76 % de la capacidad nacional instalada.

En cuanto al servicio de electricidad en Costa Rica, este es considerado un bien público. Por lo tanto, la producción, transporte y distribución de la energía eléctrica constituyen actividades donde se observa una alta participación del Estado que opera en diversos ámbitos, desde la formulación de políticas hasta el establecimiento de las tarifas aplicables al servicio y que deben sufragar los usuarios de este.

De acuerdo a lo anterior, la regulación con respecto a los precios o tarifas aplicables al uso de la energía eléctrica se realiza por medio de la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP), institución sucesora del Servicio Nacional de Electricidad (SNE) que operó desde 1928 hasta que se transformó en la ARESEP mediante la Ley 7593 de 1996 [21].

### **2.3.2. Uso de combustibles fósiles en la generación de electricidad**

La base de la industrialización de los países ricos fue el uso masivo de combustibles fósiles y hoy sigue siendo un elemento principal de los procesos de cambio económico que

caracterizan a los países más poblados del mundo. Desde hace mucho tiempo, en términos cuantitativos los combustibles fósiles aportan el grueso de la energía exosomática (es la que proporciona iluminación, calefacción, refrigeración, suministro de agua, transporte, industria, etc.), así como la propia obtención de la energía endosomática (necesaria para el metabolismo) la cual se ha hecho cada vez más dependiente del uso de combustibles fósiles.

En las últimas décadas, y especialmente desde el año 1992, ha dominado la preocupación por los impactos ambientales de la quema masiva de combustibles fósiles y, sobre todo, por sus efectos en el cambio climático. Las actividades que generan gases de efecto invernadero son diversas, pero uno de los factores más importantes es la emisión de  $\text{CO}_2$  asociada a la obtención de energía [22].

Y es que uno de los inconvenientes del uso de combustibles fósiles (derivados del petróleo, gas natural y carbón) en la generación de electricidad son las emisiones contaminantes locales y de gases de efecto invernadero, principalmente el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Aunado a esto, entre los contaminantes emitidos por el uso de dichos combustibles sobresalen los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), el monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), los hidrocarburos no quemados ( $\text{HC}$ ) y las partículas suspendidas.

La emisión de estos gases deriva en problemas ambientales tales como la lluvia ácida. Entre los principales compuestos relacionados con su formación son el  $\text{SO}_2$  y los  $\text{NO}_x$ . Dichos compuestos reaccionan en las nubes formando una mezcla de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), los cuales se precipitan a través de la lluvia y nieve afectando los cultivos y los ecosistemas. También se deposita acidez en la superficie en forma de partículas secas que en contacto con la lluvia originan un medio corrosivo [23].

Por otra parte, es necesario especificar que el término huella de carbono se entiende como la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto directo o indirecto por un individuo, organización, evento o producto. Es decir, la huella de carbono identifica la cantidad de emisiones de GEI que son liberadas a la atmósfera como consecuencia del desarrollo de cualquier actividad [24].

Asimismo, el término  $\text{CO}_2\text{eq}$ , es la unidad utilizada para exponer los resultados en cuanto a emisiones de GEI. Los gases que se indican en el Protocolo de Kioto como máximos responsables del efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global, muchos de estos liberados por el uso de combustibles fósiles, entre los cuales se encuentran [24]:

- El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )
- El metano ( $\text{CH}_4$ )
- El óxido de nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}$ )
- Los hidrofluorocarbonos (HFCs)
- Los perfluorocarbonos (PFCs)

- El hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ )

Sin embargo, el  $\text{CO}_2$  es el GEI que influye en mayor medida al calentamiento del planeta, y es por ello por lo que estas emisiones se miden en función de este gas. Con respecto a la magnitud, la tonelada de  $\text{CO}_2\text{eq}$  es la unidad universal de medida que indica el potencial de calentamiento atmosférico o potencial de calentamiento global (PCG) de cada uno de estos GEI, expresado en términos del PCG de una unidad de  $\text{CO}_2$ .

## 2.4. Herramienta de programación

Python es un lenguaje de programación de código abierto, acceso libre y sumamente estable. Actualmente, es muy utilizado en empresas ubicadas alrededor del mundo para elaborar aplicaciones web, analizar datos, automatizar operaciones y diseñar aplicaciones fiables y con gran poder de escalabilidad.

Su implementación comenzó en diciembre de 1989 cuando Guido van Rossum decidió empezar el proyecto como un pasatiempo dándole continuidad al lenguaje de programación ABC desarrollado por el equipo del que había formado parte en el CWI (Centrum Wiskunde and Informatica). Asimismo, Python es un lenguaje de programación de alto nivel que tiene como finalidad proveer una mayor legibilidad del código tanto a programas de gran y pequeña escala [25].

El lenguaje Python admite múltiples paradigmas de programación como la programación orientada a objetos, imperativa y funcional. Cuenta con un sistema de tipo dinámico y una administración automática de memoria, además de poseer una biblioteca estándar grande y completa.

Python se caracteriza por ser muy flexible, esto debido a su capacidad para utilizar componentes modulares que fueron diseñados en otros lenguajes de programación, por ejemplo, puede escribir un programa en C++ e importarlo a Python como un módulo [26].

Algunos lenguajes de programación son considerados "lenguajes de scripts" si son idóneos para realizar scripts de manera fácil y rápida, pese a que también se utilizan para codificar programas mucho más complejos. Por ejemplo, Python, el cual a menudo se considera un lenguaje de "scripting" [27].

Script (guión en español) es un término informal que se usa para describir a un documento que contiene instrucciones, escritas en códigos de programación. Estos se pueden usar para hacer prototipos de programas, automatizar tareas repetitivas, hacer procesamiento por lotes e interactuar con el sistema operativo y el usuario [28].

Para este proyecto, la automatización de procesos resulta una tarea esencial, debido a que es por medio de esto que se van a recopilar los datos de generación de los inversores, los cuales hasta el momento se han tenido que almacenar de manera manual, teniendo que acercarse una persona a cada inversor, leer los valores de generación y anotarlos en una hoja.

# Capítulo 3

## Comunicación con los inversores

Este capítulo contiene la explicación del procedimiento referente al diseño y la programación de los scripts que permiten recolectar los datos de generación eléctrica de los inversores según lo planteado en el objetivo específico 1.

### 3.1. Protocolo de comunicación Modbus

Con el propósito de realizar la comunicación con los inversores y extraer los valores correspondientes a los datos de generación eléctrica, es necesario consultar la literatura para entender cómo funciona el protocolo de comunicación ModBus, debido a que este es el medio por el cual el sistema embebido hace la solicitud de los datos.

#### 3.1.1. ¿Qué es el protocolo Modbus?

El Protocolo Modbus es una estructura de mensajería desarrollada por Modicon en 1979. Se utiliza para establecer una comunicación cliente-servidor entre dispositivos inteligentes. Es un estándar de facto, verdaderamente abierto y es el protocolo de red más utilizado en el entorno de la fabricación industrial. Ha sido implementado por cientos de proveedores en miles de dispositivos diferentes para transferir datos discretos/analógicos de E/S y de registro entre dispositivos de control [29].

#### 3.1.2. ¿Dónde se usa el protocolo Modbus?

Modbus se utiliza en múltiples aplicaciones cliente-servidor para supervisar y programar dispositivos; para comunicarse entre dispositivos inteligentes y sensores e instrumentos; para supervisar dispositivos de campo utilizando PCs y HMIs. Modbus es también un protocolo ideal para aplicaciones RTU en las que se requiere una comunicación inalámbrica. Por ello, se utiliza en innumerables aplicaciones de gas y petróleo y en subestaciones. Pero Modbus no es sólo un protocolo industrial. Las aplicaciones

de construcción, infraestructuras, transporte y energía también aprovechan sus ventajas [29].

### 3.1.3. ¿Cómo se hace el acceso de datos y cuál es el modelo de datos en Modbus?

Los datos accesibles por Modbus se almacenan, en general, en uno de los cuatro bancos de datos o rangos de direcciones: bobinas (coils), entradas discretas (discrete inputs), registros de retención (holding registers) y registros de entrada (input registers). Al igual que con gran parte de la especificación, los nombres pueden variar dependiendo del fabricante, de la industria o de la aplicación. Por ejemplo, los registros de retención pueden denominarse como registros de salida y las bobinas pueden denominarse salidas digitales o discretas.

Estos bancos de datos definen el tipo y los derechos de acceso de los datos contenidos. Los dispositivos cliente tienen acceso directo a estos datos, los cuales son alojados localmente en los dispositivos. Los datos disponibles por medio de Modbus generalmente son un subconjunto de la memoria principal del dispositivo. En contraste, los servidores Modbus deben solicitar el acceso a estos datos a través de diversos códigos de función [30]. El comportamiento de cada bloque se describe en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Bloques del modelo de datos Modbus [30].

| Bloque de memoria      | Tipo de objeto    | Tipo de acceso    | Código de función |
|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Bobina                 | Booleano          | Lectura/escritura | 01                |
| Entrada discreta       | Booleano          | Solo lectura      | 02                |
| Registros de retención | Palabra de 16 bit | Lectura/escritura | 03                |
| Registros de entrada   | Palabra de 16 bit | Solo lectura      | 04                |

Según la figura 3.1, se define como unidad de datos del protocolo (PDU, por sus siglas en inglés) al paquete compuesto por el código de función y los datos.

La PDU de solicitud especifica la dirección del registro inicial y el número de registros. En la PDU los registros se direccionan empezando por cero. Por lo tanto, los registros numerados 1-16 se direccionan como 0-15. Los datos del registro en el mensaje de respuesta se empaquetan como dos bytes por registro, con el contenido binario justificado a la derecha dentro de cada byte. Para cada registro, el primer byte contiene los bits de orden alto y el segundo contiene los bits de orden bajo.

Por otra parte, cuando se hace referencia a la unidad de datos de aplicación (ADU), es porque algunos buses específicos o redes pueden introducir campos adicionales.

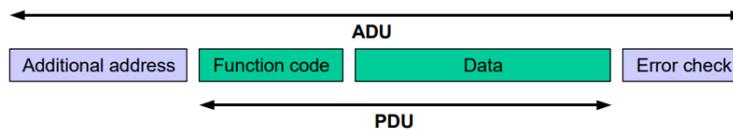


Figura 3.1: Estructura general de los paquetes de información en Modbus. [29]

Con respecto a este proyecto, se realizaron lecturas de los datos almacenados en los bloques de memoria que contienen los registros de retención y de entrada, siguiendo la definición del protocolo Modbus, donde se propone la estructura que se debe seguir tanto para la solicitud de datos como para la decodificación y lectura de estos al obtener una respuesta. Tal y como se muestra enseguida, la manera en que se realizan las solicitudes varía de acuerdo con los registros que se desean conocer:

#### ■ Lectura de los registros de retención

Estos registros poseen el código de función 03 o 0x03 (en hexadecimal) y se utiliza para leer el contenido de un bloque contiguo de registros de retención en un dispositivo remoto. En la figura 3.2 se muestran las partes que componen el mensaje enviado y recibido.

| Request               |         |                  |
|-----------------------|---------|------------------|
| Function code         | 1 Byte  | 0x03             |
| Starting Address      | 2 Bytes | 0x0000 to 0xFFFF |
| Quantity of Registers | 2 Bytes | 1 to 125 (0x7D)  |

| Response       |              |        |
|----------------|--------------|--------|
| Function code  | 1 Byte       | 0x03   |
| Byte count     | 1 Byte       | 2 x N* |
| Register value | N* x 2 Bytes |        |

\*N = Quantity of Registers

Figura 3.2: Solicitud y respuesta de datos a los registros de retención [29].

#### ■ Lectura de los registros de entrada

Estos registros poseen el código de función 04 o 0x04 (en hexadecimal) y se utiliza para leer de 1 a 125 registros de entrada contiguos en un dispositivo remoto. En la figura 3.3 se muestran las partes que componen el mensaje enviado y recibido.

| Request                     |         |                  |
|-----------------------------|---------|------------------|
| Function code               | 1 Byte  | 0x04             |
| Starting Address            | 2 Bytes | 0x0000 to 0xFFFF |
| Quantity of Input Registers | 2 Bytes | 0x0001 to 0x007D |

| Response        |              |        |
|-----------------|--------------|--------|
| Function code   | 1 Byte       | 0x04   |
| Byte count      | 1 Byte       | 2 x N* |
| Input Registers | N* x 2 Bytes |        |

\*N = Quantity of Input Registers

Figura 3.3: Solicitud y respuesta de datos a los registros de entrada [29].

Asimismo, Modbus es un protocolo de mensajería de capa de aplicación, situado en el nivel 7 del modelo OSI, que proporciona una comunicación cliente/servidor entre dispositivos conectados en diferentes tipos de buses o redes. Si se toma como referencia la figura 3.4, se aprecia que actualmente el protocolo Modbus es implementado utilizando:

- TCP/IP sobre Ethernet.
- Transmisión en serie a través de diversos medios (cable: EIA/TIA-232-E, EIA-422, EIA/TIA-485-A; fibra, radio, etc.)
- Modbus PLUS, que es una red de paso de tokens de alta velocidad.

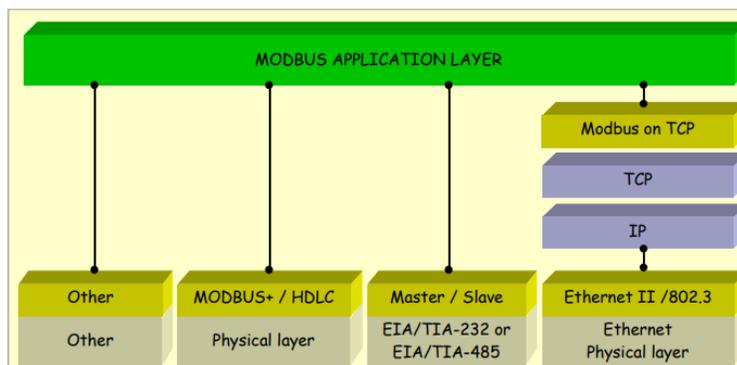


Figura 3.4: Modelo de datos para la comunicación por medio de Modbus [29].

### 3.1.4. Transmisión serial por medio del cable EIA/TIA-485

RS-485, también conocida como TIA-485 o EIA-485, es una norma publicada conjuntamente por la Asociación de la Industria de las Telecomunicaciones y la Alianza de Industrias Electrónicas (TIA/EIA) que define las características eléctricas de los controladores y receptores para su uso eficaz en sistemas de transmisión serial de datos a altas velocidades, con grandes distancias entre dispositivos y en entornos eléctricamente ruidosos.

Con respecto a la señalización eléctrica, esta es equilibrada y admite sistemas multipunto, lo que quiere decir que se pueden conectar varios receptores a una red haciendo uso de un bus lineal multipunto que admite hasta 32 usuarios. Estas características hacen que el RS-485 sea útil y altamente extendido en sectores que posean sistemas de control industrial y aplicaciones similares [31].

No obstante, una de las principales consideraciones a tomar en cuenta a la hora de trabajar con este tipo de comunicaciones es que cada dispositivo activa su transmisor sólo en el instante en que necesita transmitir, manteniéndolo apagado por el resto del tiempo, esto con el fin de permitir que otros dispositivos transmitan datos. Por lo tanto, en un momento dado, sólo puede transmitir un dispositivo, lo que caracteriza a esta red como half duplex.

### 3.1.5. ¿Qué es Modbus RTU y cómo funciona?

El protocolo Modbus RTU es un medio de comunicación que permite el intercambio de información o datos entre dispositivos electrónicos a través de conexiones en serie mediante el uso del estándar RS-485.

Una característica distintiva de esta versión es el uso de codificación binaria y una fuerte verificación de errores CRC (control de redundancia cíclica). En realidad, es la implementación del protocolo Modbus utilizado con mayor frecuencia en aplicaciones industriales e instalaciones de producción automatizada.

En este protocolo serial los datos se transmiten en bytes de 8 bits, un bit cada vez, a velocidades en baudios que van de 1200 bits por segundo a 115200 bits por segundo. La mayoría de los dispositivos sólo soportan velocidades de hasta 38400 bits por segundo [32].

Ahora bien, en una red Modbus RTU, existe un servidor y uno o más clientes. Cada cliente tiene una dirección de dispositivo o número de unidad de 8 bits.

Los mensajes enviados por el servidor incluyen: la dirección del cliente al que va dirigido el envío, la PDU de Modbus, la verificación de errores CRC y un tiempo de silencio al principio y al final del paquete.

El cliente debe responder sólo si se reconoce su dirección, y debe responder dentro de un cierto período de tiempo o el servidor lo llamará un error de «no respuesta».

Es necesario mencionar que el tiempo de silencio está en función de la tasa de baudios que se está utilizando. Lo normal es que para una tasa de baudios de 9600 bits por segundo se utilice un tiempo de silencio de 2 segundos.

La estructura de la unidad de datos de aplicación (ADU) para los paquetes de información que son enviados en Modbus RTU se muestra en la figura 3.5.

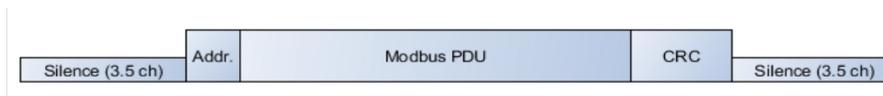


Figura 3.5: Estructura de los paquetes de información en Modbus RTU [30].

## 3.2. Diseño e implementación de los scripts

Una vez abarcada la parte teórica de la comunicación por medio del protocolo Modbus RTU, se va a describir el proceso de diseño e implementación de la solución realizada.

Para llevar a cabo la tarea de adquirir y almacenar los datos de generación eléctrica presentes en los inversores, es necesaria la elaboración de un diagrama de flujo.

Primeramente, la idea de cómo adquirir los datos se basó en definir el rango horario en el que el sistema embebido debería realizar solicitudes a los inversores para recolectar la información. El rango escogido resultó ser entre las 4:30am y las 7:00pm, debido a que existen días en los que amanece más temprano y otros en los que oscurece más tarde, y lo ideal es poder capturar diariamente el comportamiento completo del complejo solar con respecto a las condiciones ambientales.

Cuando la solicitud se hace en una hora que se encuentra fuera de rango, el script debe indicar que se activó el modo nocturno y que el funcionamiento de este se reanudara al siguiente día. Por el contrario, si esta se realiza en una hora dentro del rango de trabajo, entonces se inicia la ejecución del script, enviando una solicitud de datos al inversor correspondiente. Seguidamente, al obtener una respuesta, el script debe ser capaz de identificar a que inversor pertenece esa información, con el fin de procesarla y clasificarla.

Con procesar la información, se hace referencia al ajuste que se le debe realizar a los valores recopilados, por ejemplo, la aplicación de los factores de escala como se verá más adelante.

Luego, al disponer de la información lista para ser almacenada, se verifica que para el inversor en cuestión exista una carpeta que tenga como nombre la fecha en que se está realizando la medición. Si es así, avanza al siguiente condicional, donde se comprueba la existencia del archivo en formato CSV que contiene los datos de generación eléctrica y que lleva como nombre de igual manera la fecha.

En el caso donde la carpeta y el documento no existen, significa que es la primera medición del día, por consiguiente, estos se deben crear y el script se vuelve a ejecutar.

Se debe mencionar que solamente al momento de crear el archivo, se introduce como valores una lista que contiene los nombres de los datos y otra con los valores medidos. Si el documento ya existe, la acción siguiente consiste en concatenar en una nueva fila los valores con los ya presentes.

Por lo tanto, tomando en cuenta lo expuesto anteriormente, en la figura 3.6 se aprecia el diagrama de flujo resultante, el cual permite tener una visión clara del camino a seguir y también funciona como base para el diseño de los scripts.

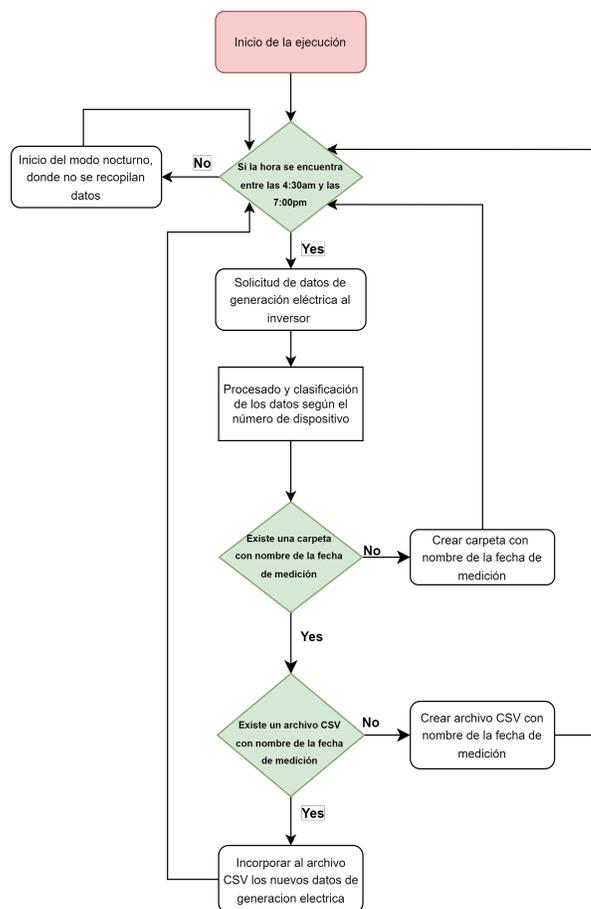


Figura 3.6: Diagrama de flujo para la adquisición y el almacenamiento de los datos de generación eléctrica

### 3.2.1. Adquisición de los datos de generación eléctrica de los inversores

En el complejo solar, actualmente se trabaja con 3 diferentes marcas de inversores: Sungrow, Growatt y Solar Edge. Cada una de ellas presenta sus peculiaridades y restricciones al momento de adquirir los datos.

