



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid
Tel.: 91 336 3060
info.industriales@upm.es

www.industriales.upm.es



Mónica Huidobro Pelayo

05 TRABAJO FIN DE MASTER

INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MASTER

Diseño de una estructura soporte para un módulo integrado de placa fotovoltaica

SEPTIEMBRE 2016

Mónica Huidobro Pelayo

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE MASTER:
D. Enrique Chacón Tanarro

TRABAJO FIN DE MASTER
PARA LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE MASTER EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL



POLITÉCNICA

Mis agradecimientos a

Víctor Vega Garita
Enrique Chacón Tanarro
Laura Ramirez-Elizondo

Jaime Huidobro Pérez-Villamil
María Concepción Pelayo Gutiérrez
Virginia Huidobro Pelayo

Joaquín Peñalver
Felix Cranz
Severine Somlo
Daniel Goodwin
Ramón Cordova
Pietro Frigo
Elena Galletti
H-H

Carmen Huidobro Giménez
Sara Martín Aparicio
Ignacio Martín Ochoa

RESUMEN

Este proyecto se encuentra enmarcado dentro de un trabajo de doctorado llevado a cabo en TU Delft por Víctor Vega Garita.

Dicho proyecto busca diseñar un módulo físicamente integrado, llamado **“Integrated PV-battery module (IPBM)”**. Se trata de un módulo solar compacto que incluye todos los componentes eléctricos y la batería acoplados en la parte posterior del panel solar.

La motivación que les ha llevado a realizar esta investigación es el hecho de que actualmente no existen sistemas compactos para la instalación de placas fotovoltaicas. Se pueden identificar las siguientes ventajas: fácil instalación, reducción del coste de instalación, reducción del coste de los componentes electrónicos, enfoque modular, solución portable y mayor protección.

Con este proyecto se busca diseñar una estructura que deberá unir la placa fotovoltaica con la batería y los componentes electrónicos, de modo que sea lo más compacta y ligera posible. Además, habrá que tener en cuenta la deformación del conjunto y la posible sobrecarga de los componentes debido a las altas temperaturas alcanzadas en estos sistemas.

Se buscan lograr los siguientes objetivos:

| | |
|---|---|
| 1 | Seleccionar los componentes del módulo |
| 2 | Determinar la forma más adecuada para la estructura, teniendo en cuenta la necesidad de acceso a los componentes para su posible sustitución |
| 3 | Seleccionar el material más apropiado para la estructura |
| 4 | Optimizar la estructura para que sea lo más ligera y pequeña posible |
| 5 | Realizar estudios mecánicos para asegurar que la estructura soporta los esfuerzos a los que se verá sometida durante su utilización |
| 6 | Realizar estudios térmicos para comprobar que la estructura es capaz de soportar las altas temperaturas a las que se verá sometida, debido principalmente, a la radiación solar y al calentamiento de los componentes |
| 7 | Asegurar que los componentes no alcanzan temperaturas superiores a sus límites de operación |
| 8 | Diseño de un sistema de aislamiento para evitar la entrada de agua u otros residuos del exterior dentro del módulo |

Cuadro 1: Objetivos

Lo primero que se debe realizar es la planificación del diseño del módulo, para ello se

deben determinar las distintas fases del proyecto, analizar la competencia existente, la normativa vigente y las condiciones a las que estará sometido el producto. Esto nos lleva al primer paso del diseño, la lista de requisitos del producto.

Una vez tenemos la lista de requisitos de nuestro diseño podemos pasar a desarrollar el diseño preliminar del producto. Para ello debemos determinar primero la arquitectura de nuestro sistema. Este estudio fue realizado por Nadhilah Shani, otra estudiante de Máster en TU Delft. Tras estudiar distintas posibilidades se decidió utilizar una arquitectura en línea para el sistema, ver esquema en la Figura 1.

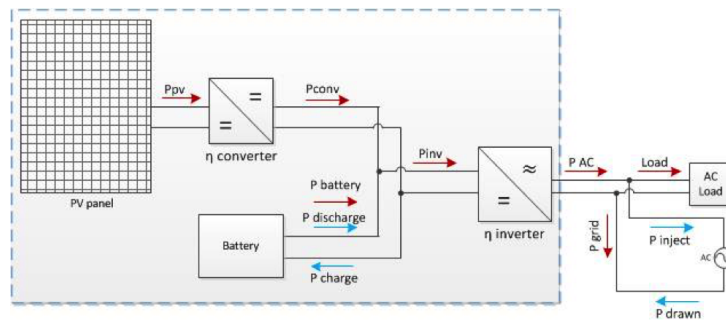


Figura 1: Esquema detallado de la arquitectura del sistema

En esta arquitectura, el panel está conectado directamente a la batería usando un convertidor DC-DC unidireccional. Además, la batería está conectada a un inversor bidireccional, el cual está conectado a la red.

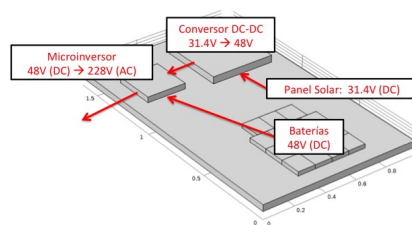


Figura 2: Esquema de conexión

Con ello ya sabemos que componentes deberán integrar nuestro sistema: un panel solar, un microinversor, un convertidor DC-DC y un conjunto de baterías.

Por último, es importante elegir el mejor material para el módulo. Teniendo en cuenta los requisitos mecánicos y térmicos del conjunto se decidió utilizar aluminio anodizado, dada su alta resistencia a la corrosión y la abrasión, y su gran protección frente a los agentes atmosféricos.

Una vez determinados los componentes y el material se pasó a la fase de diseño del módulo. Para ello se parte de un diseño preliminar básico sobre el cual se realizan simulaciones térmicas y mecánicas con Comsol para determinar que modificaciones son necesarias para llegar al diseño óptimo.

El diseño preliminar consiste en una estructura situada en la parte posterior del panel solar. Además se utiliza una rejilla metálica para proteger mejor los componentes. Puede verse el conjunto en la Figura 3.

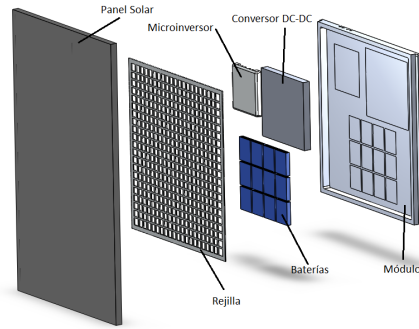


Figura 3: Diseño preliminar

Tras realizar el estudio se obtienen los siguientes resultados:

| Alternativa | Sujeción al panel | Posición de la rejilla | Resultado | Válido |
|-------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------------|--------|
| Diseño 1 | Tornillos en las esquinas | Entre el módulo y el panel | Deformación excesiva de la rejilla | No |
| Diseño 2 | Tornillos en las esquinas | Dentro del módulo | Esfuerzo excesivo sobre los tornillos | No |
| Diseño 3 | Rafles | Dentro del módulo | Cumple con los requisitos | Si |

Cuadro 2: Análisis de los distintos diseños preliminares analizados

La mejor alternativa resulta ser el Diseño 3. Con dicho diseño se obtuvieron los resultados que pueden verse en la Figura 4.

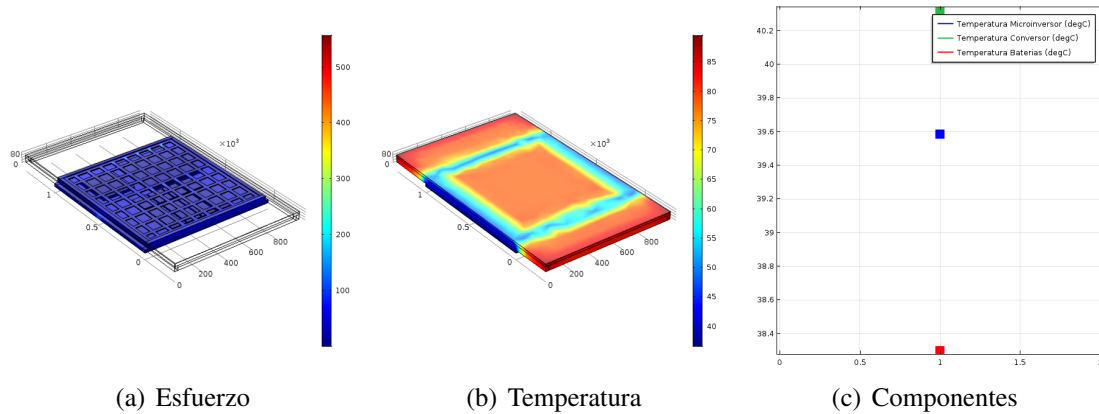


Figura 4: Estudio mecánico y térmico del diseño 3

Estos resultados cumplen con los requisitos de diseños planteados en la parte de planificación. La temperatura alcanzada por los componentes se encuentra dentro de sus rangos de operación y los esfuerzos sobre la estructura son inferiores al límite elástico del material, como puede verse en la Tabla 3.

| RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN | |
|-----------------------------|-------------------------------|
| Temperatura Microinversor | $39.6^{\circ}C < 75^{\circ}C$ |
| Temperatura Conversor DC-DC | $40.4^{\circ}C < 50^{\circ}C$ |
| Temperatura Baterías | $38.2^{\circ}C < 40^{\circ}C$ |
| Esfuerzo | $< 300MPa$ |

Cuadro 3: Resultados obtenidos con el tercer diseño

Este diseño definitivo consiste en una estructura de aluminio anodizado con marcos interiores para sujetar los componentes, de modo que todos los componentes queden a la misma altura. Cuenta con un escalón interior donde se apoya una rejilla dividida en dos partes. Esta rejilla permite la sujeción de los componentes pero sin entrar en contacto con ellos, ya que se apoya sobre el escalón del módulo.

Para unir la rejilla al módulo, y permitir así el acceso a los componentes, se utilizan unas bisagras. Por ello el módulo cuenta con agujeros ciegos en los laterales interiores. En la Figura 5 puede verse el conjunto del módulo con la rejilla.

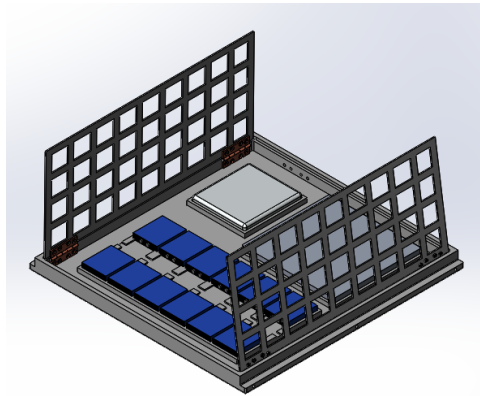
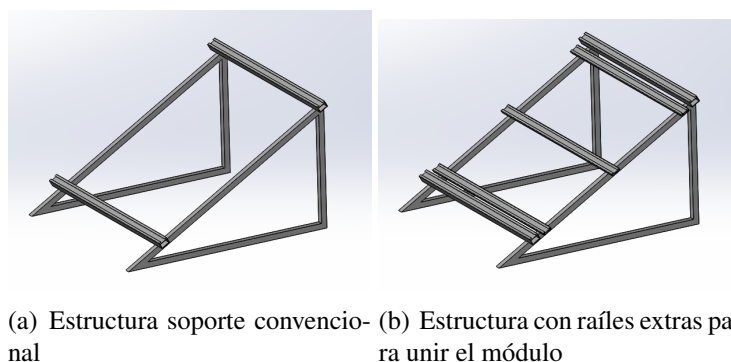


Figura 5: Diseño definitivo

En cuanto al modo de fijación del módulo al panel, hay que tener en cuenta cual es el sistema de anclaje del panel. En este diseño, se utiliza una estructura con triángulo inclinado para paneles en vertical.

En el caso del panel con el módulo integrado, este tipo de estructura no es suficiente. Debemos añadir tres raíles similares a los de la estructura pero de menor grosor (12 mm), como puede verse en la Figura 6. De este modo el módulo puede apoyarse sobre estos raíles y no deberá estar atornillado directamente al panel solar.



(a) Estructura soporte convencional (b) Estructura con raíles extras para unir el módulo

Figura 6: Estructura soporte

El módulo queda apoyado sobre los tres raíles adicionales, y por el raíl inferior, de modo que aunque no se atornille se mantiene en la posición correcta.

Por último, el módulo se une al panel por medio de pinzas similares a las que se usa para unir el panel a la estructura. Dichas pinzas van atornilladas a los laterales del módulo para una mayor sujeción. Por esta razón el módulo cuenta con tres perforaciones a ambos lados.

Pueden verse todos los detalles mencionados anteriormente en el plano del módulo mostrado en el Anexo II y el conjunto completo con todos los componentes en el Anexo V.

Además, para prevenir la entrada de agua y otros residuos se utilizan prensaestopas para conectar el microinversor al panel. En esta caso se han elegido prensaestopas de poliamida con liberación de tensión. Por último, para terminar de aislar el conjunto, se aplicará una capa de silicona en la parte superior e inferior del módulo, donde entra en contacto con el panel. Una posible silicona a utilizar sería Domosil.

Tras llegar a este diseño, debemos comprobar que se logran los objetivos establecidos en la primera fase de desarrollo del producto.

En la tabla 4 se puede ver que objetivos se han cumplido y en que aspectos habría que seguir trabajando.

| Objetivo | ¿Cumplido? |
|------------|--------------------------------|
| Objetivo 1 | Si (como primera aproximación) |
| Objetivo 2 | Si |
| Objetivo 3 | Si |
| Objetivo 4 | No |
| Objetivo 5 | Si |
| Objetivo 6 | Si |
| Objetivo 7 | Si |
| Objetivo 8 | Si |

Cuadro 4: Objetivos del proyecto

Hay que tener en cuenta que este proyecto se trata de una primera aproximación, Víctor Vega Garita y su equipo están aún trabajando en el diseño de la mejor arquitectura posible para este sistema. Esto implica que en el futuro los componentes utilizados serán diferentes, por lo que será necesario hacer cambios en el modelo aquí presentado.

Además, una vez ya se hayan seleccionado los componentes apropiados, se pretende crear un circuito integrado que englobe todas las funciones que realizan los componentes, a excepción de las baterías. Con ello se logrará en un futuro cumplir con todos los objetivos que se plantearon para este proyecto.

Índice general

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 11 |
| 1.1. Motivación del Proyecto | 11 |
| 1.1.1. Ventajas del módulo frente al sistema convencional: | 11 |
| 1.2. Conceptos básicos | 12 |
| 1.2.1. Energía Fotovoltaica | 12 |
| 1.2.2. Células fotovoltaicas | 13 |
| 1.2.3. Paneles Fotovoltaicos | 15 |
| 1.2.4. Microinversor solar | 15 |
| 1.2.5. Conversor DC-DC | 15 |
| 1.2.6. Batería de ion de litio | 16 |
| 1.2.7. Sistemas fotovoltaicos | 16 |
| 2. OBJETIVOS | 19 |
| 3. METODOLOGÍA | 21 |
| 3.1. Fases de desarrollo de un producto | 21 |
| 3.2. Planificación | 22 |
| 3.2.1. Enfoque de investigación | 22 |
| 3.2.2. Análisis de la competencia | 23 |
| 3.2.3. Productos o proyectos similares | 24 |
| 3.2.4. Productos relacionados | 26 |
| 3.2.5. Normativa Vigente | 27 |
| 3.2.6. Estructura de anclaje | 29 |
| 3.2.7. Lista de requisitos | 29 |
| 3.3. Diseño Conceptual | 31 |
| 3.3.1. Desarrollo del principio resolutivo | 31 |
| 3.3.2. Concepto | 32 |
| 3.4. Diseño Básico | 35 |
| 3.4.1. Elección de los componentes | 35 |
| 3.4.2. Elección del material | 40 |
| 3.4.3. Diseño preliminar | 40 |
| 3.4.4. Simulación térmica y mecánica | 43 |
| 3.4.5. Refinar y mejorar el diseño | 47 |
| 4. RESULTADOS | 55 |
| 4.1. Diseño Definitivo | 55 |
| 4.1.1. Fijación de los componentes | 55 |
| 4.1.2. Unión de la rejilla al módulo | 57 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.2. | Estructura soporte | 59 |
| 4.3. | Sistema de estanqueidad del módulo | 62 |
| 4.4. | Planos y lista de piezas | 64 |
| 4.4.1. | Lista de piezas | 64 |
| 4.4.2. | Planos de los componentes | 64 |
| 5. | CONCLUSIONES | 65 |
| 5.1. | Comprobación de la lista de requisitos | 65 |
| 5.2. | Comprobación de los objetivos globales del proyecto | 65 |
| 5.2.1. | Objetivo 1 | 66 |
| 5.2.2. | Objetivo 2 | 66 |
| 5.2.3. | Objetivo 3 | 66 |
| 5.2.4. | Objetivo 4 | 67 |
| 5.2.5. | Objetivo 5 | 67 |
| 5.2.6. | Objetivos 6 y 7 | 67 |
| 5.2.7. | Objetivo 8 | 67 |
| 5.2.8. | Resumen del cumplimiento de los objetivos | 67 |
| 6. | LÍNEAS FUTURAS | 69 |
| 7. | PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO | 71 |
| 7.1. | Planificación del proyecto | 71 |
| 7.1.1. | Estructura de descomposición del proyecto (EDP) | 71 |
| 7.1.2. | Diagrama de Gantt | 73 |
| 7.2. | Presupuesto | 75 |
| | Índice de figuras | 79 |
| | Índice de tablas | 83 |
| 8. | ANEXOS | 85 |
| 8.1. | Anexo I: Presentación de la Tesis de Doctorado que se está desarrollando en TU Delft | 87 |
| 8.2. | Anexo II: Plano del módulo | 88 |
| 8.3. | Anexo III: Plano de la rejilla | 89 |
| 8.4. | Anexo IV: Plano de la estructura soporte | 90 |
| 8.5. | Anexo V: Componentes del conjunto | 91 |
| 8.6. | Anexo VI: Estructura de Descomposición del Proyecto | 92 |
| 8.7. | Anexo VII: Calendario | 93 |
| 8.8. | Anexo VIII: Diagrama de Gantt | 94 |

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación del Proyecto

Este proyecto se encuentra enmarcado dentro de un trabajo de doctorado llevado a cabo en TU Delft por Víctor Vega Garita.

