



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

– **TELECOM** ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Telecomunicación

Diseño de una instalación con energías renovables basada
en fotovoltaica para electrificación rural

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación

AUTOR/A: Albarracín Solaz, Álvaro

Tutor/a: Jiménez Jiménez, Yolanda

Cotutor/a: Seguí Chilet, Salvador

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TELECOM ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

Resumen

El trabajo fin de grado está enmarcado dentro de un proyecto de cooperación internacional que se desarrolla en un orfanato ubicado en una zona rural empobrecida del oeste de Tailandia. En línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 1, 7, 11 y 13, el objetivo fundamental del trabajo es realizar un proyecto para la instalación de un sistema de abastecimiento energético basado en energías renovables. El diseño de la instalación se realizará con el fin principal de reducir los gastos de la institución en materia energética, y contribuir de este modo en la mejora de su economía de subsistencia. **Para la realización del diseño se valoraron diferentes alternativas, desde una solución combinada en la que coexisten el suministro energético tradicional con un sistema complementario basado en energías renovables, hasta una solución basada exclusivamente en energías renovables. En este último caso, se exploraron soluciones híbridas, considerando como pilar fundamental la energía solar fotovoltaica,** pero combinándola con otros tipos de energías, como la eólica o la hidráulica, que actuarían como sistemas de respaldo. Sin embargo, los requisitos económicos, de mantenimiento y de simplicidad de la instalación motivaron que se descartara esta idea, de modo que se optó por emplear únicamente energía solar fotovoltaica como fuente de energía renovable. En paralelo con el diseño de la instalación, se puso en marcha un plan de búsqueda de microcréditos para financiar la implementación real del diseño propuesto.

Resum

El treball fi de grau està emmarcat dins d'un projecte de cooperació internacional que es desenvolupa en un orfanat situat en una zona rural empobrida de l'oest de Tailàndia. En línia amb els Objectius de Desenvolupament Sostenible (ODS) 1, 7, 11 i 13, l'objectiu fonamental del treball és realitzar un projecte per a la instal·lació d'un sistema de proveïment energètic basat en energies renovables. El disseny de la instal·lació es realitzarà amb la fi principal de reduir les despeses de la institució en matèria energètica, i contribuir d'aquesta manera en la millora de la seua economia de subsistència. **Per a la realització del disseny es van valorar diferents alternatives, des d'una solució combinada en la qual coexisteixen el subministrament energètic tradicional amb un sistema complementari basat en energies renovables, fins a una solució basada exclusivament en energies renovables. En aquest últim cas, es van explorar solucions híbridas, considerant com a pilar fonamental l'energia solar fotovoltaica,** però combinant-la amb altres tipus d'energies, com l'eòlica o la hidràulica, que actuarien com a sistemes de suport. No obstant això, els requisits econòmics, de manteniment i de simplicitat de la instal·lació van motivar que es descartara aquesta idea, de manera que es va optar per emprar únicament energia solar fotovoltaica com a font d'energia renovable. En paral·lel amb el

disseny de la instal·lació, es va posar en marxa un pla de cerca de microcrèdits per a finançar la implementació real del disseny proposat.

Abstract

The final degree project is part of an international cooperation project developed in an orphanage located in a remote rural area of western Thailand. In line with the Sustainable Development Goals (SDG) 1, 7, 11 and 13, the main goal of this job is to carry out a project for the installation of an energy supply system based on renewable energies. The design of the system will be carried out with the main purpose of reducing the institution's energy costs and thus contributing to the improvement of its subsistence economy. **For the realization of the design, different alternatives were evaluated, from a combined solution in which the traditional energy supply coexists with a complementary system based on renewable energies, to a solution based exclusively on renewable energies. In the latter case, hybrid solutions were explored, considering solar photovoltaic energy as cornerstone,** but combining it with other types of energy, such as wind or hydroelectric, which would act as backup systems. However, the economic, maintenance and simplicity requirements of the installation meant that this idea was discarded, so it was decided to use only photovoltaic solar energy as a source of renewable energy. In parallel with the design of the installation, a plan was launched to seek micro-credits to finance the actual implementation of the proposed design.

Índice de figuras y tablas

Figura 1 (a). Plano general de Tailandia, país en el que se llevó a cabo la acción de cooperación. [1].....	10
Figura 1 (b). Ubicación del orfanato Safe Haven Orphanage en el que se realizó el proyecto energético desarrollado en este TFG. [2]	10
Figura 2. Medidor de consumos de energía y potencia modelo Intertek.	15
Figura 3. Diagrama de Gantt correspondiente a las actividades realizadas durante la estancia en el orfanato.....	17
Figura 4. Tipos de módulos fotovoltaicos. [7].....	20
Figura 5 (a). Conexión de módulos FV en serie. [8].....	22
Figura 5 (b). Conexión de módulos FV en paralelo. [8].....	22
Figura 6. Ejemplo de factura eléctrica del orfanato.....	23
Tabla 1. Facturas de consumo eléctrico del orfanato recopiladas en diferentes meses del año.....	23
Tabla 2. Consumos diarios y total mensual estimado basado en las mediciones realizadas in-situ en el orfanato.	24
Figura 7. Gráfico circular representando los consumos diarios del orfanato. ...	25
Figura 8. Imagen satélite del orfanato identificando los edificios que lo componen. [2]	26
Tabla 3. Parámetros solares de relevancia para la ubicación del emplazamiento.	28
Figura 9. Gráfica de irradiación promedio sobre superficie plana en la ubicación del orfanato para los diferentes meses del año.	28
Figura 10. Gráfica de temperatura media para los diferentes meses del año en la ubicación del orfanato.	29
Tabla 4. Valor típico del número de días de autonomía de una instalación fotovoltaica en diferentes supuestos climatológicos para dos tipos de instalación.	29
Tabla 5. Representación de consumos mensuales y diarios y de la irradiación solar media global para inclinaciones de 0° y 20° del generador FV y para los diferentes meses del año.	31



Tabla 6. Resumen de parámetros para el cálculo del dimensionado de la instalación	33
Tabla 7. Resumen de especificaciones del módulo FV TSM-340.....	35
Figura 11. Diagrama de conexión de 2 <i>strings</i> fotovoltaicos en serie donde cada arreglo se compone de 20 módulos conectados en paralelo.....	37
Figura 12. Diagrama de bloques del diseño de la instalación aislada con todos los elementos electrónicos que la componen	41
Tabla 8. Consumos regulares de las cargas más relevantes.	42
Tabla 9. Parámetros más relevantes de los consumos regulares diarios (diurnos y nocturnos) y exclusivamente diurnos.	43
Tabla 10. Resultados de los cálculos del diseño 2: con conexión a red.	44
Figura 13. Diagrama de bloques del diseño de la instalación con conexión a red eléctrica incluyendo todos los elementos electrónicos que la componen.	45
Figura 14. Diagrama representando una instalación fotovoltaica con un dispositivo de inyección cero.....	47
Tabla 11. Comparación de los parámetros más relevantes del diseño 1 - aislada y el diseño 2- conexión a red	49
Tabla 12. Equipos solares que conforman los Diseños 1 y 2 y su disponibilidad en el mercado.....	51
Tabla 13. Presupuesto estimado de la instalación correspondiente al Diseño 2. Instalación FV con conexión a la red eléctrica.	52
Tabla 14. Presupuesto estimado de la instalación correspondiente al Diseño 1. Instalación FV aislada.	52
Tabla 15. Estimación del coste del kWh obtenido a partir de las facturas de luz proporcionadas por la institución. [14].....	53
Tabla 16. Tabla de amortización de la inversión para la ejecución del Diseño 2: Instalación solar FV con conexión a red.	53
Tabla 17. Tabla de amortización de la inversión para la ejecución del Diseño 1: Instalación solar FV aislada.	54



Índice de contenido

Capítulo 1. Introducción	9
1.1 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	12
Capítulo 2. Objetivos.....	13
Capítulo 3. Metodología	14
3.1 Distribución de las fases del proyecto	14
3.2 Cronograma temporal durante la estancia de cooperación	16
Capítulo 4. Desarrollo y resultados	18
4.1 Energía solar fotovoltaica	18
4.2 Elementos de una instalación fotovoltaica.....	19
4.2.1 Módulo fotovoltaico, tipos y tecnologías.....	19
4.2.2 Inversor.....	20
4.2.3 Regulador.....	20
4.2.4 Batería, tipos y características	21
4.2.5 Cableado, protecciones y conexiones.....	21
4.3 Recogida de datos	22
4.3.1 Consumos eléctricos	22
4.3.2 Emplazamiento y posibles ubicaciones de la instalación fotovoltaica	25
4.4 Diseño 1: Instalación aislada sin conexión a la red eléctrica.....	27
4.4.1 Datos y parámetros de localización, clima y entorno del orfanato	27
4.4.2 Elección del mes crítico y del ángulo óptimo.....	30
4.4.3 Cálculos de la potencia media de pico mínima del generador FV	32
4.4.4 Arreglo de módulos fotovoltaicos y reguladores PWM.....	35
4.4.5 Número de inversores	38
4.4.6 Capacidad de los acumuladores	38



4.4.7	Comprobaciones	39
4.4.8	Sección de los cables de la instalación	40
4.4.9	Superficie ocupada en el tejado por los módulos fotovoltaicos.....	40
4.4.10	Diagrama de bloques de la instalación FV aislada.....	40
4.5	Diseño 2: Instalación conectada a red eléctrica	41
4.5.1	Estimación de consumos regulares diarios y diurnos.	42
4.5.2	Replanteamiento de cálculos con los nuevos consumos	43
4.5.3	Diagrama de bloques de la instalación FV conectada a la red eléctrica	44
4.5.4	Efecto de la temperatura sobre las células fotovoltaicas	45
4.5.5	Dispositivo de inyección cero	47
4.6	Comparación técnica de los dos diseños presentados.....	49
Capítulo 5.	Análisis económico	52
Capítulo 6.	Conclusiones y propuesta de trabajo futura	55
Capítulo 7.	Bibliografía.....	59
Capítulo 8.	Anexos.....	61

Capítulo 1. Introducción

En este Trabajo Fin de Grado (TFG) se presenta un proyecto de cooperación dentro del ámbito de las energías renovables. El TFG nació de una inquietud personal por aplicar los conocimientos adquiridos durante mis estudios universitarios para contribuir a la resolución de problemas reales en el ámbito de la cooperación internacional, buscando con ello ayudar a aquellos colectivos más desfavorecidos. Mi inquietud personal, junto con la oportunidad que me brindó el Centro de Cooperación al Desarrollo (CCD) de la Universitat Politècnica de València (UPV) a través de su programa de becas de cooperación al desarrollo que ofrecen cada año, han dado como resultado este proyecto. Entre las múltiples disciplinas que se estudian en el Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación (GITST) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (ETSIT), el ámbito de las energías renovables, en especial la energía solar fotovoltaica, resulta ser muy adecuado para ser aplicado en el contexto de la cooperación internacional. Los recursos naturales que nos ofrece el planeta son finitos y las nuevas tecnologías ofrecen una oportunidad única para optimizarlos al máximo, especialmente en aquellas zonas donde los recursos económicos son menos abundantes.

En base a lo anterior, la elección de la ubicación para la realización del proyecto de cooperación debía cumplir dos características principales: por un lado, debía ser un país en vías de desarrollo, pues la beca de cooperación así lo exigía, y por otro, debía ser una zona donde las condiciones de radiación solar fuesen favorables para que la viabilidad del proyecto fuera tangible. Se valoraron opciones como Paraguay, India o Tailandia. Finalmente, la ubicación elegida fue Tailandia (ver Figura 1a), debido a la particularidad de la ubicación: una zona rural, aislada y con unas buenas condiciones meteorológicas.

Para la realización de este TFG se ha cooperado con la ONG *Colabora Birmania*, la cual ha respaldado el proyecto de inicio a fin. Me gustaría destacar que sin su colaboración no hubiera sido posible desarrollarlo con éxito. Su sede principal está ubicada en la ciudad de Mae Sot, situada en la provincia de Tak en Tailandia. En esta zona fronteriza se ubican diversas organizaciones humanitarias, entre ellas *Colabora Birmania*, las cuales reciben a miles de personas cada año. Estas ONGs trabajan para cubrir las necesidades sanitarias y educativas esenciales, y luchan por el cumplimiento de los derechos humanos de Myanmar. Cerca de 160.000 personas se hacen en 9 campos de refugiados asentados a lo largo de la frontera entre Myanmar y Tailandia, considerándose afortunadas, ya que han conseguido el estatus de *refugiados* otorgado por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Otros 2 millones de birmanos viven en condición de inmigrantes ilegales en Tailandia. El 20% de trabajadores ilegales son niños y niñas birmanos. Se calcula que en el área de Mae Sot hay cerca de 20.000 niños, y sólo 9.000 están escolarizados. La causa principal es la situación de pobreza en la que viven las familias. Los salarios son tan bajos que los niños también tienen que trabajar para ganarse su propia comida, siendo ésta la razón principal por la que *Colabora Birmania* está presente en la zona,

gestionando varios proyectos en el país como una escuela, una guardería, tres orfanatos y diversas propuestas educativas para desarrollar las opciones de las personas en estas circunstancias. En particular, el proyecto energético realizado en este TFG estará destinado al orfanato *Safe Haven Orphanage*.

El orfanato *Safe Haven Orphanage*, se encuentra ubicado a 400 metros de la frontera de Tailandia con Myanmar, en una zona rural fronteriza al norte de Mae Sot (ver Figura 1b). En él viven unos 70 niños y niñas de entre 2 y 16 años aproximadamente, la mayoría birmanos, que sobreviven gracias a la acción humanitaria de las ONGs de la zona. El gran trabajo realizado por las personas que lo dirigen, así como, el esfuerzo las personas que colaboran desde España buscando ayudas y enviando materiales, hacen posible la viabilidad de los proyectos e instalaciones que se desarrollan en la zona.

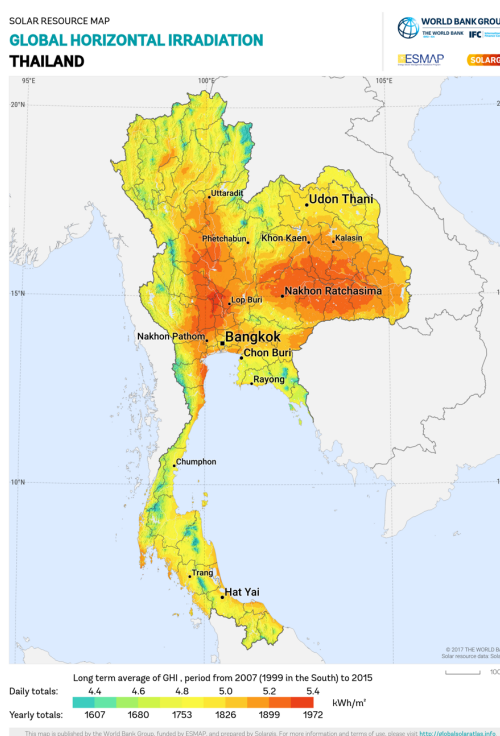


Figura 1 (a). Plano general de Tailandia, país en el que se llevó a cabo la acción de cooperación. [1]



Figura 1 (b). Ubicación del orfanato *Safe Haven Orphanage* en el que se realizó el proyecto energético desarrollado en este TFG. [2]

La principal dificultad con la que se encuentran estos orfanatos en su día a día es la limitación de su presupuesto económico. Puesto que los recursos de los que disponen son escasos para garantizar los derechos fundamentales de todos los que viven en el orfanato, cualquier acción encaminada a reducir al máximo el gasto es de vital importancia para mantenerlo activo. En este sentido, la factura del consumo energético del orfanato representa un gasto mensual sustancial que, si se redujese, favorecería que parte del presupuesto pudiera reorientarse a otros aspectos básicos, como la mejora en la educación o la ampliación de las

instalaciones para albergar a más niños. En este aspecto es donde *Colabora Birmania* considera una oportunidad la propuesta de proyecto que se describe en este TFG. La implantación de una instalación energética basada en energía solar fotovoltaica permitiría a la institución reducir el coste de la factura eléctrica o, incluso en el mejor de los casos, a conseguir que el orfanato sea energéticamente *autosuficiente*, termino muypreciado en la zona rural donde se encuentra el orfanato.