Con respecto a la adquisición de los datos, para este proyecto se utilizó una librería disponible para el lenguaje de programación Python llamada Minimal Modbus.

#### Librería Minimal Modbus

Minimal Modbus como ya se indicó es una librería de Python fácil de usar para comunicarse con instrumentos (clientes) desde un ordenador (servidor) usando el protocolo Modbus. La única dependencia es el módulo pySerial (el cual ya viene integrado en Python).

Además, esta librería posee funciones de conveniencia para manejar datos de tipo flotante (float), cadenas (string) y enteros largos (en diferentes órdenes de bytes).

Este software es compatible con las versiones de comunicación en serie 'Modbus RTU' y 'Modbus ASCII' del protocolo, y está pensado para su uso en plataformas Linux, Mac OS y Windows [33].

Ahora bien, una vez explicado en la sección 3.1 como propone el protocolo Modbus que se realice la solicitud de la información, la acción siguiente consiste en leer la documentación e investigar cómo trabaja la librería, para luego ajustar la recolección de los datos de acuerdo a la marca de inversor.

En la documentación oficial de la librería, como es de esperar, se encuentran diferentes códigos que ejemplifican el funcionamiento y orientan al lector en cómo hacer uso de las funciones que integra.

Por ejemplo, en la figura 3.7, se muestra el código que permite realizar la lectura de un instrumento. Como se ve, lo primero que se debe hacer es importar la librería. Segundo, se propone el nombre que va a recibir el cliente con el que se está trabajando (en este caso `instrument`) y se establece la conexión con el instrumento mediante la función `minimalmodbus.Instrument()`, la cual lleva como parámetros: el puerto serial de acceso (en Windows se llaman puertos COM) y el número de cliente.

Luego, se define un nombre apropiado para la variable que se desea leer y a esta se le asigna el valor que retorne la solicitud. Tal y como se indica, para la lectura de los registros se usa el comando: `nombre_del_instrumento.read_register` (si es solo uno) o `nombre_del_instrumento.read_registers` (si son varios). En este caso, el instrumento se llama `instrument`, solo se quiere un registro y este pertenece al cliente identificado con el número 1, por eso el comando se escribió de esa forma. Es relevante mencionar que el rango válido de direcciones que puede tomar un cliente normalmente se encuentra entre 1 y 247.

Para finalizar, si todo lo anterior es correcto y se logró establecer la comunicación con el cliente, al ejecutar el código, mediante el comando `print(Tension)` se debe visualizar en pantalla el valor asociado a la variable solicitada.

```
import minimalmodbus

instrument = minimalmodbus.Instrument('/dev/ttyUSB1', 1) # puerto de acceso, numero de cliente (en decimal)

Tension = instrument.read_register(289, 1) # direccion del registro, cantidad de decimales
print(Tension)
```

Figura 3.7: Ejemplo de uso de la librería [33].

Cada instrumento o cliente posee distintas propiedades que se pueden modificar de acuerdo con las necesidades en función de lo propuesto por cada fabricante. Entre ellas se pueden listar las mostradas en la figura 3.8.

```
instrument.serial.baudrate = 19200           # Define la tasa de baudios con la que se esta trabajando
instrument.serial.bytesize = 8              # Permite cambiar el tamaño de los paquetes
instrument.serial.stopbits = 1              # Si la comunicacion requiere conocer el bit de parada
instrument.serial.timeout = 0.05           # Define el tiempo de espera entre diferentes comunicaciones
instrument.clear_buffers_before_each_transaction = True # Como su nombre lo indica, habilita la limpieza del buffer
```

Figura 3.8: Propiedades del instrumento [33].

Una de las principales ventajas que posee la comunicación serial por medio del estándar RS-485, es que se pueden crear redes que admiten hasta 32 dispositivos interconectados. Por lo tanto, es necesario entender como permite la librería establecer la comunicación con múltiples instrumentos, al cambiar solamente el número de cliente y utilizando el mismo puerto. Por suerte, en la documentación se explica cómo se puede llevar a cabo esta tarea y se proporciona de igual manera un código de ejemplo, el cual se puede apreciar en la figura 3.9.

```
instrumentA = minimalmodbus.Instrument('/dev/ttyUSB1', 1)
instrumentA.serial.baudrate = 9600
instrumentA.serial.timeout = 0.2
instrumentA.mode = minimalmodbus.MODE_RTU

instrumentB = minimalmodbus.Instrument('/dev/ttyUSB1', 2)
instrumentB.mode = minimalmodbus.MODE_RTU

instrumentC = minimalmodbus.Instrument('/dev/ttyUSB2', 1)
```

Figura 3.9: Lectura de múltiples instrumentos [33].

## Sungrow

Para empezar con el proceso de recolectar los datos, primero se deben conectar los inversores entre sí por medio del cable RS-485, esto con el propósito de crear la red Modbus. Para esta tarea se debe revisar el manual del inversor en busca de como propone el fabricante que se realice la conexión. Para los modelos de Sungrow, se establece según lo mostrado en la figura 3.10. Donde la función del Data Logger la ejecuta la Raspberry Pi.

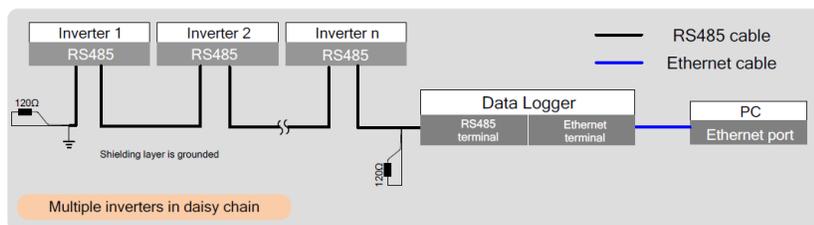


Figura 3.10: Conexión en cadena de los inversores Sungrow por medio del cable RS-485

Asimismo, en el manual de usuario, el fabricante define la configuración por defecto que posee el inversor para el uso del estándar RS-485. La propiedades se muestran en la figura adjunta a continuación:

a) RS485,

|                     | Default setting                                    |
|---------------------|--|
| Address             | Inverter: 1 – 247 settable<br>PC: 1 – 247 settable |
| Broadcast           | Yes  |
| Baud rate           | 9600bit/s  |
| Check bit           | Null or settable                                   |
| Data bit            | 8  |
| Stop bit            | 1  |
| Mode                | RTU  |
| Appliance interface | RS485-2W cable connection                          |

Figura 3.11: Configuración por defecto de los inversores Sungrow para el uso del estándar RS-485

En cuanto al formato de los datos, el fabricante añade en el manual una nota aclaratoria de cómo se debe realizar la solicitud de los registros. Por ejemplo, se indica que, para obtener la dirección de comunicación, se tiene que usar la dirección del registro y restarle 1. Por consiguiente, si se quiere acceder al registro 5003 que contiene los datos de generación de energía diarios, se tiene que usar el valor 5002.

Aunado a esto, en la figura 3.12 también se aclara cual es el significado de los tipos de datos:

- U16: Dato entero de 16 bit sin signo, de modo big-endian.
- U32: Dato entero de 32 bit sin signo, de modo little-endian o big-endian.
- S16: Dato entero de 16 bit con signo, de modo big-endian.
- S32: Dato entero de 32 bit sin signo, de modo little-endian o big-endian.

Communication address = protocol address - 1. If data of address 5000 is to be inquired, the corresponding sending address data is 4999 (0x1387);

U16: 16-bit unsigned integer, big-endian;

U32: 32-bit unsigned integer; little-endian for double-word data. Big-endian for byte data;

S16: 16-bit signed integer, big-endian;

S32: 32-bit signed integer; little-endian for double-word data. Big-endian for byte data

Power factor: + means leading; - means lagging, 1000 means power factor 1.000, 950 means power factor 0.95.

Figura 3.12: Consideraciones que se deben tener al momento de adquirir los datos de los inversores Sungrow

Para iniciar con la actividad que comprende la programación del script, es imprescindible disponer de la tabla de registros Modbus, la cual contiene: la dirección de los registros Modbus, el nombre de la variable asociada al registro, el tipo de dato, la unidad de medida y el factor de escala en caso de ser necesario. Para los inversores Sungrow, esta tabla luce como se ve en las figuras 3.13 y 3.14.

| No. | Name                 | Address        | Data type | Data range | Unit    | Note  |
|-----|----------------------|----------------|-----------|------------|---------|---|
|     |                      |                |           |            |         | voltage";<br>2: address<br>5019-5021<br>are "x-x line<br>voltage" |
| 8   | Daily power yields   | 5003           | U16       |            | 0.1 kWh |   |
| 9   | Total power yields   | 5004 ~<br>5005 | U32       |            | kWh     |   |
| 10  | Total running time   | 5006 ~<br>5007 | U32       |            | h       |   |
| 11  | Internal temperature | 5008           | S16       |            | 0.1°C   |   |
| 12  | Reserved             | 5009           | S16       |            | 0.1°C   |   |
| 13  | Reserved             | 5010           | S16       |            | 0.1°C   |   |
| 14  | DC Voltage1          | 5011           | U16       |            | 0.1V    |   |
| 15  | DC current1          | 5012           | U16       |            | 0.1A    |   |
| 16  | DC Voltage2          | 5013           | U16       |            | 0.1V    | 0x0132  |
| 17  | DC current2          | 5014           | U16       |            | 0.1A    |   |
| 18  | DC Voltage3          | 5015           | U16       |            | 0.1V    | 0x0132  |
| 19  | DC current3          | 5016           | U16       |            | 0.1A    | SG49K5J<br>0x0137   |
| 20  | Total DC power       | 5017 ~<br>5018 | U32       |            | W       |   |

Figura 3.13: Tabla de registros Modbus para los inversores Sungrow parte 1

|    |                    |                |     |  |       |  |
|----|--------------------|----------------|-----|--|-------|--|
| 24 | Phase current A    | 5022           | U16 |  | 0.1 A |  |
| 25 | Phase current B    | 5023           | U16 |  | 0.1 A |  |
| 26 | Phase current C    | 5024           | U16 |  | 0.1 A |  |
| 27 | Reserved           | 5025 ~<br>5026 | U32 |  | W     |  |
| 28 | Reserved           | 5027 ~<br>5028 | U32 |  | W     |  |
| 29 | Reserved           | 5029 ~<br>5030 | U32 |  | W     |  |
| 30 | Total active power | 5031 ~<br>5032 | U32 |  | W     |  |

Figura 3.14: Tabla de registros Modbus para los inversores Sungrow parte 2

## Programación del script

Con base en el diagrama de flujo de la figura 3.6, así como en lo planteado en el manual de usuario del fabricante Sungrow, se puede iniciar con la explicación del código implementado para la adquisición de los datos.

La figura 3.15 contiene las sentencias de inicio del script. Por lo tanto, se observa la importación de las librerías `minimalmodbus` y `time`. Seguidamente, se asigna en las variables `hora` y `fecha` los valores correspondientes presentes en el sistema embebido, para luego utilizarlo como argumento del condicional. Como ya se había planteado, el rango de trabajo está definido entre las 4:30am y las 7:00pm.

```
import minimalmodbus      #Se importa la libreria que permite extraer los datos por modbus RTU
import time               #Libreria que incorpora funciones de relacionadas con el tiempo

#con esta funcion se obtiene la hora del sistema, definida como una variable global
hora = time.strftime("%X")

#con esta funcion se obtiene la fecha del sistema, definida como una variable global
fecha = time.strftime("%Y-%m-%d")

#Condicion que hace que el script solo se ejecute entre las 4:30am y las 7:00pm, luego de eso entra en un estado
#de suspension, para evitar hacer lecturas incorrectas o erroneas
if '04:30' < hora[:5] < '19':
```

Figura 3.15: Inicio y condición de entrada para la ejecución del script

Dentro del condicional se encuentra el código que se ejecuta si la hora pertenece al rango horario y de acuerdo con el diagrama de flujo, la acción siguiente consiste en solicitar los datos de generación eléctrica al inversor. Para esto, se definió una función, la cual se observa en la figura 3.16, que toma como argumentos de entrada: el nombre del inversor, el puerto de acceso y el número de unidad. Las primeras cuatro líneas que componen la función permiten configurar la comunicación con base en las propiedades expuestas en la figura 3.8

No obstante, existe un último aspecto a considerar antes de empezar con la lectura de los datos de generación eléctrica y es el tipo de registro que se debe acceder. En la marca Sungrow, los ingenieros decidieron almacenar los valores de generación eléctrica en los registros de entrada, por lo tanto el código de función de acuerdo con la tabla 3.1 es 04 o 0x04.

Finalmente, una vez aclarados estos puntos, las siguientes sentencias de la función ejemplifican el acceso a valores que se desean conocer en el proyecto tales como la potencia en DC y AC, la energía generada tanto diaria como total, al igual que la temperatura interna del inversor.

```
def adquisicionDatos(inversor, puerto, unidad): #str, str, int

    inversor = minimalmodbus.Instrument(puerto, unidad) #numero de puerto, numero de inversor(en decimal)
    inversor.serial.baudrate = 9600 #ajuste del baudrate para que corresponda con el del inversor
    inversor.close_port_after_each_call = True #para que se cierre el puerto serial y permita nuevas consultas
    inversor.serial.timeout = 0.2

    #para la lectura de los registros, la funcion toma como parametros: la direccion del registro modbus(en hexadecimal),
    #el codigo de funcion del registro (3 para holding, 4 para input),
    #y el byteorder para registros de 32 bits, si el dato es little o big endian(probar 0, 1, 2, 3)

    ac_output_power = inversor.read_long(0x13A6, functioncode = 4, byteorder = 3) #no tiene Factor de escala
    daily_power = inversor.read_register(0x138A, functioncode = 4) #Factor de escala 0.1kWh
    total_power = inversor.read_long(0x138B, functioncode = 4, byteorder = 3) #Registro doble sin Factor de escala
    internal_temperature = inversor.read_register(0x138F, functioncode = 4) #no tiene Factor de escala
    dc_power = inversor.read_registers(0x1392, 6, functioncode = 4) #VDC1,ADC1,VDC2,ADC2,VDC3,ADC3 con Factor
```

Figura 3.16: Función que permite la adquisición de datos en los inversores Sungrow

## Growatt

En la marca Growatt, como se aprecia en la figura 3.17, el fabricante propone en el manual de usuario una manera similar a la marca Sungrow de cómo se deben interconectar los inversores. Por lo tanto, si se siguen estas recomendaciones, no deberían existir problemas al momento de realizar la conexión en cadena de los inversores.

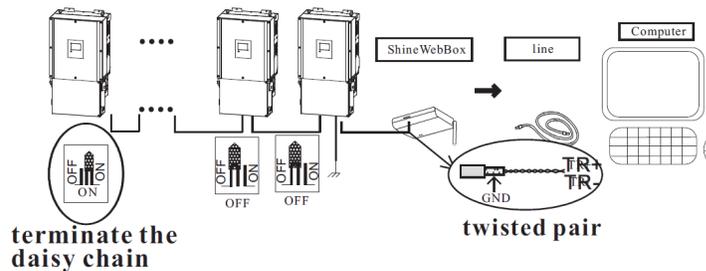


Figura 3.17: Conexión en cadena de los inversores Growatt por medio del cable RS-485

Ahora bien, con respecto a las configuraciones por defecto que posee el inversor para el uso del estándar RS-485, en el manual de usuario se encuentran las mostradas en la figura 3.18:

The format for each byte in RTU mode is:

- Coding System: 8-bit binary, hexadecimal 0-9, A-F
- Two hexadecimal characters contained in each 8-bit field of the message

Bits per Byte:

- 1 start bit
- 8 data bits, least significant bit sent first
- None parity
- 1 stop bit
- Error Check Field: Cyclical Redundancy Check (CRC)

The baud rate of the transmission is:

- Baud Rate: 9600 bps

Minimum CMD period (RS485 Time out): 850ms.  
Wait for minimum 850ms to send a new CMD after last CMD. Suggestion is 1s;

Figura 3.18: Configuración por defecto de los inversores Growatt para el uso del estándar RS-485

En cuanto a la tabla de registros Modbus, como se observa en la figura 3.19, los valores correspondientes con los datos de generación eléctrica se almacenan en los registros de entrada, por lo tanto, de acuerdo a la tabla 3.1 el código de función es 04 o 0x04.

## 4.2 Input Reg

| Register NO. | Variable Name   | Description           | Value                              | Unit   | Note |
|--------------|-----------------|-----------------------|------------------------------------|--------|------|
| 00           | Inverter Status | Inverter run state    | 0:waiting,<br>1:normal,<br>3:fault |        |      |
| 01           | Ppv H           | Input power (high)    |                                    | 0.1W   |      |
| 02           | Ppv L           | Input power (low)     |                                    | 0.1W   |      |
| 03           | Vpv1            | PV1 voltage           |                                    | 0.1V   |      |
| 04           | PV1Curr         | PV1 input current     |                                    | 0.1A   |      |
| 05           | PV1Watt H       | PV1 input watt (high) |                                    | 0.1W   |      |
| 06           | PV1Watt L       | PV1 input watt (low)  |                                    | 0.1W   |      |
| 07           | Vpv2            | PV2 voltage           |                                    | 0.1V   |      |
| 08           | PV2Curr         | PV2 input current     |                                    | 0.1A   |      |
| 09           | PV2Watt H       | PV2 input watt (high) |                                    | 0.1W   |      |
| 10           | PV2Watt L       | PV2 input watt (low)  |                                    | 0.1W   |      |
| 11           | Pac H           | Output power (high)   |                                    | 0.1W   |      |
| 12           | Pac L           | Output power (low)    |                                    | 0.1W   |      |
| 13           | Fac             | Grid frequency        |                                    | 0.01Hz |      |

Figura 3.19: Tabla de registros Modbus para los inversores Growatt parte 1

|    |        |  |  |       |  |
|----|--------|--|--|-------|--|
| 14 | Vac1   | Three/single phase grid voltage            |  | 0.1V  |  |
| 15 | Iac1   | Three/single phase grid output current     |  | 0.1A  |  |
| 16 | Pac1 H | Three/single phase grid output watt (high) |  | 0.1VA |  |
| 17 | Pac1 L | Three/single phase grid output watt (low)  |  | 0.1VA |  |
| 18 | Vac2   | Three phase grid voltage                   |  | 0.1V  |  |
| 19 | Iac2   | Three phase grid output current            |  | 0.1A  |  |
| 20 | Pac2 H | Three phase grid output power (high)       |  | 0.1VA |  |
| 21 | Pac2 L | Three phase grid output power (low)        |  | 0.1VA |  |
| 22 | Vac3   | Three phase grid voltage                   |  | 0.1V  |  |
| 23 | Iac3   | Three phase grid output current            |  | 0.1A  |  |
| 24 | Pac3 H | Three phase grid output power (high)       |  | 0.1VA |  |
| 25 | Pac3 L | Three phase grid output                    |  | 0.1VA |  |

Figura 3.20: Tabla de registros Modbus para los inversores Growatt parte 2

|    |                 |  |     |        |  |
|----|-----------------|--|-----|--------|--|
| 26 | Energy today H  | Today generate energy (high)           |     | 0.1KWH |  |
| 27 | Energy today L  | Today generate energy today (low)      |     | 0.1KWH |  |
| 28 | Energy total H  | Total generate energy (high)           |     | 0.1KWH |  |
| 29 | Energy total L  | Total generate energy (low)            |     | 0.1KWH |  |
| 30 | Time total H    | Work time total (high)                 |     | 0.5S   |  |
| 31 | Time total L    | Work time total (low)                  |     | 0.5S   |  |
| 32 | Temperature     | Inverter temperature                   |     | 0.1C   |  |
| 40 | Fault code      | Inverter fault bit                     | &*1 |        |  |
| 41 | IPM Temperature | The inside IPM in inverter Temperature |     | 0.1C   |  |
|    |                 |  |     |        |  |
| 48 | Epv1_today H    | PV Energy today                        |     |        |  |
| 49 | Epv1_today L    | PV Energy today                        |     | 0.1kWh |  |

Figura 3.21: Tabla de registros Modbus para los inversores Growatt parte 3

## Programación del script

La primera parte del script, mostrada en la figura 3.15, es exactamente igual para los 3 inversores. La variación corresponde con: la dirección de acceso de los registros, la configuración por defecto de cada inverter y las consideraciones especiales que indique el fabricante.

Con relación a la función que permite adquirir los datos de generación eléctrica, un extracto de como luce esta se puede notar en la figura 3.22.

```
def adquisicionDatos(inversor, puerto, unidad): #str, str, int

    inversor = minimalmodbus.Instrument(puerto, unidad) #numero de puerto, numero de inversor(en decimal)
    inversor.serial.baudrate = 9600 #ajuste del baudrate para que corresponda con el del inversor
    inversor.close_port_after_each_call = True #para que se cierre el puerto serial y permita nuevas consultas

    #para la lectura de los registros, la funcion toma como parametros: la direccion del registro modbus(en hexadecimal),
    #el codigo de funcion del registro (3 para holding, 4 para input),
    #y el byteorder para registros de 32 bits, si el dato es little o big endian(probar 0, 1, 2, 3)

    input_power = inversor.read_long(1, functioncode = 4) / 10 #Factor de escala 0.1

    VDC1_inversor = inversor.read_register(3, functioncode = 4) / 10 #Factor de escala 0.1
    CDC1_inversor = inversor.read_register(4, functioncode = 4) / 10 #Factor de escala 0.1
    PDC1_inversor = inversor.read_long(5, functioncode = 4) / 10 #Factor de escala 0.1

    VDC2_inversor = inversor.read_register(7, functioncode = 4) / 10 #Factor de escala 0.1
    CDC2_inversor = inversor.read_register(8, functioncode = 4) / 10 #Factor de escala 0.1
    PDC2_inversor = inversor.read_long(9, functioncode = 4) / 10 #Factor de escala 0.1
```

Figura 3.22: Función que permite la adquisición de datos en los inversores Growatt

## Solar Edge

Solar Edge en el manual de usuario añade la imagen de la figura 3.23, donde se observa que la diferencia más notoria con respecto a las marcas anteriores es que al realizar la conexión de los inversores por medio del cable RS-485, el inversor que se debe conectar con el sistema embebido es el líder o servidor y no el último cliente en la cadena.