Dicho proyecto busca diseñar un módulo físicamente integrado, llamado “Integrated PV-battery module (IPBM)”. Se trata de un módulo solar compacto que incluye todos los componentes eléctricos y la batería acoplados en la parte posterior del panel solar.

La motivación que les ha llevado a realizar esta investigación es el hecho de que actualmente no existen sistemas compactos para la instalación de placas fotovoltaicas.

1.1.1. Ventajas del módulo frente al sistema convencional:

- Fácil instalación: normalmente, la instalación de un sistema PV-batería es difícil a escala residencial. Necesita del asesoramiento profesional para poder determinar el tamaño de los componentes e instalar el sistema. En este sentido, el módulo integrado PV-batería facilitaría mucho las cosas, ya que podría ser instalado directamente sin necesidad de la intervención de un técnico. Haciendo la instalación mucho más sencilla.
- Reducción del coste de instalación: No es necesario contratar a un técnico para el diseño del sistema electrónico, dado que ya está integrado en el módulo.
- Reducción del coste de componentes electrónicos: Dado que dichos módulos se fabricarían a gran escala, el coste de los componentes se vería reducido en comparación a los sistemas convencionales.
- Enfoque modular: Es posible la instalación de varios módulos en un mismo sistema para obtener una mayor cantidad de energía. Además, en caso de fallo de uno de los módulos, se podría seguir almacenando energía con el resto de ellos.
- Solución portable: Sería posible su utilización en lugares sin conexión a la red eléctrica.
- Mayor protección: Con estos módulos se obtiene directamente un corriente AC en la salida, evitando los problemas que generan las altas corrientes DC a la salida de los sistemas convencionales.

1.2. Conceptos básicos

1.2.1. Energía Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable, obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica, o bien mediante una deposición de metales sobre un sustrato denominada célula solar de película fina.

Este tipo de energía se usa para alimentar innumerables aplicaciones y aparatos autónomos, para abastecer refugios o viviendas aisladas de la red eléctrica y para producir electricidad a gran escala a través de redes de distribución. Debido a la creciente demanda de energías renovables, la fabricación de células solares e instalaciones fotovoltaicas ha avanzado considerablemente en los últimos años. Entre los años 2001 y 2015 se ha producido un crecimiento exponencial de la producción de energía fotovoltaica, doblándose aproximadamente cada dos años. La potencia total fotovoltaica instalada en el mundo (conectada a red) ascendía a 16 GW, a finales de 2015, se estimaba que hay instalados en todo el mundo cerca de 230 GW de potencia fotovoltaica.

Gracias a ello la energía solar fotovoltaica se ha convertido en la tercera fuente de energía renovable más importante en términos de capacidad instalada a nivel global, después de las energías hidroeléctrica y eólica, y supone ya una fracción significativa del mix eléctrico en la Unión Europea, cubriendo de media el 3,5 de la demanda de electricidad y alcanzando el 7 % en los períodos de mayor producción.

Con la tecnología actual, los paneles fotovoltaicos recuperan la energía necesaria para su fabricación en un período comprendido entre 6 meses y 1 año y medio; teniendo en cuenta que su vida útil media es superior a 30 años, producen electricidad limpia durante más del 95 % de su ciclo de vida.

La demanda global de energía a crecido significativamente en las últimas décadas, debido al crecimiento de la población y de la mejora de la economía. Se prevé que para el 2050 el consumo global de energía crezca 20TW más, sobre el actual valor de 10TW. Por ello, los actuales recursos energéticos no serán suficientes en el futuro. El mayor problema de esta crisis energética es la limitada capacidad de los recursos energéticos más utilizados, los recursos fósiles. Además, hay que tener en cuenta el alto impacto ambiental que estos producen.

Como consecuencia de esto, las energías renovables son la mejor solución para resolver este problema. Dentro de estas energías renovables, la energía solar destaca entre ellas ya que utiliza el sol como fuente de energía, la cual es gratuita y muy abundante. Además, no genera residuos líquidos ni sólidos, es muy flexible y tiene una fácil operación y mantenimiento.

El mercado de paneles fotovoltaicos ha crecido durante las últimas décadas, sobretodo desde el año 2006, a partir del cual ha sufrido un crecimiento del 40 %. La Agencia Internacional de Energía ha predicho que la energía solar supondrá el 11 % de la producción mundial de energía para el año 2050.

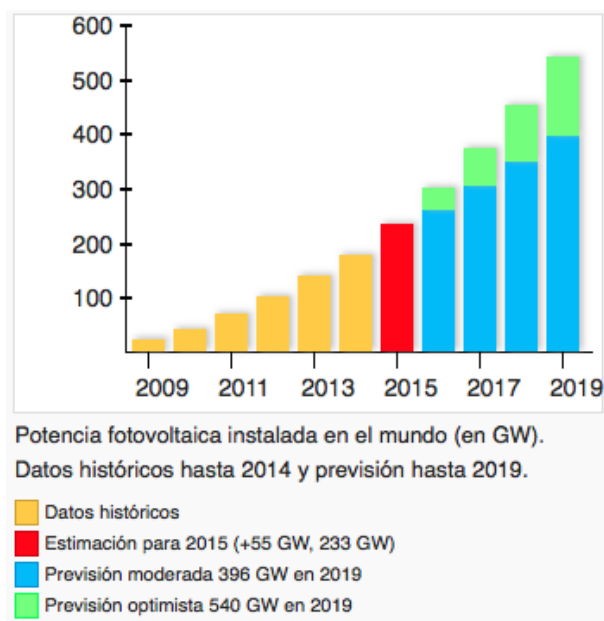


Figura 1.1: Fuente: SPE, Global Market Outlook 2015, junto con las previsiones de la industria para 2015.

1.2.2. Células fotovoltaicas

Una célula fotovoltaica es un dispositivo en el que se produce la conversión de la luz en electricidad, transforma la energía lumínica (fotones) en energía eléctrica (flujo de electrones libres) mediante el efecto fotoeléctrico [17]

La célula está formada por una delgada lámina de un material semi-conductor, muy a menudo de silicio [18].



Figura 1.2: Célula de silicio monocristalino

Actualmente el material más utilizado es el silicio mono-cristalino, aunque también existen otro tipo de células:

- Células de silicio amorfo: El silicio durante su transformación, produce un gas que se proyecta sobre una lámina de vidrio. La celda es gris muy oscuro. Es la célula de las calculadoras y relojes llamados «solares». Estas células fueron las primeras en ser manufacturadas, ya que se podían emplear los mismos métodos de fabricación de diodos.
- Célula de silicio monocristalino: Al enfriarse, el silicio fundido se solidifica formando solo un único cristal de grandes dimensiones. Luego se corta el cristal en delgadas capas que dan lugar a las células. Estas células generalmente son de un azul uniforme.

- Células de silicio policristalino: Durante el enfriamiento del silicio en un molde, se forman varios cristales. La fotocélula es de aspecto azulado, pero no es uniforme, se distinguen diferentes colores creados por los diferentes cristales.

La eficiencia de conversión media obtenida por las células disponibles comercialmente (producidas a partir de silicio monocristalino) está alrededor del 16 %, pero según la tecnología utilizada varía desde el 6 % de las células de silicio amorfo hasta el 22 % de las células de silicio monocristalino. También existen las células multicapa, normalmente de arseniuro de galio, que alcanzan eficiencias del 30 %. En laboratorio se ha superado el 46 % con células experimentales.

La vida útil media a máximo rendimiento se sitúa en torno a los 25 años, período a partir del cual la potencia entregada disminuye por debajo de un valor considerable. Al grupo de células fotoeléctricas para energía solar se le conoce como panel fotovoltaico. Los paneles fotovoltaicos consisten en una red de células solares conectadas como circuito en serie para aumentar la tensión de salida hasta el valor deseado (usualmente se utilizan 12V ó 24V) a la vez que se conectan varias redes como circuito paralelo para aumentar la corriente eléctrica que es capaz de proporcionar el dispositivo.

El tipo de corriente eléctrica que proporcionan es corriente continua, por lo que si necesitamos corriente alterna o aumentar su tensión, tendremos que añadir un inversor y/o un convertidor de potencia.

Principio de funcionamiento

Se trata de un semiconductor expuesto a la radiación solar. El fotón de energía transportado por la luz arranca un electrón, creando a la vez un "hueco" en el átomo excitado. Normalmente, el electrón encuentra rápidamente otro hueco para volver a llenarlo, y la energía proporcionada por el fotón se disipa en forma de calor. Por ello, el principio básico de una célula fotovoltaica es obligar a los electrones y a los "huecos" a avanzar hacia el lado opuesto del material en lugar de simplemente recombinarse en él. Así, se producirá una diferencia de potencial, y por lo tanto tensión, entre las dos partes del material.

Para ello, se crea un campo eléctrico permanente, a través de una unión p-n, entre dos capas dopadas respectivamente. En la Figura 1.3 puede verse un esquema de dicho campo eléctrico creado en la célula.

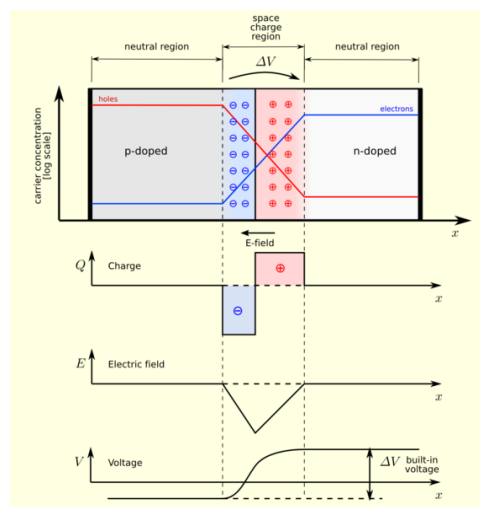


Figura 1.3: Esquema del campo eléctrico creado en una célula fotovoltaica mediante la unión p-n entre dos capas de semiconductores dopados

1.2.3. Paneles Fotovoltaicos

Los paneles o módulos fotovoltaicos están formados por un conjunto de células fotovoltaicas que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos mediante el efecto fotoeléctrico.



Figura 1.4: Panel Fotovoltaico

Los paneles fotovoltaicos, en función del tipo de célula que los forman, se dividen en:

- Cristalinas
 - Monocristalinas: se componen de secciones de un único cristal de silicio (Si) (reconocibles por su forma circular u octogonal, donde los 4 lados cortos, si se puede apreciar en la imagen, se aprecia que son curvos, debido a que es una célula circular recortada).
 - Policristalinas: cuando están formadas por pequeñas partículas cristalizadas.
- Amorfas: cuando el silicio no se ha cristalizado.

El coste de los paneles fotovoltaicos se ha reducido de forma constante desde que se fabricaron las primeras células solares comerciales y su coste medio de generación eléctrica ya es competitivo con las fuentes de energía convencionales en un creciente número de regiones geográficas, alcanzando la paridad de red.

1.2.4. Microinversor solar

Un microinversor solar es un inversor fotovoltaico que convierte la corriente eléctrica (corriente continua) de uno o dos paneles solares a corriente alterna.

Los microinversores tienen varias ventajas sobre los inversores centrales convencionales. La principal ventaja es que cuando se presenta una pequeña cantidad de sombra, escombros o líneas de nieve sobre un mismo panel solar o si, incluso, ocurre un fallo completo de un panel, no se reduce de manera desproporcionada la producción de todo el conjunto. Cada microinversor recoge la cantidad de energía óptima mediante la realización del seguimiento del punto de máxima potencia para el panel al que está conectado.

1.2.5. Conversor DC-DC

Se llama convertidor, o conversor, DC-DC, a un dispositivo que transforma corriente continua de una tensión a otra. Suelen ser reguladores de conmutación, dando a su salida una tensión regulada y, la mayoría de las veces con limitación de corriente.

1.2.6. Batería de ion de litio

La batería de iones de litio es un dispositivo diseñado para almacenamiento de energía eléctrica que emplea como electrolito una sal de litio que consigue los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo.

Las ventajas que presentan este tipo de baterías frente a otras son las siguientes:

- Una elevada densidad de energía: acumulan mucha mayor carga por unidad de peso y volumen.
- Poco peso.
- Gran capacidad de descarga, se pueden descargar totalmente en menos de dos minutos.
- Poco espesor: se presentan en placas rectangulares, con menos de 5 mm de espesor.
- Alto voltaje por célula.
- Mínimo efecto memoria.
- Descarga lineal.
- Larga vida útil, pueden llegar hasta más de 3.000 ciclos de carga/descarga para una pérdida de capacidad del 20 %
- Facilidad para saber la carga que almacenan. Basta con medir, en reposo, el voltaje de la batería. La energía almacenada es una función del voltaje medido.
- Muy baja tasa de autodescarga.

1.2.7. Sistemas fotovoltaicos

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de componentes mecánico, eléctricos y electrónicos necesarios para producir energía eléctrica a través de energía solar.

Los sistemas de generación de energía solar fotovoltaica están constituidos por paneles solares, para la transformación de la corriente continua en corriente alterna. Además, dependiendo de la arquitectura del sistema, pueden incluir también seguidores solares, convertidores o baterías.

Estos sistemas se pueden dividir en dos categorías: sistemas conectados a la red y sistemas aislados.

Sistemas conectados a la red

Este tipo de sistemas se encuentran permanentemente conectados a la red eléctrica nacional. Durante las horas de irradiación solar escasa o nula el sistema no es capaz de producir la energía suficiente para cubrir la demanda, de modo que es la red la que proporciona dicha energía. Sin embargo, durante las horas de irradiación solar suficiente el sistema produce más energía eléctrica de la que se gasta, de modo que dicho exceso se transfiere a la red.

Estos sistemas presentan las siguientes ventajas:

- No hay limitantes de almacenamiento, ya que la red de CFE se considera infinita para estas aplicaciones.
- No hay equipos ociosos, se aprovecha toda la energía generada.
- Energía gratuita.

Sistemas aislados

Los sistemas aislados se usan normalmente para proporcionar electricidad a usuarios con consumos de energía muy bajos, para los cuales no es rentable pagar el coste de la conexión a la red eléctrica.

En estos sistemas es necesario almacenar la energía eléctrica para garantizar la continuidad de la erogación incluso en los momentos en los que no es producida por el generador fotovoltaico. Dicha energía se almacena en una serie de baterías.

Además, en estos sistemas es necesaria la instalación de un regulador de carga para preservar las baterías de un exceso de carga del generador y de un exceso de descarga debido a la utilización.

Estos sistemas presentan las siguientes ventajas:

- Son 100 % independientes.
- No hay consumos excedentes.
- Energía gratuita.

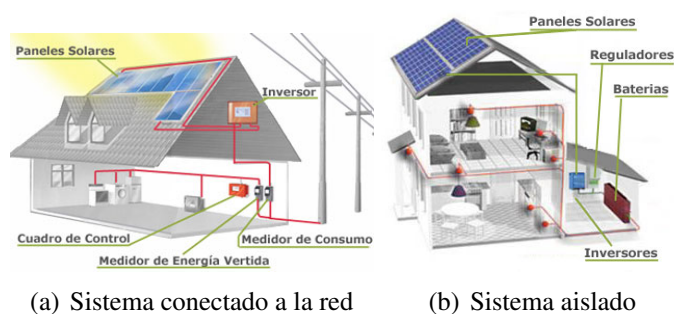


Figura 1.5: Sistemas fotovoltaicos [8]

Capítulo 2

OBJETIVOS

Con este proyecto se busca diseñar una estructura para unir los componentes que conforman un módulo integrado de sistema fotovoltaico con batería incluida. Esta estructura deberá unir la placa fotovoltaica con la batería y los componentes electrónicos, de modo que sea lo más compacta y ligera posible. Además, habrá que tener en cuenta la deformación del conjunto y la posible sobrecarga de los componentes debido a las altas temperaturas alcanzadas en estos sistemas.

De este modo, los objetivos principales de este proyecto son:

1. Seleccionar los componentes del módulo: panel solar, microinversor, convertor y baterías.
2. Determinar la forma más adecuada para la estructura, teniendo en cuenta la necesidad de acceso a los componentes para su posible sustitución.
3. Seleccionar el material más apropiado para la estructura.
4. Optimizar la estructura para que sea lo más ligera y pequeña posible.
5. Realizar estudios mecánicos para asegurar que la estructura soporta los esfuerzos a los que se verá sometida durante su utilización.
6. Realizar estudios térmicos para comprobar que la estructura es capaz de soportar las altas temperaturas a las que se verá sometida, debido principalmente a la radiación solar y al calentamiento de los componentes.
7. Asegurar que los componentes no alcanzan temperaturas superiores a sus límites de operación.
8. Diseño de un sistema de aislamiento para evitar la entrada de agua u otros residuos del exterior dentro del módulo.