En la asignatura de Conversión y Procesado de la Energía (CPE) del GITST [3], se muestra al estudiante un punto de vista alternativo al tratamiento de la energía eléctrica, tan necesario hoy en día. En particular, se enseña al estudiante las nociones más importantes para aprovechar la energía solar fotovoltaica y la eólica, y a cómo combinarlas (a través del dimensionado de la instalación eléctrica) con el fin de conseguir una mejor solución de instalación energética para cada situación particular. En este sentido, se aprovecharon los conocimientos adquiridos en la asignatura para contribuir a cubrir la necesidad planteada anteriormente, a saber, la reducción del gasto energético del orfanato *Safe Haven Orphanage*. No obstante, para ofrecer una solución integrada se tendrán que solventar los problemas técnicos que surjan, y para ello, será necesario aplicar conocimientos de otras asignaturas relacionadas, tanto del área de la tecnología electrónica como del área de comunicaciones. Por último, es importante destacar que también será necesario poner en práctica ciertas competencias transversales y capacidades adquiridas a lo largo de los años de formación académica, como son (1) la gestión de proyectos, ya que será necesaria una planificación y organización para cumplir los plazos temporales fijados, y solventar las adversidades de su ejecución; (2) la destreza en la resolución de problemas reales; (3) el pensamiento crítico; (4) la comprensión e integración; (5) la capacidad de comunicación y entendimiento de las necesidades reales; y (6) la capacidad de adaptación, escucha y liderazgo. El TFG ha sido codirigido por dos profesores del Departamento de Ingeniería Electrónica de esta Universidad, ambos expertos en el área de Potencia y Energías Renovables, y se ha realizado en 3 fases que, a grandes rasgos corresponden a: (1) trabajo de preparación de la estancia de cooperación, realizado en la UPV durante los meses previos a mi traslado al orfanato; (2) trabajo de campo in-situ en el propio orfanato; y (3) trabajo de análisis y extracción de conclusiones, así como redacción de la memoria del proyecto (posterior a la estancia de cooperación). Estas fases se describen de forma detallada en la sección 3.1 de esta memoria.



1.1 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

En el marco de la Cooperación internacional, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) representan el motivo por el que responder a los desafíos para alcanzar un futuro mejor [4]. Este proyecto está estrechamente relacionado con varios de estos objetivos, los cuales se citan a continuación. Para más detalle del grado de relación ver el Anexo 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible.

- ODS 1 - Fin de la pobreza.
- ODS 7 - Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos.
- ODS 11 - Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.
- ODS 13 - Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.



Capítulo 2. Objetivos

El objetivo fundamental de este TFG **es contribuir a reducir el coste económico de la factura energética del orfanato Safe Haven Orphanage** ubicado en una zona rural fronteriza entre Myanmar y Tailandia, dentro de un proyecto de cooperación internacional gestionado por el CCD de la UPV. Para ello, se pretende diseñar, desarrollar e implementar una instalación solar fotovoltaica, adaptada al emplazamiento y a los consumos del orfanato.

Los subobjetivos que se derivan de este objetivo principal son los siguientes:

Subobjetivo 1: Obtención de datos reales de campo del consumo energético del orfanato para trabajar con veracidad y obtener una visión holística del entorno, potenciando así los recursos y evaluando los riesgos asociados a la inversión.

Subobjetivo 2: Diseño del dimensionado de la instalación solar fotovoltaica.

Subobjetivo 3: Búsqueda de proveedores locales para la obtención de presupuestos del equipamiento y subsistemas necesarios para la implementación de la instalación energética.

Subobjetivo 4: Búsqueda de microcréditos con los que costear la instalación energética propuesta en este TFG.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Distribución de las fases del proyecto

A continuación, se describen con más detalle las diferentes fases del proyecto, indicando las actividades más representativas de cada una de ellas.

Fase 1: Correspondiente a los meses previos a mi traslado al orfanato. Las actividades realizadas durante esta primera fase fueron:

Actividad 1.1: Revisión de los contenidos de la asignatura CPE del GITST.

Actividad 1.2: Realización del curso del Centro de Formación Permanente (CFP) [5] *Energía solar fotovoltaica – Una apuesta de futuro sostenible* [6], impartido por el profesor Salvador Seguí Chilet (codirector de este TFG).

Actividad 1.3: Realización de reuniones semanales con ambos tutores con el fin de perfilar el plan de actividades a realizar en el orfanato, definiéndose los hitos y entregables. El cronograma resultante de dicha planificación se muestra en la sección 3.2.

Actividad 1.4: Recopilación de información técnica del lugar, en particular, localización del orfanato, mapas de radiación solar, posibles proveedores, facturas eléctricas de ejemplo que permitan evaluar el consumo, etc. En base a los datos obtenidos, se realizó un dimensionado previo de la instalación energética. Localizando sus puntos débiles y proponiendo soluciones alternativas para solventarlos.

Fase 2: Correspondiente a la estancia en el orfanato. Debido a la distancia, la relación con los tutores durante el desarrollo de esta fase del TFG se produjo fundamentalmente mediante videollamada y correo electrónico. La comunicación con el profesor Salvador Seguí fue esencial durante la primera etapa de mi estancia en el orfanato. Gracias a su amplio conocimiento en energías renovables y a su experiencia en la participación en ámbitos de cooperación internacional, sus consejos fueron fundamentales para enfocar la propuesta y para obtener una dirección clara del proyecto, evitando así la demora en el arranque de éste y definiendo claramente las acciones a realizar. Las actividades realizadas durante esta segunda fase fueron las siguientes:

Actividad 2.1: Medida de los consumos eléctricos del orfanato. Para ello, se adquiere un medidor de consumo de energía y potencia (ver Figura 2) con el que recabar datos reales de consumo con la doble finalidad de: (1) compararlos con las facturas facilitadas por el orfanato, y (2) identificar los grupos de consumo (alumbrado, frigoríficos, ventilación, etc.) y disponer del detalle de consumo pormenorizado de cada uno de ellos.



Figura 2. Medidor de consumos de energía y potencia modelo Intertek.

Actividad 2.2: Determinación de la ubicación de los paneles solares de la instalación fotovoltaica. Se sopesaron dos alternativas: (1) Fijarlos al suelo. La ventaja principal es su accesibilidad, lo que facilita su futuro mantenimiento, del mismo modo, al no tener que trabajar en altura, simplifica su colocación. (2) Fijarlos en el tejado inclinado de uno de los edificios del recinto del orfanato. Esta solución es la más segura, ya que los niños y niñas realizan tareas, juegan y trabajan por las instalaciones sin prácticamente ninguna restricción y sin calzado en la mayoría de los casos. De este modo, tener un conjunto de paneles fotovoltaicos al nivel del suelo podía suponer un peligro para su integridad física. Por otro lado, uno de los puntos vitales en un diseño fotovoltaico en tejados, es el ángulo de inclinación del mismo, ya que es posible que sea conveniente añadir una estructura adicional a los paneles, concretamente en parte de la de fijación de los mismos, para conseguir el ángulo óptimo de producción de energía. Debido a que no se disponía de las condiciones de seguridad adecuadas para subir a los tejados, se midieron bases y alturas desde la base de la construcción para calcular de manera teórica, mediante relaciones trigonométricas, las inclinaciones.

Actividad 2.3: Búsqueda de proveedores locales, en particular, del sector fotovoltaico. Tras realizar una búsqueda a nivel nacional y provincial, se optó por el Grupo Hayaek, un distribuidor de material de bricolaje, ferretería, construcción, etc. que disponía de una nave de venta al público en Mae Sot.

Actividad 2.4: Contacto con la administración pública que gestiona el tendido y suministro eléctrico del país. Fue una actividad limitada y sin muchas opciones.

Actividad 2.5: Consulta de las webs gubernamentales, para acceder a tarifas, impuestos y otros datos relacionados con la facturación energética. De los contactos establecidos en las actividades 2.3 y 2.4, y de la información consultada en la actividad 2.5 se averiguó un punto clave para el diseño de la instalación, el gobierno tailandés no permite la inyección del



exceso energía producida por fuentes renovables en la red eléctrica, ya que esto puede suponer un peligro para la estabilidad de ésta (ver detalles en el Capítulo 4).

Actividad 2.6: Diseño de un primer escenario basado en una instalación fotovoltaica aislada como punto de partida para tener una visión general de la magnitud del proyecto y para, posteriormente, optimizar los bloques que supusiesen una inversión de capital inicial mayor.

Actividad 2.7: Búsqueda de microcréditos que permitan la implementación real de la instalación propuesta.

Fase 3: Correspondiente a los meses posteriores a la finalización de mi estancia en el orfanato. Las actividades realizadas durante esta tercera fase fueron:

Actividad 3.1: Realización de un estudio económico con presupuestos reales de los materiales necesarios y precios de tarificación eléctrica oficiales ofrecidos por el gobierno del país. El resultado de este estudio económico constituye una referencia económica de partida y permite evaluar a la ONG *Colabora Birmania*, tanto la inversión inicial para ejecutar las acciones necesarias para implantar el proyecto, así como la viabilidad de éste.

Actividad 3.2: Redacción de la memoria del TFG.

3.2 Cronograma temporal durante la estancia de cooperación

En este apartado se detalla el cronograma temporal de las fases 2 y 3 descritas en la sección anterior, correspondientes a la estancia en el orfanato y meses posteriores (ver Figura 3).

1. Periodo junio – julio 2018

- Análisis y recogida de datos. Punto de partida para tener una base sobre la que trabajar y desarrollar las siguientes fases del proyecto.
- Comprensión de la forma de vida de los habitantes de la región e integración, siendo ésta una parte fundamental para entender la realidad y aplicar el enfoque necesario. Este punto es uno de los más importantes, siendo su duración total la misma que la duración de la estancia.
- Primeros contactos con la administración pública. Imprescindibles para conocer el marco de actuación legal energético del país.

2. Julio – agosto 2018

- Contactos telefónicos y presenciales con posibles proveedores. Obtención de documentación técnica y económica del material necesario para el diseño de la instalación fotovoltaica.
- Desarrollo de la propuesta energética. Planteamiento de diferentes escenarios basados en los datos obtenidos en el periodo inicial y teniendo en consideración la casuística del marco de cooperación.

3. Septiembre 2018

- Recopilación de las conclusiones obtenidas y realización del estudio económico.
- Presentación y valoración del proyecto con la ONG. Entrega de documentación a la organización para su evaluación de viabilidad.

Nº Actividad	Inicio	Final	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12
Análisis y recogida de datos	25/06/2018	02/07/2018	■	■										
Integración con la comunidad	25/06/2018	30/07/2018	■	■	■	■	■	■						
Contacto con la administración pública	02/07/2018	09/07/2018		■	■									
Desarrollo de la propuesta energética	09/07/2018	20/08/2018			■	■	■	■	■	■	■			
Actividades educacionales	09/07/2018	10/09/2018			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Elaboración de documentación	13/08/2018	10/09/2018								■	■	■	■	■
Presentación del proyecto	10/09/2018	17/09/2018												■

Figura 3. Diagrama de Gantt correspondiente a las actividades realizadas durante la estancia en el orfanato.

Capítulo 4. Desarrollo y resultados

4.1 Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es la energía solar transformada en electricidad mediante una célula fotovoltaica basada en tecnología de semiconductores. Este proceso se considera renovable, es decir, que la fuente energética es inagotable o que su capacidad de recuperación por medios naturales es muy alta y, por lo tanto, sus recursos son infinitos. A pesar de que esta forma de transformar la energía se conoce desde hace tiempo, no fue hasta el año 2000, aproximadamente, cuando comenzó a utilizarse para la producción de energía eléctrica de consumo, tanto a gran escala como a nivel particular.

Una gran ventaja de esta fuente de energía es que permite alimentar instalaciones eléctricas en puntos aislados, como un refugio de montaña o una vivienda aislada de la red eléctrica. Además, no emite ningún tipo de residuo, ni durante el proceso de obtención de la energía, ni durante la vida útil de la instalación que, dependiendo del entorno, puede oscilar entre 25-30 años. Esto la convierte en una de las principales alternativas de producción energética “limpia” que puede contribuir a la reducción de los gases de efecto invernadero. Otras ventajas son que es una fuente de energía silenciosa, que necesita poco mantenimiento y con una “vida” de los módulos fotovoltaicos larga. Por el contrario, su principal desventaja es que la producción de energía depende de la radiación solar, la cual es variable. Esto implica que el suministro eléctrico se puede ver comprometido por factores que escapan de nuestro control, como las condiciones meteorológicas. En este sentido, su rendimiento se ve supeditado a la climatología, factor que podría descartar la utilización de este tipo de instalaciones según el entorno escogido. Además, durante las horas del periodo nocturno, en las que no hay radiación solar, no podría ser un sustento de energía. Para superar esta desventaja se suelen utilizar otras fuentes de energía de respaldo, bien renovables (como la energía hidráulica o eólica), o bien de combustibles fósiles (como motores alimentados con gasoil), dando lugar a las instalaciones híbridas. También es necesario incorporar elementos de almacenamiento energético, como baterías. A pesar de que la intención inicial del proyecto fue explorar la combinación de varias fuentes de energía renovables para conformar un sistema híbrido, los requisitos económicos, de mantenimiento y de simplicidad de la instalación motivaron que se descartara esta idea, de modo que se optó por emplear únicamente energía solar fotovoltaica como fuente de energía renovable.

4.2 Elementos de una instalación fotovoltaica

En esta sección se describen, de forma resumida, los diferentes elementos que forman una instalación fotovoltaica.

4.2.1 Módulo fotovoltaico, tipos y tecnologías

El módulo fotovoltaico (FV) es el dispositivo principal que capta la energía generada por el sol y la transforma en energía eléctrica para su posterior uso. Los módulos FV se dividen en dos grandes grupos atendiendo al tipo de célula que los componen: (1) los basados en células cristalinas, que a su vez se subdividen en monocristalinas y policristalinas, y (2) los basados en células amorfas, también conocidas en inglés como *thin film* (*capa fina*) debido al menor espesor, hasta de una micra, de la capa de silicio que los componen (ver Figura 4). Los primeros son los que mejores rendimientos proporcionan, siendo su principal desventaja su peso, grosor y coste económico. Para este proyecto se considerarán módulos compuestos de células cristalinas, utilizando como criterios de selección principalmente el económico y el de disponibilidad de compra de los módulos.

El elemento por excelencia usado para la fabricación de los paneles es el fotodiodo, el cual está basado en la unión P-N de silicio polarizada en inversa. Cuando sobre el fotodiodo incide una radiación luminosa se genera una corriente en sentido inverso proporcional a la intensidad de la radiación. Esta corriente continua inversa generada será posteriormente procesada según los requisitos de la siguiente etapa de la instalación fotovoltaica.

En relación a la información proporcionada por los fabricantes en sus fichas técnicas, cabe destacar que todos los fabricantes prueban sus paneles solares bajo las mismas condiciones de operación, lo que hace posible la comparación de las prestaciones de paneles procedentes de diferentes fabricantes. Estas condiciones son las Standard Test Condition (STC) (Condiciones Estándar de Medida) y Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) (Temperatura de Operación Nominal de la Celda). Las condiciones STC se refieren a condiciones base de temperatura (25°C), radiación solar (1000 W/m²) y valor espectral (1.5 AM). Bajo estas condiciones se evalúan características como la potencia máxima proporcionada por el panel, la cual está incluida en su ficha técnica. Sin embargo, en funcionamiento real, los paneles operan en diferentes condiciones ambientales, por lo que nunca operan a su máximo nivel de eficiencia. Dependiendo de la hora del día, la ubicación geográfica o incluso la estación del año, la cantidad de energía que puede producir el módulo FV fluctúa. Por ello, para complementar la información anterior, los fabricantes proporcionan también las condiciones NOCT, que se refieren a las condiciones en las que el panel solar opera de forma óptima. Un módulo FV alcanza la Temperatura de Operación Nominal de la Celda para las condiciones de Irradiancia=800 W/m², masa de aire=1.5G, temperatura del ambiente=20°C y velocidad del viento=1m/s. Para valores por encima de la temperatura óptima de operación de la celda el

rendimiento del módulo FV empieza a reducirse, incluso pueden llegar a dañarse de forma irreversible si dicha temperatura es muy elevada.

Los módulos pueden ser conectados en serie o en paralelo según convenga, ya sea por criterios de tensión o corriente de trabajo o por optimizar la instalación con el mínimo número de módulos solares a utilizar.