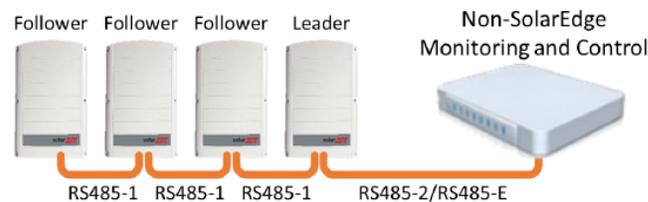


Figura 3.23: Conexión en cadena de los inversores Solar Edge por medio del cable RS-485

Asimismo, como es usual, en el manual se encuentra una sección donde se indica al usuario las configuraciones de fábrica de los inversores, las cuales se agregan a continuación:

### Physical Connection

The connection is performed using an RS485 connector with a twisted pair cable. The transmission mode in SolarEdge inverters is set to RTU (binary).

The COM port default properties are: 115200 bps, 8 data bits, no parity, 1 stop bit, no flow control. Baud rate can be changed between 9600bps to 115200bps (supported from CPU version 2.0549).

Figura 3.24: Configuración por defecto de los inversores Solar Edge para el uso del estándar RS-485

De la misma forma, para estos inversores, en el manual de usuario se encuentra disponible la tabla de registros Modbus, lo que facilita la adquisición de las variables de importancia. Esta tabla se adiciona en las figuras 3.25 y 3.26.

Cabe mencionar que para esta marca, la locación de almacenamiento de los datos cambia de los registros de entrada (input) a los de retención (holding) y de acuerdo con la tabla 3.1 estos toman el código de función 03 o 0x03.

| Address  |          | Size | Name             | Type   | Units     | Description  |
|----------|----------|------|------------------|--------|-----------|--|
| (base 0) | (base 1) |      |                  |        |           |  |
| 40069    | 40070    | 1    | C_SunSpec_DID    | uint16 |           | 101 = single phase<br>102 = split phase<br>103 = three phase |
| 40070    | 40071    | 1    | C_SunSpec_Length | uint16 | Registers | 50 = Length of model block                                   |
| 40071    | 40072    | 1    | I_AC_Current     | uint16 | Amps      | AC Total Current value                                       |
| 40072    | 40073    | 1    | I_AC_CurrentA    | uint16 | Amps      | AC Phase A Current value                                     |
| 40073    | 40074    | 1    | I_AC_CurrentB    | uint16 | Amps      | AC Phase B Current value                                     |
| 40074    | 40075    | 1    | I_AC_CurrentC    | uint16 | Amps      | AC Phase C Current value                                     |
| 40075    | 40076    | 1    | I_AC_Current_SF  | int16  |           | AC Current scale factor                                      |
| 40076    | 40077    | 1    | I_AC_VoltageAB   | uint16 | Volts     | AC Voltage Phase AB value                                    |
| 40077    | 40078    | 1    | I_AC_VoltageBC   | uint16 | Volts     | AC Voltage Phase BC value                                    |
| 40078    | 40079    | 1    | I_AC_VoltageCA   | uint16 | Volts     | AC Voltage Phase CA value                                    |

Figura 3.25: Tabla de registros Modbus para los inversores Solar Edge parte 1

| Address  |          | Size | Name                        | Type   | Units     | Description                   |
|----------|----------|------|-----------------------------|--------|-----------|-------------------------------|
| (base 0) | (base 1) |      |                             |        |           |                               |
| 40079    | 40080    | 1    | I_AC_VoltageAN <sup>1</sup> | uint16 | Volts     | AC Voltage Phase A to N value |
| 40080    | 40081    | 1    | I_AC_VoltageBN <sup>1</sup> | uint16 | Volts     | AC Voltage Phase B to N value |
| 40081    | 40082    | 1    | I_AC_VoltageCN <sup>1</sup> | uint16 | Volts     | AC Voltage Phase C to N value |
| 40082    | 40083    | 1    | I_AC_Voltage_SF             | int16  |           | AC Voltage scale factor       |
| 40083    | 40084    | 1    | I_AC_Power                  | int16  | Watts     | AC Power value                |
| 40084    | 40085    | 1    | I_AC_Power_SF               | int16  |           | AC Power scale factor         |
| 40085    | 40086    | 1    | I_AC_Frequency              | uint16 | Hertz     | AC Frequency value            |
| 40086    | 40087    | 1    | I_AC_Frequency_SF           | int16  |           | Scale factor                  |
| 40087    | 40088    | 1    | I_AC_VA                     | int16  | VA        | Apparent Power                |
| 40088    | 40089    | 1    | I_AC_VA_SF                  | int16  |           | Scale factor                  |
| 40089    | 40090    | 1    | I_AC_VAR                    | int16  | VAR       | Reactive Power                |
| 40090    | 40091    | 1    | I_AC_VAR_SF                 | int16  |           | Scale factor                  |
| 40091    | 40092    | 1    | I_AC_PF                     | int16  | %         | Power Factor                  |
| 40092    | 40093    | 1    | I_AC_PF_SF                  | int16  |           | Scale factor                  |
| 40093    | 40094    | 2    | I_AC_Energy_WH              | acc32  | WattHours | AC Lifetime Energy production |
| 40095    | 40096    | 1    | I_AC_Energy_WH_SF           | uint16 |           | Scale factor                  |
| 40096    | 40097    | 1    | I_DC_Current                | uint16 | Amps      | DC Current value              |
| 40097    | 40098    | 1    | I_DC_Current_SF             | int16  |           | Scale factor                  |
| 40098    | 40099    | 1    | I_DC_Voltage                | uint16 | Volts     | DC Voltage value              |
| 40099    | 40100    | 1    | I_DC_Voltage_SF             | int16  |           | Scale factor                  |
| 40100    | 40101    | 1    | I_DC_Power                  | int16  | Watts     | DC Power value                |
| 40101    | 40102    | 1    | I_DC_Power_SF               | int16  |           | Scale factor                  |
| 40103    | 40104    | 1    | I_Temp_Sink                 | int16  | Degrees C | Heat Sink Temperature         |
| 40106    | 40107    | 1    | I_Temp_SF                   | int16  |           | Scale factor                  |

Figura 3.26: Tabla de registros Modbus para los inversores Solar Edge parte 2

## Programación del script

En la figura 3.27 se contempla la función planteada para la adquisición de los datos de generación eléctrica de los inversores Solar Edge, tomando en cuenta los ajustes necesarios según la figura 3.24.

```
def adquisicionDatos(puerto, unidad, tags): #str, int, list

    #para establecer la conexion la funcion toma como parametros: el metodo(si es TCP o RTU),
    #el puerto serial, el baudrate, el timeout de la conexion, si se cierra despues de cada llamada y el debug
    c = ModbusClient(method = 'rtu', port = puerto, baudrate = 115200, timeout = 2, auto_close = True, debug = True) #, bytesize = 8, stopbit = 1

    #para la lectura de los registros, la funcion toma como parametros: la direccion del registro modbus(en decimal),
    #la cantidad de registros a leer y el numero de unidad

    AC_Current = c.read_holding_registers(40071, 5, unit = unidad) #AC Total Current value, Phase A Current, Phase B Current, Phase C Current, scale factor
    AC_Current = AC_Current.registers
    AC_Current_SF = utils.get_2comp(AC_Current[4]) #obtencion del complemento a 2 del factor de escala

    CurrentA = round(AC_Current[1] * 10 ** AC_Current_SF, 3) #ajuste del dato con el Factor de escala
    CurrentB = round(AC_Current[2] * 10 ** AC_Current_SF, 3) #ajuste del dato con el Factor de escala
    CurrentC = round(AC_Current[3] * 10 ** AC_Current_SF, 3) #ajuste del dato con el Factor de escala

    AC_Voltage = c.read_holding_registers(40079, 4, unit = unidad) #lectura de la tension AC y sus fases
    AC_Voltage = AC_Voltage.registers
    AC_Voltage_SF = utils.get_2comp(AC_Voltage[3]) #obtencion del complemento a 2 del factor de escala
    VoltageA = round(AC_Voltage[0] * 10 ** AC_Voltage_SF, 3) #ajuste del dato con el Factor de escala
    VoltageB = round(AC_Voltage[1] * 10 ** AC_Voltage_SF, 3) #ajuste del dato con el Factor de escala
    VoltageC = round(AC_Voltage[2] * 10 ** AC_Voltage_SF, 3) #ajuste del dato con el Factor de escala
```

Figura 3.27: Función que permite la adquisición de datos en los inversores Solar Edge

### 3.2.2. Almacenamiento de los datos

Con el propósito de almacenar los datos de generación eléctrica para su posterior análisis, es necesario establecer una estructura que permita estandarizar la manera en la que se almacena la información.

De conformidad con esta necesidad, se diseñó el diagrama de la figura 3.28, que contiene la estructura del sistema de archivos, donde se aprecia la ruta que deben seguir los datos para ser almacenados.

Como se observa, el directorio principal posee el nombre de Inversores y este contiene un total de 9 carpetas, cada una asignada al número de inversor específico. Dentro de cada carpeta perteneciente a un inversor, se crean diariamente y de manera automática, directorios que llevan como nombre la fecha del día en que se está realizando la medición. Por último, dentro de ese directorio, es donde se ubican los archivos en formato CSV que almacenan los datos de generación eléctrica diarios.

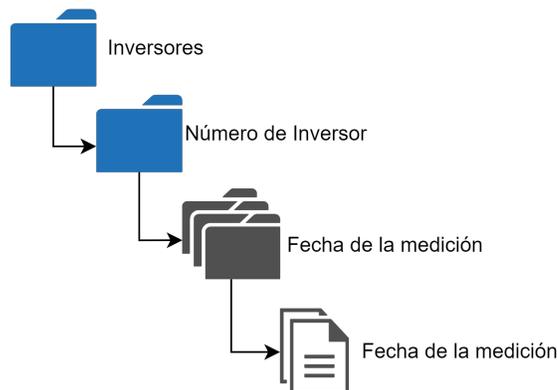


Figura 3.28: Estructura del sistema de archivos para el almacenamiento de los datos

#### Librería os

La librería OS en Python provee una manera versátil de usar funcionalidades dependientes del sistema operativo. Como por ejemplo:

- Leer o escribir un archivo
- Manipular rutas de acceso o verificar su existencia
- Leer todas las líneas de todos los archivos en la línea de comandos
- Crear archivos temporales y directorios
- Manejo de alto nivel de archivos y directorios

Para hacer uso de las funciones que ofrece la librería `os`, esta se debe incluir de la siguiente manera en el código de Python:

```
import os
from os import mkdir
```

Debido a estas características tan potentes que posee es que esta librería es de suma relevancia para el desarrollo del proyecto, ya que permite verificar mediante el comando `os.path.exists` si la ruta de un determinado elemento existe, lo que coincide con los últimos dos condicionales del diagrama de flujo. Cuando la ruta existe, quiere decir que el elemento existe y la salida es `True`, caso contrario la salida es `False`. Con estos resultados, se realizan dos condiciones. La primera permite crear el directorio dentro de la carpeta del inversor correspondiente cuando este no existe. La segunda hace lo mismo, pero con el archivo, por lo tanto, si el archivo existe, concatena la información con la anterior, si no existe, crea un archivo nuevo. En la figura 3.29 se muestra el código que permite llevar a cabo esta tarea.

```
#con esta funcion se verifica si en la ruta establecida existe una carpeta y un archivo correspondiente
#al dia de la medicion, en caso contrario la crea
#esta funcion tiene como parametros de entrada: el numero de unidad de tipo str,
#una lista con los valores medidos y la fecha, que es la variable global creada arriba
def almacenamientoDatos(unit_id, valores, fecha): #str, list, fecha

    #aquí se verifican las rutas
    dir_name = os.path.join(mainpath + unit_id + "/" + fecha)
    file_name = os.path.join(mainpath + unit_id + "/" + fecha + "/" + fecha + '.csv')

    path_dir = os.path.exists(dir_name)
    path_file = os.path.exists(file_name)

    #si no existe la carpeta del dia, se crea con el comando mkdir
    if path_dir == False:
        mkdir(mainpath + unit_id + "/" + fecha)

    #si es la primera medicion de ese dia, se crea el archivo dentro de la carpeta
    if path_file == False:
        crearArchivo(unit_id, valores, fecha, False)

    #como ya el documento existe, se llama la funcion para concatenar los nuevos valores
    else:
        crearArchivo(unit_id, valores, fecha, True)
```

Figura 3.29: Función que permite la verificación de la existencia de un elemento por medio de su ruta de acceso

## Librería csv

El archivo CSV (Valores Separados por Comas) es el formato más común de importación y exportación de hojas de cálculo y bases de datos. El formato CSV se utilizó durante muchos años antes de intentar describir el formato de manera estandarizada en RFC 4180. La falta de un estándar bien definido significa que a veces existen pequeñas diferencias en la información producida y consumida por diferentes aplicaciones. Estas diferencias pueden ser molestas al momento de procesar archivos CSV desde múltiples fuentes. Aun así, aunque los delimitadores y separadores varíen, el formato general es lo suficientemente similar como para que sea posible un sólo módulo que puede manipular tal información eficientemente, escondiendo los detalles de lectura y escritura de datos del programador [34].

El módulo csv implementa clases para leer y escribir datos tabulares en formato CSV. Permite a los programadores decir, «escribe estos datos en el formato preferido por Excel», o «lee datos de este archivo que fue generado por Excel», sin conocer los detalles precisos del formato CSV usado por Excel. Los programadores también pueden describir los formatos CSV entendidos por otras aplicaciones o definir sus propios formatos CSV para fines particulares.

Para hacer uso de la librería csv se debe incluir de la siguiente manera en el código de Python:

```
import csv  
from csv import writer
```

De acuerdo con la figura 3.30, al llamar la función crear archivo, se debe indicar el número de unidad, la lista que contiene los valores medidos, la fecha y el estado del documento. Con base en estos parámetros, pero específicamente con el valor de estado, existen dos posibles caminos:

- estado = False: Si esto ocurre, se ejecuta el primer condicional, donde lo que se realiza es la creación de un documento CSV que lleva como nombre la fecha y contiene en la primera fila una lista con los encabezados, mientras que en la segunda fila se agrega la lista de valores que previamente se cargó como un parámetro de la función.
- estado = True: Esto indica que el documento ya existe, por lo tanto, la acción a realizar consiste en abrir el archivo CSV y escribir en la última fila la lista que contiene los valores de generación eléctrica medidos.

```
#con esta funcion se crean los archivos CSV
#la primer fila contiene los encabezados con los nombres de los datos
#la segunda fila contiene los valores correspondiente con las mediciones
#esta funcion tiene como parametros de entrada: el numero de unidad de tipo str, la lista de valores medidos,
#la fecha y el estado del documento, si no existe es False, si ya existe es True
def crearArchivo(unit_id, valores, fecha, estado):

    #si el documento no existe, lo crea y le introduce como primera linea los encabezados y como segunda
    #linea la lista de valores
    if estado == False:

        file = open(mainpath + unit_id + "/" + fecha + "/" + fecha + ".csv", "w", newline='', encoding = "ISO-8859-1")
        spamreader = csv.writer(file)
        spamreader.writerow(tags)
        spamreader.writerow(valores)
        file.close()

    #si el documento ya existe, lo abre y concatena en la ultima linea la lista de valores
    else:

        with open(mainpath + unit_id + "/" + fecha + "/" + fecha + ".csv", 'a', newline='') as file:

            # Pass this file object to csv.writer()
            # and get a writer object
            writer_object = writer(file)

            # Pass the list as an argument into
            # the writerow()
            writer_object.writerow(valores)

            #Close the file object
            file.close()
```

Figura 3.30: Función que permite almacenar los datos en archivos formato CSV

## Capítulo 4

# Estimación del ahorro económico y de la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero

Realizar la recolección de los datos de generación eléctrica de los inversores y almacenarlos en archivos es una tarea primordial para el éxito del proyecto, debido a que, si esta se ejecuta sin problemas, las siguientes actividades se podrán desarrollar de buena manera.

La obtención de datos como tal es necesaria, pero se debe tener en cuenta que por si solos, los datos no dicen nada. Se requiere conocer el contexto del área en que se desarrolla el proyecto para realizar un análisis y un procesado adecuado con el propósito de darle significado a estos.

Con este fin, se va a proceder a explicar cómo se llevó a cabo el proceso para estimar los valores del ahorro económico diario así como de la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero gracias al aporte de energía limpia del complejo solar del TEC.

### 4.1. Estimación del ahorro económico

Para entender cómo se calcula la estimación del ahorro económico se va a utilizar la ecuación 4.1. En esta se puede apreciar que los datos necesarios corresponden con el valor del kWh (establecido según la empresa que brinda el servicio eléctrico), además de la energía diaria generada (la cual se extrae de cada uno de los inversores).

$$\text{ahorro económico} = \text{valor kWh} \times \text{energía diaria generada} \quad (4.1)$$

En el caso del Instituto Tecnológico de Costa Rica, es importante mencionar que la principal empresa encargada de brindar el servicio de electricidad al campus central es JASEC. Aunado a esto, debido al tipo de institución que es el ITCR, JASEC le realiza el cobro de la facturación eléctrica con base al valor del kWh estipulado en la sección de

distribución, el rubro conocido como tarifa preferencial para un consumo menor a 3000 kWh. Como se observa en la figura 4.1, el valor del kWh corresponde a 66.57 colones.

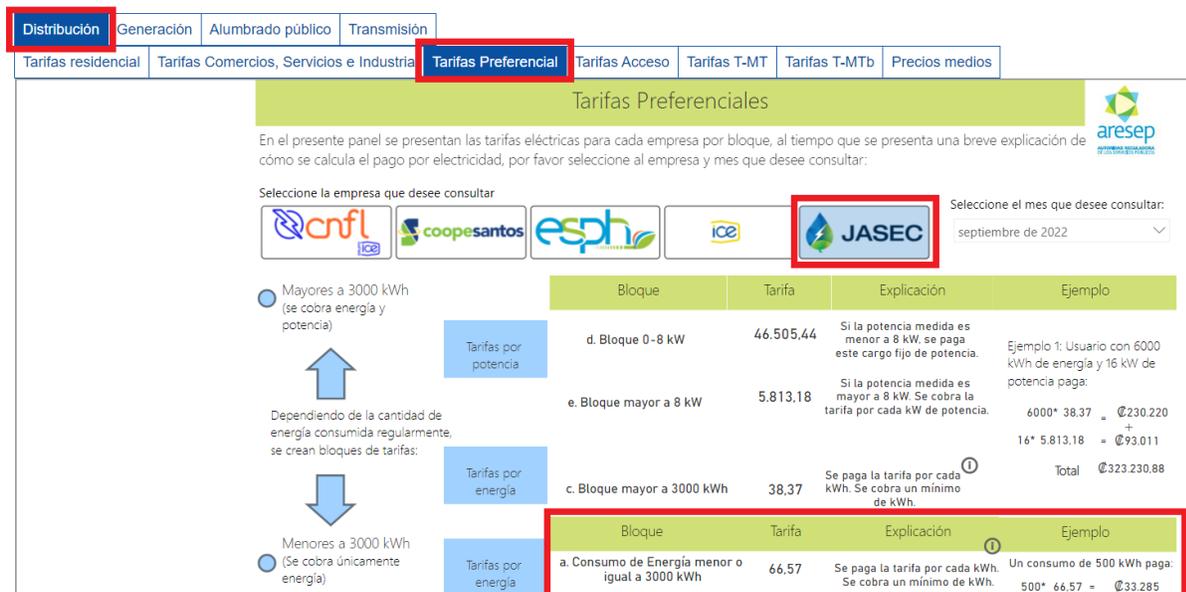


Figura 4.1: Tarifas vigentes de electricidad para el año 2022 según ARESEP [35].

## 4.2. Estimación de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero

Para la estimación de la reducción de emisiones se propone el uso de la ecuación 4.2. Esta sirve como una primera aproximación para conocer cuál es el impacto en el medio ambiente que ha tenido el complejo solar, esto debido a que gracias a su aporte energético se han dejado de emitir cierta cantidad de gases de efecto invernadero asociados con la generación de electricidad.

$$\text{reducción emisiones} = \text{factor de emisión} \times \text{energía diaria generada} \quad (4.2)$$

Cabe resaltar que, a nivel de Costa Rica, los entes encargados de publicar los datos con respecto al Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI), además de la publicación anual de los Factores de emisión de gases de efecto invernadero necesarios para la elaboración de estimaciones son el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) en colaboración con el Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET). En la figura 4.2, se muestra un extracto del documento titulado **Factores de emisión de gases de efecto invernadero** publicado en el año 2022.

## Uso de electricidad

El factor de emisión en el sector electricidad varía anualmente, los factores para los últimos siete años se indican a continuación:

| Año  | Factor de emisión<br>kg CO <sub>2</sub> e/kWh | Incertidumbres                            |  |
|------|---|---|--|
|      |   | Incertidumbre<br>expandida<br>( $k = 2$ ) | Incertidumbre<br>estándar<br>recomendada |
| 2021 | 0,0400  | ± 13%                                     | 6,5%                                     |
| 2020 | 0,0282  | ± 6,4%                                    | 3,2%                                     |
| 2019 | 0,0365  | ± 1,4%                                    | 0,7%                                     |
| 2018 | 0,0395  | ND  | ND                                       |
| 2017 | 0,0490  | ND  | ND                                       |
| 2016 | 0,0557  | ND  | ND                                       |
| 2015 | 0,0381  | ND  | ND                                       |

Figura 4.2: Factores de emisión de gases de efecto invernadero para el sector energía [36].