Capítulo 3

METODOLOGÍA

3.1. Fases de desarrollo de un producto

Para el diseño de esta estructura se van a seguir las siguientes fases de desarrollo de un producto:

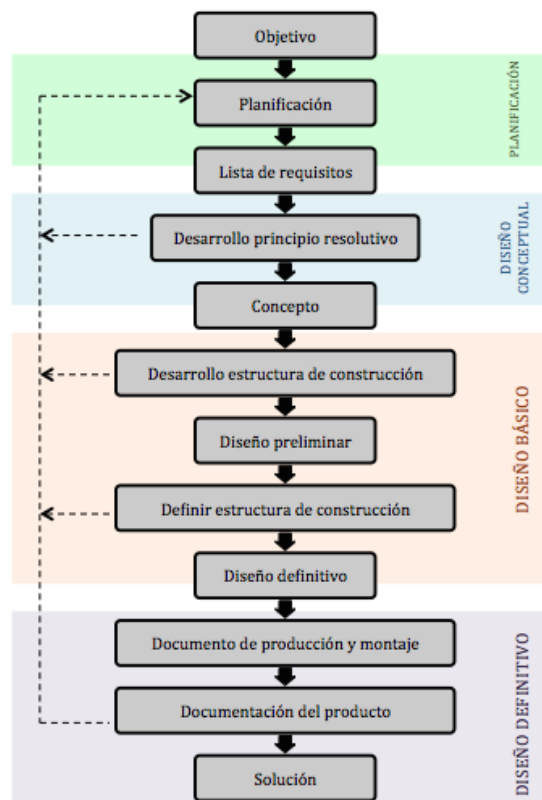


Figura 3.1: Fases de desarrollo de un producto

1. Objetivo: determinar cual es el objetivo del producto y que necesidades va a cubrir.
2. Planificación:
 - Definir el enfoque de investigación.
 - Analizar la posible competencia y productos similares.

- Estudiar la normativa vigente.
 - Determinar la lista de requisitos.
3. Desarrollo del principio resolutivo:
 - Identificar las características esenciales: materiales, elementos del conjuntos, características mecánicas a tener en cuenta y condiciones de operación.
 - Evaluar con criterios técnicos.
 4. Concepto.
 5. Desarrollo de la estructura de construcción:
 - Diseño, selección de material y cálculos preliminares.
 - Seleccionar los mejores diseños preliminares.
 - Realizar simulaciones para validar el correcto funcionamiento del sistema.
 - Refinar y mejorar el diseño.
 6. Diseño preliminar.
 7. Definir la estructura de construcción:
 - Eliminar puntos débiles.
 - Controlar errores e influencias perturbadoras.
 - Lista preliminar de piezas y documentos de producción y montaje.
 8. Diseño definitivo.
 9. Documentos de producción y montaje:
 - Dibujos y listas de piezas detalladas.
 - Instrucciones de producción, montaje, transporte y operaciones.
 - Comprobación de documentación.
 10. Documentación del producto.

3.2. Planificación

3.2.1. Enfoque de investigación

Siguiendo la metodología presentada en el apartado anterior, este proyecto se ha dividido en las siguientes tareas:

1. Definición del objetivo del proyecto y planificación (Tarea 1).
2. Diseño conceptual (Tarea 2): definir las características necesarias para la estructura y evaluarlas en función de ciertos criterios preestablecidos.
3. Diseño básico(Tarea 3): desarrollo de un diseño inicial y evaluación técnica y económica de dicho diseño.

4. Simulaciones y Diseño definitivo (Tarea 4): desarrollo del diseño final, incluyendo planos detallados de todos sus elementos. Desarrollo de simulaciones para comprobar el comportamiento de la estructura, asegurando que cumple con los objetivos establecidos.

3.2.2. Análisis de la competencia

La competencia directa de este producto son los sistemas de obtención de energía por media de paneles solares fotovoltaicos convencionales.

De manera general, una instalación solar fotovoltaica se ajusta a un esquema como el mostrado en la Figura 3.2.

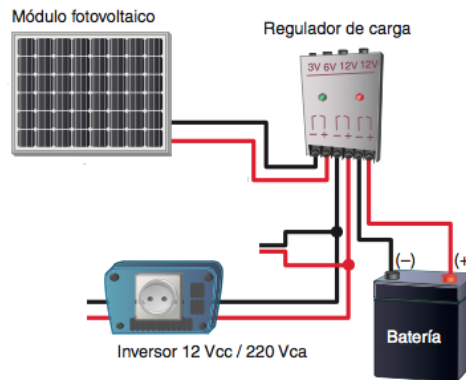


Figura 3.2: Componentes de una instalación solar fotovoltaica convencional

Uno de los mayores uso de estos paneles fotovoltaicos es en edificios o casas residenciales. Pueden utilizarse tanto para el abastecimiento de los hogares Figura 3.3 (b) como para la venta de energía eléctrica a la red Figura 3.3 (a).

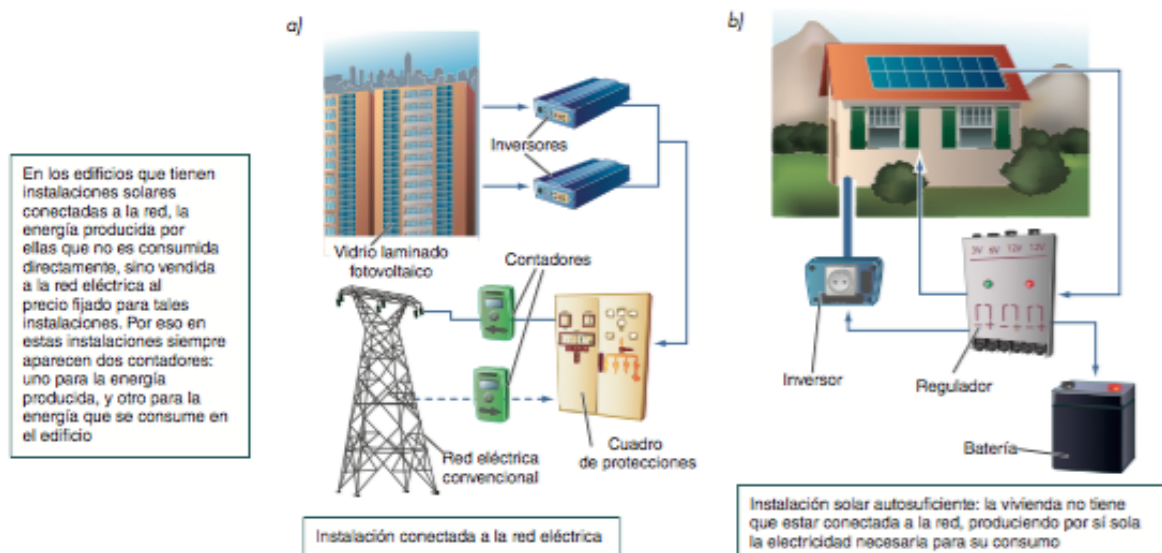


Figura 3.3: Sistema conectado a red (a) e instalación fotovoltaica autónoma (b)

Actualmente se esta popularizando el uso de los paneles fotovoltaicos para el auto-abastecimiento, esta energía fotovoltaica es muy atractiva para los hogares debido a que su utilización permite

reducir las facturas de consumo eléctrico. También es muy útil en el caso del abastecimiento eléctrico de hogares en lugares remotos debido a su sencilla instalación y mantenimiento, evitando así la necesidad de construir nuevas líneas de abastecimiento eléctrico.

A pesar de todas las ventajas que este sistema presenta, hay que tener en cuenta el alto coste inicial de instalación que este sistema supone para los usuarios. Por ello, muchas personas rechazan su instalación, ya que el periodo de recuperación de la inversión es muy largo. Además, los usuarios aun piensan que se trata de un sistema complejo, lo que hace que renieguen más su utilización. Necesitan la ayuda de alguna empresa externa para poder instalar el sistema en sus hogares, de modo que aumentan aun más los costes de instalación.

Teniendo en cuenta todos estos problemas que presentan los actuales sistemas de paneles fotovoltaicos, la idea de crear un módulo integrado PV-batería parece ser la mejor solución.

Coste de instalación de una instalación fotovoltaica autónoma [21]

Tomando como ejemplo una vivienda en la costa española, que necesite un consumo máximo de unos 250kWh al mes, sería suficiente con una instalación de unos nueve paneles de 310W cada uno, como esta de la empresa Auto Solar que cuesta aproximadamente 8.500€.

Finalmente, hay que considerar que aunque el kit de Auto Solar contiene todos los elementos eléctricos y accesorios para poder realizar el montaje adecuadamente, lógicamente la instalación la deberá hacer un técnico cualificado, lo que añade un coste extra.

De modo que podríamos considerar un coste total de unos 10.000€. Además, deberemos tener en cuenta que el cambio de las baterías supondrá un coste de al rededor de los 3.000€.

3.2.3. Productos o proyectos similares

Luz solar integrada para exterior (Integrated Solar LED Street Light)

Actualmente podemos encontrar en el mercado una gran variedad de sistemas de iluminación para calles o jardines que consisten en luces LED conectadas a un panel solar. Dichos sistemas incluyen las baterías y el panel solar dentro de la misma estructura.

Una de las empresas que venden este producto es Shenzhen Intefly Electronics [13].



Figura 3.4: Luz exterior solar de Intefly

Las características de este producto se muestran en la Tabla 3.1

| | |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| Material | Aluminio |
| Panel Solar | 18V - 90W |
| LED | Bridgelux (12V, 70W, 7100-7300LM) |
| Batería | Litio 50AH |
| Altura de montaje | 9-12 m |
| Tiempo de funcionamiento | 40-50 horas |
| Rango de temperaturas de trabajo | -30 °C / + 60 °C |

Cuadro 3.1: Características de "70W Integrated Solar LED Street Light"

Waka-Waka Power

También, se puede encontrar en el mercado sistemas integrados panel solar-batería de menor tamaño.

Por ejemplo, la empresa Waka-Waka ofrece un sistema que utiliza la energía absorbida por un panel solar para cargar pequeños dispositivos o servir como linterna.

Para más información ver [15].



Figura 3.5: Waka-Waka Power

Proyecto de J.F. Reynaud

Podemos encontrar un estudio similar a este proyecto realizado por J.F. Reynaud [19]. En su investigación realizó un prototipo de un módulo utilizando almacenamiento Lithium-ion. Este prototipo está equipado con los equipos necesarios para controlar la carga y descarga de la batería. Por desgracia, no se puede encontrar una descripción detallada de este proyecto. Ver Figura 3.6.

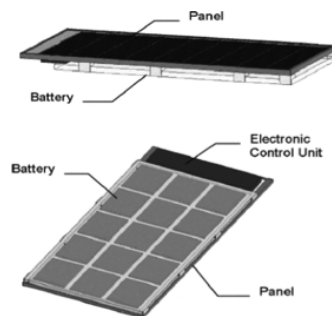


Figura 3.6: Diseño del módulo.

Solartechno Europe B.V.

La empresa Solartechno Europe B.V. [20] ha desarrollado un módulo de características muy similares a las de este proyecto, aunque aún no es posible encontrar mucha información al respecto.

Esta empresa también buscaba diseñar un sistema que integrara todos los elementos en la parte posterior del panel solar: el inversor, el controlador de carga, el sistema de control de las baterías y las baterías.

3.2.4. Productos relacionados

Para orientarnos a la hora de diseñar el módulo, hemos buscado productos similares expuestos a altas temperaturas que se encuentren en el exterior y contengan aparatos eléctricos.

Armario eléctrico mural acero inoxidable IP67

Las cajas eléctricas murales IP67 fabricadas en acero inoxidable AISI 304L, combinan unas características ideales para aplicaciones eléctricas y electrónicas, donde la perfecta estanqueidad y seguridad contra el polvo y el agua sean imprescindibles.

Esta combinación de características de estanqueidad y resistencia lo hacen ideal para el alojamiento interior de aparatos electrónicos y eléctricos en entornos adversos de intemperie.

Este producto presenta las siguientes ventajas:

- El sellado permite la protección total contra polvo y agua a 1 metro de profundidad durante 30 minutos.
- Resistencia a la corrosión y al impacto. La más alta del mercado IK10.
- Realización monobloc que consigue una perfecta estanqueidad y resistencia al impacto.



Armario eléctrico mural aluminio IP66



Este producto presenta las siguientes ventajas:

- Peso 3 veces inferior a un armario normal.
- Realización monobloc que consigue una perfecta estanqueidad y resistencia al impacto.
- Perfecta refrigeración, gracias al aluminio, que consigue que el armario expulse el calor al exterior naturalmente por toda su superficie.

3.2.5. Normativa Vigente

Las condiciones de diseño y cálculo de las instalaciones de energía solar deberán quedar suficientemente justificadas en el proyecto de la instalación mediante la utilización de procedimientos de reconocida solvencia y parámetros basados en la normativa sectorial de aplicación. Se considera adecuada para tal fin la utilización del Pliego Oficial de Condiciones Técnicas del IDEA que esté vigente.

En este caso habrá que seguir el Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red [12].

Serán de especial aplicación los siguientes artículos del documento, dentro del apartado "Componentes y materiales".

5.1. Generalidades

5.1.1 Como principio general se ha de asegurar, como mínimo, un grado de aislamiento eléctrico de tipo básico clase I en lo que afecta tanto a equipos (módulos e inversores), como a materiales (conductores, cajas y armarios de conexión), exceptuando el cableado de continua, que será de doble aislamiento de clase 2 y un grado de protección mínimo de IP65.

5.1.5 Los materiales situados en intemperie se protegerán contra los agentes ambientales, en particular contra el efecto de la radiación solar y la humedad.

5.1.6 Se incluirán todos los elementos necesarios de seguridad y protecciones propias de las personas y de la instalación fotovoltaica, asegurando la protección frente a contactos directos e indirectos, cortocircuitos, sobrecargas, así como otros elementos y protecciones que resulten de la aplicación de la legislación vigente.

5.2. Sistemas generadores fotovoltaicos

5.2.3. Los marcos laterales, si existen, serán de aluminio o acero inoxidable.

5.2.6 Por motivos de seguridad y para facilitar el mantenimiento y reparación del generador, se instalarán los elementos necesarios (fusibles, interruptores, etc.) para la desconexión, de forma independiente y en ambos terminales, de cada una de las ramas del resto del generador.

5.2.7 Los módulos fotovoltaicos estarán garantizados por el fabricante durante un período mínimo de 10 años y contarán con una garantía de rendimiento durante 25 años.

En resumen, se deberán cumplir las siguientes normativas:

| | |
|---|--|
| 1 | Aislamiento eléctrico de tipo básico clase I |
| 2 | Grado de protección mínimo de IP65 |
| 3 | Materiales protegidos contra el efecto de la radiación solar y la humedad |
| 4 | Incluir los elementos necesarios de seguridad y las protecciones propias para las personas |
| 5 | Los marcos laterales serán de aluminio o acero inoxidable |
| 6 | Los componentes deberán estar garantizados durante un periodo mínimo de 10 años |

Cuadro 3.2: Normativa vigente

Además existen ciertas condiciones de instalación para los sistemas de energía solar térmica y fotovoltaica en edificaciones y construcciones:

- a) Cubiertas inclinadas. Podrán situarse paneles de captación de energía solar y paneles fotovoltaicos en los faldones de cubierta, con la misma inclinación de éstos y sin salirse de su plano, salvo en edificios catalogados, en cuyo caso se estará a lo que dictamine favorablemente el órgano competente en aplicación de la normativa urbanística de protección.
- b) Cubiertas planas. Los paneles solares deberán situarse dentro de la envolvente formada por planos trazados a 45° desde los bordes del último forjado y un plano horizontal situado a 375 cm. de altura, medido desde la cara inferior del último forjado, de conformidad con la Figura 3.7. El peto de protección de cubierta deberá prolongarse con protecciones diáfanas estéticamente acordes al lugar, sin formar frentes opacos continuos, hasta la altura máxima del panel. No será necesario prolongar el peto citado siempre que la distancia (d), medida desde la parte más próxima del panel al plano de fachada, sea igual o superior que la distancia existente (h) entre la cara superior del forjado de cubierta y la parte más alta del panel. En el caso de edificios catalogados, la solución que se aplique será la que dictamine favorablemente el órgano municipal competente en aplicación de la normativa urbanística de protección.

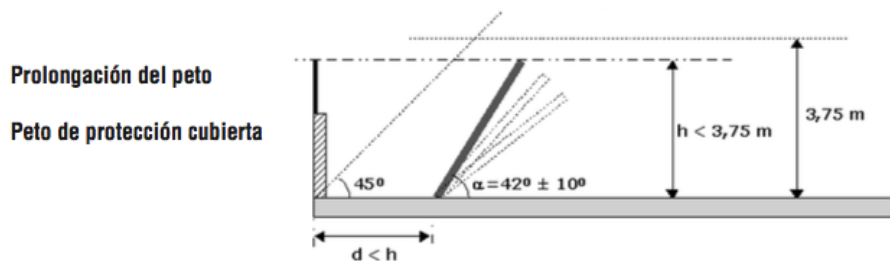


Figura 3.7: Condiciones para la instalación de paneles en cubiertas planas

En cuando al grado de estanqueidad necesario para el módulo, habrá que considerar la norma internacional IEC 60529 "Degrees of Protection" [5], la cual hace referencia al Grado de Protección IP, equivalente a la norma UNE 20324.