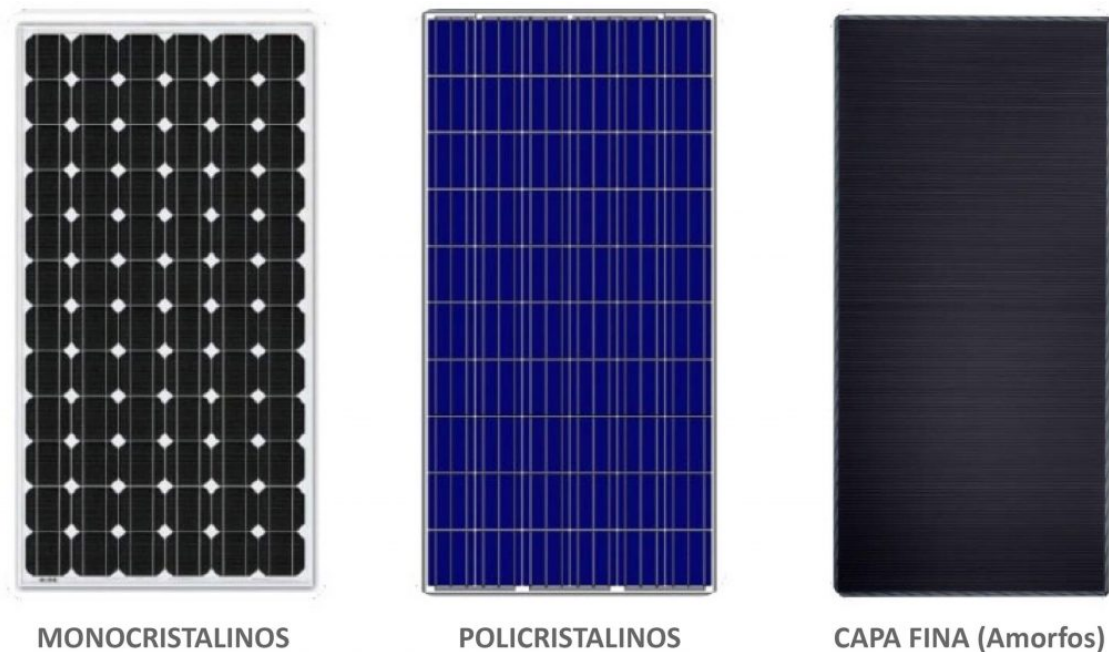


Figura 4. Tipos de módulos fotovoltaicos. [7]

4.2.2 Inversor

El inversor es el subsistema encargado de transformar la corriente continua (CC) generada por el panel FV en corriente alterna (CA) con unas determinadas características de tensión y frecuencia. La energía alterna generada ya puede ser utilizada por la mayoría de los elementos de consumo que hay en cualquier hogar, lo que le convierte en un elemento fundamental para el aprovechamiento de la energía eléctrica generada por el panel solar. Atendiendo al tipo de elementos que tengan que alimentar, los inversores pueden ser monofásicos o trifásicos y con o sin conexión a red. En determinadas instalaciones se usa un único inversor central, en otras se emplean los microinversores, los cuales realizan para cada panel solar FV la función que haría el inversor central.

4.2.3 Regulador

El regulador es el subsistema encargado de controlar la energía producida por los módulos FV para adaptarla a las condiciones de operación de la batería, optimizando la carga y descarga de las baterías y alargando su vida útil. Básicamente existen dos tipos de reguladores: PWM (Pulse Width Modulation) y

MPPT (Maximum Power Point Tracking). Los primeros no incorporan convertidor DC-DC lo que limita las tensiones de los paneles FV a los que pueden ser conectados (sólo pueden ser de 12V, 24V o 48V nominales). Se emplean en instalaciones de baja potencia. Los reguladores MPPT incorporan un sistema que realiza el seguimiento del punto de máxima potencia de los paneles gracias al convertidor DC-DC que llevan incorporado. Este convertidor permite ajustar la carga “vista” por el panel de forma que éste trabaje en el punto de máxima potencia, elevando de esta forma el rendimiento de la instalación. Gracias al convertidor DC-DC que incorporan pueden ser empleados con paneles que no se pueden usar con reguladores PWM (debido a la compatibilidad de la tensión del panel y la batería). También permiten la conexión de varios paneles solares en serie con un voltaje superior al del arreglo de baterías.

4.2.4 Batería, tipos y características

Las baterías, también conocidas como acumuladores, son dispositivos que almacenan energía eléctrica continua para su posterior uso. Son imprescindibles en las instalaciones fotovoltaicas aisladas, en las que no existe el respaldo de la red eléctrica. Su principio de funcionamiento se basa en un proceso químico de reducción-oxidación. Sus características más importantes son la capacidad, la tensión de trabajo y la profundidad de descarga.

Los tipos de baterías se pueden clasificar en cinco grupos: (1) Baterías de plomo ácido de ciclo profundo, las cuales tienen un bajo coste económico y un buen rendimiento, sin embargo, requieren de un mantenimiento regular. (2) Baterías AGM, las cuales no requieren de mantenimiento, pero por el contrario suelen tener un coste superior a las anteriores. Uno de sus usos principales es en automoción, para alimentar el sistema *start-stop*, pudiendo hacer una entrega de energía súbita por sus características. (3) Baterías de GEL, las cuales tampoco requieren de mantenimiento y ofrecen un buen rendimiento, pero su coste es alto y tienen un comportamiento menos eficiente en ambientes de altas temperaturas. (4) Baterías estacionarias, tienen un ciclo de vida largo y un ciclo de descarga profundo, ofreciendo buenos resultados, por contra, su coste económico suele ser muy alto. Finalmente, (5) Las baterías de ion-litio ofrecen una carga rápida, una densidad energética alta y no requieren de mantenimiento, sin embargo, su alto coste económico es la mayor desventaja. Suelen ser utilizadas en entornos industriales.

Dado el contexto del proyecto, las baterías de plomo ácido (1) serán las escogidas como la opción principal para el almacenamiento de energía, ya que la inversión inicial de una instalación aislada es elevada y su bajo coste encaja perfectamente en el ámbito de desarrollo.

4.2.5 Cableado, protecciones y conexiones

El cableado atiende principalmente a la limitación física de que a mayor corriente circule por el conductor, mayor sección deberá tener éste. Respecto a las conexiones de los módulos, se pueden conectar (1) en *string* o serie, en este

caso se sumarán las tensiones y la intensidad será la del módulo con la corriente más restrictiva (ver Figura 5(a)); y (2) en paralelo, donde las corrientes y tensiones se comportan a la inversa que en serie, sumándose en este caso las intensidades (ver Figura 5(b)). La elección de las conexiones entre paneles es un punto importante en el diseño, ya que se buscará la configuración que entregue la tensión y corriente óptimas a los demás elementos conectados a éstos.

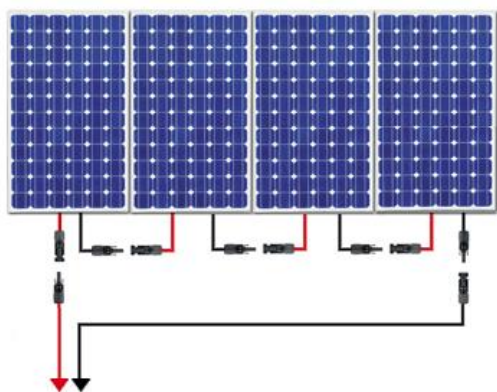


Figura 5 (a). Conexión de módulos FV en serie. [8]

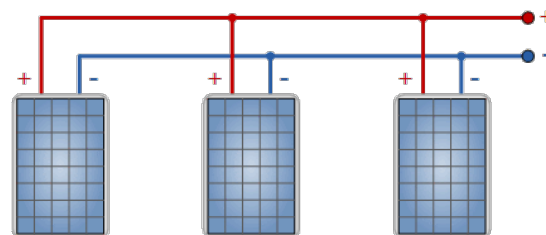


Figura 5 (b). Conexión de módulos FV en paralelo. [8]

Otras consideraciones a tener en cuenta son:

- Las protecciones. Pueden ser de dos tipos, (1) las que se colocan en la parte de la instalación que trabaja con corriente continua con el fin proteger la instalación de posibles sobreintensidades, entre estas protecciones se encuentran fusibles, seccionadores de corte y descargadores de sobretensiones; y (2) las protecciones que se colocan en la parte de la instalación que trabaja con alterna (interruptores magnetotérmicos y diferenciales).
- Un punto adicional que destacar son los sistemas “anti vertido” o de inyección cero, los cuales permiten evitar el vertido del excedente de producción energética a la red de distribución, opción muy útil para países con regulaciones legislativas donde pueda resultar un gran inconveniente, burocrático o/y económico, inyectar energía a la red.

4.3 Recogida de datos

4.3.1 Consumos eléctricos

Para conocer los consumos eléctricos del orfanato se solicitaron varias facturas de meses anteriores a mi llegada con el fin de conocer el consumo medio energético aproximado de éste, así como el coste económico en la moneda local, baht (THB; 1 euro aproximadamente son 38 bahts). En la Figura 6 se muestra un ejemplo de esta factura y en la Tabla 1 un resumen de las facturas recopiladas en diferentes puntos del año (ver Anexo 2. Facturas eléctricas orfanato).



Figura 6. Ejemplo de factura eléctrica del orfanato.

#	Fecha	Consumo [kWh]	Importe [฿]	Importe [€]
1	12/8/17	630	2563	67,44
2	12/12/17	570	2031	53,44
3	13/4/18	600	2406	63,31

Tabla 1. Facturas de consumo eléctrico del orfanato recopiladas en diferentes meses del año.

Adicionalmente, con el medidor de potencia y consumo de energía adquirido se obtuvieron datos de consumos reales de los dispositivos consumidores de energía (neveras, luces, ventiladores...). En la Tabla 2 se muestra un desglose de las medidas registradas para cada día, proporcionadas en Wh, y el total mensual (asumiendo un mes promedio de 30 días) proporcionado en kWh para el mes de agosto (ver Anexo 3.1 Medición consumos). Se aprecian tres grandes grupos de elementos en la tabla: (1) los marcados en color naranja, que suponen ~60% del consumo diario, además se utilizan de forma regular con un tiempo de uso y consumo elevados; (2) los marcados en color azul, que también se utilizan regularmente y que tienen asociado un tiempo de utilización medio; y finalmente (3) los marcados en color gris, una agrupación de varios elementos de uso heterogéneo que, si bien suponen ~25% del consumo del total, no son de uso regular. Como se verá en la siguiente sección, en este TFG se exploran dos opciones de diseño, (1) asumiendo que el emplazamiento está totalmente aislado de la red eléctrica y que debe ser autosuficiente; y (2) asumiendo una situación mixta en la que se combinen la energía solar fotovoltaica con la energía proporcionada por la red eléctrica. En la opción (1) se consideraron como elementos de consumo todos los indicados en la Tabla 2. Sin embargo, en la

opción (2) quedaron fuera del diseño los marcados en color gris debido a su reducido tiempo de uso y a su carácter entrópico.

Equipos	Número	Potencia [W]	Tiempo [h/día]	Consumo [Wh/día]
Congelador 1	1	200	16	3200
Congelador 2	1	200	16	3200
Nevera 1	1	80	14	1120
Nevera 2	1	80	18	1440
Nevera 3	1	90	18	1620
Lavadora 1	1	400	4	1600
Ventiladores habitaciones	4	60	6	1440
Otros	34	4980	25,82	4651,67
Alumbrado hall	5	25	6	750
Ventiladores hall	2	60	6	720
Lavadora 2	1	400	1	400
Arrocera	1	2000	0,75	1500
Ventiladores iglesia	3	60	1,5	270
Televisión	1	60	4	240
Alumbrado habitaciones	8	25	1	200
Alumbrado baños	4	25	1	100
Alumbrado iglesia	6	25	1	150
Portátil 1	1	50	3	150
Tetera	1	2200	0,07	146,67
Portátil 2	1	50	0,5	25
Total				18271,67
Total mes [kWh]				548,1501

Tabla 2. Consumos diarios y total mensual estimado basado en las mediciones realizadas in-situ en el orfanato.

En la siguiente imagen, Figura 7, se han representado los consumos registrados en forma de gráfico circular. En este gráfico se aprecia la distribución porcentual de los consumos reales diarios obtenidos durante las mediciones.

CONSUMOS DIARIOS

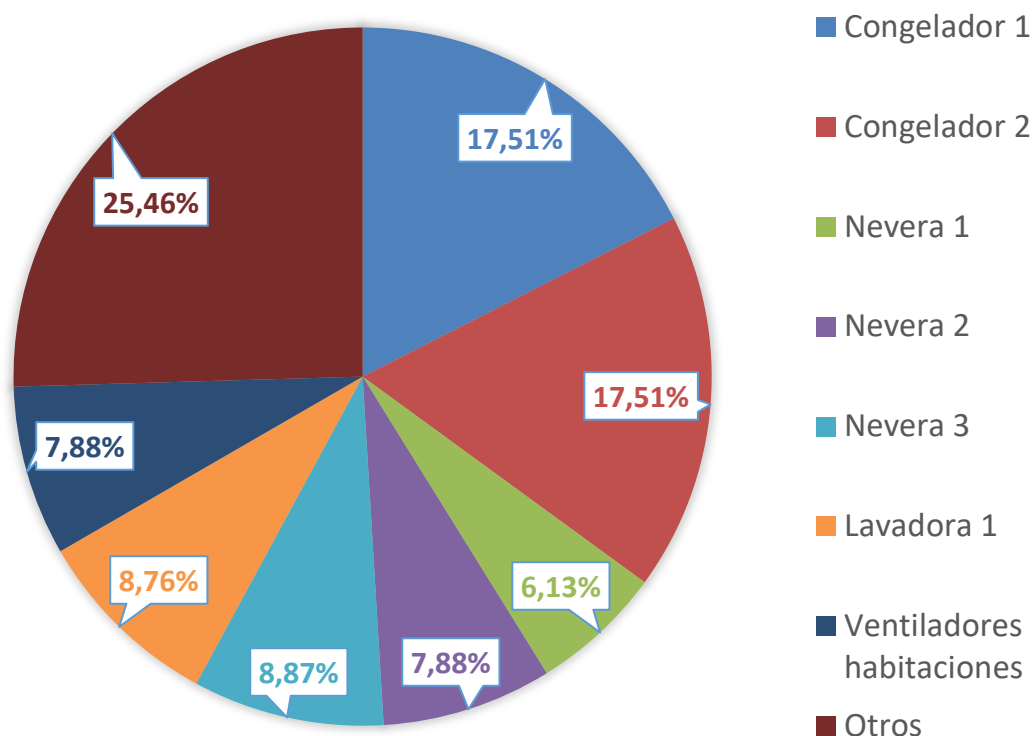


Figura 7. Gráfico circular representando los consumos diarios del orfanato.

4.3.2 Emplazamiento y posibles ubicaciones de la instalación fotovoltaica

El orfanato está localizado en la latitud $17,55521^\circ$ y longitud $97,92481^\circ$, en la provincia de Tak, Tailandia. Los alrededores de la zona son selváticos a varios kilómetros a la redonda, por lo que no existe ningún núcleo de población urbano cercano, lo cual define un factor (k_L) de montaña, que favorecerá la producción energética. El núcleo urbano importante más cercano es Mae Sot, situado a unos 140 Km al sur. El clima ofrece una temperatura media anual de $24,13^\circ\text{C}$, con una media anual de 12,14 horas de sol diarias y con una irradiación solar sobre una superficie horizontal de 1 m^2 de $4,74 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ (ver Anexo 3.2 Datos NASA).

El emplazamiento tiene una extensión de $\sim 10.000 \text{ m}^2$ aproximadamente, y se compone de varios edificios, todos al nivel del suelo con tejados inclinados de uralita (ver Figura 8). Existen varios carriles de tierra y grava para desplazarse con vehículo.

Otro punto de interés es la conexión a la red eléctrica pública, realizándose a través del contador situado en la entrada del orfanato.



Figura 8. Imagen satélite del orfanato identificando los edificios que lo componen. [2]

Debido a que la localización pertenece al hemisferio norte, la orientación que maximiza la producción es con los paneles fotovoltaicos orientados al sur.

A partir de la información de los consumos y de las características del emplazamiento se abordó la fase de diseño de la instalación energética. Se consideró como punto de partida el diseño de una instalación fotovoltaica para abastecer al orfanato como si fuera un emplazamiento aislado SIN conexión a la red eléctrica (Diseño 1). Con este diseño el orfanato sería autosuficiente y totalmente independiente de la red eléctrica. No obstante, sobre este diseño original de partida, se realizaron modificaciones de acuerdo con las restricciones que fueron apareciendo durante el desarrollo del proyecto. Esto dio lugar a un segundo diseño de carácter NO aislado, en el que también se cuenta con el sustento de la energía proporcionada por la red eléctrica (Diseño 2). En las siguientes secciones se describen el desarrollo y resultados de ambos diseños.