### 4.3. Diseño e implementación del algoritmo que permite el cálculo de las estimaciones

#### Diagrama de flujo del algoritmo a utilizar

En el diagrama de flujo de la figura 4.3 se expone el comportamiento deseado del algoritmo por desarrollar, con el fin de que este permita acceder a los datos de generación eléctrica almacenados para posteriormente procesarlos y retornar los valores del ahorro económico y la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero.

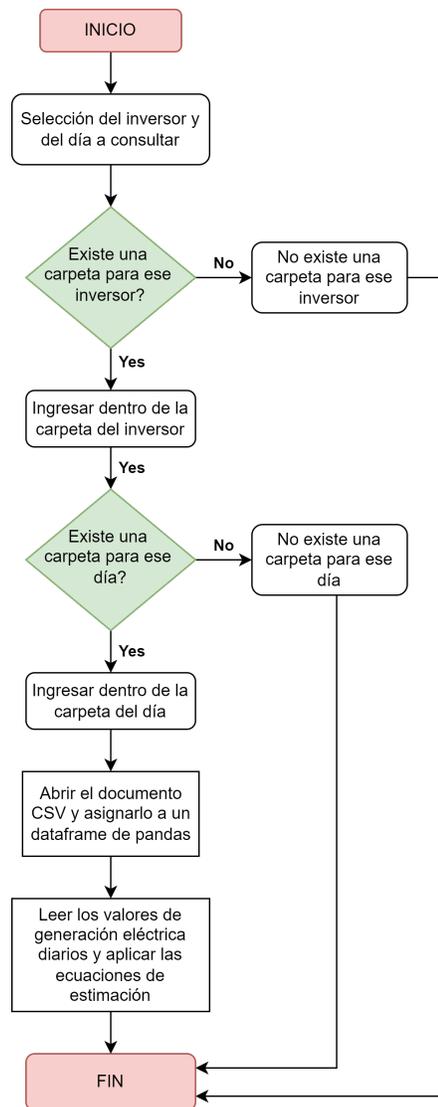


Figura 4.3: Diagrama de flujo para obtener la estimación del ahorro económico y la reducción en la emisión de gases de efecto de invernadero

## Librería Pandas

Pandas es una librería de Python especializada en el manejo y análisis de estructuras de datos. Entre sus principales características se encuentran [37]:

- Define nuevas estructuras de datos basadas en los arrays de la librería NumPy pero con nuevas funcionalidades.
- Permite leer y escribir fácilmente ficheros en formato CSV, Excel y bases de datos SQL.

- Permite acceder a los datos mediante índices o nombres para filas y columnas.
- Ofrece métodos para reordenar, dividir y combinar conjuntos de datos.
- Permite trabajar con series temporales.
- Realiza todas estas operaciones de manera muy eficiente.

Por lo tanto, debido a las múltiples funcionalidades que ofrece la librería Pandas, es que se escogió como herramienta para programar un algoritmo que permite leer los valores de los archivos CSV previamente creados, para luego aplicar las ecuaciones y obtener como resultado los datos correspondientes con las estimaciones.

Entre los aspectos que deben ser considerados para la programación del algoritmo se encuentra la importancia de que los archivos presenten homogeneidad en el nombramiento de las columnas, ya que esto va a facilitar la lectura de los valores, caso contrario el código se volvería muy complicado de realizar y de leer, al tener que estar solicitando múltiples columnas con diferentes nombres.

A propósito de lo anterior, en este proyecto, cuando se propuso la manera en que la información iba a ser almacenada, también se estableció un estándar con respecto a la lista que contiene el nombre de los encabezados que componen el documento CSV. Dependiendo de la marca y de la configuración del inversor, la lista iba a tener más o menos nombres, pero lo ideal era que el nombre de las variables fuera el mismo en todas. En la figura 4.4 se observa la lista establecida como modelo a seguir.

```
encabezados = ['AC output power(W)', 'Daily power yields(kWh)', 'Total power yields(kWh)', 'Internal Temperature(C)',  
'DC voltage 1(V)', 'DC current 1(A)', 'DC voltage 2(V)', 'DC current 2(A)', 'DC voltage 3(V)',  
'DC current 3(A)', 'DC voltage 4(V)', 'DC current 4(A)', 'Total DC power(W)', 'Phase A current(A)',  
'Phase B current(A)', 'Phase C current(A)', 'Last update time']
```

Figura 4.4: Lista modelo para el nombramiento de los encabezados del documento CSV.

Teniendo en cuenta lo expuesto previamente y tomando como referencia el diagrama de flujo de la figura 4.3, se procedió a programar el algoritmo mostrado en la figura 4.5. Como es usual en Python, lo primero que se realiza es importar las librerías a utilizar, en este caso sería pandas, que por convención se renombra como pd y os. Seguidamente se establece la ruta principal donde se encuentran almacenados los archivos, para luego, mediante el comando `os.listdir()` mostrar todos los directorios presentes en esa locación de memoria.

Ahora bien, con el primer ciclo for se recorre cada uno de los directorios en busca de uno que cumpla la condición de que presente la palabra Inversor 1 en su nombre. Si esto ocurre, entonces se ingresa a la carpeta y se vuelven a listar los directorios presentes en ella.

El siguiente ciclo for funciona para posicionarse sobre cada una de las carpetas existentes en Inversor 1, es gracias al posterior condicional que se selecciona el día que se

desea conocer. Dentro del condicional, se ingresa a la carpeta del día que se quiere saber, se listan los archivos CSV y se asignan a la variable archivo.

Para poder leer la información contenida en los archivos es necesaria la creación de un dataframe, que es la estructura con la que se trabaja en pandas. Normalmente a este se le asignan todos los valores contenidos en el documento CSV.

Por último, a partir del dataframe, es posible conocer las estimaciones. Para esto, se emplean las ecuaciones 4.1 y 4.2. Donde `df['Daily power yields(kWh)'].max()` representa el valor máximo para la generación de energía con respecto al día propuesto.

Para calcular el ahorro diario en colones, la energía se multiplicó por el valor del kWh presente en la figura 4.1.

Por otra parte, en el caso de la reducción diaria de emisiones, el factor de emisión utilizado corresponde al año 2021, debido a que el valor perteneciente al año 2022 aún no está disponible.

En las últimas líneas de código, lo que se realiza, antes de imprimir el valor con su respectiva unidad, es un redondeo a 2 cifras decimales.

```
import pandas as pd
import os

main_path = 'C:/Users/Joseph/Desktop/TFG/Progra/Mediciones Inversores/'

carpetas = os.listdir(main_path)

for i in carpetas:

    if i == 'Inversor 1':
        ruta_carpeta = main_path + i
        carpeta_fecha = os.listdir(ruta_carpeta)

        for j in carpeta_fecha:

            if '2022-09-22' in j:
                ruta_archivo = ruta_carpeta + '/' + j
                archivo_fecha = os.listdir(ruta_archivo)

                archivo = ruta_archivo + '/' + archivo_fecha[0]

                df = pd.read_csv(archivo)
                if i == 'Inversor 8' or i == 'Inversor 9':
                    ahorro_diario_colones = round(((4 * df['AC output power(W)'].max()) / 1000) * 66.57, 2)
                    reduccion_diaria_emisiones = round(((4 * df['AC output power(W)'].max()) / 1000) * 0.0400, 2)
                else:
                    ahorro_diario_colones = round(df['Daily power yields(kWh)'].max() * 66.57, 2)
                    reduccion_diaria_emisiones = round((df['Daily power yields(kWh)'].max() * 0.0400), 2)

            else:
                print('No existe una carpeta para ese dia')

        else:
            print('No existe una carpeta para ese inversor')

ahorro_diario_colones = round(ahorro_diario_colones, 2)
print(ahorro_diario_colones, 'colones')

reduccion_diaria_emisiones = round(reduccion_diaria_emisiones, 2)
print(reduccion_diaria_emisiones, 'kgCO2eq')
```

Figura 4.5: Algoritmo para estimar el ahorro económico y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero

# Capítulo 5

## Desarrollo de la plataforma de monitoreo

El propósito de este proyecto se centra en la necesidad de conocer cual es el comportamiento diario del complejo solar con respecto a la generación de energía eléctrica. Para esto, es de suma relevancia contar con una plataforma que permita observar de manera fácil y rápida el funcionamiento de cada uno de los inversores, lo que implica entonces que se pueda conocer como están trabajando los módulos solares.

Con este fin, es que se plantea el desarrollo de una plataforma de monitoreo para conocer el comportamiento diario de cada uno de los inversores, y así poder medir ciertas variables de importancia en los sistemas fotovoltaicos, tales como potencia, tensión y corriente en DC y AC, al igual que la temperatura de trabajo de cada inversor.

Por lo tanto, para lograr lo mencionado anteriormente, era primordial el éxito de las dos primeras etapas, donde se recolectan y almacenan los datos presentes en cada uno de los inversores y luego, se estiman los valores del ahorro económico y la reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Una vez hecho esto, ya se cuenta con los insumos suficientes para proceder a programar el script que compondrá la interfaz de visualización de datos.

Entre las librerías que se utilizaron para alcanzar el objetivo se encuentran las ya conocidas pandas y os. Sin embargo, también se emplearon librerías nuevas como dash, plotly y submódulos inmersos en ellas.

### 5.1. Método de análisis gráfico

Para la realización de un método de análisis gráfico se utilizó Plotly, esta una biblioteca de gráficos de Python, en la cual se puede realizar gráficos interactivos de calidad de publicación. Entre los ejemplos que ofrece esta librería se encuentran los gráficos de líneas, gráficos de dispersión, gráficos de área, gráficos de barras, barras de error, gráficos de caja, histogramas, mapas de calor, subplots, ejes múltiples, gráficos polares y gráficos

de burbujas. Asimismo, es importante destacar que Plotly es gratuito y de código abierto [38].

Debido a la amplia variedad de gráficos que ofrece la librería, es que fue seleccionada como herramienta principal para esta tarea.

En relación con esto, a continuación, se procede a mostrar un ejemplo de como se utiliza plotly para crear los gráficos en el lenguaje de programación Python a partir de los datos recopilados.

```
from datetime import datetime
import pandas as pd
import plotly.express as px
import os

# set files path
main_path = 'C:/Users/Joseph/Desktop/TFG/Progra/Mediciones Inversores/'

carpetas = os.listdir(main_path)
```

Figura 5.1: Importación de las librerías necesarias para realizar los gráficos.

```
for i in carpetas:
    if 'Inversor' in i:
        ruta_carpeta = main_path + i
        carpeta_fecha = os.listdir(ruta_carpeta)

        if i == 'Inversor 1':

            for j in carpeta_fecha:
                ruta_archivo = ruta_carpeta + '/' + j
                arhivo_fecha = os.listdir(ruta_archivo)

                for m in arhivo_fecha:

                    if '2022-09-24' in m:
                        archivo = ruta_archivo + '/' + m
                        df = pd.read_csv(archivo)

                        for h in df['Last update time']:

                            hora = datetime.strptime(h, '%Y-%m-%d %H:%M:%S') #2022-9-7 15:48:56 year-month-day

                            df['Last update time'] = df['Last update time'].replace([h], hora)

                        x = 'Last update time'
                        y = ['Total DC power(W)', 'AC output power(W)']

                        fig = px.line(df, x, y)

                        fig.update_layout(xaxis_title = "Hora última actualización", yaxis_title = "Potencia generada (W)",
                                          legend_title = "Variables")

                        newnames = {'AC output power(W)': 'Potencia de salida en AC (W)',
                                    'Total DC power(W)': 'Potencia de entrada en DC (W)'}
                        fig.for_each_trace(lambda t: t.update(name = newnames[t.name], legendgroup = newnames[t.name],
                                                            hovertemplate = t.hovertemplate.replace(t.name, newnames[t.name])))

                        fig.show()
```

Figura 5.2: Código implementado para obtener un gráfico de líneas en 2 dimensiones.

El código de la figura 5.1 representa como se realiza la importación de las librerías que se van a utilizar al entorno de programación. Seguidamente, se especifica la ruta principal de acceso de los archivos requeridos.

Por otra parte, en la figura 5.2 se observa el código utilizado para acceder hasta el archivo específico, ya sea por inversor o por día. Luego, una vez ubicado el archivo, se asigna el contenido de este a un dataframe de pandas, para posteriormente realizar la acción necesaria, en este caso, colocar en el **eje X** la hora de última actualización y en el **eje Y** los valores correspondientes a la potencia en DC y AC. Por último, el comando **fig.show()** permite que el gráfico sea desplegado en pantalla.

## 5.2. Diseño de la plataforma de monitoreo

Dash es un framework de código abierto utilizado para construir interfaces de visualización de datos. Fue lanzado en 2017 como una biblioteca de Python, Aunque ha crecido y ahora incluye implementaciones para los lenguajes de programación R y Julia.

Uno de los mayores beneficios que ofrece Dash, es que ayuda a los científicos de datos a crear aplicaciones web analíticas sin necesidad de tener conocimientos avanzados de desarrollo web.

Como dato interesante, la empresa encargada de construir Dash y apoyar su desarrollo es Plotly. Aunado a esto, la compañía recientemente, abrió el código de Dash y lo publicó bajo una licencia MIT, por lo que es posible usar Dash sin coste alguno.

Por lo tanto, aprovechando la integración que posee Dash con los gráficos realizados por medio de Plotly, es que se empleó como herramienta principal para el desarrollo de la interfaz de visualización de datos [39].

Ahora, la importancia de construir una plataforma radica en que plotly, si bien permite graficar los datos, estos resultados están por separado, lo que quiere decir que, para cada gráfica, se abrirá una ventana mostrando la información que se solicitó. Esto implica que el contenido del gráfico sea el mismo en todo momento, porque no existe una interacción entre el usuario y los datos. Aunado a esto, si se desea ejecutar cambios, estos se deben implementar directamente en el código, lo cual puede resultar confuso y poco intuitivo, además de que el riesgo de cometer errores se ve incrementado.

Es por esto, que la existencia de la plataforma se vuelve esencial, ya que mediante esta, el usuario se ve beneficiado, otorgándole interacción con los datos y una mejor experiencia de uso, al poder ordenar la información que se despliega en pantalla y brindarle la facilidad de acceder al contenido en un mismo sitio.

Para entender como es que se llevo a cabo el desarrollo de la interfaz de visualización de datos, es necesario explicar que Dash funciona mediante el uso de paquetes de componentes, como lo son los paquetes de HTML y Bootstrap.

HTML (del inglés HyperText Markup Language) es el componente más básico de una pagina web. Este define el significado y la estructura del contenido web. HTML utiliza "marcas" para etiquetar texto, imágenes y otro contenido para mostrarlo en un navegador Web. Las marcas HTML incluyen elementos especiales como: head, title, body, header, footer, div y muchos otros [40].

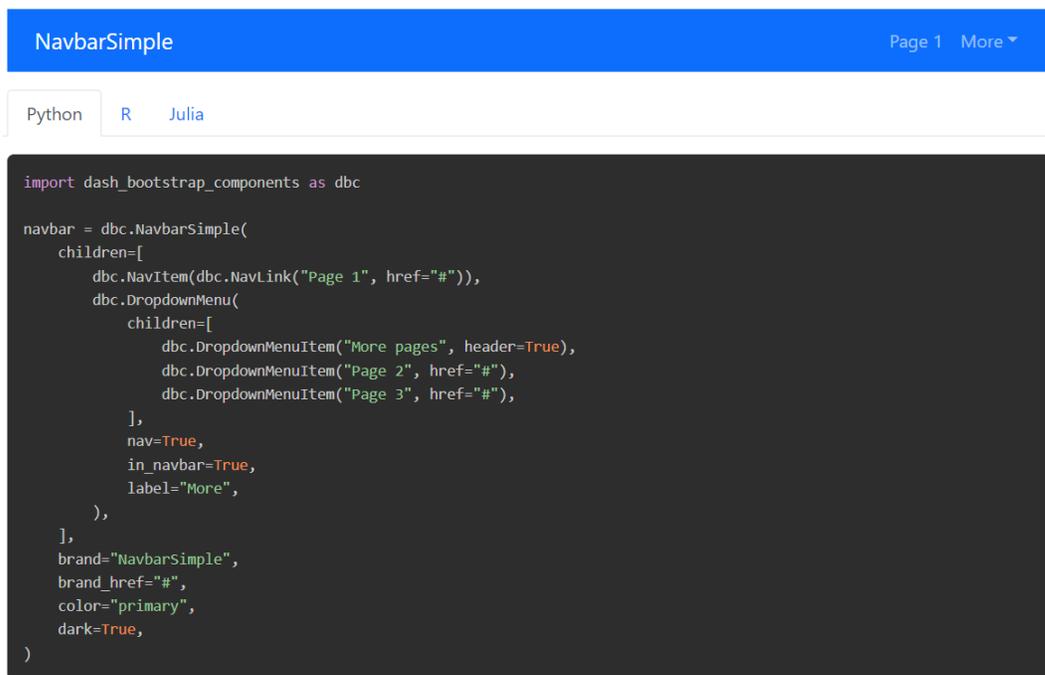
Por otra parte, además de HTML, generalmente se utilizan otras tecnologías para describir la apariencia/presentación de una página web entre ellas se encuentra Bootstrap, la cual ofrece un conjunto de herramientas front-end potentes, extensibles y repletas de funciones.

Bootstrap contiene plantillas de diseño con tipografía, formularios, botones, cuadros, menús de navegación y otros elementos de diseño basado en HTML y CSS, así como extensiones de JavaScript adicionales. A diferencia de muchos frameworks web, este solo se ocupa del desarrollo front-end [41].

### 5.2.1. Selección de los componentes que integran la plataforma

En seguida, se van a presentar los distintos componentes de Bootstrap que integran la plataforma. Estos fueron tomados de la pagina oficial de Dash Bootstrap Components, donde para cada uno de los componentes, se proporciona el código necesario para su implementación en distintos lenguajes de programación.

- **Barra de navegación (Navbar):** En esta barra se ubican los componentes mediante los cuales el usuario va a tener interacción con la plataforma.



```
import dash_bootstrap_components as dbc

navbar = dbc.NavbarSimple(
    children=[
        dbc.NavItem(dbc.NavLink("Page 1", href="#")),
        dbc.DropdownMenu(
            children=[
                dbc.DropdownMenuItem("More pages", header=True),
                dbc.DropdownMenuItem("Page 2", href="#"),
                dbc.DropdownMenuItem("Page 3", href="#"),
            ],
            nav=True,
            in_navbar=True,
            label="More",
        ),
    ],
    brand="NavbarSimple",
    brand_href="#",
    color="primary",
    dark=True,
)
```

Figura 5.3: Barra de navegación y su código en Python [42].

- **Tarjetas (Cards):** Las tarjetas cumplen la función de mostrar los valores del ahorro económico, reducción en las emisiones y generación de energía diaria del Complejo Solar.

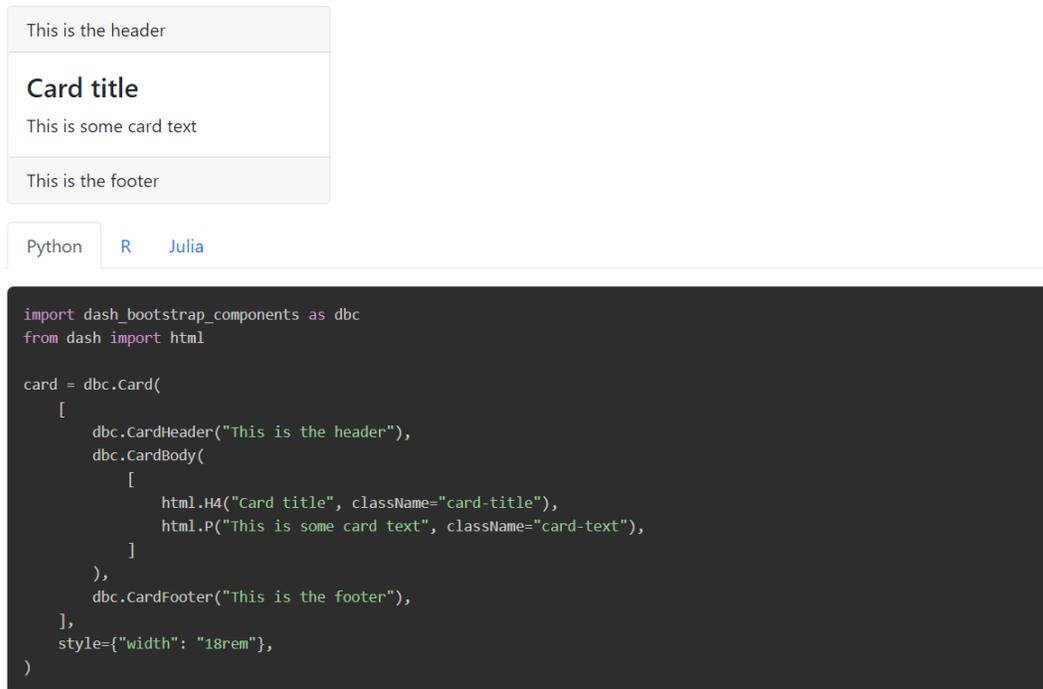


Figura 5.4: Tarjetas y su código en Python [42].

- **Desplegable (Dropdown):** Este desplegable permite seleccionar el contenido que se desea acceder, ya sea la información específica del funcionamiento de cada uno de los inversores o por el contrario, un resumen de todos los inversores a lo largo del tiempo con respecto a la generación de energía.