Figura 3.8: Significado de las siglas del grado de protección IP

En este caso módulo deberá tener un Grapo de Protección IP65.

- El valor "6" en el primer dígito numérico describe el nivel de protección ante polvo, en este caso: "El polvo no debe entrar bajo ninguna circunstancia".
- El valor "5" en el segundo dígito numérico describe el nivel de protección frente a líquidos (normalmente agua), en este caso: no debe entrar el agua arrojada a chorro (desde cualquier ángulo) por medio de una boquilla de 6,3 mm de diámetro, a un promedio de 12,5 litros por minuto y a una presión de 30 kN/m² durante un tiempo que no sea menor a 3 minutos y a una distancia no menor de 3 metros.

3.2.6. Estructura de anclaje

Por último debemos tener en cuenta que el módulo fotovoltaico debe ir anclado al tejado o situado sobre una superficie horizontal. Actualmente existen muchos sistemas de anclaje en el mercado, de modo que tendremos que adaptar nuestro módulo para que cumple con las características necesarias para poder usar dichas estructuras soporte.

Los sistemas más utilizados consisten en raíles que van anclados al tejado sobre los cuales se colocan abrazaderas para sujetar los paneles.

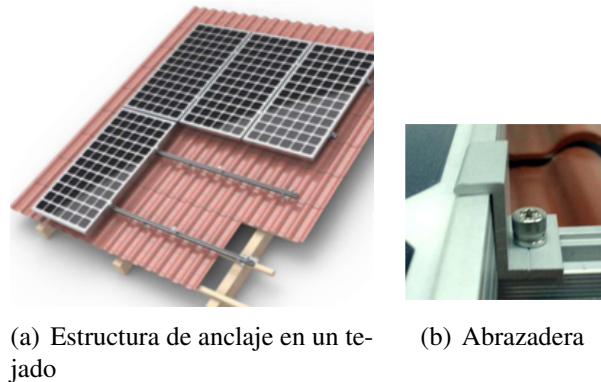


Figura 3.9: Sistema de anclaje al tejado

En cuanto a las superficies horizontales, existen sistemas de anclaje que consisten igualmente en raíles metálicos sobre una estructura triangular.

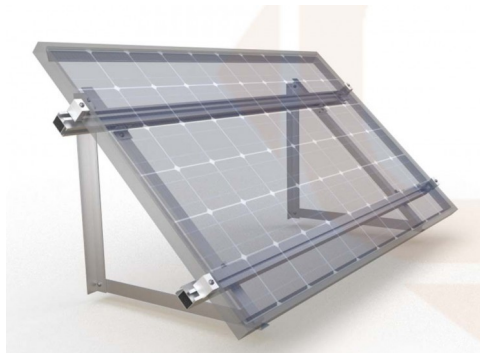


Figura 3.10: Estructura de anclaje sobre superficies horizontales [10]

Además, también hay que tener en cuenta que los paneles pueden colocarse tanto horizontal como verticalmente.

Existen diferentes tipos de abrazaderas para sujetar los paneles, dependiendo del grosor del marco del panel.

A la hora de determinar el grosor final del módulo deberemos tener en cuenta que existan abrazaderas compatibles.

3.2.7. Lista de requisitos

La lista de requisitos engloba en conjunto una serie de características que deben respetarse para conseguir los objetivos pretendidos para el producto. En este diseño vamos a incorporar y distinguir dos tipos de requisitos: de diseño y mecánicos.

Para ello debemos tener en cuenta la normativa señalada anteriormente, ver Tabla 3.2, y la competencia existente.

Requisitos de diseño

- Peso inferior a 20Kg: para poder competir con los productos actuales, es necesario que la instalación de este producto no suponga un gasto adicional muy elevado. Por ello se busca que se pueda instalar utilizando los mismo sistemas que los productos convencionales. Teniendo en cuenta que un panel fotovoltaico de gran tamaño puede llegar a pesar unos 20 Kg, queremos que nuestro módulo no sobrepase este valor.
- Posibilidad de recambio de los componentes.
- Adaptable a distintos paneles fotovoltaicos: se busca un diseño que permita su uso en paneles con distintos tamaños, abriendo así sus posibilidades de uso.
- Cumplimiento de la normativas de seguridad: tal y como se establece en el Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red (puntos 5.1.6. y 5.2.6).

Requisitos mecánicos

- Estructura rígida y tenaz.
- Sistema de estanqueidad: es necesario asegurar un grado de protección IP65.
- Sistema de refrigeración: en el caso de que se superen las temperaturas máximas de operación de los componentes será necesario pensar en un modo de refrigeración del interior del módulo.
- Posibilidad de sujeción con una estructura de anclaje convencional.

Tabla resumen de requisitos

| REQUISITOS DE DISEÑO | |
|---|------------------------------|
| Concepto | Requisito(R) o Pretensión(P) |
| Peso inferior a 20 Kg | R |
| Posibilidad de recambio de los componentes | R |
| Coste máximo estimado de 1100€ por todo el conjunto | R |
| Adaptable a distintos paneles fotovoltaicos | P |
| Cumplimiento de la normativas de seguridad | R |

Cuadro 3.3: Requisitos de diseño

| REQUISITOS MECÁNICOS | |
|--|------------------------------|
| Concepto | Requisito(R) o Pretensión(P) |
| Estructura rígida y tenaz | R |
| Sistema de estanqueidad (IP65) | R |
| Sistema de refrigeración | R |
| Posibilidad de sujeción con una estructura de anclaje convencional | R |

Cuadro 3.4: Requisitos mecánicos

Condiciones de operación del módulo

Además consideraremos que mientras el sistema este en funcionamiento se verá sometido a ciertas condiciones atmosféricas, para poder realizar este estudio tomaremos los siguientes parámetros aproximados.

- Estimación de la energía solar incidente: Por norma general las medidas de radiación que se toman para una determinada zona se hacen en condiciones de orientación Sur y posición horizontal. Se puede estimar que la irradiación solar en España se encuentra entre los $3.4 \sim 5.0 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$.
- Temperatura ambiente alcanzada: En cuanto a la temperatura ambiente a la que estará expuesto el módulo, consideremos una temperatura máxima de 40°C y una mínima de -8°C [4]. Teniendo en cuenta la media de temperaturas en España anualmente.
- Humedad relativa: En cuanto a la humedad relativa que el módulo deberá soportar, tomaremos un valor medio del 57% [4].

3.3. Diseño Conceptual

3.3.1. Desarrollo del principio resolutivo

Estudio de posibles materiales

Para que el módulo cumpla con los requisitos determinados es importante también elegir el material más apropiado.

| COMPARACIÓN ENTRE MATERIALES | | | | |
|------------------------------|------------------------------|----------------|--|----------------------------------|
| MATERIAL | DENSIDAD (kg/m^3) | RES. CORROSIÓN | λ ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) | $\alpha(10^{-6}/^\circ\text{C})$ |
| Acero al carbono | 7850 | NO | $47 \sim 58$ | 12 |
| Acero inoxidable | 7850 | SI | $14 \sim 16$ | $10.1 \sim 17.3$ |
| Aluminio | 2700 | NO | 209.3 | 23 |
| Aluminio anodizado | 2700 | SI | 209.3 | 23 |

Cuadro 3.5: Estudio de posibles materiales

A la hora de seleccionar el material es muy importante evitar la corrosión galvánica. La corrosión galvánica es un proceso electroquímico en el que un metal se corroe preferentemente cuando está en contacto eléctrico con un tipo diferente de metal (más noble) y ambos metales se encuentran inmersos en un electrolito o medio húmedo.

Hay varias maneras de reducir y prevenir este tipo de corrosión.

1. Mantener a los metales secos y / o protegidos de los compuestos iónicos (sales, ácidos, bases), por ejemplo, pintando o recubriendo al metal protegido bajo plástico o resinas epoxi, y permitiendo que se sequen.
2. Revestir los dos materiales y, si no es posible cubrir ambos, el revestimiento se aplicará al más noble, el material con mayor potencial de reducción. Esto es necesario porque si el revestimiento se aplica sólo en el material más activo (menos noble), en caso de deterioro de la cubierta, habrá un área de cátodo grande y un área de ánodo muy pequeña, y el efecto en la zona será grande pues la velocidad de corrosión será muy elevada.

3. También es posible elegir dos metales que tengan potenciales similares. Cuanto más próximos entre sí estén los potenciales de los dos metales, menor será la diferencia de potencial y por lo tanto menor será la corriente galvánica. Utilizar el mismo metal para toda la construcción es la forma más precisa de igualar los potenciales y prevenir la corrosión.
4. La protección catódica mediante ánodos de sacrificio: Se conecta el metal que queremos proteger con una barra de otro metal más activo, que se oxidará preferentemente, protegiendo al primer metal. Se utilizan uno o más ánodos de sacrificio de un metal que sea más fácilmente oxidable que el metal protegido. Los metales que comúnmente se utilizan para ánodos de sacrificio son el zinc, el magnesio y el aluminio.

3.3.2. Concepto

Arquitectura del sistema

Para poder determinar los componentes que deberá integrar el módulo, es necesario determinar la arquitectura más apropiada.

Existen múltiples arquitecturas posibles para un sistema PV-batería. Se pueden clasificar en cuatro grupos: DC-acoplado, AC-acoplado, DC/AC-acoplado y en línea.

- **Arquitectura 1: En línea.** En esta arquitectura, el panel está conectado directamente a la batería usando un convertidor DC-DC unidireccional. Además, la batería está conectada a un inversor bidireccional, el cual está conectado a la red. Ver esquema en la Figura 3.11

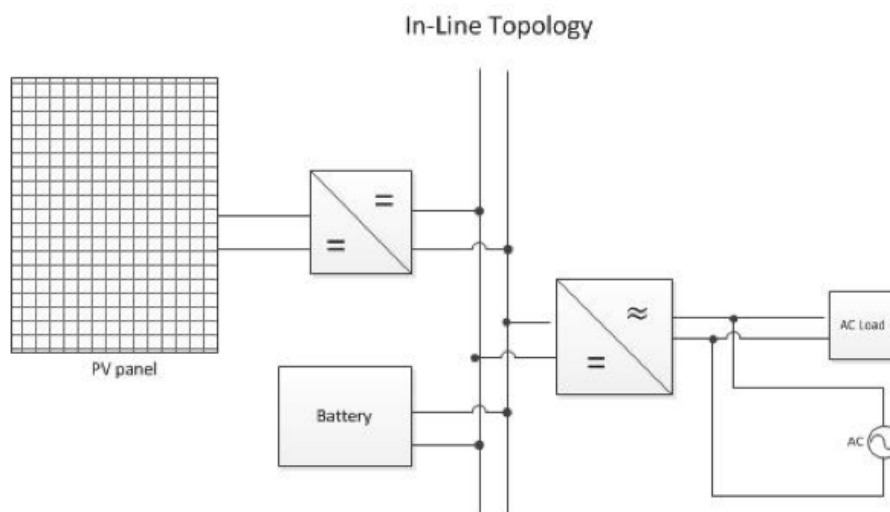


Figura 3.11: Esquema de la arquitectura 1

- **Arquitectura 2:DC-acoplado.** Esta arquitectura utiliza un bus DC donde se conectan todos los componentes. El panel está conectado al bus DC mediante un convertidor DC-DC unidireccional y la batería mediante un controlador de carga bidireccional. El inversor se utiliza para convertidos la potencia en corriente continua en corriente alterna y así poder conectar el sistema a la red.

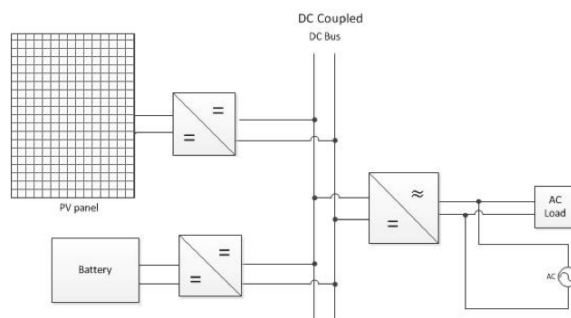


Figura 3.12: Esquema de la arquitectura 2

- Arquitectura 3: AC-acoplado. En este caso se conectan todos los componentes utilizando un bus en AC. El panel está conectado a un inversor unidireccional y la batería a uno bidireccional, después los dos se conectan a un bus AC, el cual está conectado a la red. Ver esquema en la Figura 3.13

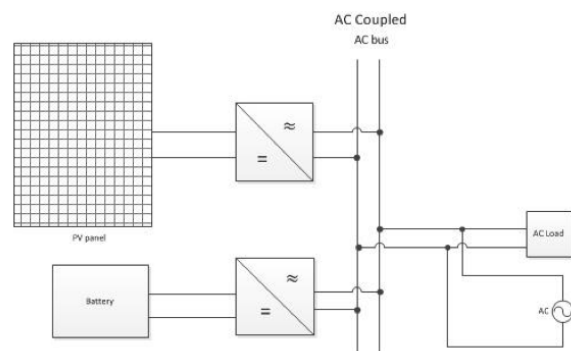


Figura 3.13: Esquema de la arquitectura 3

- Arquitectura 4: DC/AC-acoplado. Esta arquitectura es muy similar a la arquitectura 2, la única diferencia es que tiene un bus DC y otro AC.

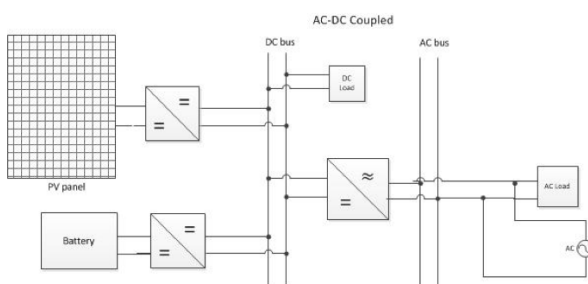


Figura 3.14: Esquema de la arquitectura 4

Elección de la mejor arquitectura

La elección de la arquitectura más apropiada para el sistema se ha hecho en función de la eficiencia, la flexibilidad y el coste de implementación.

Este estudio ha sido realizado por Nadhilah Shani, otra estudiante de Máster en TU Delft.

Al final se decidió utilizar la arquitectura 1.

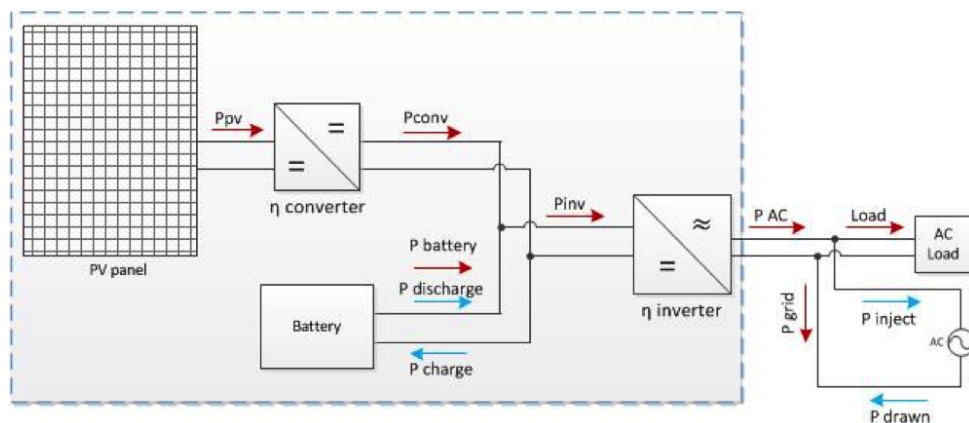


Figura 3.15: Esquema detallado de la arquitectura 1

Elementos del conjunto

Teniendo en cuenta la arquitectura elegida, el módulo deberá integrar los siguientes componentes:

- Panel solar.
- Batería.
- Convertidor DC-DC.
- Microinversor.

En la Figura 3.16 podemos ver un boceto a escala de los componentes que integran el módulo.

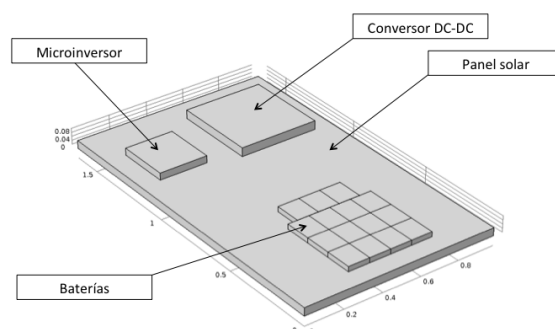


Figura 3.16: Figura a escala de los componentes del módulo

Plano de conexión eléctrica

El panel solar tiene un voltaje de 31.4V, por ello se necesita un convertor DC-DC para igualar dicho voltaje al de las baterías (48V). Después, el microinversor es necesario para convertir la corriente continua que se obtiene en corriente alterna, la que utiliza la red eléctrica.

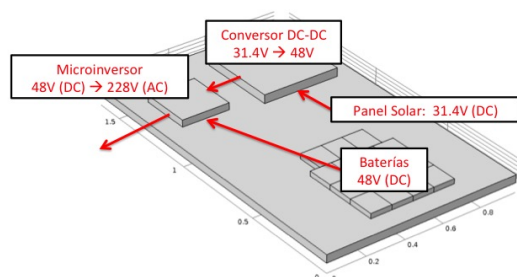


Figura 3.17: Esquema de conexión

3.4. Diseño Básico

3.4.1. Elección de los componentes

Dentro de este proyecto no se incluyó la selección de los componentes, estos fueron elegidos por el supervisor del proyecto en TU Delft.