4.4 Diseño 1: Instalación aislada sin conexión a la red eléctrica

Tal y como se ha indicado en la sección previa, el primer diseño se abordó asumiendo que la instalación fotovoltaica debía servir para abastecer un enclave aislado y SIN conexión a la red eléctrica. Éste sería el objetivo ideal a conseguir, ya que, de este modo, el propio orfanato sería autosuficiente y totalmente independiente de la red eléctrica. De los dos diseños abordados, éste es el que más elementos incorpora en su configuración, por lo que es el más complejo y costoso. Sin embargo, también es el más completo en cuanto a prestaciones. Aunque este diseño se aleja en cierta medida de cumplir las restricciones económicas que limitan la aplicabilidad real del proyecto, es un excelente punto de partida, ya que ofrece una visión general de la envergadura de la instalación, facilitando una visión sobre qué aspectos del diseño pueden ser optimizados para alcanzar el compromiso *coste-autosuficiencia*.

La metodología empleada para en este primer diseño es la del *mes crítico*, la cual permite realizar el dimensionado de la instalación fotovoltaica para maximizar la producción, y consiste en considerar sólo los valores de irradiación solar del mes más desfavorable. De esta manera, cubriendo los consumos mensuales medios estimados para dicho mes se garantiza el suministro eléctrico durante el resto de los meses del año. El primer paso de este método consiste en la obtención de los datos y parámetros relativos a la localización, clima y entorno donde se realizará la instalación energética. Los cálculos y formación necesarios para completar los diseños fotovoltaicos están basados en el material de la asignatura Conversión y Procesado de Energía de la ETSIT, impartida por el profesor Antonio Arnau Vives [9].

4.4.1 Datos y parámetros de localización, clima y entorno del orfanato

Los datos y parámetros relacionados con la localización, clima y entorno determinarán los resultados del diseño dependiendo de las condiciones de la ubicación y de algunas elecciones realizadas a criterio del usuario.

Para la obtención fiable de datos acerca de la radiación sobre superficie plana o inclinada, temperaturas, ángulo óptimo y orientación se hace uso una herramienta del sitio web de la NASA [10]. Introduciendo en esta web los valores de latitud y longitud, periodo de tiempo (mensual y anual) de los valores medios, y rango inicial y final de tiempo en años, se obtienen los datos incluidos en la Tabla 3 (Ver Anexo 3.2).

Parámetros	Media anual
T2M MERRA2 Temperatura a dos metros	24,13 °C
SG_DAY_HOUR_AVG SRB Horas diurnas	12,14 h
SI_EF_TILTED_SURFACE_0 Irradiación solar en superficies horizontales	4,74 kWh/m ² /día
SI_EF_OPTIMAL_ANG SRB Ángulo óptimo de irradiancia	17 °
SI_EF_TILTED_ANG_ORT SRB Orientación de la irradiancia solar de la superficie	S

Tabla 3. Parámetros solares de relevancia para la ubicación del emplazamiento.
(Latitud: 17,5521, Longitud: 97,92481)

En las Figuras 9 y 10 se han representado los valores promedio de irradiación solar sobre superficie plana y de temperatura, respectivamente, extraídos de la web de la NASA para los diferentes meses del año (ver Anexo 3.2). Estas dos magnitudes servirán en pasos posteriores del diseño para determinar, por un lado, cuál es el mes con menor irradiación solar, lo que se conoce comúnmente como el *mes crítico*; y por otro, para anticipar los posibles problemas que pueden producirse sobre las células fotovoltaica por el efecto de la temperatura ambiente.

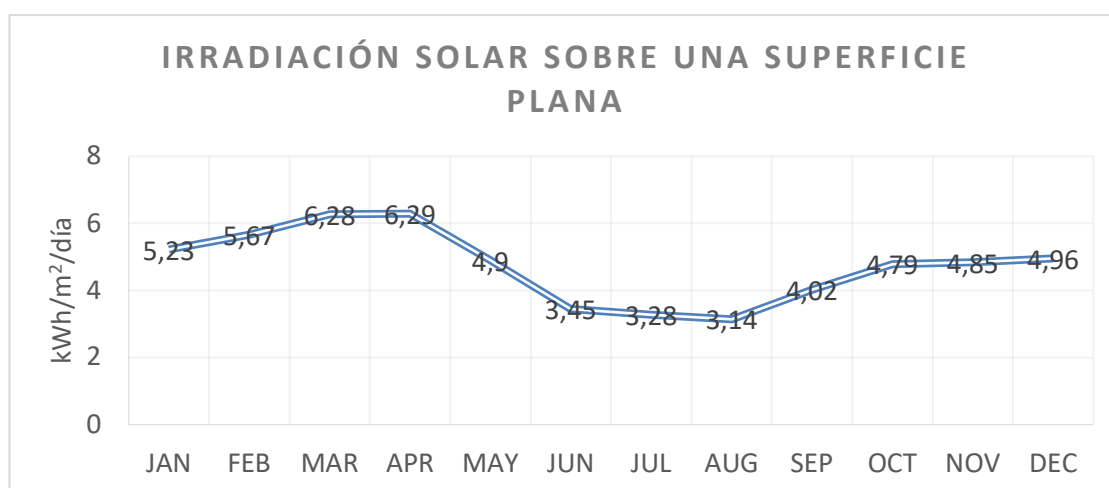


Figura 9. Gráfica de irradiación promedio sobre superficie plana en la ubicación del orfanato para los diferentes meses del año.

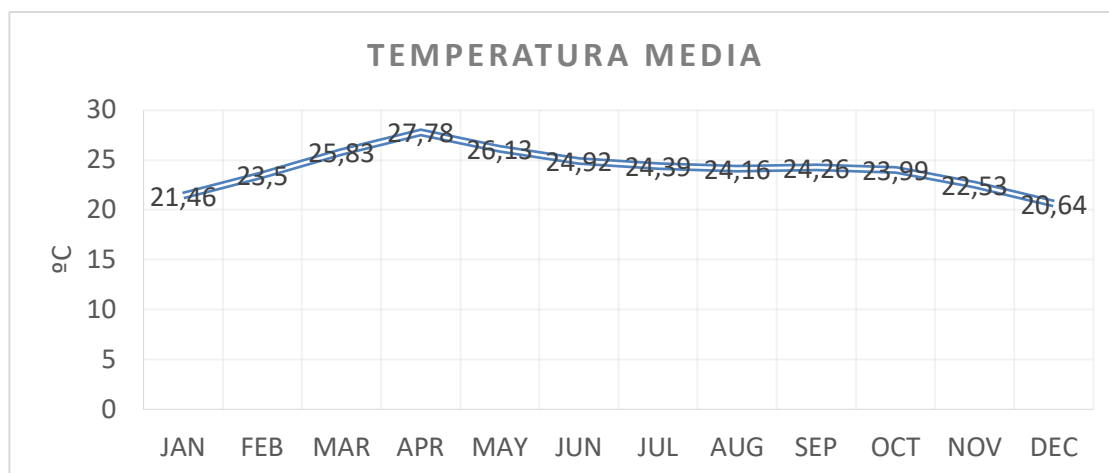


Figura 10. Gráfica de temperatura media para los diferentes meses del año en la ubicación del orfanato.

A continuación, se enumeran los parámetros relacionados con el clima, entorno y ubicación que serán empleados en el diseño de la instalación:

- N [días]: Es el máximo número de días de autonomía de la instalación en el supuesto caso de una irradiación solar nula. A mayor N , la probabilidad de fallo del sistema se reduce, pero también aumenta su coste económico y el número de componentes electrónicos implicados en el diseño. En instalaciones domésticas y con un clima soleado, un valor típico para este parámetro es $N=4$ días (ver Tabla 4).

Zona	Instalación doméstica N [días]	Instalación crítica N [días]
Muy nuboso	6	10
Variable	5	8
Soleado	4	6

Tabla 4. Valor típico del número de días de autonomía de una instalación fotovoltaica en diferentes supuestos climatológicos para dos tipos de instalación.

- Tensión de trabajo [V]: Es la tensión que demandan los elementos de consumo de la instalación (también conocidos como “cargas de consumo”). Hay que tener en cuenta que para una instalación que esté conectada a la red eléctrica, esta tensión vendrá determinada por la legislación local, en el caso de Tailandia son 220 V.
- K_L : Es el coeficiente de limpieza atmosférico, el cual corrige la radiación global incidente dependiendo de la limpieza atmosférica. Puede variar entre valores de 1,05 para zonas de montaña con poca polución, 0,95 para ciudades o 0,92 para zonas con niebla. Se considerará un factor 1,05

por la latitud y longitud del emplazamiento, y por tratarse de zona rural alejada de una ciudad.

- FS: Es el factor de sombra que determina las pérdidas por sombreado. En este caso, hay zonas de árboles y arbustos, pero la mayoría de ellas están ubicadas en los exteriores del perímetro de la parcela, por lo que no suponen un inconveniente en cuanto a sombras sobre la mayoría de los tejados o superficies de interés. Se considerará que el factor de sombras será 1, sin pérdidas.
- FI: Es el factor de inclinación, y refleja las pérdidas de radiación de la orientación e inclinación de la instalación respecto de las óptimas. Se calcula a partir de la Ec.(1), siendo el valor estimado de FI = 0,999.

$$FI = 1 - [1,2 \cdot 10^{-4}(\beta - \beta_{opt})^2 + 3,5 \cdot 10^{-5}\alpha^2] \text{ para } 15^\circ < \beta < 90^\circ \quad (1)$$

4.4.2 Elección del mes crítico y del ángulo óptimo

La obtención del *mes crítico*, así como el ángulo óptimo de inclinación, se obtienen a partir de la Ec.(2):

$$\frac{E_{CC}^{AC}}{G_{m,d}(\alpha, \beta)} = \frac{\text{Consumo medio diario (Wh/día)}}{G_{m,d}(\alpha, \beta) \text{ Para diferentes inclinaciones } \beta} \quad (2)$$

Donde E_{CC}^{AC} corresponde a los consumos medios diarios y $(G_{m,d}(\alpha, \beta))$ a los valores de irradiación solar media diaria. El ángulo α hace referencia al azimut y vale 0° cuando la superficie de las placas está orientada hacia el Ecuador (sur). El *mes crítico* será aquel en que la relación dada por la Ec.(2) sea máxima para los diferentes valores del ángulo de inclinación β . El ángulo óptimo será aquel que proporcione la menor relación dada por la Ec.(2) en el mes crítico (menor de los máximos).

En la Tabla 5 (columnas 2 y 3) se muestran los consumos de corriente alterna mensuales y diarios, respectivamente, estimados a partir de las medidas realizadas durante la estancia en el orfanato (ver Tabla 2). Aunque sólo se registraron datos durante los meses de julio y agosto, el resto de los datos para los otros meses del año se extrapolaron a partir de la media de consumo de las facturas de la compañía eléctrica recogidas en la Tabla 1 (ver Anexo 2). Dichos valores extrapolados resultan ser muy cercanos a los datos registrados con el medidor de consumos de energía.

La irradiación media global sobre el plano inclinado del generador FV ($G_{m,d}(\alpha, \beta)$) se calcula a partir de la Ec.(3). En concreto, se calcula a partir de la irradiación global sobre superficie horizontal ($G_{m,d}(0,0)$) ponderada por una serie de factores: (1) el factor de corrección por inclinación (k_β) a la latitud correspondiente; (2) las pérdidas por inclinación (FI), se utilizará un valor de partida de FI=1 y posteriormente se ajustará a partir del ángulo óptimo extraído y de la Ec.(1); (3) las pérdidas por sombreado, en este caso sin pérdidas (FS=1); y (4) el factor de limpieza atmosférica $k_L=1.05$.

$$G_{m,d}(\alpha, \beta) = k_{\beta} G_{m,d}(0,0) \text{ F I F S } k_L \quad (3)$$

En las columnas 4 y 5 se muestran datos de la irradiación solar media diaria sobre dos inclinaciones ($G_{m,d}(\alpha, \beta)$): (1) sobre una superficie plana ($G_{m,d}(0,0)$), la cual se ha obtenido de la Figura 9; y (2) sobre una superficie inclinada a 20° ($G_{m,d}(0,20)$), de la que se conocen sus valores de irradiación a través de PVWatts [11] (ver Anexo 4, PVWatts HSP 20), que utiliza los modelos matemáticos mencionados en las Ec. (1 y 3) junto a la irradiación sobre superficie horizontal. Según datos de la NASA, el ángulo de inclinación óptimo corresponde a 17°. Puesto que no se disponía de datos de irradiación a 17°, se utiliza $\beta = 20^\circ$.

En la columna 6 de la Tabla 5 se muestra la relación $\frac{E_{CC}^{AC}}{G_{m,d}(\alpha, \beta)}$ obtenida a partir de la Ec.(2) para la inclinación de 20°. A partir de los resultados obtenidos se escoge como *mes crítico* junio (sombreado en la Tabla 5 en color amarillo), ya que es el que proporciona la relación de la Ec.(2) más alta.

Los resultados de la Tabla 5 se utilizarán como valor de partida para los cálculos del dimensionado de la instalación fotovoltaica (ver Anexo 3.3. Mes crítico aislada).

MES	Ecc ^{AC} (Wh/mes)	Ecc ^{AC} (Wh/día)	G _{d,m} (0,0) (Wh/m ² /día)	G _{d,m} (0,20) (Wh/m ² /día)	$\frac{E_{CC}^{AC}}{G_{m,d}(0,20)}$
Enero	600000	19355	5230	6200	3,122
Febrero	600000	21429	5670	6870	3,119
Marzo	600000	19355	6280	6350	3,048
Abril	600000	20000	6290	6320	3,165
Mayo	600000	19355	4900	4960	3,902
Junio	600000	20000	3450	3740	5,348
Julio	600000	19355	3280	3740	5,175
Agosto	600000	19355	3140	3730	5,189
Septiembre	600000	20000	4020	4920	4,065
Octubre	600000	19355	4790	5750	3,366
Noviembre	600000	20000	4850	6210	3,221
Diciembre	600000	19355	4960	6010	3,220

Tabla 5. Representación de consumos mensuales y diarios y de la irradiación solar media global para inclinaciones de 0° y 20° del generador FV y para los diferentes meses del año.

4.4.3 Cálculos de la potencia media de pico mínima del generador FV¹

La potencia media de pico mínima, $P_{mp,min}$, es la cantidad mínima de potencia de pico que los módulos de la instalación deben producir para atender la energía demandada por los elementos de consumo (ver Ec.(4)). Para obtener esta potencia, se considera la energía que teóricamente debería entregar el generador FV para cubrir los consumos (E_{CC}^{AC}), y este valor se pondera por el parámetro denominado “performance ratio” (PR_{AC}), el cual engloba diferentes factores de rendimiento de los subsistemas que forman la instalación, los cuales se detallan más abajo. Dividiendo esta energía “ponderada” ($\frac{E_{CC}^{AC}}{PR_{AC}}$) por las horas solares de pico (HSP), se obtiene la potencia que como mínimo debe proporcionar el generador FV.

$$P_{mp,min} = \frac{E_{CC}^{AC}}{PR_{AC}} \cdot \frac{1}{HSP} \quad (4)$$

Las horas solares de pico se extraen a partir de la irradiación global media diaria en el peor caso y de la constante $I_{CEM} = 1000 \text{ W/m}^2$ que representa la irradiancia solar constante de 1 Sol.

$$HSP = \frac{G_{m,d}(\alpha, \beta)}{I_{CEM}} \quad (5)$$

Antes de continuar con el cálculo de $P_{mp,min}$, se resumen en la Tabla 6 los valores de algunos parámetros y constantes que intervendrán en dicho cálculo.

¹ En este apartado se hace referencia de forma frecuente a datos incluidos en las hojas de especificaciones de los fabricantes de los subsistemas: baterías, inversor, paneles FV o regulador PWM. Las especificaciones empleadas se encuentran recopiladas en el Anexo 3.4 Cálculos aislada. Los valores resumidos en dicho anexo se han obtenido a partir de los data sheet de los fabricantes de los diferentes módulos que componen la instalación y que también han sido incluidos como anexos a esta memoria.

Parámetro	Valor	Observaciones
E_{CC}^{AC}	20000 Wh/día	Extraído de la Tabla 5 (<i>mes crítico</i>)
$G_{d,m}(0, 20)$	3740 Wh/(m ² ·día)	Extraído de la Tabla 5 (<i>mes crítico</i>) y ángulo óptimo
$HSP = \frac{G_{d,m}(0, 20)}{I_{CEM}}$	3.74 HSP/día	Extraído de la Ec.(5) y de los valores de esta tabla para el <i>mes crítico</i> y ángulo óptimo
V_N	48V	Tensión nominal de la batería ²
k_A	0.00476	Coefficiente de autodescarga de las baterías diario ³
P_D	0.7	Profundidad de descarga de las baterías. Superior a 1000 ciclos ⁴
N	4	Número de días de autonomía de la instalación
σ_{Cu}	53 [S/m]@30°C	Conductividad del cobre a 30°C

Tabla 6. Resumen de parámetros para el cálculo del dimensionado de la instalación

La tensión nominal de la batería condicionará que otros dispositivos como el regulador o inversor trabajen a la misma tensión. La elección de esta tensión de trabajo, la más alta disponible de los dispositivos, permite que para la misma potencia del campo solar las corrientes sean más bajas, lo que repercute en un aumento de la eficiencia del conjunto del diseño debido a que hay menos pérdidas por cableado y en consecuencia es necesaria menos sección del mismo.