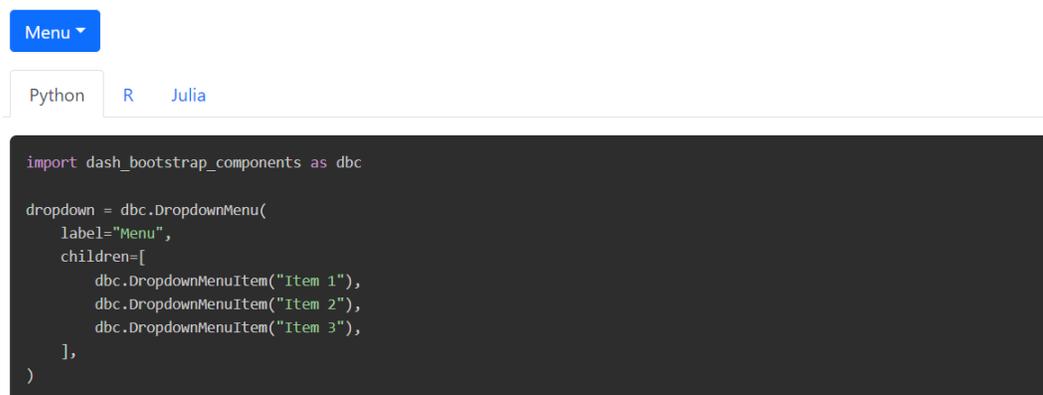
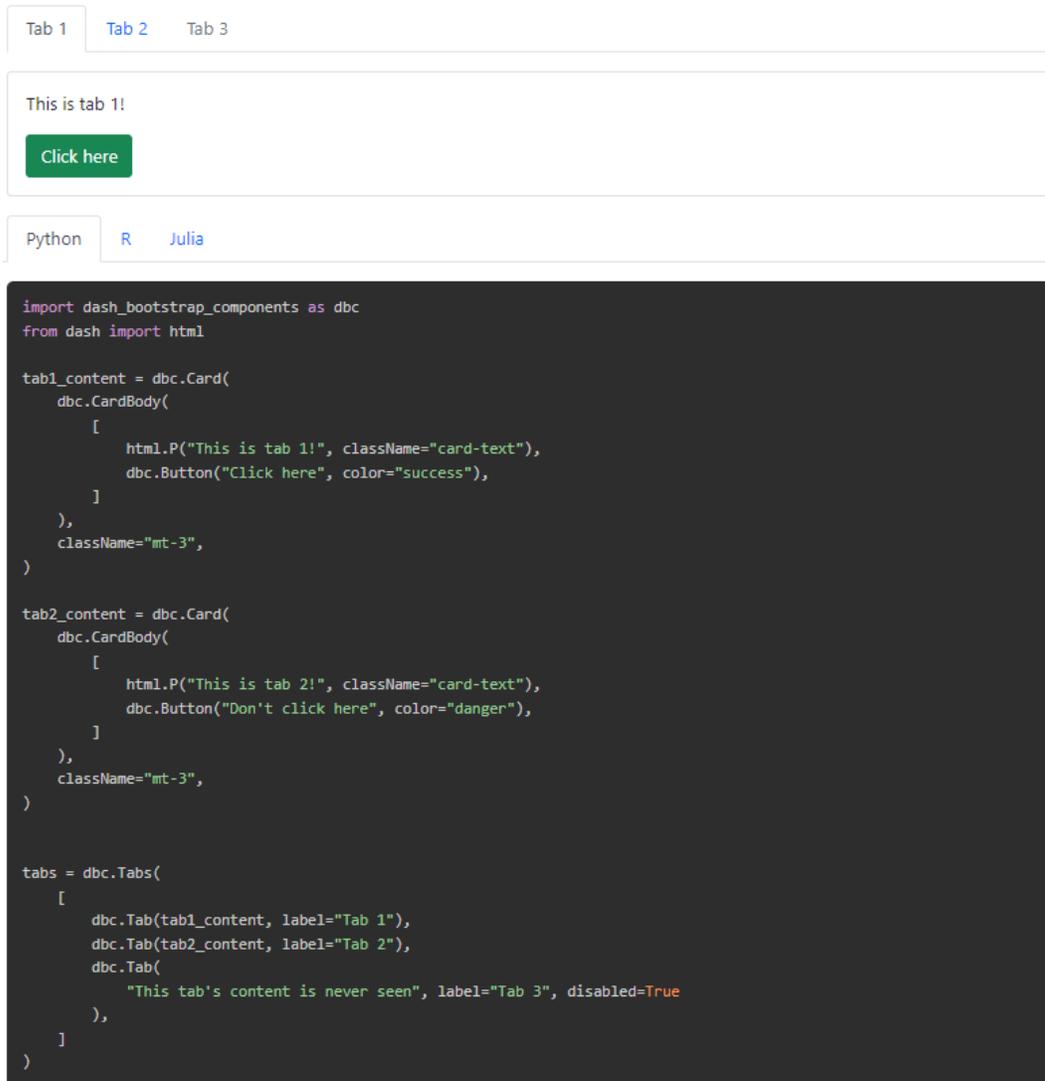


Figura 5.5: Desplegable y su código en Python [42].

- **Pestañas (Tabs):** El contenido mostrado en pantalla se ordena mediante el uso de pestañas, las cuales llevan nombres acorde con la información que hacen referencia.



```
import dash_bootstrap_components as dbc
from dash import html

tab1_content = dbc.Card(
    dbc.CardBody(
        [
            html.P("This is tab 1!", className="card-text"),
            dbc.Button("Click here", color="success"),
        ]
    ),
    className="mt-3",
)

tab2_content = dbc.Card(
    dbc.CardBody(
        [
            html.P("This is tab 2!", className="card-text"),
            dbc.Button("Don't click here", color="danger"),
        ]
    ),
    className="mt-3",
)

tabs = dbc.Tabs(
    [
        dbc.Tab(tab1_content, label="Tab 1"),
        dbc.Tab(tab2_content, label="Tab 2"),
        dbc.Tab(
            "This tab's content is never seen", label="Tab 3", disabled=True
        ),
    ],
)
```

Figura 5.6: Pestañas y su código en Python [42].

- **Entrada de datos (Input):** Aquí se ingresan los datos correspondientes al valor del kWh y al factor de emisión, necesarios para el calculo de las estimaciones.



The image shows a web interface with a text input field containing the placeholder text "Type something...". Below the input field are three tabs: "Python", "R", and "Julia". The "Python" tab is selected, and the code editor displays the following Python code:

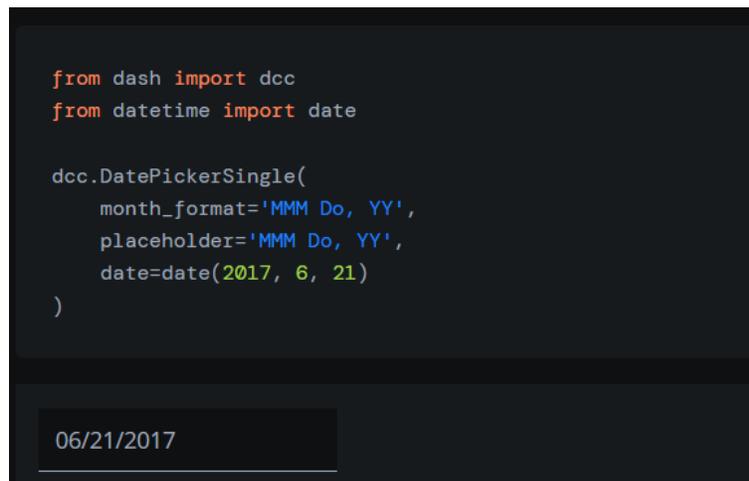
```
import dash_bootstrap_components as dbc
from dash import Input, Output, html

text_input = html.Div(
    [
        dbc.Input(id="input", placeholder="Type something...", type="text"),
        html.Br(),
        html.P(id="output"),
    ]
)

@app.callback(Output("output", "children"), [Input("input", "value")])
def output_text(value):
    return value
```

Figura 5.7: Entrada de texto y su código en Python [42].

- **Calendario:** Mediante este componente se selecciona el día que se desea conocer su información con respecto a la generación de electricidad por inversor y total, así como las estimaciones asociadas.



The image shows a web interface with a date picker component displaying the date "06/21/2017". Below the date picker is the corresponding Python code:

```
from dash import dcc
from datetime import date

dcc.DatePickerSingle(
    month_format='MMM Do, YY',
    placeholder='MMM Do, YY',
    date=date(2017, 6, 21)
)
```

Figura 5.8: Calendario y su código en Python [42].

# Capítulo 6

## Análisis de resultados

### 6.1. Comunicación con los inversores

Esta sección aborda las pruebas de funcionamiento de los script que permiten recolectar los datos de generación eléctrica de cada uno de los inversores y cuales fueron los resultados obtenidos.

Es importante mencionar que, la variación que existe entre los valores presentes en las imágenes de cada inversor y los datos recopilados se debe principalmente a que existen ciertos tiempos de retraso por ejemplo cuando se toma la foto, debido a que el teléfono se demora en capturar y almacenar la imagen, también, el tiempo que dura el script en llevar a cabo su ejecución. Si bien, se trató de que los valores coincidieran, es muy difícil sincronizar el tiempo de la captura de la imagen con el tiempo de ejecución del script. Además de esto, se debe sumar que los inversores actualizan los valores presentes en la pantalla principal cada segundo.

Por otra parte, la ecuación utilizada para el cálculo del porcentaje de error es la siguiente:

$$\%error = \left| \frac{\text{valor obtenido} - \text{valor real}}{\text{valor real}} \right| \times 100 \quad (6.1)$$

Con base en el contenido de la columna porcentaje de error de las tablas mostradas para cada marca e inversor, y tomando como referencia lo expuesto en el indicador, se puede deducir que el objetivo específico 1 fue completado de manera exitosa, ya que todos los datos presentes en dicha columna, se encuentran por debajo del valor propuesto como aceptable, es decir, no superan el 5% de error establecido.

### 6.1.1. Sungrow

Con respecto a los inversores de la marca Sungrow, en la figura que muestra la pantalla principal se presenta un desglose de los valores diarios de generación, asimismo, se indica el estado de operación del inversor, el cual normalmente debe estar en RUN.

En la siguiente figura, se muestran con detalle los valores de generación eléctrica en CD, los cuales corresponden con los datos provenientes de los paneles solares y su comportamiento en ese momento.

Seguidamente, se observa una figura que contiene los valores de generación eléctrica en AC, los cuales pertenecen a la salida del inversor.

Por ultimo, se añade una figura que presenta cierta información importante de conocer, como por ejemplo la temperatura de trabajo del inversor, la energía mensual generada, la cantidad de horas totales y minutos diarios que lleva en funcionamiento, etc.

#### Inversor 1

La figura 6.5. muestra los valores recopilados del inversor 1 por medio del script. A continuación, se va a describir e indicar a que pertenece cada uno:

- AC output power es la potencia total de salida en AC del inversor en ese momento. Este valor corresponde con el indicado en la figura 6.1 como P-ac.
- Daily power yields es la energía generada por la porción del complejo solar del TEC conectado al inversor 1 durante el día. Este valor se observa en la figura 6.1 en la casilla E-day.
- Total power yields representa la energía total generada por el sistema fotovoltaico captada por el inversor 1 desde el momento que fue conectado. Este valor se observa en la figura 6.1.
- Total DC power es la potencia total de entrada en DC del inversor en ese momento. Este valor se puede ver en la figura 6.2 en la parte superior.

Asimismo, en esta figura se observa cada una de las entradas en DC del inversor 1 con respecto a la tensión, la corriente y la potencia.

- Phase A, B y C representa cada una de las fases de salida en corriente alterna del inversor. Sus valores se pueden corroborar con la figura 6.3.
- Por último, Internal Temperature representa un valor sumamente importante de conocer como lo es la temperatura de trabajo del inversor. Este se puede verificar en la figura 6.4.

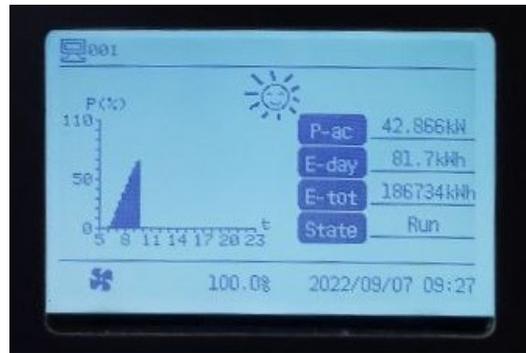


Figura 6.1: Pantalla principal del inversor 1.

| DC power input |        | 43731W |        |
|----------------|--------|--------|--------|
|                | Vdc[V] | Idc[A] | Pdc[W] |
| DC1            | 667.2  | 13.2   | 8807   |
| DC2            | 660.5  | 20.0   | 13210  |
| DC3            | 662.2  | 13.1   | 8674   |
| DC4            | 658.6  | 19.8   | 13040  |

Figura 6.2: Datos de generación eléctrica en CD del inversor 1.

|        | R     | S     | T     |
|--------|-------|-------|-------|
| Vac[V] | 280.0 | 280.8 | 280.0 |
| Iac[A] | 51.0  | 51.1  | 51.1  |
| Pac[W] | 14304 | 14374 | 14304 |
| F[Hz]  | 59.96 | 59.96 | 59.96 |

Figura 6.3: Datos de generación eléctrica en AC del inversor 1.



|                         |          |
|-------------------------|----------|
| CO <sub>2</sub> -reduce | 112040kg |
| E-month                 | 1687kwh  |
| h-Total                 | 8071h    |
| T-today                 | 235min   |
| Temp                    | 43.2°C   |
| ISO                     | 332k Ω   |

Figura 6.4: Resumen de la generación eléctrica del inversor 1.

```
-----Inversor 1-----  
AC output power(W) , 42682  
Daily power yields(kwh) , 81.4  
Total power yields(kwh) , 186734  
Internal Temperature(C) , 43.2  
DC voltage 1(V) , 671.5  
DC current 1(A) , 13.2  
DC voltage 2(V) , 658.0  
DC current 2(A) , 20.1  
DC voltage 3(V) , 664.0  
DC current 3(A) , 13.2  
DC voltage 4(V) , 667.8  
DC current 4(A) , 19.6  
Total DC power(W) , 43888  
Phase A current(A) , 51.0  
Phase B current(A) , 51.1  
Phase C current(A) , 51.1  
Last update time , 2022-9-7 9:27:8
```

Figura 6.5: Datos de generación eléctrica del inversor 1 obtenidos mediante el script.

En términos del porcentaje de error existente entre los valores presentes en el inversor 1 y los recopilados por medio del script, se tiene lo siguiente:

Tabla 6.1: Porcentaje de error de los datos de generación eléctrica recopilados con respecto a los presentes en el inversor 1.

| Variable                  | Valor Inversor 1 | Valor obtenido | % Error |
|---------------------------|------------------|----------------|---------|
| AC output power [W]       | 42866            | 42682          | 0.43 %  |
| Daily power yields [kWh]  | 81.7             | 81.4           | 0.37 %  |
| Total power yields [kWh]  | 186734           | 186734         | 0 %     |
| Internal temperature [°C] | 43.2             | 43.2           | 0 %     |
| DC voltage 1 [V]          | 667.2            | 671.5          | 0.64 %  |
| DC current 1 [A]          | 13.2             | 13.2           | 0 %     |
| DC voltage 2 [V]          | 660.5            | 658.0          | 0.38 %  |
| DC current 2 [A]          | 20.0             | 20.1           | 0.5 %   |
| DC voltage 3 [V]          | 662.2            | 664.0          | 0.27 %  |
| DC current 3 [A]          | 13.1             | 13.2           | 0.76 %  |
| DC voltage 4 [V]          | 658.6            | 667.8          | 1.38 %  |
| DC current 4 [A]          | 19.8             | 19.6           | 1.01 %  |
| Total DC power [W]        | 43731            | 43888          | 0.36 %  |
| Phase A current [A]       | 51.0             | 51.0           | 0 %     |
| Phase B current [A]       | 51.1             | 51.1           | 0 %     |
| Phase C current [A]       | 51.1             | 51.1           | 0 %     |

## Inversor 2

La figura 6.10. muestra los valores recopilados del inversor 2 por medio del script. A continuación, se va a describir e indicar a que pertenece cada uno de ellos:

- AC output power es la potencia total de salida en AC del inversor en ese momento. Este valor corresponde con el indicado en la figura 6.6 como P-ac.
- Daily power yields es la energía generada por la porción del complejo solar del TEC conectado al inversor 1 durante el día. Este valor se observa en la figura 6.6 en la casilla E-day.
- Total power yields representa la energía total generada por el sistema fotovoltaico captada por el inversor 2 desde el momento que fue conectado. Este valor se observa en la figura 6.6.
- Total DC power es la potencia total de entrada en DC del inversor en ese momento. Este valor se puede ver en la figura 6.7 en la parte superior.  
Asimismo, en esta figura se observa cada una de las entradas en DC del inversor 1 con respecto a la tensión, la corriente y la potencia.
- Phase A, B y C representa cada una de las fases de salida en corriente alterna del inversor. Sus valores se pueden corroborar con la figura 6.8.

- Por último, Internal Temperature representa un valor sumamente importante de conocer como lo es la temperatura de trabajo del inversor. Este se puede verificar en la figura 6.9.

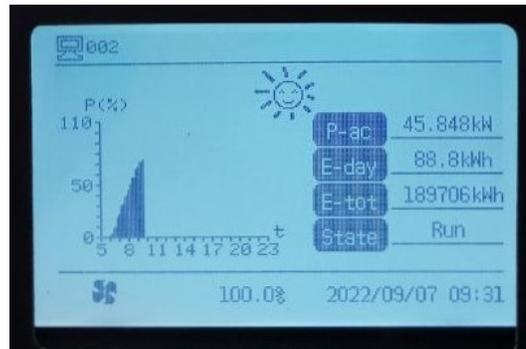


Figura 6.6: Pantalla principal del inversor 2.

The screenshot displays a table titled 'DC power input' with a total of 46626w. The table lists four DC channels (DC1 to DC4) with their respective voltage (Vdc), current (Idc), and power (Pdc) values.

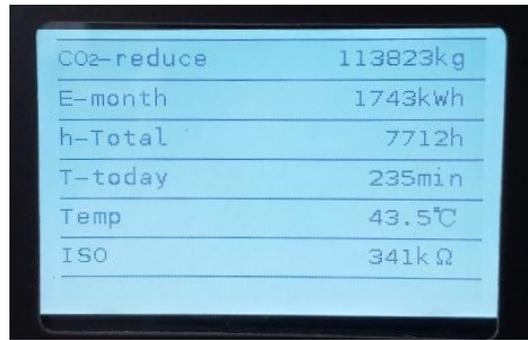
| DC power input |        | 46626w |        |
|----------------|--------|--------|--------|
|                | Vdc[V] | Idc[A] | Pdc[w] |
| DC1            | 688.2  | 22.2   | 15278  |
| DC2            | 674.3  | 20.2   | 13620  |
| DC3            | 673.3  | 13.3   | 8954   |
| DC4            | 669.8  | 13.1   | 8774   |

Figura 6.7: Datos de generación eléctrica en CD del inversor 2.

The screenshot displays a table with three columns labeled R, S, and T. The rows show AC output parameters: Vac (V), Iac (A), Pac (w), and F (Hz).

|        | R     | S     | T     |
|--------|-------|-------|-------|
| Vac[V] | 278.4 | 278.4 | 278.4 |
| Iac[A] | 54.5  | 54.4  | 54.4  |
| Pac[w] | 15213 | 15206 | 15184 |
| F[Hz]  | 60.00 | 60.00 | 60.00 |

Figura 6.8: Datos de generación eléctrica en AC del inversor 2.



|            |          |
|------------|----------|
| CO2-reduce | 113823kg |
| E-month    | 1743kwh  |
| h-Total    | 7712h    |
| T-today    | 235min   |
| Temp       | 43.5°C   |
| ISO        | 341kΩ    |

Figura 6.9: Resumen de la generación eléctrica del inversor 2.

```
-----Inversor 2-----  
AC output power(W) , 45828  
Daily power yields(kWh) , 88.4  
Total power yields(kWh) , 189706  
Internal Temperature(C) , 43.5  
DC voltage 1(V) , 686.5  
DC current 1(A) , 22.3  
DC voltage 2(V) , 675.5  
DC current 2(A) , 20.2  
DC voltage 3(V) , 671.4  
DC current 3(A) , 13.4  
DC voltage 4(V) , 663.9  
DC current 4(A) , 13.2  
Total DC power(W) , 46765  
Phase A current(A) , 54.7  
Phase B current(A) , 54.8  
Phase C current(A) , 54.7  
Last update time , 2022-9-7 9:30:45
```

Figura 6.10: Datos de generación eléctrica del inversor 2 obtenidos mediante el script.

En cuanto al porcentaje de error existente entre los valores presentes en el inversor 2 y los recopilados por medio del script, se tiene lo siguiente:

Tabla 6.2: Porcentaje de error de los datos de generación eléctrica recopilados con respecto a los presentes en el inversor 2.

| <b>Variable</b>           | <b>Valor Inversor 2</b> | <b>Valor obtenido</b> | <b>% Error</b> |
|---------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|
| AC output power [W]       | 45848                   | 45828                 | 0.04 %         |
| Daily power yields [kWh]  | 88.8                    | 88.4                  | 0.45 %         |
| Total power yields [kWh]  | 189706                  | 189706                | 0 %            |
| Internal temperature [°C] | 43.5                    | 43.5                  | 0 %            |
| DC voltage 1 [V]          | 688.2                   | 686.5                 | 0.25 %         |
| DC current 1 [A]          | 22.2                    | 22.3                  | 0.45 %         |
| DC voltage 2 [V]          | 674.3                   | 675.5                 | 0.18 %         |
| DC current 2 [A]          | 20.2                    | 20.2                  | 0 %            |
| DC voltage 3 [V]          | 673.3                   | 671.4                 | 0.28 %         |
| DC current 3 [A]          | 13.3                    | 13.4                  | 0.75 %         |
| DC voltage 4 [V]          | 669.8                   | 663.9                 | 0.88 %         |
| DC current 4 [A]          | 13.1                    | 13.2                  | 0.76 %         |
| Total DC power [W]        | 46628                   | 46765                 | 0.29 %         |
| Phase A current [A]       | 54.5                    | 54.7                  | 0.37 %         |
| Phase B current [A]       | 54.4                    | 54.8                  | 0.73 %         |
| Phase C current [A]       | 54.4                    | 54.7                  | 0.55 %         |

### 6.1.2. Growatt

En relación con los inversores de la marca Growatt, se debe mencionar que la cantidad de datos que se pueden observar es muy limitada, otorgando el fabricante solamente la posibilidad de leer del inversor la información contenida en la pantalla principal, donde se presenta un desglose de los valores diarios de generación tanto en corriente directa como alterna.