Panel Fotovoltaico

Criterios de selección:

- Peso
- Coste
- Eficiencia
- Coeficientes térmicos (como disminuye la potencia con la temperatura)

Teniendo en cuenta este criterio, se ha seleccionado el panel solar Jinko Solar JKM265P-60 (265W) [9]. Ver Figura 3.18.

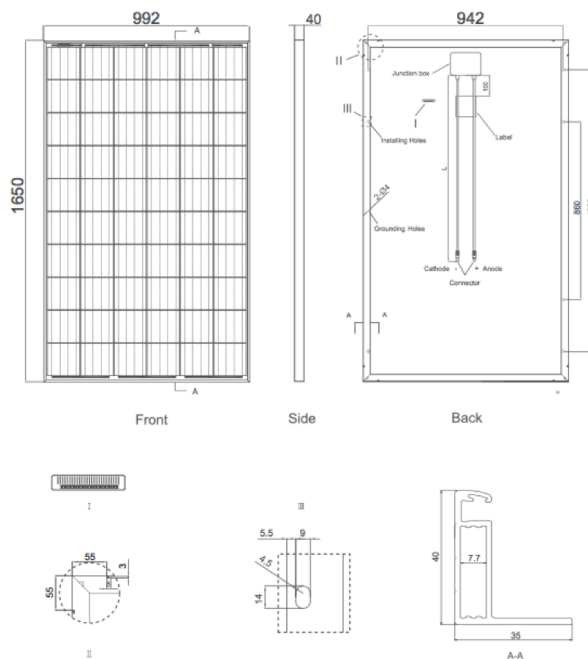


Figura 3.18: Planos del panel solar JMK265P-60

Ver las especificaciones técnicas en Tabla 3.6 y Tabla 3.7.

| | |
|--------------------|---|
| Tipo de celda | Policristalina 156x156 mm |
| Número de celdas | 60 (6x10) |
| Dimensiones | 1650x992x40 mm |
| Peso | 19.0 kg |
| Cristal frontal | 3.2 mm (alta transmisión, cristal templado) |
| Marco | Aleación de aluminio anodizado |
| Caja de conexiones | IP67 Rated |
| Cables de salida | TÜV 1 * 4.0mm ² |

Cuadro 3.6: Características Mecánicas.

| | |
|-------------------------------------|---------------|
| Potencia máxima (Pmax) | 265 Wp |
| Voltaje a potencia máxima (Vmp) | 31.4 V |
| Corriente a potencia máxima (Imp) | 8.44 A |
| Voltaje en circuito abierto (Voc) | 38.6 V |
| Corriente en circuito cerrado (Isc) | 9.03 A |
| Eficiencia del módulo STC | 16.19 % |
| Temperatura de operación | -40°C / +80°C |
| Voltaje máximo del sistema | 1000 VDC |
| Tolerancia de potencia | 0 / +3 % |
| Coefficiente térmico a Voc | -0.31 %/°C |
| Coefficiente térmico a Isc | 0.06 % /°C |
| Coefficiente térmico a Pmax | -0.41 % /°C |

Cuadro 3.7: Especificaciones

Y en la Figura 3.19. se puede ver el comportamiento eléctrico y dependencia de la temperatura del panel.

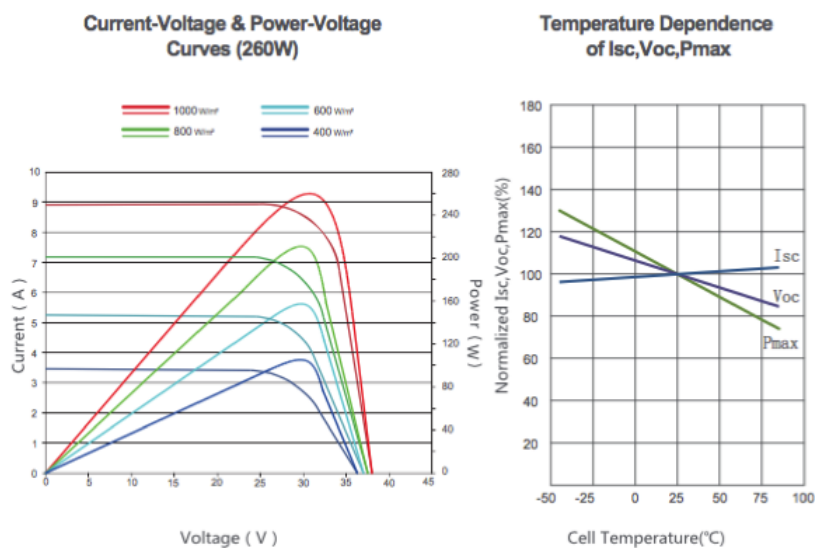


Figura 3.19: Comportamiento eléctrico y térmico

Microinversor

Un microinversor solar, o microinversor, es un inversor fotovoltaico que convierte la corriente eléctrica (corriente continua, DC) de uno o dos paneles solares a corriente alterna (AC).



Figura 3.20: Microinversor

Para este diseño se ha elegido el microinversor : ABB micro inverter system MICRO-0.25/0.3/0.3HV-I-OUTD 0.25kW to 0.3kW. Los datos técnicos se recogen en la tabla Tabla 3.8.

| | Entrada (DC) | Salida (AC) |
|---------------------------|--------------------------|-------------|
| Potencia nominal | 300W | |
| Potencia máxima | 310W | |
| Eficiencia máxima | 96.5 % | |
| Voltaje máximo | 79V | 183-228V |
| Corriente máxima | 10.5 A | 1.2A |
| Tipo de conexión DC | Amphenol H4 PV connector | |
| Dimensiones | 266 x 246 x 35mm | |
| Peso | 1.65kg | |
| Tiempo de vida | 10 años | |
| Refrigeración | Convección natural | |
| Temperaturas de operación | -40°C~75°C | |

Cuadro 3.8: Datos técnicos del Microinversor

Batería

La capacidad y el tamaño de la batería está relacionado con la motivación que nos lleva a almacenar la energía, si queremos almacenarla por un corto periodo de tiempo o por un largo periodo de tiempo. Almacenar la energía por un corto periodo de tiempo puede ser útil para reducir la dependencia de la red, y así reducir la factura eléctrica, además de servir como fuente de energía en caso de apagón eléctrico. [16]

Para este proyecto se ha decidido utilizar baterías de litio-ferrofosfato, LiFePo4. Se trata de un tipo de baterías recargables. Concretamente una batería de ion-litio con un cátodo de fosfato de hierro-litio.

Las baterías LiFePO4 presentan una densidad energética algo menor que las más comunes de LiCoO2 (óxido de litio cobalto) que se encuentran con frecuencia en aparatos electrónicos, pero ofrecen mayor durabilidad, mayor potencia y son inherentemente más seguras, por lo que se utilizan con frecuencia almacenamiento de energía.

Debido a la necesidad de integración de estas baterías con el panel solar, usar baterías prismáticas es la mejor opción.

Por ello, se han elegido las baterías 20Ah LiFePo4 3.2V prismático [7]

Ver Figura 3.21 y Tabla 3.9



Figura 3.21: Batería prismática

| | |
|---------------------------|----------------------------------|
| Marca | JRP (Just Real Power) |
| Tipo de batería | LiFePo4 |
| Capacidad | 20 Ah |
| Voltaje nominal | 3.2V |
| Dimensiones | 25x110x135mm |
| Peso | 0.75kg |
| Tiempo de vida | Más de 2000 cargas |
| Material | Caja de aluminio, Carcasa de PVC |
| Temperatura de operación | -20°C~40°C |
| Temperatura de almacenaje | -40°C~45°C |

Cuadro 3.9: Datos técnicos de la batería

Se utilizarán 12 baterías por panel solar, para así conseguir el tamaño de batería que buscamos:

$$3.2V \cdot 12 \cdot 20Ah = \mathbf{0.77 \text{ kWh}}$$

Las baterías serán descargadas usando una corriente constante tras una hora (1C-ratio).

En cuanto a la conexión de las baterías, ya que queremos obtener la mayor potencia con las menores pérdidas, es necesario mantener la corriente al mínimo. Por lo que queremos que en todas las baterías la corriente sea:

$$I_{min} \geq 20Ah \rightarrow I = 20Ah$$

Por esta razón, las baterías han de conectarse en serie entre si.

Convertor DC-DC Unidireccional

Se encarga de transformar corriente continua de una tensión a otra. Para este proyecto se ha elegido el convertor EZA2500-32048. Ver Figura 3.22 y Tabla 3.10



Figura 3.22: Convertor DC-DC

| | Carga | Descarga |
|--------------------------------|--------------------|-----------------|
| Voltaje de salida | 48V (36-60V) | 320V (300-380V) |
| Voltaje de entrada | 320V (300-380V) | 48V (36-60V) |
| Corriente de salida | 52A | 7.8A |
| Eficiencia máxima | 94 % | 94 % |
| Salida máxima | 2.5kW | 2.5kW |
| Máxima potencia de salida | 2496W | |
| Protección por sobrecarga | 2600W | |
| Tamaño | 422.8x43.6x400 mm | |
| Peso | 8kg | |
| Tiempo de vida | 5 años | |
| Refrigeración | Ventilador interno | |
| Temperaturas de operación | -10°C~50°C | |
| Temperaturas de almacenamiento | -20°C~70°C | |

Cuadro 3.10: Datos técnicos del conversor DC-DC

3.4.2. Elección del material

Tras comparar los distintos materiales, dada la necesidad de evitar la corrosión galvánica del módulo, se decidió utilizar aluminio anodizado para la estructura.

El aluminio anodizado es el material más comúnmente utilizado para este tipo de estructuras.

El aluminio anodizado presenta las siguientes ventajas:

- No necesita mantenimiento.
- Aumenta la protección contra la lluvia, el sol, la humedad.
- Aumenta la dureza superficial
- Acabado decorativo, se pueden obtener diferentes tonalidades
- Resistencia a la abrasión y al desgaste.
- Resistencia a la corrosión.

Consideraremos las siguientes propiedades:

| Densidad (kg/m ³) | Res. Corrosión | λ (W/(m·K)) | α (10 ⁻⁶ /°C) | Límite elástico (MPa) |
|-------------------------------|----------------|---------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 2700 | SI | 209.3 | 23 | 300 |

Cuadro 3.11: Propiedades del aluminio anodizado

3.4.3. Diseño preliminar

Una vez hemos determinado los requisitos que debe cumplir el módulo y los componentes que lo integran, podemos empezar con el diseño del mismo.

El módulo consiste en una estructura de aluminio anodizado, la cual irá situada en la parte posterior del panel solar, como puede verse en la Figura 3.23. Se decidió esta colocación ya que el panel solar dispone de un espacio en su parte posterior, de modo que es posible introducir elementos en dicho espacio. Esto permite hacer el conjunto más compacto.

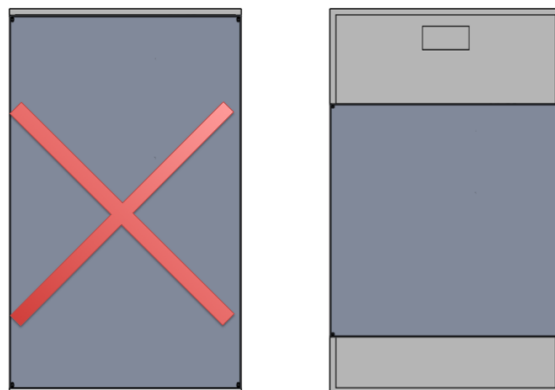


Figura 3.23: Posición del módulo

En primera instancia se pensó cubrir toda la parte posterior del panel solar, pero dado que los componentes no ocupan una gran superficie, es posible reducir la longitud del módulo, haciendo la estructura más ligera. Además, gracias a esto, el módulo puede utilizarse en paneles de diferente tamaño al que hemos seleccionado, cumpliéndose así uno de los requisitos establecidos anteriormente.

Las dimensiones básicas son las siguientes:

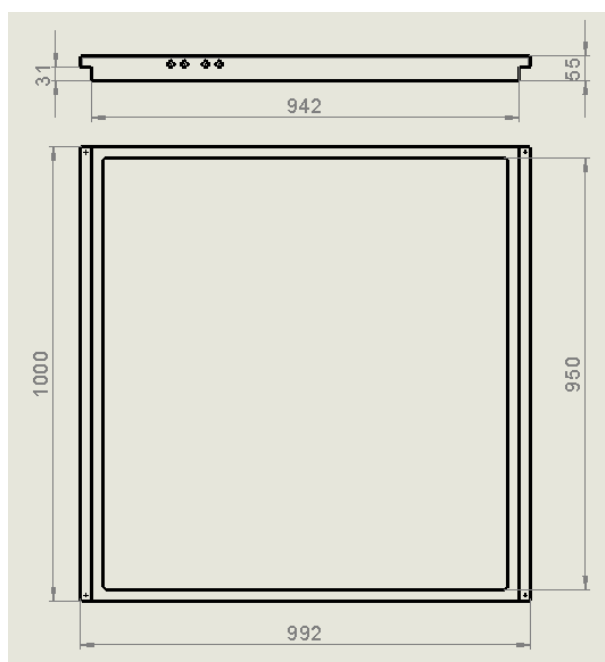


Figura 3.24: Plano diseño preliminar del módulo

Dentro del módulo hay que situar los componentes, para ello se han añadido unas marcas en el diseño como guía. Puede verse en la Figura 3.25. En este apartado no se decidió aún como se unirían los componentes al módulo, primero se prefirió realizar los estudios térmicos y mecánicos.

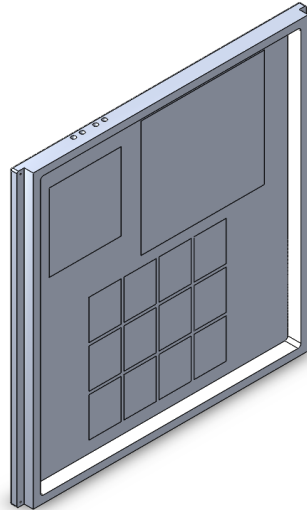


Figura 3.25: Diseño preliminar del módulo

Además, para proteger de manera más efectiva los componentes del calor emitido por el panel solar, se ha pensando colocar una rejilla que separe el módulo de dicho panel.

Al final el modulo seria el representado en la Figura 3.26.

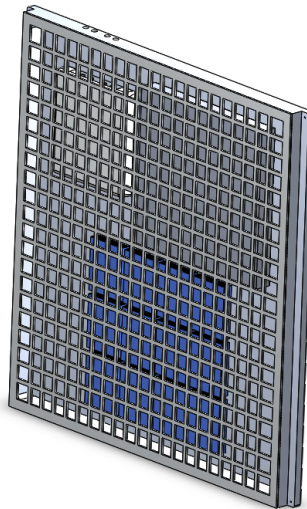


Figura 3.26: Diseño preliminar del conjunto

Por último, hay que tener en cuenta que el módulo debe ir sujeto al panel. En este primer diseño se considera que el módulo va atornillado por las esquinas a los laterales del panel solar, esto se decidió así ya que el panel cuenta con un marco exterior y, en primera instancia, parece la manera más sencilla de sujeción.

Aquí se puede ver en más detalle el conjunto completo:

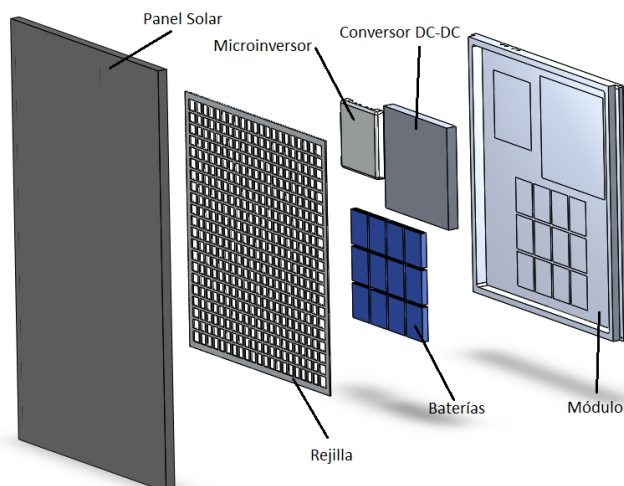


Figura 3.27: Conjunto preliminar

3.4.4. Simulación térmica y mecánica

Para poder llegar al diseño definitivo del módulo debemos comprobar que será capaz de soportar las condiciones de operación planteadas anteriormente. Esto significa que para tener unos resultados válidos es necesario que las temperaturas de los componentes no excedan los valores máximos y mínimos de operación, presentados en la Tabla 3.12, y que no se produzcan esfuerzos excesivos sobre el módulo, superando el límite elástico del material (300MPa).

| Componente | Rango de temperaturas de operación |
|-----------------|------------------------------------|
| Baterías | $-20^{\circ}C \sim 40^{\circ}C$ |
| Convertor DC-DC | $-10^{\circ}C \sim 50^{\circ}C$ |
| Microinversor | $-40^{\circ}C \sim 75^{\circ}C$ |

Cuadro 3.12: Temperaturas de operación de los componentes

En este problema tenemos que acoplar dos físicas: transferencia de calor en sólidos y mecánica de sólidos.