El *performance ratio* (PR_{AC}) se obtiene a partir de la Ec.(6).

² Según disponibilidad y proveedores del mercado de baterías en Tailandia, se elige el modelo Trojan SPRE 06 255. Extraído de las hojas de especificaciones del fabricante de la batería (ver Anexo 5. Baterías Trojan SPRE 06 255 DS).

³ Extraído de las hojas de especificaciones del fabricante de la batería (ver Anexo 5. Baterías Trojan SPRE 06 255 DS). El fabricante suele darlo en porcentaje mensual, en las fórmulas debe emplearse el valor absoluto promediado entre 30 días del mes.

⁴ La profundidad de descarga de una batería hace referencia a la energía que puede extraerse de ella respecto de su valor inicial cuando está totalmente cargada. Se obtiene de las hojas de especificaciones del fabricante de la batería (ver Anexo 5. Baterías Trojan SPRE 06 255 DS).

$$PR_{AC} = R_{AC} \eta_{GF} \eta_J^{GR} \quad (6)$$

Donde R_{AC} es el rendimiento global AC, η_{GF} es la eficiencia del generador FV y η_J^{GR} es el rendimiento por efecto Joule en cualquier sección de cable de la instalación.

El rendimiento global AC, R_{AC} , se obtiene a partir de la Ec.(7):

$$R_{AC} = R_{DC} \eta_I \eta_J^{AC} \quad (7)$$

Donde $R_{DC} = \eta_A \eta_B \eta_J^{DC}$ es el rendimiento global DC, η_I es el rendimiento del inversor (ver Anexo 6. Inversor Leonics S 210 017) y η_J^{AC} es el rendimiento de la instalación AC (cables y autoconsumo del inversor). El cálculo del rendimiento R_{DC} requiere a su vez el cálculo de 3 rendimientos:

- I. $\eta_A = 1 - k_A N/P_D$, donde k_A es el coeficiente de autodescarga de la batería, P_D es la profundidad de descarga (ver Anexo 5. Baterías Trojan SPRE 06 255 DS) y N el número de días de autonomía de la instalación (ver Tabla 6). Sustituyendo los valores se obtiene $\eta_A = 0,973$.
- II. $\eta_B = 1 - k_B$ es la eficiencia de carga, o rendimiento electroquímico de las baterías y su valor, extraído de las hojas de especificaciones del fabricante de la batería es $\eta_B = 0,9$.
- III. $\eta_J^{DC} = (1 - k_J^{DC})$ es el rendimiento de la instalación DC, k_J^{DC} incluye las pérdidas del cableado (0.015) y por autoconsumo del regulador (0.03) (ver Anexo 7. Regulador Steca Power Tarom 4110). A partir de los datos del catálogo se obtiene un valor de $\eta_J^{DC} = (1 - (0,015 + 0,03)) = 0,955$.

A partir de los rendimientos anteriores se obtiene el rendimiento global DC $R_{DC} = \eta_A \eta_B \eta_J^{DC} = 0.836$.

De acuerdo con la hoja de especificaciones del fabricante del inversor su rendimiento es $\eta_I = 0.9$. Respecto al rendimiento de la instalación AC (cableado y autoconsumo del inversor) $\eta_J^{AC} = (1 - k_J^{AC})$, k_J^{AC} incluye las pérdidas del cableado (0.015) y por autoconsumo del inversor (0.05) (ver Anexo 6. Inversor Leonics S 210 017). A partir de los datos del catálogo se obtiene un valor de $\eta_J^{AC} = (1 - (0,015 + 0,05)) = 0,935$. Con todo, el cálculo del rendimiento global AC resulta $R_{AC} = R_{DC} \eta_I \eta_J^{AC} = 0.836 \times 0.9 \times 0.935 = 0.704$.

Siguiendo con el cálculo de $PR_{AC} = R_{AC} \eta_{GF} \eta_J^{GR} \eta_R$ en la Ec.(6), faltaría por determinar la eficiencia del generador FV η_{GF} , la cual se refiere a la pérdida de potencia de dicho generador debido a efectos como la limpieza y, sobre todo, al funcionamiento fuera del punto de máxima potencia (PMP). Este rendimiento se calcula a partir de la Ec.(8).

$$\eta_{GF} = \frac{P_p}{P_{ST}} \quad (8)$$

Donde P_p hace referencia a la potencia de pico real del generador FV, P_{ST} a la potencia de pico estándar para condiciones STC de dicho módulo. A partir de los datos proporcionados por fabricante del panel FV (ver Anexo 8. Módulo Trinasolar TSM-340) se obtiene $\eta_{GF} = 271,51/340 = 0,799$.

Por último, $\eta_j^{GR} = 1 - 0,015 = 0,985$ hace referencia al rendimiento por efecto Joule.

Con todo, resulta el siguiente valor para PR_{AC} :

$$PR_{AC} = R_{AC} \eta_{GF} \eta_j^{GR} \eta_R = 0.704 \times 0.799 \times 0,985 \times 0.9 = 0.499, \quad (9)$$

Obtenido este valor, ya es posible extraer el valor de la potencia media de pico mínima dada por la Ec.(4), la cual se repite a continuación como Ec.(10) por comodidad para el lector:

$$P_{mp,min} = \frac{E_{CC}^{AC}}{PR_{AC}} \cdot \frac{1}{HSP} = \frac{20000 \text{ Wh/día}}{0.499} \times \frac{1}{3.68 \text{ h/día}} = 10716,62 \text{ W} \quad (10)$$

Según recomendaciones del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España (IDAE), se puede aplicar hasta un +20% a la $P_{mp,min}$, de tal manera que exista un margen de trabajo del campo solar con el fin de cubrir con suficiencia la demanda de energía. Sin embargo, con el fin de dejar dar un mayor margen de seguridad a la instalación para que puedan haber excedentes de energía, se considera sobrepasar la recomendación y aplicar un 25%.

En términos numéricos esto resulta $P_{mp,min} + 25\% = 13395,78 \text{ W}$

4.4.4 Arreglo de módulos fotovoltaicos y reguladores PWM

En este apartado se realizarán los cálculos necesarios para determinar cuál es la mejor combinación de módulos fotovoltaicos y reguladores PWM.

Se parte los datos obtenidos de la hoja de especificaciones del fabricante del módulo fotovoltaico TSM-340 que se resumen en la Tabla 7 (ver Anexo 8).

Magnitud	Valor	Significado
V_{mp}	37,8 (V)	Tensión en el punto de máxima potencia del panel FV
I_{mp}	8,99 (A)	Corriente en el punto de máxima potencia del panel FV
I_{SC}	9,420 (A)	Corriente cortocircuito

Tabla 7. Resumen de especificaciones del módulo FV TSM-340

Para calcular el número de paneles dispuestos en serie, N_s , se utiliza el resultado de redondear el valor proporcionado por la Ec.(11) al entero más alto:

$$N_s = \frac{V_N}{V_{mp}} = \frac{48}{37,8} = 1,27 \approx 2 \quad (11)$$

Donde V_N y V_{mp} son la tensión nominal de la batería y la tensión en el punto de máxima potencia del panel, respectivamente. De este modo, la tensión de trabajo del generador fotovoltaico, V_{GF} , se obtendrá del producto de la tensión en el punto de máxima potencia, V_{mp} , y el número de paneles dispuestos en serie, N_s , obteniendo un resultado de 75,6 V.

Para calcular el número de paneles dispuestos en paralelo, N_p , se utiliza el resultado de redondear el valor proporcionado por la Ec.(12) al entero más alto:

$$N_p = \frac{I_{GF}}{I_{mp}} \quad (12)$$

El cálculo de la corriente del generador fotovoltaico, I_{GF} , se obtendrá a partir cociente de la potencia media de pico mínima $P_{mp,min}$ calculada en la Ec.(10) +20% y la tensión del generador FV V_{GF} , resultando $I_{GF} = P_{mp,min}/V_{GF} = 177,19A$. Sustituyendo en la Ec.(12) $N_p = 170,11/8,99 = 20$.

De acuerdo con la normativa IEC 62548 [12], se establece que el uso de fusibles entre *strings* es obligatorio cuando se satisface la siguiente ecuación.

$$(N_{strings} - 1) \times I_{SC} > I_{modulo \max OCPR} \quad (13)$$

Donde $N_{strings}$ hace referencia al número de strings en paralelo de cada campo solar (10), I_{SC} a la corriente de cortocircuito del módulo (9,42A) e $I_{modulo \max OCPR}$ a la máxima corriente de fusible establecida por el fabricante (15A) (ver Anexo 8). Esto implica que serán necesarios 9 fusibles por campo solar, en total 18 para toda la instalación.

La configuración final obtenida está formada por 20 *strings* de dos paneles cada uno, conectados entre sí en paralelo y agrupados en dos arreglos independientes (10 y 10), es decir un total de 40 módulos (ver Figura 11). Ésta sería la configuración obtenida de los cálculos teóricos previos. Sin embargo, para obtener la definitiva se deben de tener en cuenta los reguladores PWM, así como algunas comprobaciones recomendadas por el IDAE.

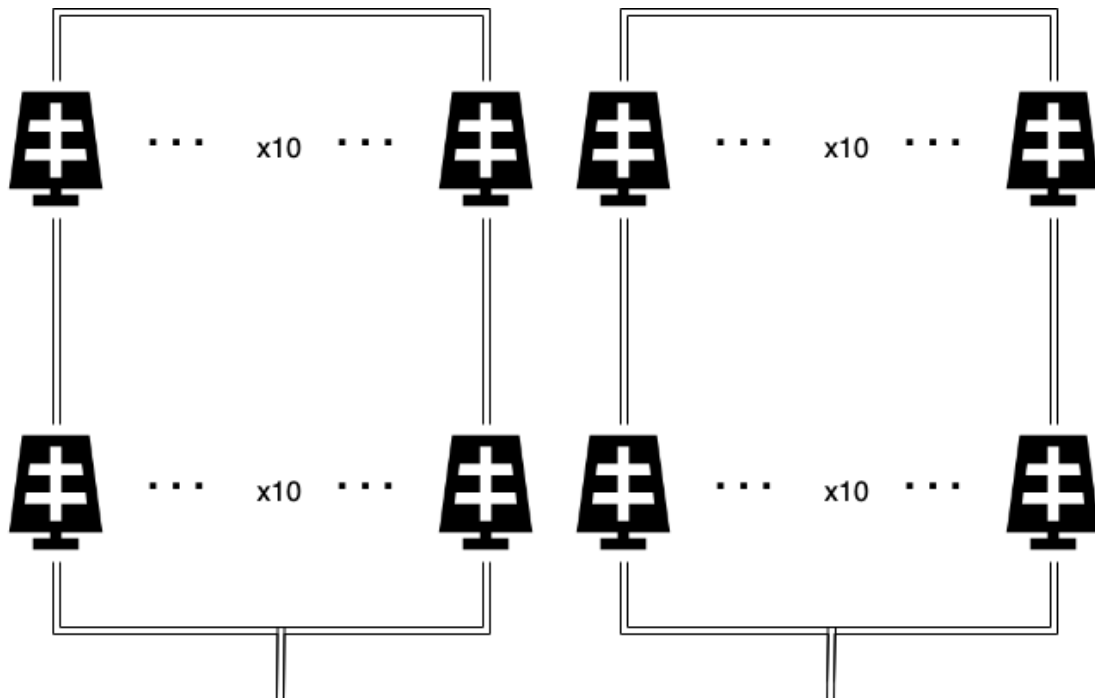


Figura 11. Diagrama de conexión de 2 *strings* fotovoltaicos en serie donde cada arreglo se compone de 20 módulos conectados en paralelo

Para determinar el número de reguladores PWM a incluir en el diseño se utilizarán las Ec.(14) y (15). El número de reguladores PWM corresponderá al valor entero superior más alto proporcionado por ambas ecuaciones, ya que sería el caso más restrictivo. Eligiendo dicho valor se asegura la robustez del sistema y su compatibilidad frente a corrientes máximas.

$$\frac{I_{SC}^{GF}}{I_{RI}^{MAX}} = \frac{188,4}{110} = 1,71 \quad (14)$$

$$\frac{I_S^{GF}}{I_{RO}^{MAX}} = \frac{43,75}{55} = 0,8 \quad (15)$$

Donde I_{SC}^{GF} es la corriente a la salida del generador FV y se obtiene del producto entre la corriente en cortocircuito (I_{SC}) unitaria por módulo y el número de módulos en paralelo (20), obteniendo un resultado de 188,4 A. I_{RI}^{MAX} es la máxima corriente soportada por el regulador PWM a su entrada, cuyo valor obtenido de las hojas de especificaciones del fabricante es 110 A.

I_S^{GF} es la corriente de salida del regulador y se calcula a partir de la Ec.(16), y I_{RO}^{MAX} es la máxima corriente soportada por el regulador PWM a su salida (55 A).

$$I_S^{GF} = \frac{P_T}{\eta_I} = 43,75 \text{ A} \quad (16)$$

Donde P_T es la potencia total de pico de las cargas (1890W), teniendo en cuenta que se han eliminado los elementos Tetera (2200 W) y Arrocera (2000 W) (ver Tabla 2), ya que incluirlos en este cálculo desvirtuaba el número de reguladores PWM e inversores a utilizar en el diseño, siendo el tiempo de uso de estos dos electrodomésticos muy corto y pudiendo prescindir de su uso en momentos críticos. $\eta_I = 0,9$ es el rendimiento del inversor y V_N es la tensión nominal del inversor. Del cociente de los resultados de las Ec.(14) y (15) se deduce que el número de reguladores PWM a considerar serán 2 unidades. A partir de este resultado, se revisa el número de módulos fotovoltaicos, el cual debe ser múltiplo del número de reguladores para que los arreglos estén en equilibrio.

4.4.5 Número de inversores

Para obtener el número de inversores se partirá de la potencia a la entrada del inversor, la cual se estima como el cociente entre la potencia total de las cargas (1890 W) y el rendimiento del inversor (0,9), resultando 2100 W. A partir de este valor se estima la máxima corriente a la entrada demandada por las cargas como el resultado de dividir de la potencia total demandada por las cargas y la tensión nominal a la entrada del inversor, la cual coincide con la tensión del acumulador (48 V):

$$I_{Max,Load} = \frac{\frac{P_T}{\eta_I}}{V_N} = 43,75 \text{ A} \quad (17)$$

IDAE recomienda dejar un margen de guarda adicional del 25%, resultando que la corriente con la que tendría que trabajar el inversor es de 54,69 A. Del cociente de la corriente máxima soportada a la entrada del inversor (60A) y la $I_{Max,Load}$, se deduce que es necesaria una unidad del inversor Leonics Aplo S-219CP para convertir la energía almacenada en los acumuladores a corriente alterna para su consumo.

4.4.6 Capacidad de los acumuladores

Para calcular la capacidad nominal del conjunto de acumuladores se emplea la Ec.(18).

$$C_N = \frac{\frac{E_{CC}^{AC}}{R_{AC}}}{P_D \cdot V_N} \cdot N = 3382,03 \text{ Ah} \quad (18)$$

Donde E_{CC}^{AC} corresponde al consumo de las cargas en Wh/día, R_{AC} es el rendimiento en corriente alterna, P_D es la profundidad de descarga, V_N la tensión nominal de los acumuladores y N es el número de días de autonomía.

Teniendo en cuenta que el número de reguladores de la instalación son 2, la capacidad por sección mínima será el cociente entre la capacidad nominal (C_N) y el número de reguladores, resultando 845,51 Ah. Tomando una tensión de

flotación de 54 V, dado que la tensión de la batería son 6 V, el cociente entre ambos parámetros, redondeado al entero superior inmediato, determina que el número de unidades de baterías en serie será de 8. Teniendo en cuenta que se han seleccionado 2 reguladores PWM, el número total de baterías será 16. Por lo tanto, la capacidad por sección para 100h (C_{100}) viene dada por la Ec.(19). Se toman 100h de autonomía por ser el entero superior más próximo al resultado de multiplicar el número de días de autonomía que se requieren en la instalación, 4×24 horas que tiene cada día (total 96 horas). C_{100} se obtiene de la hoja de especificaciones del fabricante.

$$C_{sección} = C_{100} \times N_{bat}^{serie} = 255 \times 8 = 2040 Ah \quad (19)$$

4.4.7 Comprobaciones

Ya se tiene una estimación del dimensionado de la instalación solar fotovoltaica. El siguiente paso, consiste en realizar una serie de comprobaciones para verificar que se cumplen las recomendaciones de IDAE.