## Inversor 5

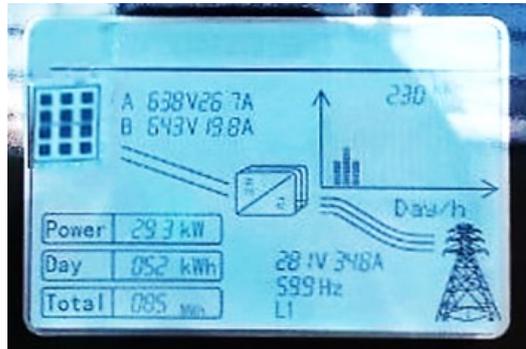


Figura 6.11: Pantalla principal del inversor 5.

```
----- Inversor 5 -----  
AC output power(W) , 29493.8  
Daily power yields(kwh) , 52.1  
Total power yields(kwh) , 85298.8  
Internal Temperature(C) , 51.5  
DC voltage 1(V) , 635.3  
DC current 1(A) , 26.6  
DC power 1(W) , 16898.9  
DC voltage 2(V) , 641.8  
DC current 2(A) , 19.8  
DC power 2(W) , 12707.6  
Total DC power(W) , 30095.7  
Phase A current(A) , 34.7  
Phase B current(A) , 35.4  
Phase C current(A) , 35.0  
Last update time , 2022-9-7 9:30:35
```

Figura 6.12: Datos de generación eléctrica del inversor 5 obtenidos mediante el script.

Tabla 6.3: Porcentaje de error de los datos de generación eléctrica recopilados con respecto a los presentes en el inversor 5.

| Variable                 | Valor Inversor 5 | Valor obtenido | % Error |
|--------------------------|------------------|----------------|---------|
| AC output power [W]      | 29300            | 29493          | 0.66 %  |
| Daily power yields [kWh] | 52.0             | 52.1           | 0.19 %  |
| Total power yields [kWh] | 85000            | 85298.8        | 0.35 %  |
| DC Voltage 1 [V]         | 638              | 635.3          | 0.42 %  |
| DC current 1 [A]         | 26.7             | 26.6           | 0.38 %  |
| DC power 1 [W]           | 17034.6          | 16898.9        | 0.80 %  |
| DC Voltage 2 [V]         | 643              | 641.8          | 0.19 %  |
| DC current 2 [A]         | 19.8             | 19.8           | 0 %     |
| DC power 2 [W]           | 12731.4          | 12707.6        | 0.19 %  |
| Total DC power [W]       | 29766            | 30095.7        | 1.11 %  |
| Phase A current [A]      | 34.8             | 34.7           | 0.29 %  |
| Phase B current [A]      | 34.8             | 35.4           | 1.72 %  |
| Phase C current [A]      | 34.8             | 35.0           | 0.57 %  |

## Inversor 6

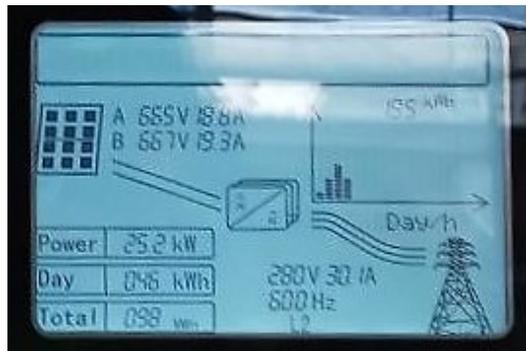


Figura 6.13: Pantalla principal del inversor 6.

```

----- Inversor 6 -----
AC output power(W) , 25248.1
Daily power yields(kwh) , 46.5
Total power yields(kwh) , 98228.6
Internal Temperature(C) , 47.7
DC voltage 1(V) , 665.5
DC current 1(A) , 18.8
DC power 1(W) , 12511.4
DC voltage 2(V) , 667.7
DC current 2(A) , 19.3
DC power 2(W) , 12886.6
Total DC power(W) , 25763.3
Phase A current(A) , 29.9
Phase B current(A) , 30.1
Phase C current(A) , 29.9
Last update time , 2022-9-7 9:28:43

```

Figura 6.14: Datos de generación eléctrica del inversor 6 obtenidos mediante el script.

Tabla 6.4: Porcentaje de error de los datos de generación eléctrica recopilados con respecto a los presentes en el inversor 6.

| Variable                 | Valor Inversor 6 | Valor obtenido | % Error |
|--------------------------|------------------|----------------|---------|
| AC output power [W]      | 25200            | 25248.1        | 0.19 %  |
| Daily power yields [kWh] | 46.0             | 46.5           | 1.09 %  |
| Total power yields [kWh] | 98000            | 98228.6        | 0.23 %  |
| DC Voltage 1 [V]         | 665              | 665.5          | 0.07 %  |
| DC current 1 [A]         | 18.8             | 18.8           | 0 %     |
| DC power 1 [W]           | 12502            | 12511.4        | 0.07 %  |
| DC Voltage 2 [V]         | 667              | 667.7          | 0.09 %  |
| DC current 2 [A]         | 19.3             | 19.3           | 0 %     |
| DC power 2 [W]           | 12873.1          | 12886.6        | 0.10 %  |
| Total DC power [W]       | 25375.1          | 25763.3        | 1.53 %  |
| Phase A current [A]      | 30.1             | 29.9           | 0.66 %  |
| Phase B current [A]      | 30.1             | 30.1           | 0 %     |
| Phase C current [A]      | 30.1             | 29.9           | 0.66 %  |

## Inversor 7

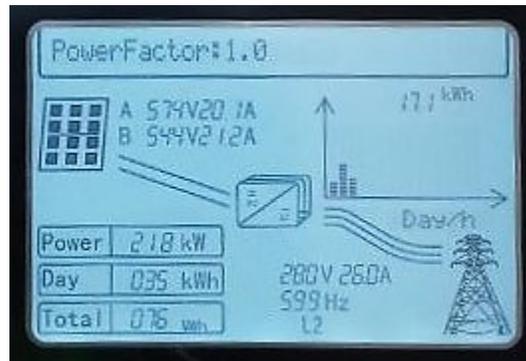


Figura 6.15: Pantalla principal del inversor 7.

```
----- Inversor 7 -----  
AC output power(W) , 21875.7  
Daily power yields(kwh) , 35.6  
Total power yields(kwh) , 76005.5  
Internal Temperature(C) , 46.0  
DC voltage 1(V) , 571.9  
DC current 1(A) , 20.2  
DC power 1(W) , 11552.3  
DC voltage 2(V) , 543.1  
DC current 2(A) , 21.2  
DC power 2(W) , 11513.7  
Total DC power(W) , 23066.0  
Phase A current(A) , 25.9  
Phase B current(A) , 26.0  
Phase C current(A) , 25.8  
Last update time , 2022-9-7 9:29:57
```

Figura 6.16: Datos de generación eléctrica del inversor 7 obtenidos mediante el script.

Tabla 6.5: Porcentaje de error de los datos de generación eléctrica recopilados con respecto a los presentes en el inversor 7.

| Variable                 | Valor Inversor 7 | Valor obtenido | % Error |
|--------------------------|------------------|----------------|---------|
| AC output power [W]      | 21800            | 21875.7        | 0.35 %  |
| Daily power yields [kWh] | 35.0             | 35.6           | 1.71 %  |
| Total power yields [kWh] | 76000            | 76005.5        | 0.007 % |
| DC Voltage 1 [V]         | 574              | 571.9          | 0.37 %  |
| DC current 1 [A]         | 20.1             | 20.2           | 0.50 %  |
| DC power 1 [W]           | 11537.4          | 11552.3        | 0.13 %  |
| DC Voltage 2 [V]         | 544              | 543.1          | 0.17 %  |
| DC current 2 [A]         | 21.2             | 21.2           | 0 %     |
| DC power 2 [W]           | 11532.8          | 11513.7        | 0.16 %  |
| Total DC power [W]       | 23070.2          | 23066.0        | 0.02 %  |
| Phase A current [A]      | 26.0             | 25.9           | 0.38 %  |
| Phase B current [A]      | 26.0             | 26.0           | 0 %     |
| Phase C current [A]      | 26.0             | 25.8           | 0.78 %  |

### 6.1.3. Solar Edge

#### Inversor 8

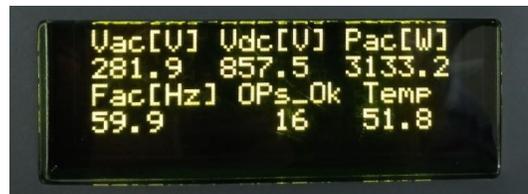


Figura 6.17: Pantalla principal del inversor 8.

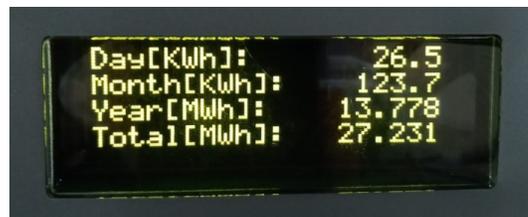


Figura 6.18: Pantalla principal del inversor 8.

```

-----Inversor 8-----
AC output power(w) , 3133
Total power yields(wh) , 27231052
Internal Temperature(C) , 51.78
DC voltage(V) , 856.8
DC current(A) , 3.711
Total DC power(w) , 3180
Phase A current(A) , 3.78
Phase B current(A) , 3.77
Phase C current(A) , 3.78
Phase A voltage(V) , 283.0
Phase B voltage(V) , 281.6
Phase C voltage(V) , 280.9
Last update time , 2022-10-04 14:32:32

```

Figura 6.19: Datos de generación eléctrica del inversor 8 obtenidos mediante el script.

Tabla 6.6: Porcentaje de error de los datos de generación eléctrica recopilados con respecto a los presentes en el inversor 8.

| Variable                  | Valor Inversor 8 | Valor obtenido | % Error |
|---------------------------|------------------|----------------|---------|
| AC output power [W]       | 3133.2           | 3133           | 0 %     |
| Total power yields [kWh]  | 27231            | 27231.05       | 0 %     |
| Internal temperature [°C] | 51.8             | 51.78          | 0.04 %  |
| DC voltage [V]            | 857.5            | 856.8          | 0.08 %  |
| Phase A voltage [V]       | 281.9            | 283.0          | 0.39 %  |

## Inversor 9

Como nota aclaratoria, el valor de temperatura mostrado en la figura 6.20 se encuentra en la escala Fahrenheit, por lo tanto se debe convertir a grados Celsius para que concuerde con lo recopilado por medio del script.

Para esto, es necesario utilizar la siguiente ecuación:

$$^{\circ}\text{C} = \frac{^{\circ}\text{F} - 32}{1,8} \quad (6.2)$$

$$^{\circ}\text{C} = \frac{102,7 - 32}{1,8} \quad (6.3)$$

$$^{\circ}\text{C} = 39,28 \quad (6.4)$$



Figura 6.20: Pantalla principal del inversor 8.



Figura 6.21: Pantalla principal del inversor 8.

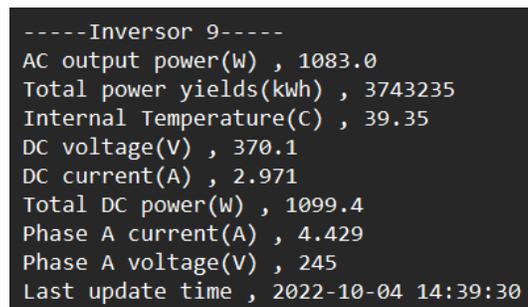


Figura 6.22: Datos de generación eléctrica del inversor 8 obtenidos mediante el script.

Tabla 6.7: Porcentaje de error de los datos de generación eléctrica recopilados con respecto a los presentes en el inversor 9.

| Variable                  | Valor Inversor 9 | Valor obtenido | % Error |
|---------------------------|------------------|----------------|---------|
| AC output power [W]       | 1083.1           | 1083.0         | 0.009 % |
| Total power yields [kWh]  | 3743             | 3743.23        | 0.006 % |
| Internal temperature [°C] | 39.28            | 39.35          | 0.178 % |
| DC Voltage [V]            | 369.4            | 370.1          | 0.189 % |
| Phase A voltage [V]       | 245.5            | 245            | 0.204 % |

## 6.2. Estimación del ahorro económico y de la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero

En las siguientes subsecciones se muestran una serie de cálculos realizados para cada uno de los inversores con respecto al ahorro económico y la reducción de emisiones.

Con este fin, se hizo uso de las ecuaciones 4.1 y 4.2, así como el dato real de la generación de energía eléctrica por inversor para el día 22 de setiembre del año 2022.

Tal y como se aprecia en las tablas 6.8 y 6.9, el algoritmo satisface con éxito lo propuesto en el indicador del objetivo 2, donde se indica que los resultados de este deben coincidir en un 99 % con los cálculos realizados.

### 6.2.1. Ahorro económico diario

#### Inversor 1

$$\text{ahorro económico diario} = 192,9 \text{ kWh} \times 66,57 \frac{\text{colones}}{\text{kWh}} \quad (6.5)$$

$$\text{ahorro económico diario} = 12841,35 \text{ colones} \quad (6.6)$$

```
-----Inversor 1-----
Ahorro económico diario = 12841.35 colones
```

Figura 6.23: Ahorro económico diario del inversor 1 retornado por el algoritmo.

#### Inversor 2

$$\text{ahorro económico diario} = 206,9 \text{ kWh} \times 66,57 \frac{\text{colones}}{\text{kWh}} \quad (6.7)$$

$$\text{ahorro económico diario} = 13773,33 \text{ colones} \quad (6.8)$$

```
-----Inversor 2-----
Ahorro económico diario = 13773.33 colones
```

Figura 6.24: Ahorro económico diario del inversor 2 retornado por el algoritmo.

**Inversor 5**

$$\text{ahorro económico diario} = 124,9 \text{ kWh} \times 66,57 \frac{\text{colones}}{\text{kWh}} \quad (6.9)$$

$$\text{ahorro económico diario} = 8314,59 \text{ colones} \quad (6.10)$$

```
-----Inversor 5-----
Ahorro económico diario = 8314.59 colones
```

Figura 6.25: Ahorro económico diario del inversor 5 retornado por el algoritmo.

**Inversor 6**

$$\text{ahorro económico diario} = 113,8 \text{ kWh} \times 66,57 \frac{\text{colones}}{\text{kWh}} \quad (6.11)$$

$$\text{ahorro económico diario} = 7575,67 \text{ colones} \quad (6.12)$$

```
-----Inversor 6-----
Ahorro económico diario = 7575.67 colones
```

Figura 6.26: Ahorro económico diario del inversor 6 retornado por el algoritmo.

**Inversor 7**

$$\text{ahorro económico diario} = 93,5 \text{ kWh} \times 66,57 \frac{\text{colones}}{\text{kWh}} \quad (6.13)$$

$$\text{ahorro económico diario} = 6224,29 \text{ colones} \quad (6.14)$$

```
-----Inversor 7-----
Ahorro económico diario = 6224.29 colones
```

Figura 6.27: Ahorro económico diario del inversor 7 retornado por el algoritmo.

**Inversor 8**

$$\text{ahorro económico diario} = 17,73 \text{ kWh} \times 66,57 \frac{\text{colones}}{\text{kWh}} \quad (6.15)$$

$$\text{ahorro económico diario} = 1180,42 \text{ colones} \quad (6.16)$$

```
-----Inversor 8-----
Ahorro económico diario = 1180.42 colones
```

Figura 6.28: Ahorro económico diario del inversor 8 retornado por el algoritmo.

**Inversor 9**

$$\text{ahorro económico diario} = 8,03 \text{ kWh} \times 66,57 \frac{\text{colones}}{\text{kWh}} \quad (6.17)$$

$$\text{ahorro económico diario} = 534,42 \text{ colones} \quad (6.18)$$

```
-----Inversor 9-----
Ahorro económico diario = 534.42 colones
```

Figura 6.29: Ahorro económico diario del inversor 9 retornado por el algoritmo.

Tabla 6.8: Porcentaje de coincidencia entre los datos estimados de ahorro económico de gases de efecto invernadero y los valores retornados por el algoritmo.

| <b>Inversor</b> | <b>Ahorro económico algoritmo [¢]</b> | <b>Ahorro económico calculado [¢]</b> | <b>% Coincidencia</b> |
|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Inversor 1      | 12841.35                              | 12841.35                              | 100 %                 |
| Inversor 2      | 13773.33                              | 13773.33                              | 100 %                 |
| Inversor 5      | 8314.59                               | 8314.59                               | 100 %                 |
| Inversor 6      | 7575.67                               | 7575.67                               | 100 %                 |
| Inversor 7      | 6224.29                               | 6224.29                               | 100 %                 |
| Inversor 8      | 1180.42                               | 1180.42                               | 100 %                 |
| Inversor 9      | 534.42                                | 534.42                                | 100 %                 |

### 6.2.2. Reducción diaria de emisiones de gases de efecto invernadero

#### Inversor 1

$$\text{reducción diaria emisiones} = 192,9 \text{ kWh} \times 0,0400 \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{kWh}} \quad (6.19)$$

$$\text{reducción diaria emisiones} = 7,72 \text{ kgCO}_2\text{eq} \quad (6.20)$$

```
-----Inversor 1-----
Reducción diaria emisiones = 7.72 kgCO2eq
```

Figura 6.30: Reducción diaria de emisiones del inversor 1 retornado por el algoritmo.

#### Inversor 2

$$\text{reducción diaria emisiones} = 206,9 \text{ kWh} \times 0,0400 \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{kWh}} \quad (6.21)$$

$$\text{reducción diaria emisiones} = 8,28 \text{ kgCO}_2\text{eq} \quad (6.22)$$

```
-----Inversor 2-----
Reducción diaria emisiones = 8.28 kgCO2eq
```

Figura 6.31: Reducción diaria de emisiones del inversor 2 retornado por el algoritmo.

#### Inversor 5

$$\text{reducción diaria emisiones} = 124,9 \text{ kWh} \times 0,0400 \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{kWh}} \quad (6.23)$$

$$\text{reducción diaria emisiones} = 5,00 \text{ kgCO}_2\text{eq} \quad (6.24)$$

```
-----Inversor 5-----
Reducción diaria emisiones = 5.0 kgCO2eq
```

Figura 6.32: Reducción diaria de emisiones del inversor 5 retornado por el algoritmo.

**Inversor 6**

$$\text{reducción diaria emisiones} = 113,8 \text{ kWh} \times 0,0400 \frac{\text{kgCO2eq}}{\text{kWh}} \quad (6.25)$$

$$\text{reducción diaria emisiones} = 4,55 \text{ kgCO2eq} \quad (6.26)$$

```
-----Inversor 6-----  
Reducción diaria emisiones = 4.55 kgCO2eq
```

Figura 6.33: Reducción diaria de emisiones del inversor 6 retornado por el algoritmo.

**Inversor 7**

$$\text{reducción diaria emisiones} = 93,5 \text{ kWh} \times 0,0400 \frac{\text{kgCO2eq}}{\text{kWh}} \quad (6.27)$$

$$\text{reducción diaria emisiones} = 3,74 \text{ kgCO2eq} \quad (6.28)$$

```
-----Inversor 7-----  
Reducción diaria emisiones = 3.74 kgCO2eq
```

Figura 6.34: Reducción diaria de emisiones del inversor 7 retornado por el algoritmo.

**Inversor 8**

$$\text{reducción diaria emisiones} = 17,73 \text{ kWh} \times 0,0400 \frac{\text{kgCO2eq}}{\text{kWh}} \quad (6.29)$$

$$\text{reducción diaria emisiones} = 0,71 \text{ kgCO2eq} \quad (6.30)$$

```
-----Inversor 8-----  
Reducción diaria emisiones = 0.71 kgCO2eq
```

Figura 6.35: Reducción diaria de emisiones del inversor 8 retornado por el algoritmo.

**Inversor 9**

$$\text{reducción diaria emisiones} = 8,03 \text{ kWh} \times 0,0400 \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{kWh}} \quad (6.31)$$

$$\text{reducción diaria emisiones} = 0,32 \text{ kgCO}_2\text{eq} \quad (6.32)$$

```
-----Inversor 9-----
Reducción diaria emisiones = 0.32 kgCO2eq
```

Figura 6.36: Reducción diaria de emisiones del inversor 9 retornado por el algoritmo.

Tabla 6.9: Porcentaje de coincidencia entre los datos estimados de reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero y los valores retornados por el algoritmo.

| <b>Inversor</b> | <b>Reducción de emisiones algoritmo [kgCO<sub>2</sub>eq]</b> | <b>Reducción de emisiones calculado [kgCO<sub>2</sub>eq]</b> | <b>% Coincidencia</b> |
|-----------------|--|--|-----------------------|
| Inversor 1      | 7.72   | 7.72   | 100 %                 |
| Inversor 2      | 8.28   | 8.28   | 100 %                 |
| Inversor 5      | 5.00   | 5.00   | 100 %                 |
| Inversor 6      | 4.55   | 4.55   | 100 %                 |
| Inversor 7      | 3.74   | 3.74   | 100 %                 |
| Inversor 8      | 0.71   | 0.71   | 100 %                 |
| Inversor 9      | 0.32   | 0.32   | 100 %                 |

## 6.3. Plataforma de monitoreo

### 6.3.1. Método de análisis gráfico

Una tarea sumamente importante de realizar es comprobar que el contenido de los gráficos creados para monitorear el comportamiento de las variables eléctricas concuerda con los datos almacenados en los archivos CSV.