Detalles de la simulación

Los pasos seguidos para realizar esta simulación son los siguientes:

1. Definir la geometría: consiste en 17 dominios: panel solar, modulo, rejilla, convertor, microinversor y 12 baterías.

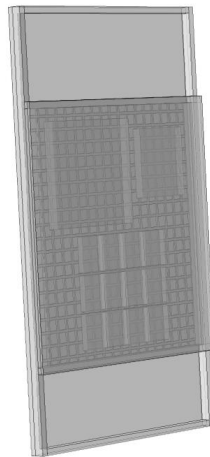


Figura 3.28: Geometría en Comsol

2. Definir los materiales:

- Módulo y la rejilla: aluminio ($\rho = 2700kg/m^3$)
- Panel: vidrio.
- Baterías: aluminio ($\rho = 2020.2kg/m^3$)
- Microinversor: aluminio ($\rho = 720.44kg/m^3$)
- Conversor: aluminio ($\rho = 1035.94kg/m^3$)

3. Mecánica de sólidos: aquí determinamos las condiciones de contorno y las fuerzas que actúan sobre el conjunto (en esta parte de la simulación no estudiamos la deformación del panel).

- Fuerza de la gravedad sobre todos los dominios.
- Restricción fija en los contornos de las esquinas del módulo (donde irá atornillado al panel).

4. Transferencia de calor en sólidos: aquí determinamos las fuentes de calor y la transferencia de calor entre cada uno de los componentes.

- Transferencia de calor por conducción entre todos los elementos en contacto.
- Fuentes de calor:
 - Baterías: $Q = 550W/m^3$
 - Conversor: $Q = 9039/m^3$
 - Microinversor: $Q = 2039/m^3$
 - Cara superior del panel: $q = 1050W/m^2$
- Flujo de calor convectivo:
 - Cara superior del panel: $h = 6W/m^2 * K$
 - Modulo: $h = 5W/m^2 * K$
- Radiación:

- Cara superior del panel: $\epsilon = 0.84$
- Cara inferior del panel: $\epsilon = 0.8$
- Módulo: $\epsilon = 0.77$

Dificultades durante la simulación

A la hora de realizar el ensayo mecánico y térmico se han encontrado muchas dificultades hasta conseguir definir correctamente el modelo en COMSOL.

El primer problema fue la definición de la geometría. Debido a que solo se disponía de la versión para estudiantes tanto de SolidWorks como de COMSOL, no se consiguió encontrar fácilmente una manera de exportar la geometría de SolidWorks para utilizarla en COMSOL. Eso supuso que fuera necesario definir toda la geometría directamente en COMSOL, lo cual es una tarea ardua dado que COMSOL no está diseñado como una herramienta de CAD.

En segundo lugar, la determinación de las condiciones de contorno y el solapamiento de las distintas físicas resultó ser más complicado de lo esperado inicialmente. Dado que había que tener en cuenta la radiación solar y la transferencia de los diferentes componentes por separado, fue complicado conseguir determinar los parámetros que permitieran simular el modelo de la manera más realista posible.

Por último, el mallado del conjunto se convirtió en otra parte muy complicada de la simulación. Fue necesario definir mallados diferentes para los componentes internos, el módulo y la rejilla. Esto se debe a que en las zonas de contacto donde se produce la transferencia de calor era importante tener más precisión (mallado más fino), mientras que en los componentes electrónicos no era necesario tanto detalle. Si esto no se hacía así, el modelo era demasiado grande y la simulación nunca convergía a una solución. Así conseguimos limitar el número de grados de libertad del modelo y lograr obtener una simulación más rápida y que convergiera a una solución lógica.

Análisis de los resultados

Debido al peso propio del conjunto y al aumento de temperatura del conjunto, el cual produce una dilatación del material, el módulo sufre una deformación. Los resultados pueden verse en la Figura 3.29.

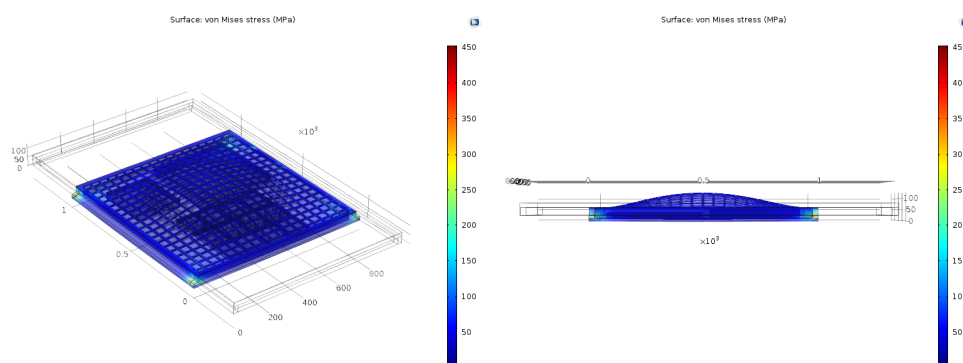


Figura 3.29: Estudio mecánico de la simulación inicial

La mayor deformación se produce en la rejilla. Debido al aumento de temperatura la rejilla se hincha, chocando contra la parte inferior del panel. Esta deformación es de 11.8mm . El módulo en cambio solo sufre una deformación de 0.6mm en la parte inferior.

A su vez, esta deformación genera un esfuerzo sobre los puntos de unión entre el modulo y el panel de $394.6MPa$. Ya que el límite elástico del aluminio se encuentra entre los 200-300 MPa, el módulo no soporta la deformación sufrida a causa del peso propio y la dilatación térmica.

En cuanto a la transferencia de calor, los resultados pueden verse en la Figura 3.30.

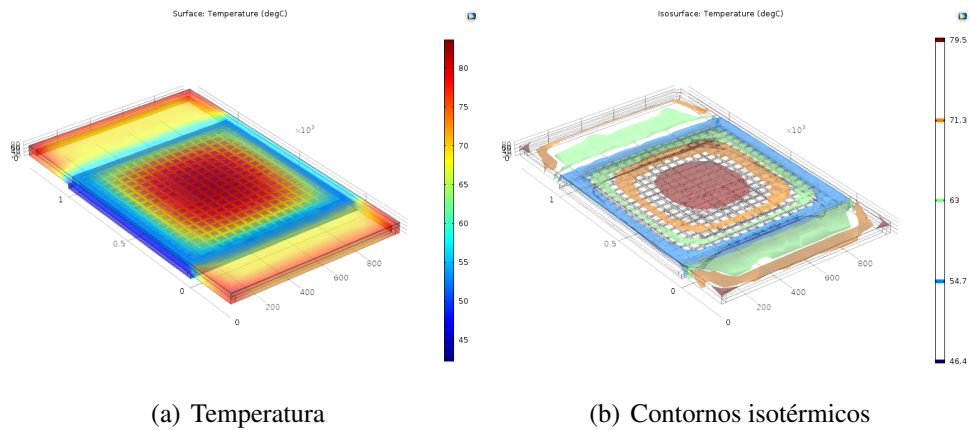


Figura 3.30: Estudio térmico de la simulación inicial

El panel, al estar en contacto con la rejilla y el modulo, transmite calor al resto de los componentes.

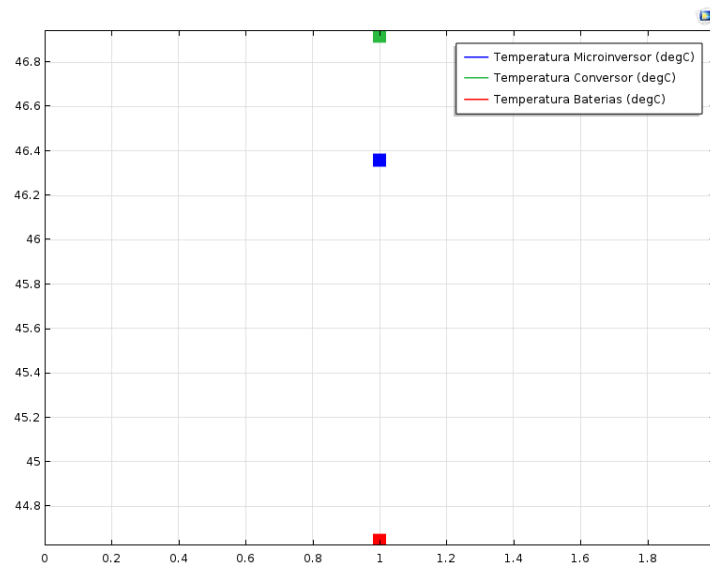


Figura 3.31: Temperatura alcanzada por los componentes

Como puede verse en la Figura 3.31, el componente que alcanza mayor temperatura es el conversor, llegando casi a los 50°C.

Conclusiones

Con esta simulación hemos podido comprobar que debemos realizar ciertos cambios en el diseño preliminar.

Con este diseño los componentes alcanzan temperaturas que superan sus límites de operación y el esfuerzo sobre los tornillos de unión excede el límite elástico del material, como puede verse en la Tabla 3.13

| RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN | |
|-----------------------------|-------------------------------|
| Temperatura Microinversor | $46.4^{\circ}C < 75^{\circ}C$ |
| Temperatura Conversor DC-DC | $50^{\circ}C = 50^{\circ}C$ |
| Temperatura Baterías | $44.6^{\circ}C > 40^{\circ}C$ |
| Esfuerzo sobre los tornillo | $394.6MPa > 300MPa$ |

Cuadro 3.13: Resultados obtenidos con el primer diseño

3.4.5. Refinar y mejorar el diseño

Para evitar la gran deformación de la rejilla y mejorar la transferencia de calor de los componentes, se modifica la posición de dicha rejilla. En vez de estar en contacto directo con el panel, la rejilla se situará en el interior el módulo, justo a la altura de los componentes pero sin llegar a estar en contacto directo con ellos. Para ello será necesario añadir un escalón en los laterales interiores del módulo donde la rejilla pueda apoyarse. De este modo es el módulo el que esta en contacto con el panel en vez de la rejilla.

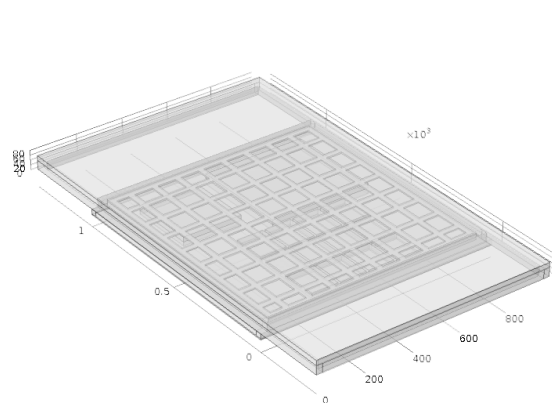


Figura 3.32: Geometría de la simulación del modelo modificado

Con esta modificación se obtienen los siguientes resultados.

Simulación del segundo diseño

Se observa que con este cambio la máxima deformación se produce en la parte inferior del módulo, en vez de en la rejilla. Dicha deformación es de $\simeq 1mm$.

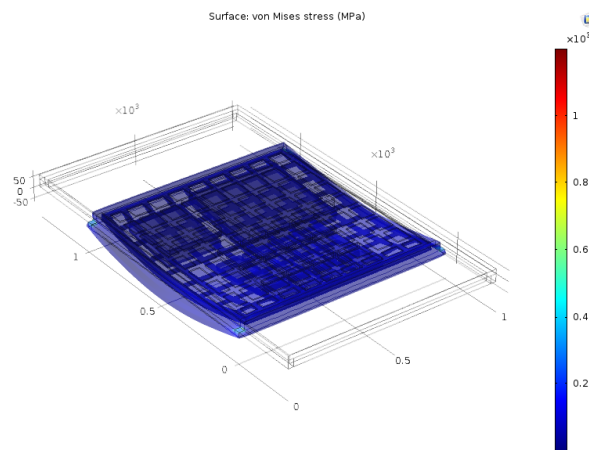
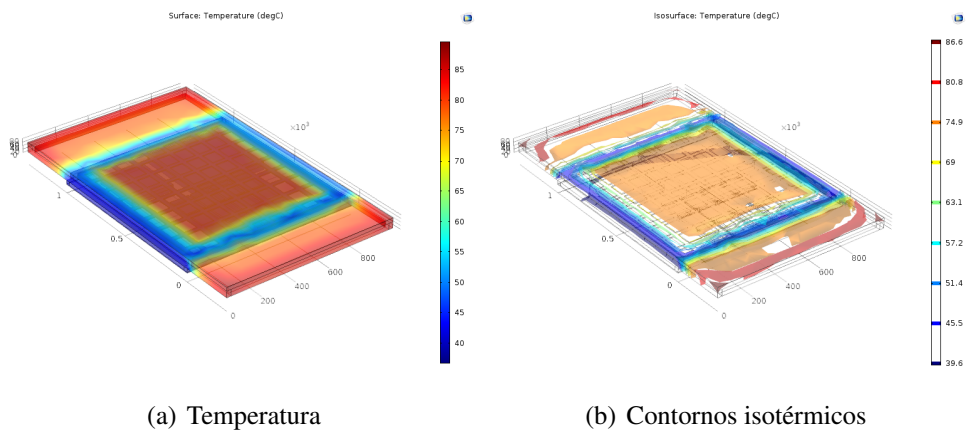


Figura 3.33: Estudio mecánico de la simulación del segundo modelo (factor de escala=70)

En cuanto al esfuerzo sufrido en los puntos de unión con el módulo, se produce un aumento del esfuerzo que deberán soportar los elementos de unión. Dicho esfuerzo es de $\simeq 1400 MPa$.

Por otro lado, en cuanto al análisis térmico, se consigue disminuir la temperatura alcanzada por los componentes.



(a) Temperatura

(b) Contornos isotérmicos

Figura 3.34: Estudio térmico de la simulación del segundo diseño

La máxima temperatura se sigue alcanzando en el convertidor, pero en este caso es de $\simeq 40^{\circ}C$ (ver Figura 3.35).

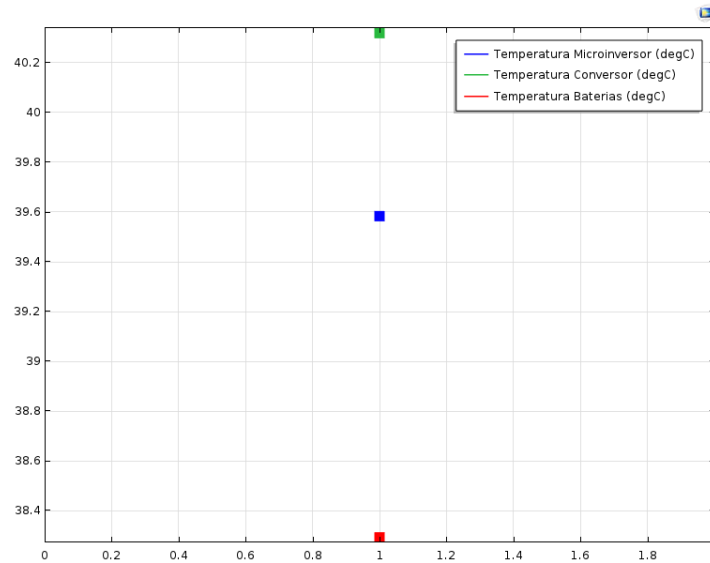


Figura 3.35: Temperatura alcanzada por los componentes en el segundo diseño

Tras haber realizado este estudio se observa que el diseño cumple con los requisitos térmicos del conjunto. Sin embargo, los requisitos mecánicos no se alcanzan. El esfuerzo sobre los tornillos que unen el módulo con el panel es aun mayor que con el diseño anterior ($1400\text{MPa} \gg 300\text{MPa}$), de modo que este diseño tampoco es válido.

| RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN | |
|-----------------------------|---|
| Temperatura Microinversor | $39.6^{\circ}\text{C} < 75^{\circ}\text{C}$ |
| Temperatura Conversor DC-DC | $40.4^{\circ}\text{C} < 50^{\circ}\text{C}$ |
| Temperatura Baterías | $38.2^{\circ}\text{C} < 40^{\circ}\text{C}$ |
| Esfuerzo sobre los tornillo | $1400\text{MPa} > 300\text{MPa}$ |

Cuadro 3.14: Resultados obtenidos con el segundo diseño

Estos resultados indican que es necesario cambiar el método de sujeción del módulo.

Simulación del modelo con el tercer diseño

Dado que la unión con tornillos del módulo y el panel no da buenos resultados se pensó en aprovechar la propia estructura soporte del panel para sostener el módulo. De este modo se pensó sujetar el módulo con raíles, del mismo modo en que se sujeta el panel solar, aprovechando la propia estructura soporte del panel solar. Así, el módulo no va sujeto al panel, simplemente esta en contacto con él y se sostiene gracias a la estructura soporte.

Por ello, en este tercer diseño el módulo será soportado por tres raíles situados en la parte inferior del mismo, tal y como se ve en la Figura 3.36. Dichos raíles irán sujetos a la estructura soporte del conjunto. De este modo, además, no es necesario perforar el panel solar.

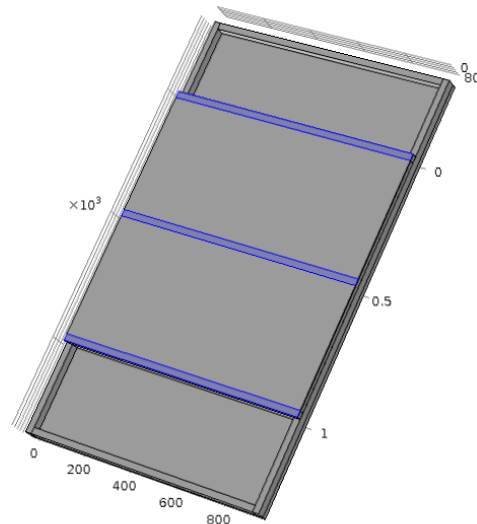


Figura 3.36: Superficies de apoyo del panel sobre los raíles

En este caso, la máxima deformación se produce en la zona de contacto entre el panel y el módulo, pero dicha deformación es tan sólo de 0.24mm.