Recomendación I: La corriente soportada por el regulador a la entrada debe ser superior a la corriente de cortocircuito (I_{SC}). La corriente soportada por el regulador será:

$$I_{REG} = I_{SC} \cdot N_p = 9,42 \cdot 10 = 94,2 A \quad (20)$$

$$I_{REG} > I_{SC} \rightarrow 110 A > 94,2 A_{SC} \quad (21)$$

Recomendación II: Debe cumplirse la relación dada por la Ec.(22) entre la capacidad de la batería 20 horas y para 100 horas:

$$C_{20} \approx C_{100}/1,25 \quad (22)$$

De la hoja de especificaciones del fabricante de la batería se obtiene que $C_{20} = 229 Ah$ y $C_{100} = 255 Ah$, por tanto, se cumple la recomendación $C_{20} \approx C_{100}/1,25 = 204 Ah$

4.4.8 Sección de los cables de la instalación

Asumiendo una longitud de cableado $L=10$ m, la sección de los cables empleados en la instalación puede obtenerse a partir de la Ec.(23).

$$S = \frac{2 \cdot L \cdot I_{SC}}{\sigma_{Cu} \cdot 0,015 \cdot V_N} = 93,45 \text{ mm}^2 \quad (23)$$

Donde L es la longitud del cableado (10m), I_{SC} es la corriente de cortocircuito del generador FV (9,42 A), σ_{Cu} es la conductividad del cobre (53 [S/m]) y V_N es 48 V. Operando resulta $93,45\text{mm}^2$. Es importante tener en cuenta que la sección de cable se ve duplicada por la ida y la vuelta.

4.4.9 Superficie ocupada en el tejado por los módulos fotovoltaicos

Con el fin de conseguir un factor de sombras (FS) ideal, por razones de seguridad y con el fin de no consumir espacio de parcela, la instalación de los módulos se realizará sobre tejado. La superficie total que ocupará en el tejado se obtiene a partir de las dimensiones del módulo (ver Anexo 8):

$$S = H \times W \times N^{\circ}_{paneles} = 1,96\text{m} \cdot 0,992 \cdot 40 = 77,77 \text{ m}^2 \quad (24)$$

Donde H es el alto y W el ancho de los paneles. Un indicador interesante es el ratio de metros cuadrados que se necesitan para generar 1 KW de producción de energía, el cual puede ser estimado a partir de la Ec.(25):

$$R_{m^2/1KW} = \frac{H \times W \times N^{\circ}_{paneles}}{P_{GV}/1000} = \frac{1,96 \times 0,992 \times 32}{10874,3/1000} = 5,72 \text{ m}^2 \quad (25)$$

4.4.10 Diagrama de bloques de la instalación FV aislada

En la Figura 12 se representa, en forma de diagrama de bloques, el conjunto de todos los subsistemas que forman el diseño de la instalación solar FV en la modalidad de aislada (Diseño 1).

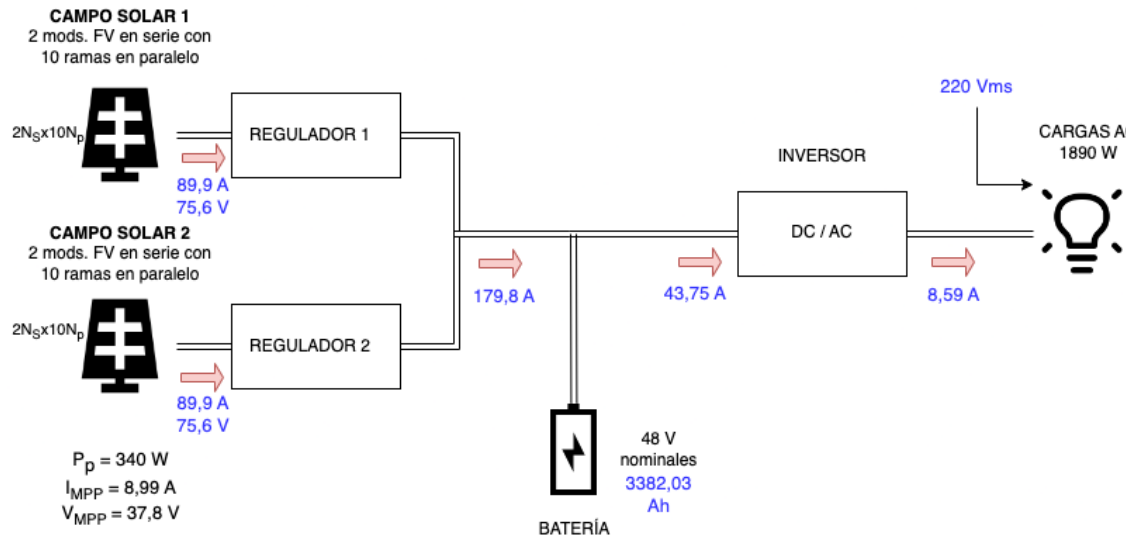


Figura 12. Diagrama de bloques del diseño de la instalación aislada con todos los elementos electrónicos que la componen

Tras cuantificar el número de subsistemas electrónicos necesarios para cubrir las necesidades de las cargas energéticas con una instalación aislada se estima que la superficie necesaria para su implantación es de $77,77 \text{ m}^2$. En relación a su coste, aunque éste será descrito con más detalle en el Capítulo 5, se avanza en este punto del TFG que sería necesario asumir una inversión inicial de 20.540 €. Los resultados de este primer diseño indican que, para abastecer los consumos del orfanato mediante una instalación FV aislada, es necesario disponer de un espacio muy extenso y de una inversión inicial excesivamente elevada para el presupuesto considerado por la ONG Colabora Birmania. Estos resultados motivaron la consideración de un segundo diseño que combine las ventajas de poder conectarse a la red eléctrica nacional, al tiempo que aproveche las ventajas de la producción de energía mediante una instalación FV. En este segundo diseño, se busca prescindir de las baterías junto con sus reguladores. De este modo, en los periodos con baja radiación solar, el aporte de energía vendrá a través de la conexión a la red eléctrica. Con esta nueva perspectiva se busca alcanzar un diseño con un presupuesto más realista a las posibilidades del orfanato.

4.5 Diseño 2: Instalación conectada a red eléctrica

Por los motivos expuestos en la sección anterior, se optó por explorar una alternativa donde la viabilidad económica fuese el eje central del diseño. Es por ello, que para el siguiente diseño se prescinde de los acumuladores (o baterías). Los acumuladores son subsistemas que necesitan ser mejorados en muchos aspectos, en este sentido, su elevado coste y baja eficiencia los convierte, habitualmente, en el punto débil de una instalación fotovoltaica. Al eliminar los acumuladores también desaparecen los reguladores, quedando únicamente los módulos fotovoltaicos y el inversor.

4.5.1 Estimación de consumos regulares diarios y diurnos.

Los consumos utilizados para este Diseño 2 son los mismos que se han utilizado para el Diseño 1. Sin embargo, dado que no se debe acumular el excedente de energía generada, es necesario adaptar el generador FV a una parte de la energía demandada por las cargas, de tal manera que los excedentes queden minimizados.

Como ya se indicó en la sección 4.3.1, sólo una parte de los consumos pueden asumirse como *regulares*, entendiendo como tales aquéllos en los que la demanda de energía se produce durante gran parte del día. En la Tabla 8 (extracto de la Tabla 2) se detallan dichos consumos regulares, se trata, fundamentalmente, de las neveras y congeladores para los alimentos.

Equipos	Número	Potencia [W]	Tiempo [h/día]	Consumo [Wh/día]
Congelador 1	1	200	16	3200
Congelador 2	1	200	16	3200
Nevera 1	1	80	14	1120
Nevera 2	1	80	18	1440
Nevera 3	1	90	18	1620

Tabla 8. Consumos regulares de las cargas más relevantes.

Teniendo en cuenta las potencias demandadas por las cargas, el consumo de energía y el tiempo de uso diario totales, se deduce que las cargas que se muestran en la Tabla 8 representan, aproximadamente, el 58% del consumo energético del orfanato. Por otro lado, hay que tener en cuenta que la instalación FV únicamente generará energía durante el día, por lo que, tras aplicar una corrección de un 65%, correspondiente a 16 horas de luz diurna, se concluye que la energía que deberá abastecer la instalación fotovoltaica será un 37,6% del total de los consumos considerados inicialmente.

En la Tabla 9 se muestran los parámetros más relevantes asociados a los consumos regulares. En la columna 2 se incluyen los consumos diarios totales (incluyendo horas diurnas y nocturnas). En la columna 3 se incluyen los consumos exclusivamente diurnos, es decir, los demandados por las cargas exclusivamente durante las horas de luz solar (se estiman en 16 horas).

Parámetro	Consumos regulares diarios	Consumos regulares diurnos
Potencia total [W]	650	650
Consumo [Wh/día]	10580	6877,00
Tiempo de ON medio[h/día]	16,40	10,66
Representación del total	57,9%	37,6%
Consumo al mes [kWh]	317,40	206,31

Tabla 9. Parámetros más relevantes de los consumos regulares diarios (diurnos y nocturnos) y exclusivamente diurnos.

En términos absolutos, resulta un consumo medio mensual de 206,3 kWh/mes, dato que se utilizará en los siguientes apartados para el diseño.

Posteriormente en el Capítulo 5 donde se detalla el análisis económico, se tomará el valor del 35% para completar los cuadros de amortización, ya que, los consumos medidos (ver Tabla 8) son ligeramente inferiores a los obtenidos de las facturas proporcionadas (ver Anexo 2).

4.5.2 Replanteamiento de cálculos con los nuevos consumos

El procedimiento seguido para obtener el número de paneles fotovoltaicos de la instalación, los valores de los rendimientos, el valor de la potencia media de pico mínima, la elección del inversor y las comprobaciones recomendadas por IDAE [13] es, en esencia, el mismo que el indicado en la sección 4.4, por lo que no se repetirán en este punto de la memoria todas las ecuaciones. En su lugar, se indicarán los resultados más relevantes obtenidos tras la aplicación de dicho procedimiento. El detalle de los cálculos realizados puede consultarse en el Anexo 3.7.

El método del *mes crítico* arrojará los mismos resultados que los obtenidos para el Diseño 1 (ver Anexo 3.6. Mes crítico con conexión a red), aunque dado que el consumo asociado a las cargas en este escenario es menor, el conjunto de módulos fotovoltaicos se reducirá considerablemente.

En la Tabla 10 se muestran los parámetros más relevantes de los cálculos realizados para el segundo diseño con conexión a red. En la columna 1 se indica el nombre del parámetro y sus unidades, en la columna 2 los valores de los resultados de los cálculos y, finalmente, en la columna 3 el número de la ecuación de la sección 4.4 empleada para la obtención de estos valores.

Parámetro	Diseño 2 - con conexión a red	Ecuación N ^o
Rendimiento R_{AC}	0,863	7
Rendimiento PR_{AC}	0,745	6
Potencia media de pico mín [W]	2468,15	8
Pot. media de pico mín + 25% [W]	3085,19	8
I_{GF} [A]	8,99	-
V_{GF} [V]	340,20	-
P_{GF} [W]	3058,40	17
Número de reguladores	No se utilizan reguladores	
Número de inversores	1,00	-
Número de baterías	No se utilizan baterías	
Número de módulos	9,00	-
Sección de cable [mm ²]	0,66	21
Superficie [m ²]	17,50	22
Inversión [€]	2812,63	-

Tabla 10. Resultados de los cálculos del diseño 2: con conexión a red.

El resultado es una configuración de 9 módulos FV conectados entre sí en serie y un único inversor para transformar la energía continua en energía alterna de consumo. Esta topología supone que se trabajará con tensiones altas y corrientes bajas, lo que siempre es deseable desde el punto de vista económico por el ahorro de protecciones (fusibles) y de cableado. También desde una perspectiva técnica las tensiones altas suponen una mayor eficiencia.

Otro aspecto destacable es el cambio de modelo de inversor para ajustarse a los nuevos requerimientos técnicos del Diseño 2. En este caso, puesto que no se encontraron opciones que se adecuasen al diseño en el mercado local de Tailandia, se ha optado por emplear un modelo internacional de referencia: el SMA Sunny Boy 2.5 (ver Anexo 9. Inversor SMA Sunny Boy).

4.5.3 Diagrama de bloques de la instalación FV conectada a la red eléctrica

En la Figura 14 se representa, en forma de diagrama de bloques, el conjunto de los elementos electrónicos del diseño de la instalación FV en la modalidad de conexión a red eléctrica. En dicho diagrama se observa la simplicidad de la instalación, la cual se traduce en una reducción del capital necesario para su implementación, una mayor simplicidad en su mantenimiento al prescindir de los acumuladores y una menor superficie ocupada.

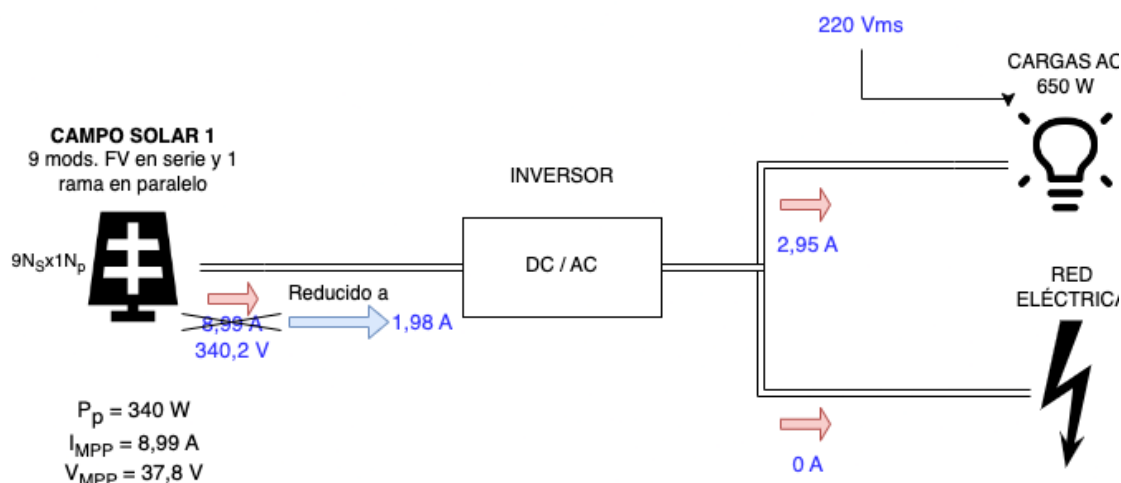


Figura 13. Diagrama de bloques del diseño de la instalación con conexión a red eléctrica incluyendo todos los elementos electrónicos que la componen.

A continuación, se incluyen algunas consideraciones adicionales sobre el diseño final de la instalación solar presentado en la Figura 13. En particular, se discute el efecto que tienen las temperaturas elevadas sobre la capacidad de producción energética de las células fotovoltaicas (sección 4.5.4). Por otro lado, también se discute la necesidad de incorporar un dispositivo de vertido cero para cumplir con la legislación de la zona, así como las consecuencias que este hecho tiene en el diseño final de la instalación (sección 4.5.5).

4.5.4 Efecto de la temperatura sobre las células fotovoltaicas

Como ya se comentó en la sección 4.2.1, los *data sheets* de los módulos fotovoltaicos especifican los parámetros basados en condiciones STC: radiación de 1000 W/m^2 , temperatura de célula de 25°C y presión atmosférica de $1,5 \text{ AM}$. La temperatura es un valor clave a considerar para estimar la producción de energía, ya que existe una pérdida de dicha producción para valores elevados de temperatura y un aumento de la tensión del generador fotovoltaico para temperaturas bajas. En el caso de Tailandia, la temperatura media del mes más frío no es inferior a 21°C , estando la más alta en torno a 35°C [10], por lo que se analizarán únicamente los efectos que tienen las temperaturas elevadas sobre los paneles. La mayoría de los fabricantes indican en sus hojas de especificaciones que para una temperatura ambiente de 40°C se pueden estimar unas pérdidas en la producción de energía de los paneles del 20%.