Con este fin, se agrega la figura 6.48, donde se muestra el comportamiento de la potencia y la temperatura durante todo el rango de trabajo del inversor, esto es desde que sale el sol hasta que se oculta. Este comportamiento pertenece al Inversor 1 en el día 19 de octubre del año 2022.

Ahora bien, para comprobar que esta gráfica fue creada utilizando los datos almacenados, primero se realizó un acercamiento a la caída en la potencia cercana al medio día y se leyeron los valores. Estos son los presentes en las figuras 6.38, 6.39 y 6.40.

Luego, se tomó otro punto de referencia, por ejemplo, el pico máximo de potencia y se observaron los valores, los cuales se muestran en las figuras 6.41, 6.42 y 6.43. Si todo esta correcto, estos valores deberían coincidir con los almacenados en el documento CSV.

Para corroborar esto, una vez obtenidos los puntos, se procedió a buscar el documento CSV correspondiente con las lecturas del día que se desea conocer. Los datos almacenados se observan en la figura 6.44.

De acuerdo con las tablas 6.10 y 6.11, los valores mostrados en los gráficos coinciden con los valores de generación eléctrica previamente almacenados.

Tabla 6.10: Comprobación de la coincidencia entre los datos almacenados y los mostrados en los gráficos para el día 19 de octubre del 2022 a las 11:03am.

| Variable    | Valores CSV | Valores gráfico |
|-------------|-------------|-----------------|
| Potencia DC | 30675       | 30675           |
| Potencia AC | 30057       | 30057           |
| Temperatura | 47.7        | 47.7            |
| Hora        | 11:03       | 11:03           |

Tabla 6.11: Comprobación de la coincidencia entre los datos almacenados y los mostrados en los gráficos para el día 19 de octubre del 2022 a las 11:17am.

| Variable    | Valores CSV | Valores gráfico |
|-------------|-------------|-----------------|
| Potencia DC | 53823       | 53823           |
| Potencia AC | 52071       | 52071           |
| Temperatura | 47.2        | 47.2            |
| Hora        | 11:17       | 11:17           |



Figura 6.37: Comportamiento de la potencia y la temperatura durante el día 19 de octubre del año 2022.



Figura 6.38: Valor de la potencia en DC a las 11:03am según el gráfico.

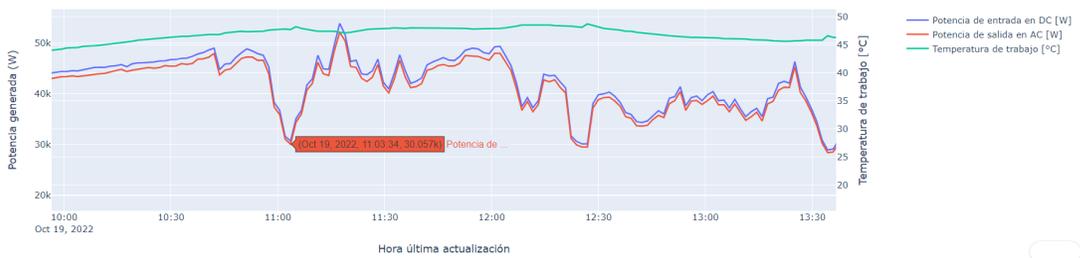


Figura 6.39: Valor de la potencia en AC a las 11:03am según el gráfico.

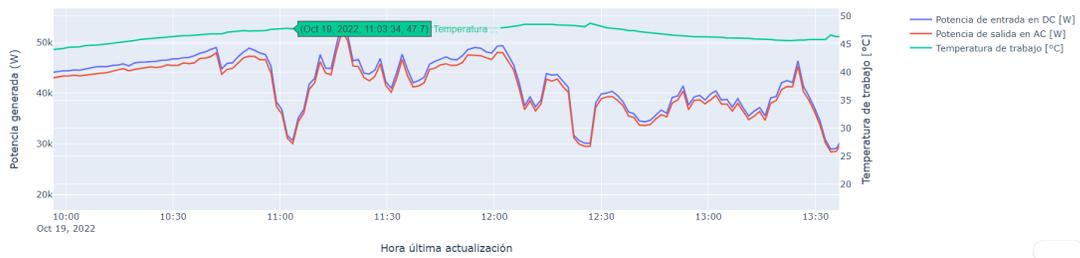


Figura 6.40: Valor de la temperatura a las 11:03am según el gráfico.

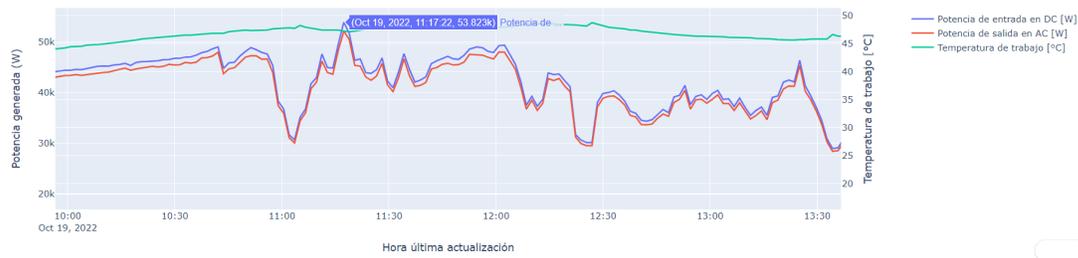


Figura 6.41: Valor de la potencia en DC a las 11:17am según el gráfico.



Figura 6.42: Valor de la potencia en AC a las 11:17am según el gráfico.



Figura 6.43: Valor de la temperatura a las 11:17am según el gráfico.

|     | A               | B           | C         | D             | E          | F          | G          | H          | I          | J          | K          | L          | M              | N          | O          | P          | Q         | R         | S         | T                |
|-----|-----------------|-------------|-----------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| 228 | AC output power | Daily power | Total pow | Internal Temp | DC voltage | DC current | Total DC power | Phase A cu | Phase B cu | Phase C cu | Phase A w | Phase B w | Phase C w | Last update time |
| 229 | 35880           | 141.6       | 197010    | 47.8          | 682.1      | 10.7       | 667.5      | 16.7       | 663.1      | 11.1       | 662        | 16.5       | 36728          | 42.7       | 42.7       | 42.9       | 279.2     | 280       | 280.8     | 19/10/2022 11:00 |
| 230 | 31083           | 142.5       | 197010    | 47.8          | 690        | 9.1        | 669.6      | 14.4       | 666.6      | 9.5        | 670.1      | 14         | 31634          | 36.9       | 37         | 37         | 278.4     | 279.2     | 279.2     | 19/10/2022 11:02 |
| 231 | 30057           | 143.2       | 197011    | 47.7          | 693.1      | 8.8        | 675.6      | 13.8       | 672.1      | 9.1        | 676.6      | 13.5       | 30675          | 35.9       | 36.1       | 36         | 278.4     | 280       | 279.2     | 19/10/2022 11:03 |
| 232 | 34362           | 144.1       | 197012    | 48.2          | 694.6      | 10         | 673.2      | 15.8       | 672.7      | 10.4       | 672.2      | 15.6       | 35064          | 41.1       | 41.1       | 41.1       | 279.2     | 280.8     | 280.8     | 19/10/2022 11:05 |
| 233 | 35978           | 145         | 197013    | 47.9          | 695.5      | 10.5       | 677.4      | 16.5       | 672        | 10.9       | 673.5      | 16.2       | 36713          | 42.8       | 42.8       | 42.7       | 277.6     | 278.4     | 278.4     | 19/10/2022 11:06 |
| 234 | 40720           | 146         | 197014    | 47.7          | 691.7      | 12         | 670.6      | 18.9       | 675.2      | 12.3       | 671.7      | 18.5       | 41704          | 48.6       | 48.5       | 48.7       | 279.2     | 280       | 280.8     | 19/10/2022 11:08 |
| 235 | 42012           | 147.1       | 197015    | 47.6          | 692        | 12.4       | 673.9      | 19.4       | 672.4      | 12.7       | 672.5      | 18.9       | 42902          | 49.7       | 49.7       | 49.6       | 278.4     | 280       | 279.2     | 19/10/2022 11:09 |
| 236 | 46167           | 148.2       | 197016    | 47.4          | 686.2      | 13.8       | 668.8      | 21.5       | 668.8      | 14.2       | 666.3      | 21.3       | 47536          | 55         | 55.1       | 55.1       | 279.2     | 280.8     | 280.8     | 19/10/2022 11:11 |
| 237 | 43901           | 149.4       | 197017    | 47.4          | 685.2      | 13.1       | 670.6      | 20.3       | 667.6      | 13.4       | 671.1      | 19.9       | 44888          | 52.1       | 52.1       | 52.3       | 278.4     | 279.2     | 280       | 19/10/2022 11:12 |
| 238 | 43576           | 150.5       | 197018    | 47.4          | 686.6      | 13         | 668.5      | 20.3       | 667.1      | 13.4       | 664.1      | 20.1       | 44782          | 52.1       | 52.1       | 52.1       | 278.4     | 279.2     | 280       | 19/10/2022 11:14 |
| 239 | 48299           | 151.7       | 197020    | 47.4          | 680.6      | 14.5       | 663.4      | 22.6       | 661.2      | 15         | 659.2      | 22.4       | 49544          | 57.5       | 57.5       | 57.6       | 278.4     | 279.2     | 280       | 19/10/2022 11:15 |
| 240 | 52071           | 153         | 197021    | 47.2          | 673.6      | 16         | 660.9      | 24.6       | 660        | 16.3       | 657        | 24.4       | 53823          | 62.2       | 62.2       | 62.3       | 279.2     | 279.2     | 280.8     | 19/10/2022 11:17 |
| 241 | 50365           | 154.3       | 197022    | 47.1          | 671        | 15.4       | 658.9      | 23.7       | 655.5      | 15.7       | 658        | 23.3       | 51570          | 59.7       | 59.6       | 59.6       | 277.6     | 278.4     | 279.2     | 19/10/2022 11:18 |
| 242 | 45323           | 155.6       | 197024    | 47.2          | 673        | 13.8       | 656        | 21.5       | 653        | 14.2       | 651.6      | 21.1       | 46322          | 53.9       | 53.8       | 53.9       | 279.2     | 280       | 280.8     | 19/10/2022 11:20 |
| 243 | 45159           | 156.7       | 197025    | 47.4          | 673.6      | 13.8       | 661.1      | 21.3       | 658.2      | 14.1       | 650.6      | 21.3       | 46577          | 54.2       | 54.2       | 54.2       | 277.6     | 278.4     | 278.4     | 19/10/2022 11:21 |
| 244 | 43029           | 157.8       | 197026    | 47.5          | 670.7      | 13.1       | 657.1      | 20.3       | 653.7      | 13.4       | 651.2      | 20.1       | 43891          | 51.1       | 51.1       | 51.1       | 280       | 280       | 279.2     | 19/10/2022 11:23 |
| 245 | 42381           | 158.9       | 197027    | 47.7          | 672.7      | 13         | 652.7      | 20.2       | 657.2      | 13.3       | 654.1      | 20         | 43751          | 50.9       | 51         | 51         | 276.8     | 278.4     | 278.4     | 19/10/2022 11:25 |
| 246 | 43244           | 160         | 197028    | 47.8          | 672.3      | 13.2       | 655.7      | 20.4       | 653.7      | 13.5       | 652        | 20.4       | 44469          | 51.7       | 51.9       | 51.9       | 279.2     | 280       | 280.8     | 19/10/2022 11:26 |
| 247 | 45728           | 161.2       | 197029    | 47.8          | 671.6      | 13.9       | 655.5      | 21.6       | 652.6      | 14.3       | 653.8      | 21.3       | 46790          | 54.3       | 54.4       | 54.3       | 276.8     | 278.4     | 278.4     | 19/10/2022 11:28 |
| 248 | 41470           | 162.3       | 197030    | 47.9          | 677.6      | 12.5       | 656.5      | 19.6       | 653.6      | 12.9       | 655        | 19.1       | 42228          | 49.1       | 49.1       | 49.2       | 279.2     | 279.2     | 280       | 19/10/2022 11:29 |
| 249 | 40134           | 163.3       | 197031    | 47.9          | 679.6      | 12         | 657.1      | 18.9       | 655.5      | 12.5       | 660.1      | 18.4       | 40912          | 47.8       | 47.9       | 47.7       | 277.6     | 278.4     | 278.4     | 19/10/2022 11:31 |
| 250 | 42878           | 164.4       | 197032    | 48            | 677.6      | 13         | 656.2      | 20.3       | 659.1      | 13.3       | 654.1      | 20         | 43994          | 51.1       | 51.2       | 51.1       | 278.4     | 279.2     | 278.4     | 19/10/2022 11:32 |
| 251 | 46583           | 165.5       | 197033    | 47.9          | 675        | 14.1       | 659        | 21.8       | 657.1      | 14.4       | 660        | 21.5       | 47627          | 55.4       | 55.5       | 55.4       | 279.2     | 280       | 279.2     | 19/10/2022 11:34 |
| 252 | 43299           | 166.7       | 197035    | 47.9          | 675.5      | 13.2       | 656.5      | 20.5       | 652.6      | 13.6       | 655        | 20.3       | 44545          | 51.7       | 51.8       | 51.8       | 276.8     | 277.6     | 278.4     | 19/10/2022 11:35 |
| 253 | 41176           | 167.8       | 197036    | 48            | 676.7      | 12.4       | 656.8      | 19.4       | 659.2      | 12.7       | 658.7      | 19         | 42018          | 49         | 49         | 49         | 279.2     | 280       | 280       | 19/10/2022 11:37 |

Figura 6.44: Datos de generación eléctrica almacenados para el día 19 de octubre del año 2022.

### 6.3.2. Interfaz de visualización de datos

En la parte superior de la plataforma de monitoreo se ubica la barra de navegación mostrada en la figura 6.45, la cual contiene: el nombre de la página, el desplegable que permite seleccionar entre los distintos inversores, el calendario que facilita la elección del día y dos entradas de datos, en las cuales se carga por defecto el valor del kWh y el factor de emisión vigente.

Complejo Solar TEC

Seleccione el inversor

Seleccione el día

Ingrese el valor del kWh

Ingrese el Factor de emisión

Figura 6.45: Diseño final de la barra de navegación.

Seguidamente, se presenta la primera sección de la plataforma, donde se encuentra la información diaria de todos los inversores del complejo solar.

La primer pestaña lleva como nombre Resumen diario del Complejo Solar, y esto se debe a que aquí se ubican las tarjetas, como se observa en la figura 6.46, que contienen los valores totales diarios para el ahorro económico, la reducción de emisiones y la generación de electricidad.

La segunda pestaña, por su parte, posee como nombre Generación de electricidad, y en esta se muestra el contenido de la figura 6.47, donde se aprecian 2 gráficos, el de barras funciona para comparar la contribución de cada uno de los inversores con respecto a la generación de energía, mientras que el circular permite conocer cuánto significa el aporte energético pero de manera porcentual.

Información diaria de todos los inversores del Complejo Solar



Figura 6.46: Diseño final de las tarjetas que contienen los valores estimados y la generación eléctrica total diaria.

Información diaria de todos los inversores del Complejo Solar

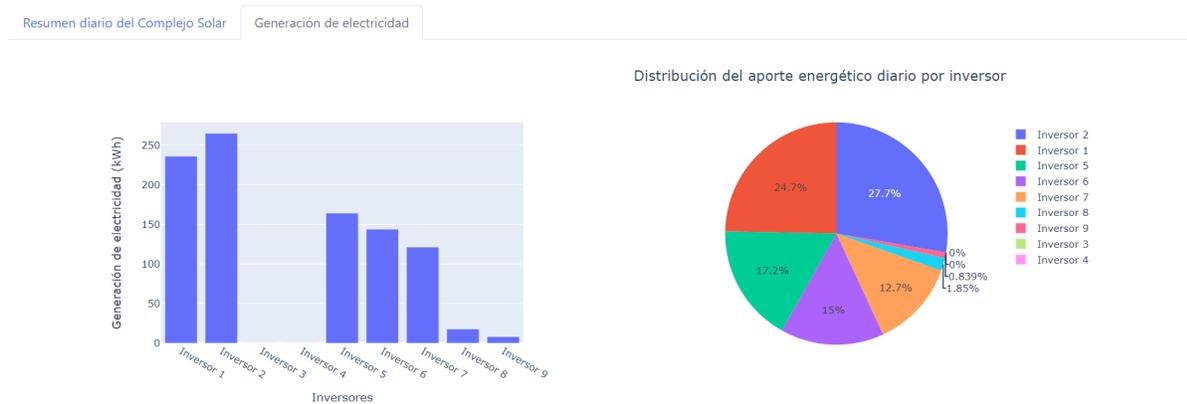


Figura 6.47: Diseño final de los gráficos de barras y circulares que muestran la distribución del aporte energético diario.

En la siguiente sección se observa la información diaria para cada inversor del Complejo Solar. Aquí se detallan las distintas variables adquiridas, las cuales permiten mantener un monitoreo constante del funcionamiento del inversor. Para una mejor visualización de los gráficos, estos se separaron por pestañas:

- Potencia generada:** Esta pestaña muestra el gráfico de la figura 6.48, donde se visualiza el comportamiento de la potencia de entrada en DC, la potencia de salida en AC y la temperatura del inversor en grados Celsius durante todo el rango de trabajo, es decir, desde que salió el sol hasta que se ocultó.
- Tensión DC:** En la figura 6.49, se observan las líneas de tensión de entrada en DC del inversor. Cada una de estas líneas representa una cadena de paneles solares, por consiguiente, en caso de un posible fallo, tener control sobre ellas permite delimitar la zona de afectación y reducir el tiempo de respuesta.
- Corriente DC:** En dicha pestaña se aprecia el contenido de la figura 6.50, el cual corresponde con la entrada de corriente en DC. Es importante acotar que para cada línea de tensión debe existir una línea de corriente.

- **Tensión AC:** Aquí se visualiza el comportamiento de las líneas de salida con respecto a la tensión. Asimismo, el gráfico mostrado en esta pestaña corresponde con el de la figura 6.51.
- **Corriente AC:** Esta pestaña contiene el gráfico de la figura 6.52, que permite visualizar el funcionamiento de las líneas de salida con respecto a la corriente.
- **Resumen del inversor:** Para finalizar, se muestran las tarjetas de la figura 6.53, donde se indica cual es el ahorro económico, la reducción de emisiones y la generación eléctrica de cada inversor para el día seleccionado.

Información diaria para cada inversor del Complejo Solar



Figura 6.48: Diseño final de los gráficos de potencia en DC y AC, así como de la temperatura del inversor.

Información diaria para cada inversor del Complejo Solar



Figura 6.49: Diseño final de los gráficos de tensión en DC.

Información diaria para cada inversor del Complejo Solar



Figura 6.50: Diseño final de los gráficos de corriente en DC.

Información diaria para cada inversor del Complejo Solar



Figura 6.51: Diseño final de los gráficos de tensión en AC.

Información diaria para cada inversor del Complejo Solar



Figura 6.52: Diseño final de los gráficos de corriente en AC.

Información diaria para cada inversor del Complejo Solar



Figura 6.53: Diseño final de las tarjetas que contienen los valores estimados y la generación eléctrica diaria por inversor.

En la última sección de la plataforma se encuentran los datos históricos del Complejo Solar. Estos se añadieron como un valor agregado al desarrollo del proyecto.

Como se aprecia en la figura 6.54, se colocaron tarjetas que contienen una estimación de los valores históricos del ahorro económico y de la reducción de emisiones, así como la cantidad de electricidad generada desde que el Complejo Solar fue construido hasta la fecha.

Aunado a esto, se agregó también el contenido de la figura 6.55, donde se muestra como se distribuye la cantidad de electricidad generada por cada inversor a lo largo del tiempo.

Datos históricos del Complejo Solar



Figura 6.54: Diseño final de las tarjetas que contienen los valores estimados y la generación eléctrica total histórico del Complejo Solar.

Datos históricos del Complejo Solar

Resumen histórico del Complejo Solar

Generación de electricidad

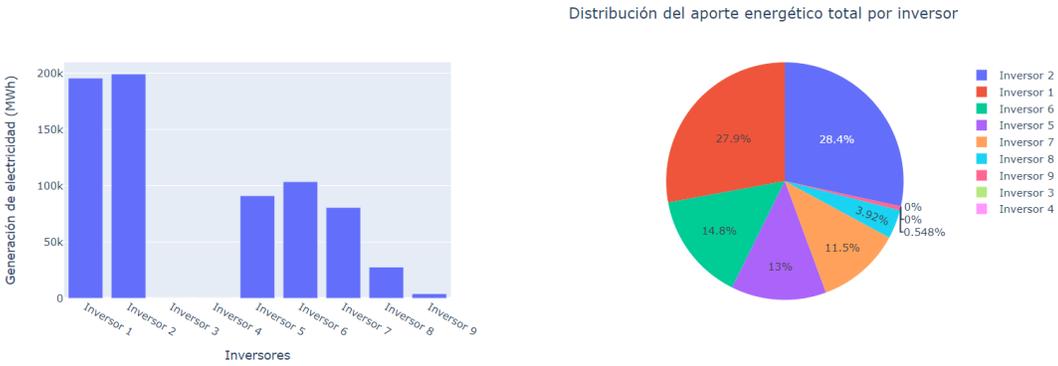


Figura 6.55: Diseño final de los gráficos de barras y circulares que muestran la distribución del aporte energético histórico del Complejo Solar.