Además, el peso del conjunto es soportado por los tres raíles por lo que la estructura no presenta puntos con sobreesfuerzos. Como puede verse en la Figura 3.37 siempre se tienen valores inferiores a 300MPa.

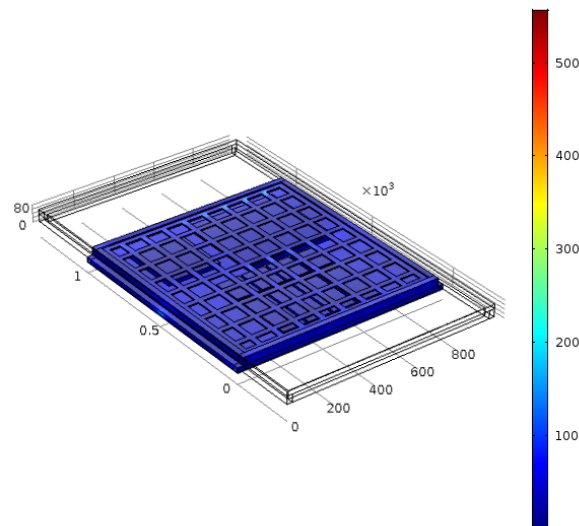


Figura 3.37: Estudio mecánico de la simulación del tercer diseño (factor de escala=10)

En cuanto a los resultados térmicos, los valores se mantienen muy similares a los casos anteriores, como puede verse en las Figuras 3.38 y 3.39.

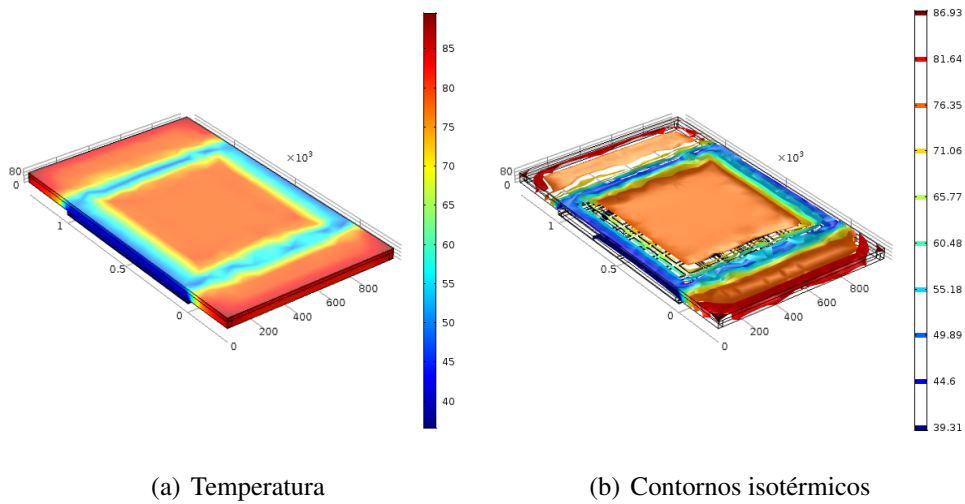


Figura 3.38: Estudio térmico de la simulación del tercer diseño

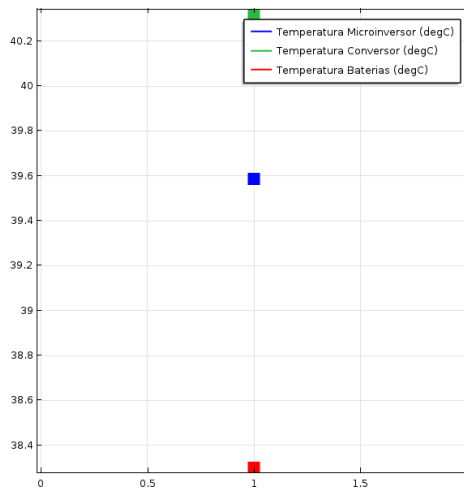


Figura 3.39: Temperatura alcanzada por los componentes en el tercer diseño

Con esta última modificación el conjunto ya cumple tanto con los requisitos mecánicos como térmicos necesarios.

| RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN | |
|-----------------------------|-------------------------------|
| Temperatura Microinversor | $39.6^{\circ}C < 75^{\circ}C$ |
| Temperatura Conversor DC-DC | $40.4^{\circ}C < 50^{\circ}C$ |
| Temperatura Baterías | $38.2^{\circ}C < 40^{\circ}C$ |
| Esfuerzo | $< 300MPa$ |

Cuadro 3.15: Resultados obtenidos con el tercer diseño

Comprobación de casos extremos

Todas las simulaciones anteriores se realizaron considerando una temperatura ambiente de 20°C. Como especificamos anteriormente, para este estudio vamos a considerar una temperatura

exterior máxima de 40°C y una mínima de -8°C . Por ello es importante que comprobemos que este último diseño seguirá siendo válido en estas circunstancias.

$$T_{max} = 40^{\circ}\text{C} - T_{min} = -8^{\circ}\text{C}$$

- Temperatura ambiental máxima: considerando 40°C como temperatura ambiente se obtiene el siguiente resultado (ver Figura 3.40).

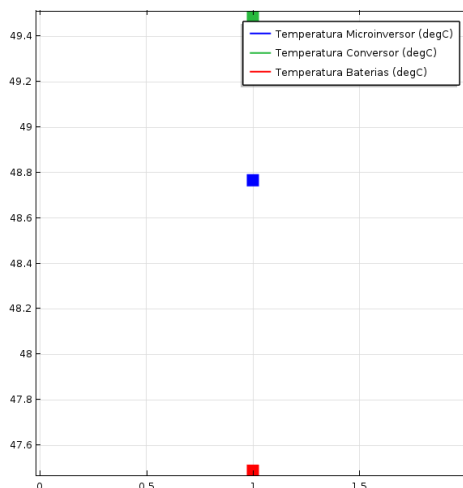


Figura 3.40: Temperatura alcanzada por los componentes a máxima temperatura ambiente

- Temperatura ambiental mínima: considerando -8°C como temperatura ambiente se obtiene el siguiente resultado (ver Figura 3.41).

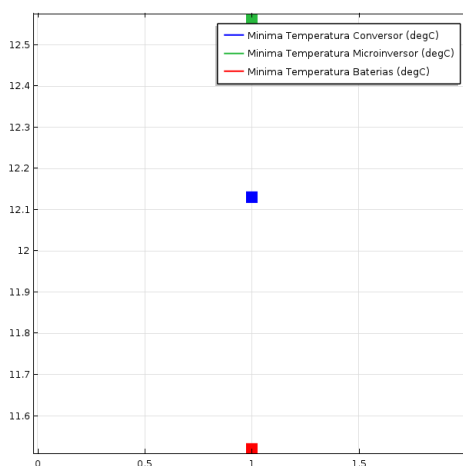


Figura 3.41: Temperatura alcanzada por los componentes a mínima temperatura ambiente

Se puede comprobar que en ambos casos los componentes se mantienen dentro de su rango de temperaturas de operación, como puede observarse en la Tabla 3.16

| Componente | Temp. ambiente | Temp. alcanzada |
|-------------------|-----------------------|--|
| Baterías | 40°C -8°C | $-20^{\circ}C < 40^{\circ}C = 40^{\circ}C$ $-20^{\circ}C < 11.4^{\circ}C < 40^{\circ}C$ |
| Convertor DC-DC | 40°C -8°C | $-10^{\circ}C < 50^{\circ}C = 50^{\circ}C$ $-10^{\circ}C < 12^{\circ}C < 50^{\circ}C$ |
| Microinversor | 40°C -8°C | $-40^{\circ}C < 48.8^{\circ}C < 75^{\circ}C$ $-40^{\circ}C < 13^{\circ}C < 75^{\circ}C$ |

Cuadro 3.16: Resultados con temperaturas extremas

Resumen de las alternativas de diseño analizadas

Tras realizar el estudio preliminar se han analizado diferentes posibilidades del diseño, llegando a la solución más apropiada para cumplir con los requisitos definidos en la primera fase de diseño.

Las alternativas planteadas han sido las siguientes:

| Alternativa | Sujeción al panel | Posición de la rejilla | Resultado | Válido |
|--------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|---------------|
| Diseño 1 | Tornillos en las esquinas | Entre el módulo y el panel | Deformación excesiva de la rejilla | No |
| Diseño 2 | Tornillos en las esquinas | Dentro del módulo | Esfuerzo excesivo sobre los tornillos | No |
| Diseño 3 | Rafles | Dentro del módulo | Cumple con los requisitos | Si |

Cuadro 3.17: Análisis de los distintos diseños preliminares analizados

Capítulo 4

RESULTADOS

4.1. Diseño Definitivo

Una vez analizado el diseño preliminar podemos diseñar el módulo de manera detallada.

Tras los resultados obtenidos con las simulaciones debemos realizar cambios en las dimensiones del diseño preliminar. Dado que la rejilla va ahora situada dentro del módulo, debemos ampliar el grosor de dicho módulo. Las nuevas dimensiones pueden verse en la Figura 4.1.

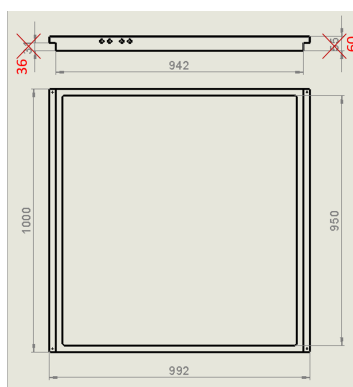
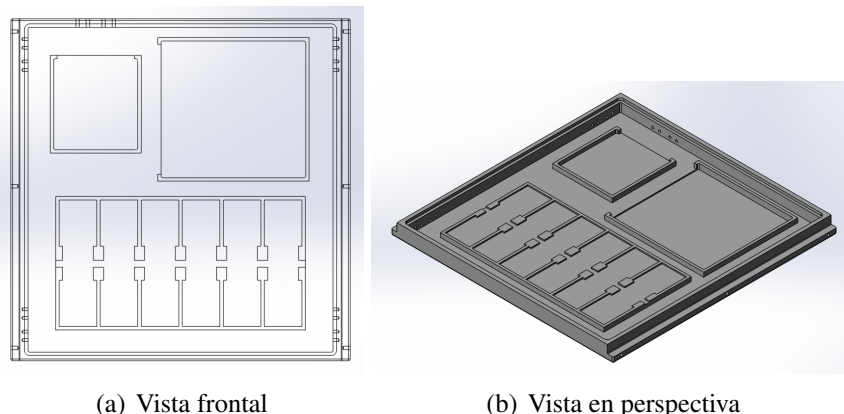


Figura 4.1: Dimensiones básicas del diseño definitivo

4.1.1. Fijación de los componentes

Para mantener fijos los componentes se ha decidido evitar el uso de pegamentos o siliconas, ya que uno de los requisitos de este módulo es la posibilidad de un fácil recambio de los componentes.

Por ello, la parte interior del módulo cuenta con marcos de aluminio para cada uno de los componentes, como puede verse en la Figura 4.2.



(a) Vista frontal

(b) Vista en perspectiva

Figura 4.2: Diseño definitivo del módulo sin rejilla

Dichos marcos están abiertos por uno de sus lados para permitir la conexión de los cables de entrada y salida de cada uno de los componentes.

Además, el módulo está diseñado de manera que todos los componentes quedan a la misma altura. Esto permite que la rejilla los sujete y no se desplacen cuando se transporte el módulo.

A su vez, como puede verse en las Figuras 4.3 y 4.4, se ha diseñado el módulo de manera que tenga un escalón donde la rejilla quede apoyada. De este modo se evita que los componentes tengan que aguantar el peso de la rejilla y esta quede correctamente posicionada.

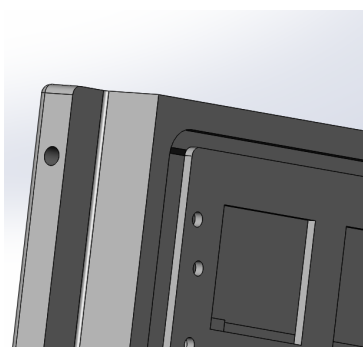


Figura 4.3: Detalle del apoyo de la rejilla sobre el módulo

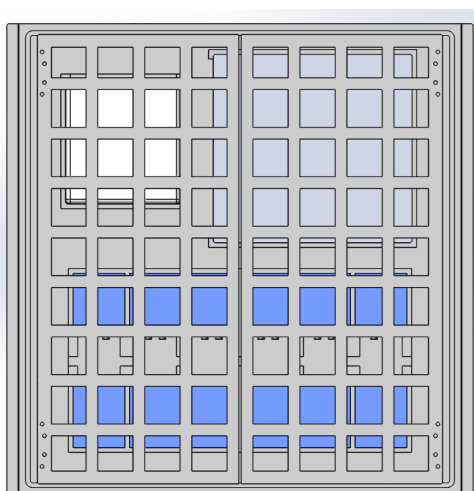
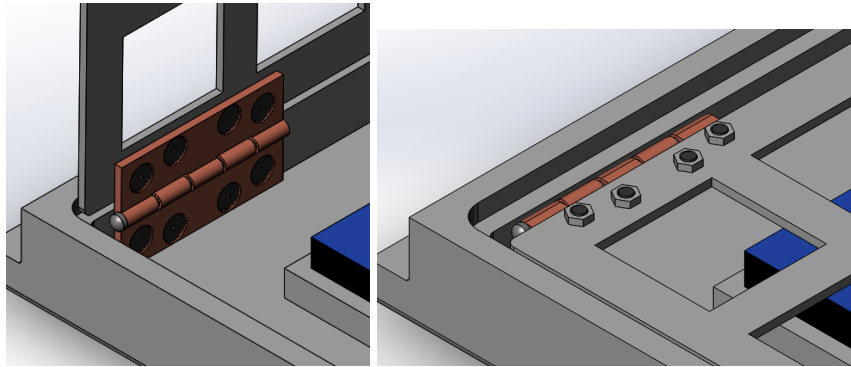


Figura 4.4: Vista frontal del módulo con la rejilla

Los planos detallados del módulo y de la rejilla pueden verse en los Anexos II y III, respectivamente.

4.1.2. Unión de la rejilla al módulo

Para unir la rejilla al módulo, y permitir así el acceso a los componentes, se utilizan unas bisagras. Se tomó esta decisión ya que es un sistema sencillo y con una larga vida útil.

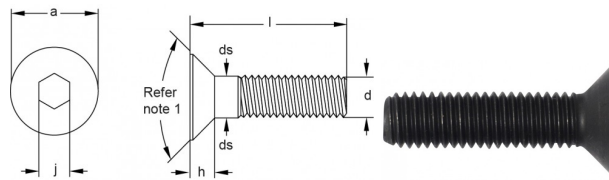


(a) Unión al módulo

(b) Unión a la rejilla

Figura 4.5: Detalle de las bisagras

Dichas bisagras van unidas al módulo y a la rejilla por medio de tornillos, como puede verse en la Figura 4.5.



(a) Geometría del tornillo

(b) Tornillo

Figura 4.6: Tornillos de sujeción de la rejilla al módulo

Se trata de tornillos avellanados allen. Cuyos parámetros se pueden ver en la Tabla 4.1 [2].

| | d | l | Paso | a | h |
|----------------------|----------|----------|-------------|----------|----------|
| Unión con el módulo | M8 | 20 mm | 1.25 | 16 mm | 4 mm |
| Unión con la rejilla | M8 | 10 mm | 1.25 | 16 mm | 4 mm |

Cuadro 4.1: Parámetros de los tornillos de unión de la rejilla al módulo

Para la sujeción de las bisagras al módulo se cuenta con agujeros ciegos en los laterales del módulo (profundidad de 15 mm), como puede verse en la Figura 4.7.

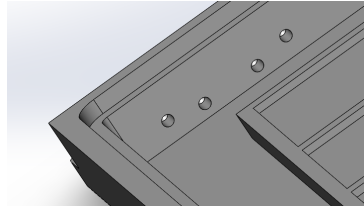


Figura 4.7: Unión de las bisagras al módulo

Por otro lado, debido al pequeño grosor de la rejilla, será necesario sujetar los tornillos con tuercas.

Se trata de tuercas hexagonales bajas de acero inoxidable DIN 439 [6].

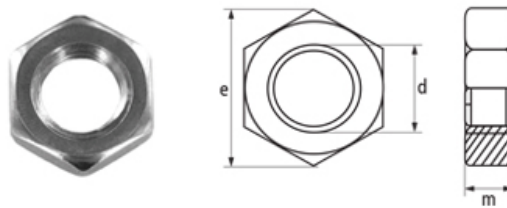


Figura 4.8: Tuerca hexagonal DIN 439

| d | Paso | m | e |
|----------|-------------|----------|----------|
| M8 | 1.25 | 4 mm | 14.38 mm |

Cuadro 4.2: Parámetros de las tuercas de la rejilla

Al final el conjunto completo es el que se ve en la Figura 4.9.

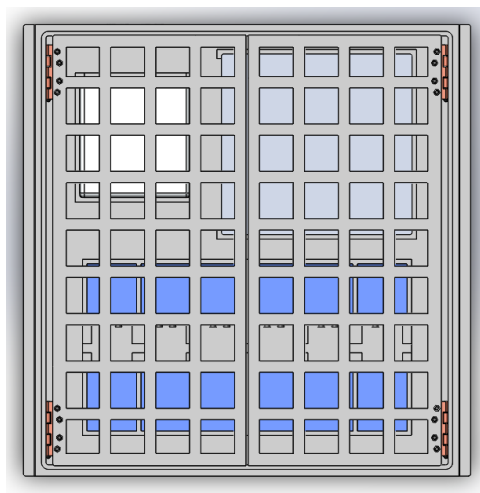


Figura 4.9: Vista frontal del módulo completo

Para poder acceder a los componentes dentro del módulo, se ha dividido la rejilla por la mitad, de modo que pueda abrirse fácilmente.