Es importante destacar que existe una diferencia entre la temperatura del ambiente y la temperatura de la célula FV, siendo esta última muy superior a la primera. En términos generales, se puede afirmar que la temperatura de la célula FV suele ser aproximadamente 25°C superior a la temperatura del ambiente. Para obtener un cálculo más preciso de la temperatura de la célula T_{Cel} se utiliza la Ec.(26), donde:

- 1) T_a corresponde a la temperatura media del ambiente.
- 2) G es al valor de irradiación máxima.
- 3) NOTC corresponde a la temperatura de operación de la célula que, según las especificaciones del fabricante es de 44°C (ver Anexo 8)

$$T_{Cel} = T_a + G \cdot \frac{NOTC - 20^\circ\text{C}}{0,8} \quad (26)$$

El aumento de la temperatura disminuye la tensión de salida del campo solar (V_{GFSC}), y esto puede afectar a la tensión de operación de máxima potencia con la que el inversor funciona a máximo rendimiento. Para un buen aprovechamiento energético es importante que la tensión de salida del campo solar esté comprendida alrededor de la tensión de MPP (Maximum Power Point). Adicionalmente, el aumento de la temperatura también tiene como consecuencia un aumento de la corriente de salida del campo solar.

Se debe verificar que la corriente continua de salida en condiciones de cortocircuito (I_{SC}) no supera la máxima corriente admitida por el inversor. A continuación, se calcula la variación de los parámetros del módulo fotovoltaico con la temperatura, teniendo en cuenta las siguientes condiciones iniciales:

- Localización: latitud $17,55521^\circ$ y longitud $97,92481^\circ$
- Temperatura ambiente máxima: $36,3^\circ\text{C}$ (mes de abril) [10]
- Condiciones STC: 25°C , 1000 W/m^2 , $1,5\text{ ATM}$
- NOTC: 44°C
- $P_{MPP-TSTC} = 335\text{ W}$
- $I_{SC} = 9,35\text{ A}$
- $V_{MPP-TSTC} = 37,6\text{ V}$
- α (Coeficiente de temperatura de I_{SC}): $0,05\text{ \%/}^\circ\text{C}$
- β (Coeficiente de temperatura de V_{OC}): $-0,32\text{ \%/}^\circ\text{C}$
- γ (Coeficiente de temperatura de P_{MAX}): $-0,41\text{ \%/}^\circ\text{C}$

A partir de la Ec.(27) y de los valores anteriores, se obtiene la máxima temperatura que alcanzarán las células FV en el mes más caluroso, abril en este caso:

$$T_{Cel}^{max} = T_a^{Max} + G \cdot \frac{NOTC - 20^\circ\text{C}}{0,8} = 66,3^\circ\text{C} \quad (27)$$

Las Ecs.(28), (29) y (30) proporcionan la intensidad máxima de cortocircuito, voltaje mínimo y potencia entregada por el panel, respectivamente, en el punto de máxima potencia, teniendo en cuenta los coeficientes de temperatura indicados más arriba:

$$I_{SC} = I_{SC-TSTC} + I_{SC-TSTC} \cdot \alpha \cdot (T_{Cel}^{max} - 25^\circ\text{C}) = 9,54\text{ A} \quad (28)$$

$$V_{MPP(T_{Cel}^{max})} = V_{MPP-TSTC} + V_{MPP-TSTC} \cdot \beta \cdot (T_{Cel}^{max} - 25^\circ\text{C}) = 32,63\text{ V} \quad (29)$$

$$P_{MPP(T_{Cel}^{max})} = P_{MPP-TSTC} + P_{MPP-TSTC} \cdot \gamma \cdot (T_{Cel}^{max} - 25 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 278,27 \text{ W}_p \quad (30)$$

En las ecuaciones anteriores $P_{MPP-TSTC}$ hace referencia a la potencia máxima de pico para condiciones STC dada en la hoja de especificaciones del fabricante del módulo (ver Anexo 8).

Uno de los aspectos más destacables es la pérdida de potencia con el aumento de temperatura, llegando a tener una disminución de hasta un 17% cuando el panel trabaja a temperaturas máximas, que en términos absolutos corresponde a una disminución de 335 W_p a 278,27 W_p .

4.5.5 Dispositivo de inyección cero

Como ya se ha indicado en secciones anteriores, en Tailandia no está permitido el vertido de energía a la red eléctrica, por lo que para el diseño se ha tenido en cuenta que, en las horas donde la producción es máxima, pueden existir excedentes y será necesario el uso de un dispositivo de inyección cero. Hay que señalar que ningún sistema de inyección cero es totalmente preciso y que generalmente tienen un retardo, de modo que, pequeñas fugas de energía serán inevitables. La principal ventaja del uso de este sistema, cuando no es posible recibir compensaciones de los excedentes, es que generalmente ahorra trámites y permisos, de hecho, en algunos casos es la única solución para que optar por que la energía solar sea una realidad.

Un sistema de vertido cero requiere de un analizador o medidor de energía, cuya función es hacer un seguimiento en tiempo real del consumo de las cargas, así como la gestión del flujo de la corriente que se transmite desde los módulos fotovoltaicos a la vivienda, en este caso el orfanato y sus edificios. En este diseño se ha optado por el medidor de energía SMA EMETER-20 (ver Anexo 10. Medidor energía EMETER-20).

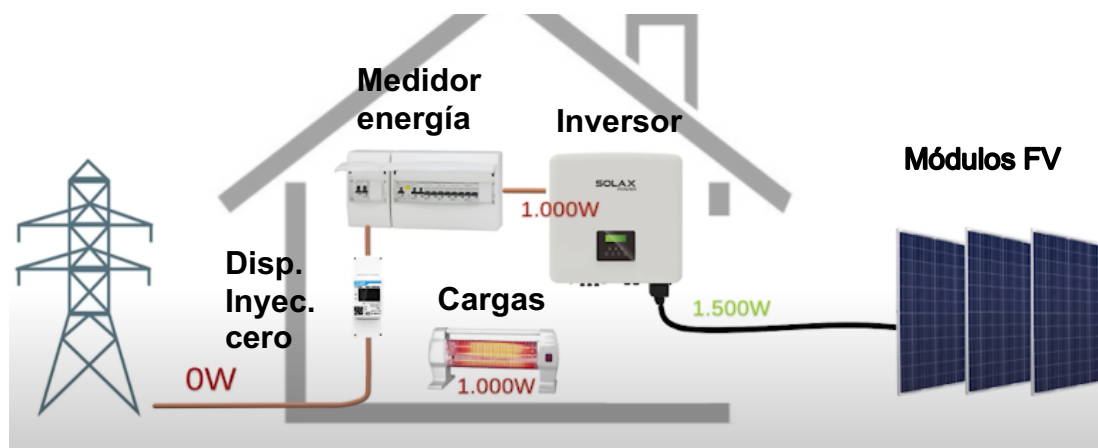


Figura 14. Diagrama representando una instalación fotovoltaica con un dispositivo de inyección cero



El medidor de energía y el inversor deben ser compatibles, por lo que suelen ser comercializados por el mismo fabricante. La comunicación entre ellos se realiza mediante, mediante un cable de red UTP (Unshielded Twister Pair). De este modo, cuando la producción fotovoltaica supera la potencia demandada por las cargas, el sistema inyección cero modifica el punto de trabajo del campo fotovoltaico para reducir la potencia fotovoltaica generada (saliéndose del MPP). Por el contrario, cuando se dé la situación opuesta el inversor permitirá que fluya toda la potencia fotovoltaica generada, generalmente teniendo una situación mixta donde parte de las cargas estarán alimentadas de la producción fotovoltaica y el restante que sería cubierto con energía de la red eléctrica.

4.6 Comparación técnica de los dos diseños presentados

La finalidad de esta sección es ofrecer una comparativa entre los dos diseños planteados en este TFG. En la Tabla 11 se muestran enfrentados los resultados de los parámetros técnicos más relevantes de ambos diseños, recogidos en las columnas 2 y 3. En la columna 4, se representan, en porcentaje, las variaciones entre ambos diseños.

Parámetro	Diseño 1 Aislada	Diseño 2 Con conexión a red	Diferencia [%]
Rendimiento R_{AC}	0,704	0,863	22,59%
Rendimiento PR_{AC}	0,499	0,745	49,30%
Potencia media de pico mín [W]	10716,62	2468,15	-76,97%
Pot. media de pico mín + 25% [W]	13395,78	3085,19	-76,97%
I_{GF} [A]	177,19	8,99	-94,93%
V_{GF} [V]	75,60	340,20	350,00%
P_{GF} [W]	13395,78	3058,40	-77,17%
Número de reguladores	2,00	-	-
Número de inversores	1,00	1,00	-
Número de baterías	16,00	-	-
Número de módulos	40,00	9,00	-77,50%
Sección de cable [mm ²]	93,45	0,66	-99,29%
Superficie [m ²]	77,77	17,50	-77,50%
Inversión [€] ⁵	20540,53	2812,63	-86,31%

Tabla 11. Comparación de los parámetros más relevantes del diseño 1 - aislada y el diseño 2- conexión a red

⁵ Ver detalle en el Capítulo 5

A grandes rasgos, la comparativa técnica se puede dividir en cinco aspectos:

- 1) Rendimientos
- 2) Potencia
- 3) Corrientes y tensiones
- 4) Sección de cableado
- 5) Superficie ocupada

En cuanto a los rendimientos (1) es más favorable el Diseño 2, principalmente debido a la ausencia de acumuladores. Sin embargo, en cuanto a potencia (2), es evidente que el Diseño 1 tiene un alcance de cobertura mayor debido a su envergadura y enfoque de cargas energéticas a cubrir.

Un punto a destacar, son las diferencias entre corrientes y tensiones (3), donde para el Diseño 1 se trabaja con altas corrientes y bajas tensiones como consecuencia de una topología de conexión mayoritariamente en paralelo, debido a la limitación de la tensión nominal (48 V) del regulador. Por el contrario, en el Diseño 2, la tensión es el valor que se eleva, lo cual no representa inconvenientes de rendimiento, y la corriente se mantiene en valores mínimos, ya que el diseño consiste en un único *string* en serie. Estos aspectos, están directamente relacionados con la sección de cable (4) a utilizar para interconectar los diferentes subsistemas que conforman las instalaciones. A mayor corriente, mayor sección de cable será necesaria para permitir el paso de corriente. Esto tiene un gran impacto económico y de rendimiento por pérdidas debido a la resistencia de los materiales.

Finalmente, desde el punto de vista del espacio ocupado por la instalación (5), claramente el Diseño 2 ofrece una solución más práctica. Una reducción de ~77,5% en superficie ocupada para el Diseño 2 respecto del Diseño 1 implica que la solución propuesta para el segundo diseño pueda ubicarse sin problemas en alguno de los tejados del orfanato. En el caso del Diseño 1 sería necesario utilizar varios tejados.

Desde un punto de vista técnico, se puede concluir que, para un emplazamiento con conexión a la red eléctrica, una instalación aislada no es la mejor opción, ya que, la tecnología fotovoltaica y los subsistemas asociados, en especial los acumuladores, no son suficientemente eficientes para suponer una mejora sobre el sistema eléctrico. Los acumuladores necesitan también un espacio adecuado para ser ubicados, dicho espacio, debe tener unas condiciones de limpieza y temperatura óptimas para mantener un buen funcionamiento de éstos. El mantenimiento de una instalación aislada también es mucho más complejo. En definitiva, el hecho de poder disponer de energía eléctrica como recurso puede llegar a ser un aspecto determinante y tener más peso que las principales desventajas que suelen considerarse.

En relación a los proveedores seleccionados para suministrar los subsistemas necesarios, en la Tabla 12 se resumen los subsistemas empleados en cada uno de los dos diseños, indicando en cada caso el nombre del proveedor o distribuidor y su condición de local o internacional. Los criterios seguidos para

seleccionar el proveedor han sido (1) factor económico y (2) disponibilidad, en este orden.

Equipo solar	Fabricante	Modelo	Mercado	Diseño
Módulo FV	Trina Solar	TSM-340	Internacional	1 y 2
Inversor	Leonics	Apollo S-219CP	Tailandés	1
Regulador	Steca	Power Tarom 4110	Tailandés	1
Acumulador	Trojan	SPRE 06 255	Tailandés	1
Inversor	SMA	Sunny Boy 2.5	Internacional	2

Tabla 12. Equipos solares que conforman los Diseños 1 y 2 y su disponibilidad en el mercado.

En el siguiente capítulo se introduce una comparativa económica de las dos soluciones propuestas en este TFG.

Capítulo 5. Análisis económico

Uno de los aspectos clave del proyecto era que fuera viable para poder ser ejecutado, por ello, este TFG incluye también un estudio económico de la instalación propuesta. Para ello, se han tenido en cuenta los precios de venta al público de los elementos que conforman el diseño final escogido, el cual finalmente combina la conexión a red eléctrica y los dispositivos electrónicos mínimos necesarios para implementar una instalación fotovoltaica. En la Tabla 13 se muestra este detalle. En la primera columna se indican los subsistemas que sería necesario adquirir, así como el coste de instalación. En la columna 2 se indica el coste unitario, el importe indicado es orientativo, ya que, cuando se solicitaron los presupuestos, en muchos casos se indicaba que el coste estaba sujeto a una variación de un $\pm 20\%$.

Elemento solar	Precio unitario [€]	Cantidad	Coste [€]
Sunny Boy 2.5	800 $\pm 20\%$	1	800
SMA Energy Meter 20	430 $\pm 20\%$	1	430
TSM-340	170	9	1530
Instalación	52,63 $\pm 35\%$	1	52,63
Total			2812,63

Tabla 13. Presupuesto estimado de la instalación correspondiente al Diseño 2. Instalación FV con conexión a la red eléctrica.

Con el fin de establecer una comparativa entre los dos diseños también se aporta una estimación del presupuesto para el Diseño 1, siguiendo la misma estructura que la Tabla 13.

Elemento solar	Precio unitario [€]	Cantidad	Coste [€]
Leonics Aplo S-219CP	3050 $\pm 20\%$	1	3050
Trojan SPRE 06 255	430 $\pm 20\%$	16	6880
Steca Power Tarom 4110	1800 $\pm 20\%$	2	3600
TSM-340	170 $\pm 20\%$	40	6800
Instalación	210,53 $\pm 35\%$	1	210,53
Total			20540,53

Tabla 14. Presupuesto estimado de la instalación correspondiente al Diseño 1. Instalación FV aislada.

Es importante hacer hincapié en que el desembolso económico que requiere la ejecución de este proyecto debe ser considerado como una inversión. De este modo, en términos absolutos, las cifras indicadas en las Tablas 13 y 14 no contextualizan correctamente el desembolso de capital requerido, por lo que otro aspecto importante a tener en cuenta es el *payback* o plazo de recuperación.

Teniendo en mente que la motivación principal de este proyecto es contribuir a mejorar la calidad de vida de los habitantes del orfanato aportando un ahorro mensual en la factura de la luz, se hace una estimación del coste mensual del kWh a partir de las facturas proporcionadas por la institución (ver Tabla 15).

Energía consumida [kWh]	Coste mensual [Baht]	Coste mensual [€]	Precio Bath/kWh	Precio €/kWh
600	2537,51	66,78	4,2292	0,1113

Tabla 15. Estimación del coste del kWh obtenido a partir de las facturas de luz proporcionadas por la institución. [14]

Asumiendo que la instalación de las placas solares proporciona ~35% de la energía demandada por las cargas (ver Tabla 9), a partir de la Tabla 15 se estima un ahorro mensual de 23,35 €/mes en la factura de luz gracias al aprovechamiento de la energía solar proporcionada por la instalación diseñada en este TFG (35% de 66,78 €). Con este dato, se calcula el cuadro de amortización de la instalación por años. El valor de la cuota (280,46 €) se obtiene del producto de la energía consumida (columna 1 de la Tabla 15) y el precio (columna 5 de la Tabla 15), el porcentaje del total que cubre el sistema FV (35%) (ver Tabla 9) y los 12 meses que representan un año.

El estudio indica que, en un periodo de 10 años y 1 mes, el ahorro conseguido en la factura de la luz cubriría la inversión inicial del proyecto para el Diseño 2. Hay que tener en cuenta que no se han estimado costes de mantenimiento técnico durante esos 10 años, ya que la instalación con conexión a la red eléctrica apenas los tiene, siendo la vida útil de los módulos fotovoltaicos entre 25 y 30 años y del inversor unos 10 años.

Periodo	Capital inicial	Cuota	Capital pendiente
Año 1	2.812,63 €	280,46 €	2.532,17 €
Año 2	2.532,17 €	280,46 €	2.251,71 €
Año 3	2.251,71 €	280,46 €	1.971,25 €
Año 4	1.971,25 €	280,46 €	1.690,79 €
Año 5	1.690,79 €	280,46 €	1.410,32 €
Año 6	1.410,32 €	280,46 €	1.129,86 €
Año 7	1.129,86 €	280,46 €	849,40 €
Año 8	849,40 €	280,46 €	568,94 €
Año 9	568,94 €	280,46 €	288,48 €
Año 10	288,48 €	280,46 €	8,02 €
Mes 1 Año 11	8,02 €	8,02 €	- €

Tabla 16. Tabla de amortización de la inversión para la ejecución del Diseño 2: Instalación solar FV con conexión a red.