# Capítulo 7

## Conclusiones y recomendaciones

### 7.1. Conclusiones

1. Los scripts desarrollados permitieron establecer la comunicación entre la Raspberry Pi y los distintos inversores, logrando que la extracción y el almacenamiento de los datos de generación eléctrica se llevara a cabo con menos de un 1.72 % de error con respecto a los valores medidos en cada uno de los inversores.
2. Las estimaciones obtenidas para las variables del ahorro económico y la reducción de emisiones por medio del algoritmo generado presentaron un 100 % de coincidencia con los cálculos realizados, lo que indica que la ejecución del algoritmo es óptima.
3. Los datos contenidos en los gráficos realizados para analizar el comportamiento de las variables eléctricas coinciden con los valores de generación eléctrica previamente almacenados, lo que permite el monitoreo de la actividad diaria del Complejo Solar del TEC.

### 7.2. Recomendaciones

1. Leer la hoja de datos así como el manual de usuario específico del equipo con el que se está trabajando minimiza la cantidad de errores que se pueden cometer en la fase de diseño y maximiza el tiempo a la hora de ejecutar la implementación, ya que en una misma marca, la manera de comunicarse por medio de Modbus o la forma de conectar varios inversores puede variar de modelo a modelo.
2. Desarrollar una interfaz gráfica que permita implementar cambios en los scripts de recolección y almacenamiento de manera más sencilla, como por ejemplo: añadir nuevos valores que se deseen conocer de los inversores, cambiar la dirección de acceso de los registros Modbus, cambiar la ruta donde se almacenan los datos, etc.

3. Seguir trabajando en la plataforma de monitoreo para detallar más la parte estética y agregarle nuevas secciones y funcionalidades, tales como: una sección que hable acerca del Complejo Solar o del SESLab, la posibilidad de descargar reportes de los datos presentes en pantalla, poder comparar la información de generación eléctrica entre diferentes meses o años, etc.

# Bibliografía

- [1] K. Johnson. "Virtual Assistants". The Machine - Making sense of AI. [En línea], URL: <https://venturebeat.com/2016/12/30/2016-chat-wars-are-over-amazon-won/>.
- [2] B.K. Bose. Global energy scenario and impact of power electronics in 21st century. [En línea], URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6214597>.
- [3] J. D. van Wyk and F. Lee, "On a Future for Power Electronics". [En línea], URL: <https://isiarticles.com/bundles/Article/pre/pdf/53161.pdf>.
- [4] "HITACHI Energy". POWER ELECTRONICS: REVOLUTIONIZING THE WORLD'S FUTURE ENERGY SYSTEMS. [En línea], URL: <https://www.hitachienergy.com/es/es/news/perspectives/2021/08/power-electronics-revolutionizing-the-world-s-future-energy-systems>.
- [5] "TEC: Tecnológico de Costa Rica". Tecnológico de Costa Rica. [En línea], URL: <https://www.tec.ac.cr/>.
- [6] "SESLab by Costa Rica Tech". Escuela de Ingeniería Electrónica. [En línea], URL: <http://www.ie.tec.ac.cr/seslab/>.
- [7] E. Ortega, G. Aranguren, M. Saenz, R. Gutierrez, and J. Jimeno, "Study of photovoltaic systems monitoring methods". IEEE, Junio 2017.
- [8] S. Kurtz, N. Haegel, R. Sinton y R. Margolis, 'A new era for solar'. Nature photonics, vol. 11, pp. 3-5, 2017
- [9] "What is Solar Energy and How Do Solar Panels Work?" SunPower - United States. [En línea], URL: <https://us.sunpower.com/solar-array-definition>.
- [10] "¿Qué beneficios tiene la energía solar? | ACCIONA | Business as unusual". Experts in designing a better planet | ACCIONA | Business as unusual. [En línea], URL: <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energía-solar/>.
- [11] C. Meza, "Seslab promueve e investiga en energías renovables", Investiga.TEC, no. 14, pp. 12-13, [En línea], URL: <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/investiga-tec/article/view/705/636>

- [12] O. Perpiñan, "Energía solar fotovoltaica,". [En línea]. URL: <https://oscarperpinan.github.io/esf/ESF.pdf>
- [13] 'Energía Solar: tipos de generación en América Latina'. Banco de Desarrollo de América Latina. [En línea]. URL: <https://onx.la/58df8>.
- [14] M. A. Abella. "Sistemas fotovoltaicos". academia.edu. [En línea]. URL: [https://www.academia.edu/download/38373658/SISTEMAS\\_FOTOVOLTAICOS.pdf](https://www.academia.edu/download/38373658/SISTEMAS_FOTOVOLTAICOS.pdf)
- [15] A. Aranzabal Olea. "Semiconductores". UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia. [En línea]. URL: [https://www2.uned.es/cabergara/ppropias/Morillo/web\\_et\\_dig/02\\_semiconduc/diodos.pdf](https://www2.uned.es/cabergara/ppropias/Morillo/web_et_dig/02_semiconduc/diodos.pdf)
- [16] J. Delgado Avendaño. "FISICANOVA (Una aproximación a la realidad)". Google Books. [En línea]. URL: <https://onx.la/0bff6>
- [17] M. Vilaragut Llanes, G. Duyos Podadera y M. Castro Fernández. "Modelación del funcionamiento de un parque fotovoltaico de 1MW, conectado a la red eléctrica". ResearchGate. [En línea]. URL: <https://onx.la/9d35b>
- [18] J. A. A. Lorenzo. "Célula Fotovoltaica: Estructura y Tipo de Aplicación". SunFields Mayorista fotovoltaica: Placas solares, Inversores. [En línea]. URL: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/celula-fotovoltaica-estructura-tipo-aplicacion/>
- [19] A. Amuse. "Voltaje, corriente y funcionamiento de sistemas solares". Electricaplicada. [En línea]. URL: <https://onx.la/8571a>.
- [20] J. F. Sandoval Vásquez y F. Li Bonilla. 'El modelo de regulación tarifaria para el servicio de electricidad y el costo de la energía eléctrica en Costa Rica — Revista Nacional de Administración'. Revistas UNED. [En línea]. URL: <https://revistas.uned.ac.cr/index.php/rna/article/view/822>.
- [21] 'Antecedentes e Historia'. ARESEP — Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos. [En línea]. URL: <https://aresep.go.cr/aresep/antecedentes-historia>.
- [22] S. Salaet Fernández y J. Roca Jusmet. 'AGOTAMIENTO DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES Y EMISIONES DE CO<sub>2</sub>: ALGUNOS POSIBLES ESCENARIOS FUTUROS DE EMISIONES'. Sistema de Información Científica Redalyc, Red de Revistas Científicas. [En línea]. URL: <https://www.redalyc.org/pdf/391/39113124001.pdf>
- [23] I. Laguna. "Generación de energía eléctrica y medio ambiente". Dialnet. [En línea]. URL: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2887469>

- [24] "GUÍA PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO Y PARA LA ELABORACIÓN DE UN PLAN DE MEJORA DE UNA ORGANIZACIÓN". Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. [En línea]. URL: [https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guia\\_huella\\_carbono\\_tcm30-479093.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guia_huella_carbono_tcm30-479093.pdf).
- [25] K. Reitz and T. Schlusser, The Hitchhiker's Guide to Python: Best Practices for Development, 1st ed. O'Reilly, 2016.
- [26] M. Nosrati, "Python: An appropriate language for real world programming," World Applied Programming, vol. 1, no. 2, pp. 110–117, June 2011. [En línea]. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.678.2551rep=rep1type=pdf>
- [27] "Lenguajes de guiones (Scripting languages)". Wayback Machine. [En línea]. URL: <https://web.archive.org/web/20160303015918/http://lml.ls.fi.upm.es/ep/script.html>.
- [28] "Programming is Hard, Let's Go Scripting..." Perl.com. [En línea]. URL: <https://www.perl.com/pub/2007/12/06/soto-11.htm/>.
- [29] "Modbus". The Modbus Organization. [En línea]. URL: <https://modbus.org/faq.php>.
- [30] 'Información detallada sobre el protocolo Modbus'. Engineer Ambitiously - NI. [En línea]. URL: <https://www.ni.com/es-cr/innovations/white-papers/14/the-modbus-protocol-in-depth.html>.
- [31] 'INGENIERIA EN MICROCONTROLADORES Protocolo RS-485'. i-micro. [En línea]. URL: <http://www.electronica60norte.com/mwfls/pdf/rs-485.pdf>.
- [32] "Modicon Modbus Protocol Reference Guide". The Modbus Organization. [En línea]. URL: [https://modbus.org/docs/PI\\_MBUS\\_300.pdf](https://modbus.org/docs/PI_MBUS_300.pdf).
- [33] "MinimalModbus 2.0.1 documentation". Welcome to MinimalModbus. [En línea], URL: <https://minimalmodbus.readthedocs.io/en/stable/usage.html>.
- [34] 'CSV - Lectura y escritura de archivos CSV — documentación de Python - 3.10.7'. Python.org. [En línea], URL: <https://docs.python.org/es/3/library/csv.html>.
- [35] "Tarifas vigentes de electricidad". ARESEP — Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos. [En línea], URL: <https://aresep.go.cr/electricidad/tarifas>.
- [36] "Factores de emisión de gases de efecto invernadero". IMN Cambio Climático. [En línea], URL: <http://cglobal.imn.ac.cr/wp-content/uploads/2022/07/FactoresEmision-GEI-2022-1.pdf>.
- [37] "pandas - Python Data Analysis Library". pandas. [En línea], URL: <https://pandas.pydata.org/about/index.html>.

- [38] "Plotly, Inc." Plotly: Low-Code Data App Development. [En línea], URL: <https://plotly.com/about-us/>.
- [39] 'Introduction — Dash for Python Documentation — Plotly'. Dash Documentation User Guide — Plotly. [En línea], URL: <https://dash.plotly.com/introduction>.
- [40] 'Introduction to HTML 4.0'. World Wide Web Consortium (W3C). [En línea], URL: <https://www.w3.org/TR/REC-html40-971218/intro/intro.html>.
- [41] "Bootstrap". Bootstrap · The most popular HTML, CSS, and JS library in the world. [En línea], URL: <https://getbootstrap.com>.
- [42] 'Components - dbc docs'. Dash Bootstrap Components. [En línea], URL: <https://dash-bootstrap-components.opensource.faculty.ai/docs/components/>.
- [43] "Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi". Raspberry Pi. [En línea], URL: <https://www.raspberrypi.org>.
- [44] 'Arduino Home'. Arduino - Home. [En línea], URL: <https://www.arduino.cc>.
- [45] "Jetson Nano Developer Kit". NVIDIA Developer. [En línea], URL: <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano-developer-kit>.
- [46] S. Pugh, "Concept Selection: A Method that Works", Proceedings of International Conference on Engineering Design, Heurista, Zürich, 1981, pp. 497-506.
- [47] "Welcome to Python.org," Python.org. [En línea]. URL: <https://www.python.org>.
- [48] L. Pounder. Raspberry Pi vs Arduino: Which Board is Best?", Tom's Hardware. [En línea], URL: <https://www.tomshardware.com/features/raspberry-pi-vs-arduino>.
- [49] C. Tan. "Jetson Nano vs Raspberry Pi 4: The Differences". All3DP. [En línea], URL: <https://all3dp.com/2/raspberry-pi-vs-jetson-nano-differences/>.
- [50] N. George. "Jetson vs Raspberry Pi vs Arduino". LinkedIn. [En línea], URL: <https://www.linkedin.com/pulse/jetson-vs-raspberry-pi-arduino-robotics-nathan-george/>.
- [51] J. Lucas. 'Curva de aprendizaje Arduino vs Raspberry Pi vs Jetson Nano'. OpenWebinars.net. [En línea], URL: <https://openwebinars.net/blog/arduino-vs-raspberry-pi-jetson-nano/>.

## Anexos

### Hoja de información del proyecto

#### Anexo B. HOJA DE INFORMACIÓN DEL PROYECTO

##### Información del estudiante:

**Nombre:** Joseph Alejandro Sánchez Solís

**Cédula:** 1 1658 0760

**Carné ITCR:** 2016085624

**Dirección de su residencia en época lectiva:** Alajuelita Centro, Alajuelita, San José, Costa Rica, de la escuela Abraham Lincoln 100m oeste, 75m sur.

**Teléfono:** +506 8524 6070

**Email:** jsanchezs0911@gmail.com

##### Información del proyecto:

**Nombre del Proyecto:** Desarrollo de una plataforma para monitorear el comportamiento y cuantificar el impacto económico/ambiental de la planta solar fotovoltaica del SESLab en el TEC de Cartago.

**Área del Proyecto:** <Programación, Sistemas Fotovoltaicos>

##### Información de la empresa:

**Nombre:** Laboratorio de Sistemas Electrónicos para la Sostenibilidad (SESLab)

**Zona:** Oriental, Cartago

**Dirección:** Instituto Tecnológico de Costa Rica

**Teléfono:** +506 2550 2728

**Sitio web:** <http://www.ie.tec.ac.cr/seslab/>

**Actividad Principal:** Evaluación, análisis y desarrollo de sistemas electrónicos utilizados específicamente en aplicaciones carbono neutral y de bajo impacto ambiental.

##### Información del asesor en la empresa:

**Nombre:** Carlos Mauricio Segura Quirós

**Puesto que ocupa:** Profesor y Coordinador del SESLab

**Departamento:** Escuela de ingeniería Electrónica

**Profesión:** Ingeniero Electrónico

**Grado académico:** Lic.

**Teléfono:** +506 8308 0474

**Ext.:**

**Email:** csegura@itcr.ac.cr

# Evaluación de las características del proyecto

| Instrumento de evaluación de las características de diseño incorporadas en el "Proyecto de Graduación"   |  |  |   |  |       |
|--|--|--|---|--|-------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Valore (1) grado en que participan y (2) nivel de complejidad en que los aspectos indicados a continuación están presentes en su proyecto o se requieren para su desarrollo.</li> <li>Los aspectos por valorar están relacionados con (I) los elementos de diseño integrados en el proyecto, (II) las restricciones limitantes del desarrollo del proyecto y (III) las características del proceso de diseño en ingeniería.</li> <li>Describa en documento adjunto los elementos de diseño específicos presentes en su proyecto y el grado de complejidad en que son utilizados.</li> </ul> |  |  |   |  |       |
| <b>I. Elementos integrados en el proyecto</b>  |  |  |   |  |       |
| Aspecto  | 1  | 2  | 3   | 4  | Total |
| <b>1. Matemática</b>   | Valore el grado de complejidad de conceptos matemáticos requeridos para el desarrollo del proyecto.  |  |   |  |       |
|  | No requiere utilizar conceptos matemáticos.  | Requiere utilizar conceptos matemáticos elementales (nivel algebraico).  | Requiere utilizar conceptos matemáticos de complejidad intermedia (nivel de cálculo y álgebra lineal).                        | Requiere utilizar conceptos matemáticos de alta complejidad (nivel de transformaciones y modelos).                   | 3     |
| <b>2. Ciencias básicas</b>   | El desarrollo del proyecto requiere la utilización de conceptos correspondientes a las ciencias básicas (física, química u otras ciencias conexas).  |  |   |  |       |
|  | No requiere el uso de conceptos de ciencias básicas.   | Requiere utilizar conceptos elementales de ciencias básicas.   | Requiere utilizar conceptos de ciencias básicas de complejidad intermedia.  | Requiere utilizar conceptos de ciencias básicas de alta complejidad.   | 4     |
| <b>3. Ciencias de la ingeniería</b>  | <b>a. Relacionados con la ingeniería electrónica:</b> La solución del problema requiere la utilización de conceptos correspondientes a los campos de la teoría de circuitos, técnicas de medición, electrotecnia, electrónica analógica, sistemas digitales, microprocesadores, procesamiento digital de señales, electromagnetismo, comunicaciones eléctricas, teoría de modelos, sensorica, control automático.                    |  |   |  |       |
|  | No requiere el uso de conceptos de la ingeniería electrónica.  | Requiere utilizar conceptos elementales de la ingeniería electrónica.  | Requiere utilizar conceptos de la ingeniería electrónica de complejidad intermedia.   | Requiere utilizar conceptos de la ingeniería electrónica de alta complejidad.  | 3     |
|  | <b>b. Relacionados con la ingeniería de la computación:</b> El desarrollo del proyecto considera la utilización de conceptos correspondientes a la ingeniería de la computación (tales como lenguajes, estructuras de datos, algoritmos, bases de datos, graficación computacional, modelos computacionales, métodos numéricos, inteligencia artificial, redes neuronales y otros que puedan clasificarse dentro de esta categoría). |  |   |  |       |
|  | No requiere el uso de conceptos de ciencias de la ingeniería de la computación.  | Requiere utilizar conceptos elementales de la ingeniería de la computación.  | Requiere utilizar conceptos de ciencias de la ingeniería de la computación de complejidad intermedia.                         | Requiere utilizar conceptos de ciencias de la ingeniería de la computación de alta complejidad.                      | 3     |
| <b>3. Ciencias de la ingeniería</b>  | <b>c. Relacionados con otras ingenierías:</b> El desarrollo del proyecto considera la utilización de conceptos correspondientes a los campos de la termodinámica, estática, dinámica, ciencias de los materiales, fluidos (hidráulica & neumática) y otros que puedan clasificarse dentro de esta categoría.   |  |   |  |       |
|  | No requiere el uso de conceptos de otras ingenierías.  | Requiere utilizar conceptos elementales de otras ingenierías.  | Requiere utilizar conceptos de otras ingenierías de complejidad intermedia.   | Requiere utilizar conceptos de otras ingenierías de alta complejidad.  | 3     |
| <b>4. Estudios comple-</b>   | El desarrollo del proyecto considera la realización de estudios complementarios correspondientes a los campos de la estadística, la ergonomía u otros.   |  |   |  |       |
|  | No requiere la realización de estudios complementarios.  | Requiere realizar estudios complementarios elementales.  | Requiere realizar estudios complementarios de complejidad intermedia.   | Requiere realizar estudios complementarios de alta complejidad.  | 4     |
| <b>II. Restricciones de cumplimiento que limitan el desarrollo del proyecto</b>  |  |  |   |  |       |
| Aspecto  | 1  | 2  | 3   | 4  | Total |
| <b>5. Estándares</b>   | Durante el desarrollo del proyecto debe acatarse el cumplimiento de estándares técnicos aprobados por organismos internacionales tales como los de la IEEE, FCC, ITU-T (antes CCITT), ASH, etc.  |  |   |  |       |
|  | El proyecto no está sujeto a restricciones derivadas de estándares técnicos internacionales.   | El proyecto está sujeto en bajo grado a restricciones derivadas de estándares técnicos internacionales.              | El proyecto está sujeto en un grado intermedio a restricciones derivadas de estándares técnicos internacionales.              | El proyecto está sujeto en alto grado a restricciones derivadas de estándares técnicos internacionales.              | 3     |
| <b>6. Aspectos legislativos</b>  | Durante el desarrollo del proyecto debe acatarse el cumplimiento de leyes, normas o disposiciones legales nacionales e internacionales específicas de la disciplina, tales como código eléctrico nacional, normativa de colegio de ingenieros, etc.  |  |   |  |       |
|  | El proyecto no está sujeto a restricciones derivadas de regulaciones específicas.  | El proyecto está sujeto en bajo grado a restricciones derivadas de regulaciones específicas.                         | El proyecto está sujeto en un grado intermedio a restricciones derivadas de regulaciones específicas.                         | El proyecto está sujeto en alto grado a restricciones derivadas de regulaciones específicas.                         | 3     |
| <b>7. Factores interdisciplinarios</b>   | El desarrollo del proyecto está sujeto a la consideración de restricciones derivadas de factores interdisciplinarios establecidos por el diseño industrial, la economía, la seguridad y salud ambientales, la protección del ambiente, aspectos sociales u otros pertinentes.  |  |   |  |       |
|  | El proyecto no está sujeto a la consideración de restricciones derivadas de factores interdisciplinarios.  | El proyecto está sujeto en bajo grado a la consideración de restricciones derivadas de factores interdisciplinarios. | El proyecto está sujeto en un grado intermedio a la consideración de restricciones derivadas de factores interdisciplinarios. | El proyecto está sujeto en alto grado a la consideración de restricciones derivadas de factores interdisciplinarios. | 3     |
| <b>III. Características del proceso de diseño del proyecto</b>   |  |  |   |  |       |
| Aspecto  | 1  | 2  | 3   | 4  | Total |
| <b>8. Creativo</b>   | Valore si este proyecto pretende desarrollar un nuevo elemento, sistema o proceso y/o el grado de innovación de la solución propuesta (aporte creativo del estudiante para el logro de objetivos).   |  |   |  |       |
|  | El elemento, sistema o proceso desarrollado no es nuevo ni su solución innova alguna.  | El elemento, sistema o proceso desarrollado requiere un bajo grado de innovación.                                    | El elemento, sistema o proceso desarrollado requiere un grado intermedio de innovación.                                       | El elemento, sistema o proceso desarrollado es nuevo y requiere un alto grado de innovación.                         | 3     |
| <b>9. Iterativo</b>  | Valore el grado en que el logro de objetivos de este proyecto involucra el desarrollo de un proceso iterativo.   |  |   |  |       |
|  | El proceso de desarrollo de este proyecto es lineal (no requiere iteración alguna).  | El proceso de desarrollo de este proyecto requiere un bajo grado de iteración.                                       | El proceso de desarrollo de este proyecto requiere un grado intermedio de iteración.  | El proceso de desarrollo de este proyecto requiere un alto grado de iteración.                                       | 3     |
| <b>10. De final abierto</b>  | Valore el grado en que la continuidad de este proyecto está abierta la generación de nuevos proyectos o iniciativas dentro del área de conocimiento a la que pertenece.  |  |   |  |       |
|  | Este proyecto no ofrece posibilidades de desarrollo de nuevos proyectos dentro del área a la que pertenece.  | Este proyecto ofrece pocas posibilidades de desarrollo de nuevos proyectos dentro del área a la que pertenece.       | Este proyecto ofrece algunas posibilidades de desarrollo de nuevos proyectos dentro del área a la que pertenece.              | Este proyecto ofrece muchas posibilidades de desarrollo de nuevos proyectos dentro del área a la que pertenece.      | 3     |