Del mismo modo se calcula la tabla de amortización para el Diseño 1, que resulta ser mucho más extensa y por lo tanto menos atractiva económicamente. En este caso la cuota se calcula siguiendo el mismo procedimiento que en el Diseño 2, pero sin aplicar el porcentaje corrector del 35%, pues el Diseño 1 tiene como objetivo abastecer todo el consumo energético del orfanato.

Periodo	Capital inicial	Cuota	Capital pendiente
Año 1	20.540,53 €	801,32 €	19.739,21 €
Año 2	19.739,21 €	801,32 €	18.937,89 €
Año 3	18.937,89 €	801,32 €	18.136,57 €
Año 4	18.136,57 €	801,32 €	17.335,25 €
Año 5	17.335,25 €	801,32 €	16.533,93 €
Año 6	16.533,93 €	801,32 €	15.732,61 €
Año 7	15.732,61 €	801,32 €	14.931,29 €
Año 8	14.931,29 €	801,32 €	14.129,97 €
Año 9	14.129,97 €	801,32 €	13.328,66 €
Año 10	13.328,66 €	801,32 €	12.527,34 €
Año 11	12.527,34 €	801,32 €	11.726,02 €
Año 12	11.726,02 €	801,32 €	10.924,70 €
Año 13	10.924,70 €	801,32 €	10.123,38 €
Año 14	10.123,38 €	801,32 €	9.322,06 €
Año 15	9.322,06 €	801,32 €	8.520,74 €
Año 16	8.520,74 €	801,32 €	7.719,42 €
Año 17	7.719,42 €	801,32 €	6.918,10 €
Año 18	6.918,10 €	801,32 €	6.116,79 €
Año 19	6.116,79 €	801,32 €	5.315,47 €
Año 20	5.315,47 €	801,32 €	4.514,15 €
Año 21	4.514,15 €	801,32 €	3.712,83 €
Año 22	3.712,83 €	801,32 €	2.911,51 €
Año 23	2.911,51 €	801,32 €	2.110,19 €
Año 24	2.110,19 €	801,32 €	1.308,87 €
Año 25	1.308,87 €	801,32 €	507,55 €
Año 26	507,55 €	507,55 €	- €

Tabla 17. Tabla de amortización de la inversión para la ejecución del Diseño 1: Instalación solar FV aislada.

Los resultados anteriores ponen de manifiesto que, desde un punto de vista económico, el Diseño 2 es el óptimo. En cuanto a la inversión inicial, el segundo diseño requiere de un presupuesto un 730,3% inferior al primero. Adicionalmente, el periodo de amortización se reduce de 10 años para el primero a 26 años para el segundo.

Capítulo 6. Conclusiones y propuesta de trabajo futura

En este TFG se presentan dos alternativas de diseño de una instalación solar fotovoltaica adaptada al emplazamiento y consumos del orfanato Safe Haven Orphanage. La primera de ellas considerando el orfanato como un lugar aislado de la red eléctrica y la segunda considerando su capacidad de conexión a dicha red. En este sentido, a partir de los objetivos secundarios planteados en el Capítulo 2 de este Trabajo Fin de Grado, se presentan las siguientes conclusiones:

- I. Se han obtenido los datos reales del consumo energético del orfanato por dos vías: (1) a partir del estudio de las facturas eléctricas de varios meses proporcionadas por el orfanato; y (2) a través de las medidas realizadas in situ, durante los meses de la estancia. A partir de dichos datos se ha realizado un estudio de la distribución de consumos a lo largo del tiempo, el cual ha sido clave para identificar cuáles son los consumos regulares y más elevados, diferenciándolos de los esporádicos, pues los regulares serán los que determinarán principalmente el dimensionado de la instalación.
- II. Se han proporcionado dos diseños de instalación solar fotovoltaica. En el primero se ha realizado el diseño considerando que no se tiene acceso al suministro de la red eléctrica, y en el segundo considerando que sí. Para cada uno de los dos diseños se proporcionan los subsistemas y el número de ellos (dimensionado). También se proporciona el presupuesto necesario para realizar la inversión inicial en cada uno de ellos, así como una tabla de amortizaciones.
- III. Se han buscado proveedores locales, pero también se han valorado distribuidores internacionales. Los criterios utilizados han sido el coste y la disponibilidad. Finalmente, para el Diseño 1 (instalación aislada) los inversores, acumuladores y reguladores (ver Anexos 5, 6 y 7, respectivamente) empleados pertenecen al mercado tailandés, no así para los módulos FV (ver Anexo 8), que con el fin de obtener una comparativa equitativa con el Diseño 2 (instalación con conexión a red), se utiliza un modelo del mercado internacional. Los subsistemas empleados en el Diseño 2 pertenecen al mercado internacional.
- IV. En relación a la búsqueda de microcréditos con los que costear la instalación energética propuesta, se buscó financiación a través de los colaboradores de la ONG pero sin resultado favorable, ya que el orden de prioridades económico de la entidad no estaba alineado con el proyecto.

Las conclusiones más importantes de la comparativa de los dos diseños son las siguientes:

- I. Desde el punto de vista técnico, el Diseño 1 es más complejo, al requerir más subsistemas. En particular, el Diseño 1 requiere de un mayor número de módulos FV. Aunque en la actualidad han evolucionado notablemente

y continuarán haciéndolo en los próximos años, existe una clara desventaja intrínseca asociada a los diseños aislados, pues deben cubrir al completo la demanda de energía de todas las cargas. Adicionalmente, deben proporcionar energía adicional para cubrir periodos temporales con baja radiación solar (noche, meses de invierno, condiciones climatológicas desfavorables...). Estas circunstancias hacen que sean necesarios 31 paneles más en el Diseño 1 que en el 2. Esto tiene como consecuencia un aumento el número de unidades de módulos y la superficie ocupada por éstos.

- II. El Diseño 1 requiere de la instalación de baterías o acumuladores, las cuales, para mejorar su ciclo de vida tecnológico y eficiencia, deben estar ubicadas en espacios acondicionados con temperatura controlada, lo que aumentaría considerablemente el coste de la instalación. Adicionalmente, las baterías requieren de un mantenimiento periódico, no siendo éste muy complicado, pero vital para su correcto funcionamiento. Incluir este dispositivo en el diseño, eleva el *payback* o plazo de recuperación de la inversión a un periodo que no sitúa la instalación en una posición tan atractiva, haciendo peligrar su factibilidad.
- III. Desde el punto de vista de superficie ocupada, para el Diseño 2, esta superficie se reduce en un 81,24% respecto de la solución aislada, ocupando una superficie total de 11,67 m². Por seguridad, es recomendable ubicar los módulos FV sobre los tejados de los edificios del orfanato, ya que sus usuarios son niños. Por otro lado, debido a que Tailandia sufre inundaciones recurrentes, la instalación a nivel del suelo no es viable. El Diseño 1 requiere de muchos paneles FV que deberían ser instalados en varios tejados o sobre estructuras elevadas expresamente construidas para ello; teniendo un impacto negativo en la producción y coste, ya que cada tejado tendría una orientación diferente. Adicionalmente, un aumento en el número de paneles requiere también de un aumento de cableado. En este sentido, la interconexión entre paneles ubicados en diferentes tejados supondría un punto crítico de la instalación. La superficie ocupada por el Diseño 2 permite completar la instalación de todos los módulos en un mismo tejado.
- IV. Las conclusiones anteriores anticipan que, en su conjunto, es mucho mayor la inversión que es necesario realizar para poner en marcha el Diseño 1. De hecho, el coste estimado de la instalación del Diseño 1 es un 730,3% superior a la del Diseño 2.
- V. Respecto al periodo de amortización de la inversión, el Diseño 1 requiere un periodo temporal **~260%** mayor que el Diseño 2.

En definitiva, las conclusiones extraídas de este trabajo se pueden clasificar en dos grandes grupos, las técnicas y las socioeconómicas. En el contexto del orfanato, la segunda condiciona de manera severa a la primera.

Desde un punto de vista técnico, la conclusión principal del proyecto es que las instalaciones solares fotovoltaicas aisladas no suelen ser óptimas cuando el emplazamiento objetivo está conectado a la red eléctrica. Esta afirmación tiene

consecuencias a todos los niveles, pero principalmente en el económico, de seguridad y de viabilidad. La instalación de energía FV combinada con la conexión a la red eléctrica resuelve las grandes desventajas planteadas para el Diseño 1, aunque con un enfoque diferente en cuanto a abastecimientos de consumos se refiere. En este sentido, debido a la ausencia de acumuladores, el diseño tiene como objetivo cubrir parcialmente los consumos, utilizando como respaldo la energía proporcionada por la red eléctrica cuando la demanda sea superior a la producción solar. Las instalaciones no aisladas de la red eléctrica prescinden de elementos como las baterías y los reguladores, simplificando su instalación, mantenimiento, coste económico y superficie ocupada. En el futuro, la evolución de la tecnología permitirá que los acumuladores sean más eficientes y que su coste económico disminuya. Estos dos puntos de mejora también tienen efecto sobre el resto de los subsistemas electrónicos que forman parte de los diseños fotovoltaicos. En cuanto a los paneles y su casuística con la superficie, la tendencia de los últimos años ha sido a concentrar más potencia por cada célula fotovoltaica, es decir, a aumentar la ratio de potencia por metro cuadrado.

En el plano socioeconómico, las conclusiones del TFG no son amables. A pesar de que desde el primer momento el objetivo de este TFG era llevar a cabo la implementación del proyecto, no ha sido posible hacerlo realidad. Tras presentar el estudio financiero a Colabora Birmania para valorar su financiación por parte de la organización, se desestimó la viabilidad del proyecto a pesar de los esfuerzos de contener al máximo el capital necesario a invertir. Colabora Birmania tiene como prioritarios otros proyectos ya en curso que cubren otras necesidades que requieren de un gasto económico mensual, tales como alimentación, salud o transporte. A pesar de la rentabilidad del proyecto solar, destinar recursos económicos para llevarlo a cabo pondría en peligro otros aspectos como los ya mencionados.

Tailandia es un país en vías de desarrollo, con una renta per cápita cuatro veces inferior a la española. En particular, la zona del orfanato es una zona empobrecida y afectada directamente por una guerra que tiene su origen años atrás y que de momento no ha cesado. Una manera de representar la jerarquía de prioridades de las necesidades humanas es a través de una pirámide, donde en el primer nivel de su base se recogen las necesidades fisiológicas, como la alimentación o el descanso, y en el segundo nivel aspectos como la seguridad física, empleo o salud. La economía del orfanato por sí misma no alcanza a cubrir estos dos niveles, de ahí que organizaciones como Colabora Birmania la complementen. Esta situación no permite destinar más recursos para niveles superiores, donde se situaría la instalación fotovoltaica. La rentabilidad de la instalación solar es un hecho, pero es necesario un capital inicial de inversión que representa una barrera infranqueable desde el punto de vista del poder adquisitivo del orfanato. Únicamente a través de mecenas suscritos a ONGs o programas de subvenciones gubernamentales, sería posible costear el proyecto. Haciendo un paralelismo con la situación en España, en los últimos meses

muchos ciudadanos se han visto beneficiados de fondos europeos y otras ayudas destinadas a subvencionar instalaciones fotovoltaicas domésticas con el fin de promover la energía solar. Incluso con un poder adquisitivo y una economía más saneada que un ciudadano medio tailandés, ha sido necesario aplicar este tipo de estrategias económicas para que los ciudadanos se aventuren en el campo de la energía solar, obteniendo una rentabilidad económica asegurada en unos plazos de tiempo bastante cortos y alineando sus viviendas con la transición ecológica de los próximos años.

Todos los países, desde los más desarrollados hasta los que están en vías de desarrollo, tienen múltiples compromisos a corto y medio plazo para una transición energética que ya va con retraso. En este sentido, en el año 2015, los líderes mundiales adoptaron un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos en los próximos 15 años [4]. Estas metas también son conocidas como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), pero estas acciones necesitan de un enfoque “*glocal*”, un término utilizado en Cooperación y otros ámbitos que pretende focalizar el pensamiento a un ámbito global, para luego tener una actuación local. La Universitat Politècnica de València dispone de un programa con este nombre, que apoya actividades que fomenten la solidaridad y la participación social entre la comunidad universitaria [15].

El planeta y el ser humano necesita de la combinación de todas las fuentes de energía renovables posibles para preservar su existencia y condiciones de vida. La energía solar se presenta como una de las grandes alternativas que jugará un papel muy importante y decisivo durante este siglo y próximos. “*Lo pequeño es hermoso*” (Ernst Friedrich Schumacher, 1973).

Capítulo 7. Bibliografía

- [1] Global Solar Atlas. ESMAP. <https://globalsolaratlas.info/map>
- [2] Google Maps. Coordenadas latitud 17,55521° y longitud 97,92481°
<https://goo.gl/maps/VyQtjagoVUF5uw5s5>
- [3] Introducción a las energías renovables y la eficiencia energética. Apuntes de conversión y procesado la Energía. CPE online. Antonio Arnau Vives.
https://poliformat.upv.es/portal/site/GRA_12409_2022/tool/501e56fd-d4a8-4612-a017-e8fb6934a75e
- [4] Página web Naciones Unidas. Objetivos de Desarrollo Sostenible.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [5] Centro de Formación Permanente (CFP). Universitat Politècnica de València. <https://www.cfp.upv.es/formacion-permanente/>
- [6] Curso Energía solar fotovoltaica – Una apuesta de futuro sostenible. Salvador Seguí Chilet. <https://www.cursofotovoltaica.com/>
- [7] Tipos de tecnología de módulos fotovoltaicos. Ecofener.
<https://ecofener.com/blog/tipos-de-paneles-solares/>
- [8] Tipos de conexiones para módulos fotovoltaicos. Serie y paralelo.
<https://energiasolarfotovoltaica.org/paneles-solares-de-conexion-en-serie-o-en-paralelo-la-guia-definitiva-para-aplicaciones-solares-moviles>
- [9] Energía Solar Fotovoltaica. Apuntes de conversión y procesado de la energía. CPE online. Antonio Arnau Vives.
https://poliformat.upv.es/portal/site/GRA_12409_2022/tool/501e56fd-d4a8-4612-a017-e8fb6934a75e
- [10] Web NASA. POWER Data Access Viewer.
<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [11] Calculadora PVWatts. National Renewable Energy Laboratory (NREL).
<https://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php>
- [12] Asociación Española de Normalización (UNE). IEC 62548:2016.
<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/iec/?c=25949>
- [13] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Pliego de condiciones técnicas para instalaciones aisladas.
https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_pliego_condiciones_tecnicas_instalaciones_aisladas_red_843370f2.pdf



[14] Web Metropolitan Electricity Authority (Tailandia). Electric Monthly Calculation. <https://testmeaor.me.a.or.th/en/aboutelectric/116/280/form/11>

[15] Programa GLOCAL. Universitat Politècnica de València.
<http://www.upv.es/entidades/CCD/infoweb/ccd/info/861699normalc.html>



Capítulo 8. Anexos

- Anexo 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible
- Anexo 2. Facturas eléctricas orfanato
- Anexo 3. Diseños fotovoltaicos
 - Anexo 3.1. Medición consumos
 - Anexo 3.2. Datos NASA
 - Anexo 3.3. Mes crítica aislada
 - Anexo 3.4. Cálculos aislada
 - Anexo 3.5. Financiero aislada
 - Anexo 3.6. Mes críticos conexión a red
 - Anexo 3.7. Cálculos con conexión a red
 - Anexo 3.8. Financiero conexión a red
- Anexo 4. PVWatts HSP 20.pdf
- Anexo 5. Baterías Trojan SPRE 06 255 DS
- Anexo 6. Inversor Leonics S 210 017
- Anexo 7. Regulador Steca Power Tarom 4110
- Anexo 8. Módulo Trinasolar TSM-340
- Anexo 9. Inversor SMA Sunny Boy
- Anexo 10. Medidor energía EMETER-20



Glosario de acrónimos

- Asociación Española de Normalización (UNE)
- Centro de Cooperación al Desarrollo (CCD)
- Centro de Formación Permanente (CFP)
- Conversión y Procesado de la Energía (CPE)
- Corriente Alterna (CA)
- Corriente continua (CC)
- Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (ETSIT)
- Fotovoltaico (FV)
- Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación (GITST)
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)
- Maximum Power Point Tracking (MPPT)
- National Renewable Energy Laboratory (NREL)
- Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)
- Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)
- Organización de las Naciones Unidas (ONU)
- Pulse Width Modulation (PWM)
- Standard Test Condition (STC)
- Trabajo Fin de Grado (TFG)
- Universitat Politècnica de València (UPV)
- Unshielded Twister Pair (UTP)