Las dimensiones de estas bisagras pueden verse en la Figura 4.10. Para poder determinar las dimensiones exactas se ha tenido en cuenta que la rejilla no debe chocar con el módulo al abrirse. Debe permitir al menos que se puedan abrir hasta un ángulo de 90°.

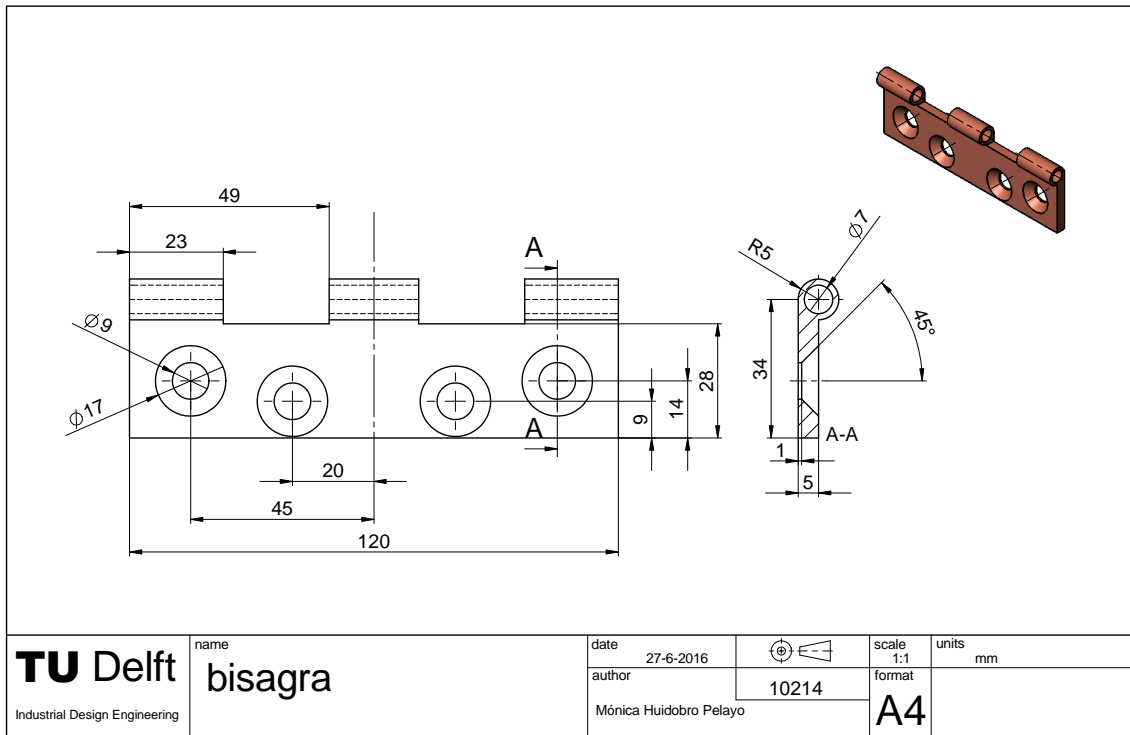


Figura 4.10: Dimensiones de la bisagra

El conjunto puede verse en la Figura 4.11.

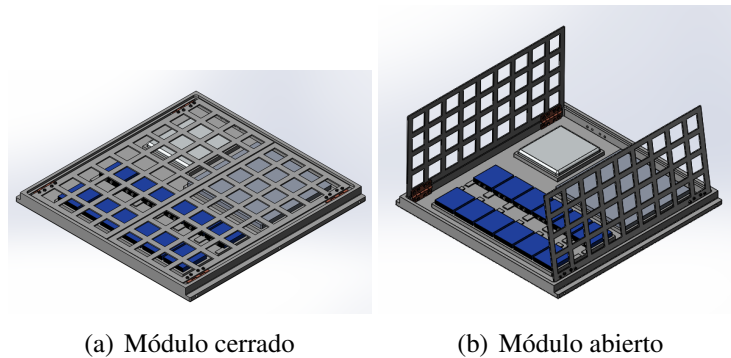


Figura 4.11: Diseño definitivo del módulo

4.2. Estructura soporte

En cuanto al modo de fijación del módulo al panel, hay que tener en cuenta cual es el sistema de anclaje del panel.

Como ya se mencionó anteriormente, el panel va anclado sobre una estructura de raíles metálicos. Dicho panel puede situarse tanto vertical como horizontalmente, y puede estar colocado sobre una superficie inclinada o plana.

En nuestro caso, la mejor opción es situar el panel verticalmente, ya que si no los raíles chocarían con el módulo y no se podría anclar adecuadamente el conjunto.

Por ello, vamos a determinar que se utilizará una estructura con triángulo inclinado para paneles en vertical, como la que se muestra en la Figura 4.12



Figura 4.12: Estructura de aluminio para superficie plana, un panel solar de 60 células en vertical [11]

El panel va unido al soporte mediante unas pinzas o agarraderas de aluminio y acero, como la que se muestra en la Figura 4.13. La pinza se coloca al final del raíl de soporte y se ajusta al grosor del marco del panel.



Figura 4.13: Pinzas para módulos fotovoltaicos [11]

En el caso del panel con el módulo integrado, este tipo de estructura no es suficiente. Debemos añadir una serie de cambios a este diseño.

Añadimos tres raíles similares a los de la estructura pero de menor grosor (12 mm), como puede verse en la Figura 4.14 (b). De este modo el módulo puede apoyarse sobre estos raíles y no deberá estar atornillado directamente al panel solar. Puede verse el plano detallado de esta estructura en el Anexo IV.

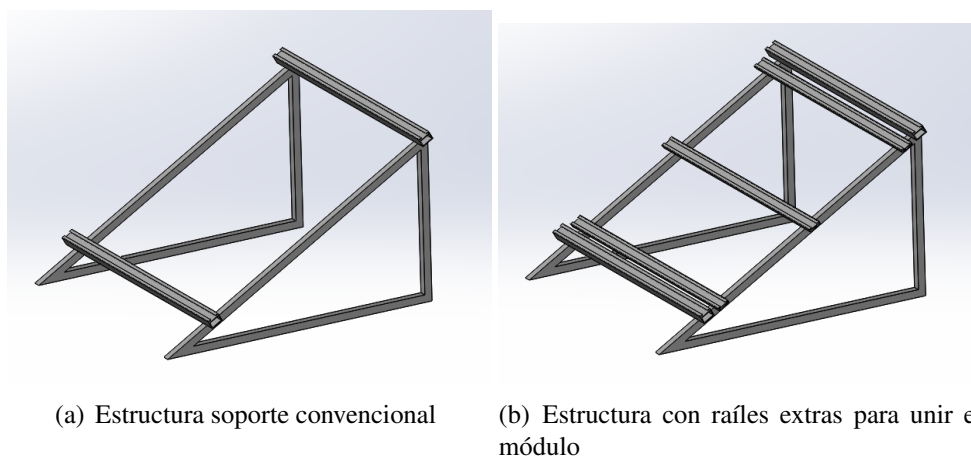


Figura 4.14: Estructura soporte

El módulo queda apoyado sobre los tres raíles adicionales, y por el raíl inferior, de modo que aunque no se atornille se mantiene en la posición correcta.

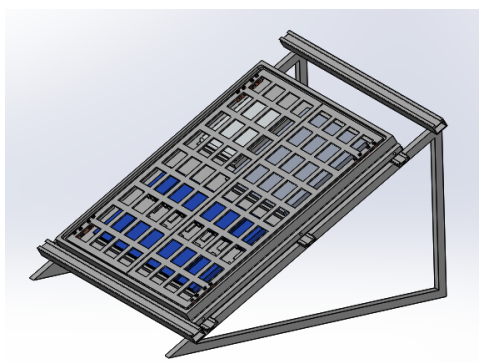


Figura 4.15: Apoyo del módulo sobre la estructura soporte

Por último, el módulo se une al panel por medio de pinzas similares a las que se usa para unir el panel a la estructura. Dichas pinzas irán atornilladas a los laterales del módulo para una mayor sujeción. Por esta razón el módulo cuenta con tres perforaciones a ambos lados, como puede verse en la Figura 4.16.

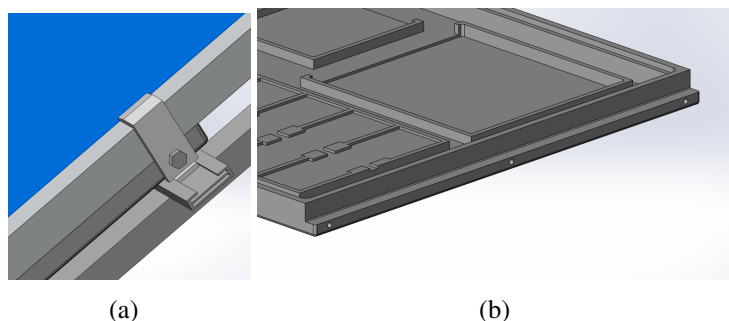


Figura 4.16: Unión del módulo con la estructura soporte

Los tornillos utilizados para unir el módulo son tornillos hexagonales DIN933 M10x20 [1].



Figura 4.17: Tornillo hexagonal DIN933 M10x20

El conjunto final es el siguiente:

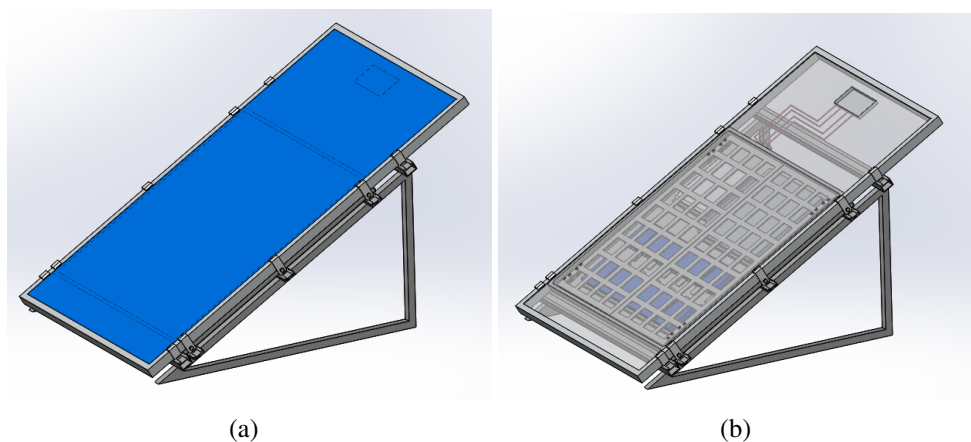


Figura 4.18: Colocación del conjunto sobre la estructura soporte

En el Anexo V puede verse el conjunto con los componentes que lo integran.

4.3. Sistema de estanqueidad del módulo

Para prevenir la entrada de agua y otros residuos dentro del módulo vamos a utilizar prensaestopas para conectar el microinversor con el panel. Las prensaestopas facilitan la entrada directa de los cables a través de envoltorios, instalándose directamente roscadas sobre las paredes del módulo.



Figura 4.19: Prensaestopa

En este caso se han elegido prensaestopas de poliamida con liberación de tensión GERICH [3], para evitar la sobrepresión dentro del módulo debido al aumento de temperatura en su interior.

| | |
|--------------------------------|------------------|
| Material | Poliamida PA 6.6 |
| Tipo de protección | IP68 |
| Temperatura de servicio | -20°C ~ +100°C |
| Diámetro de unión | 20 mm |

Cuadro 4.3: Parámetros de la prensaestopa

Estas se colocarán en los agujeros de salida de los cables del módulo.

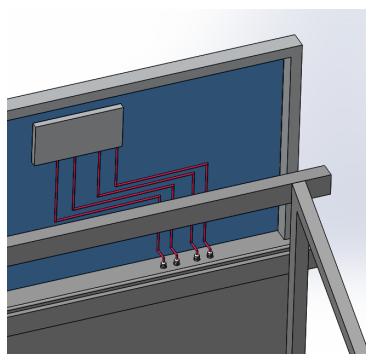


Figura 4.20: Posición de las prensaestopas

Por último, para terminar de estancar el conjunto, se aplicará una capa de silicona en la parte superior e inferior del módulo, donde entra en contacto con el panel. De este modo prevenimos la entrada de agua o pequeñas partículas dentro del módulo.

Una posible silicona a utilizar sería DOMOSIL [14].



Figura 4.21: DOMOSIL

DOMOSIL es un sellador de silicona para uso general, que proporciona:

- Resistencia térmica de $-40^{\circ}C$ a $+160^{\circ}C$.
- Excelente adherencia a cualquier tipo de soporte sin poro.
- Gran resistencia al envejecimiento.

4.4. Planos y lista de piezas

4.4.1. Lista de piezas

| Componente | Imagen | Cantidad |
|--|--|----------|
| Módulo |  | 1 |
| Panel Solar |  | 1 |
| Convertor DC-DC |  | 1 |
| Microinversor |  | 1 |
| Batería |  3.2V Lifepo4 20Ah 3C discharge Dimensiones: 25x110x135mm | 12 |
| Rejilla |  | 2 |
| Bisagra |  | 4 |
| Tornillo avellanado Allen M8x20 |  | 16 |
| Tornillo avellanado Allen M8x10 |  | 16 |
| Tuerca hexagonal DIN439 M8x4 |  | 16 |
| Prensaestopa |  | 4 |
| Estructura soporte triangular con pinzas |  | 1 |
| Raíl de 12 mm de grosor |  | 3 |
| Pinza para el módulo |  | 6 |
| Tornillo hexagonal DIN933 M10x20 |  | 6 |

Cuadro 4.4: Lista de piezas

4.4.2. Planos de los componentes

Para ver los planos detallados ver Anexo.

Capítulo 5

CONCLUSIONES

5.1. Comprobación de la lista de requisitos

Una vez determinado el diseño definitivo vamos a comprobar que se cumplen los requisitos que se determinaron al principio.

Los requisitos eran los siguientes:

1. Peso inferior a 20 Kg: este requisito no se ha podido satisfacer. En el apartado siguiente se explica con más detalle las razones de este problema.
2. Posibilidad de recambio de los componentes: con este diseño es posible el acceso a los componentes y hacer el recambio de manera sencilla.
3. Adaptable a distintos paneles solares: es posible utilizar este módulo para paneles con diferentes longitudes.
4. Cumplimiento de las normativas de seguridad: este requisito no se ha llegado a detallar del todo, debido a que no se ha entrado en el análisis de como irán conectados los distintos componentes.
5. Estructura rígida y tenaz: el uso de aluminio anodizado proporciona estas características al conjunto.
6. Sistema de estanqueidad (IP65): gracias al uso de prensaestopas en la salida de los cables y la silicona entre el módulo y el panel se asegura el grado de protección necesario.
7. Sistema de refrigeración: al final no ha sido necesario ya que no se alcanzan temperaturas mayores a las temperaturas máximas de operación de los componentes.
8. Posibilidad de sujeción con una estructura de anclaje convencional: gracias a las dimensiones del módulo y sistema de sujeción del mismo es posible utilizar una estructura de anclaje convencional.

5.2. Comprobación de los objetivos globales del proyecto

Para terminar con el proyecto debemos comprobar si se han logrado los objetivos que se determinaron al principio del mismo.

Dichos objetivos eran:

1. Seleccionar los componentes del módulo.
2. Determinar la forma más adecuada para la estructura, teniendo en cuenta la necesidad de acceso a los componentes para su posible sustitución.
3. Seleccionar el material más apropiado para la estructura.
4. Optimizar la estructura para que sea lo más ligera y pequeña posible.
5. Realizar estudios mecánicos para asegurar que la estructura soporta las esfuerzos a los que se verá sometida durante su utilización.
6. Realizar estudios térmicos para comprobar que la estructura es capaz de soportar las altas temperaturas a las que se verá sometida, debido principalmente a la radiación solar y al calentamiento de los componentes.
7. Asegurar que los componentes no alcanzan temperaturas superiores a sus límites de operación.
8. Diseño de un sistema de aislamiento para evitar la entrada de agua u otros residuos del exterior dentro del módulo.

A continuación se va a analizar detalladamente cada uno de los objetivos.

5.2.1. Objetivo 1

Para este primer diseño se seleccionaron los componentes de acuerdo a una posible arquitectura. Como una primera aproximación es una decisión razonable, pero analizándolo a largo plazo sería necesario cambiar estos componentes. Tiene más sentido diseñar un placa que integre el convertor y el microinversor, de modo que no sería necesario un módulo tan grande y pesado.

En el apartado de "Líneas Futuras" se desarrolla de manera más extensa esta idea.

5.2.2. Objetivo 2

El objetivo de poder acceder a los componentes interiores del módulo para su posible sustitución se ha logrado gracias a la utilización de los perfiles de aluminio y la rejilla.

Como ya se explicó en el apartado de "Resultados" los componentes van situados dentro del módulo en sus correspondientes recuadros de aluminio. Esto impide que se desplacen. Además la rejilla los mantiene en contacto con el módulo en todo momento. Para acceder a ellos y sustituirlos basta tan solo con abrir la rejilla.

5.2.3. Objetivo 3

La elección del material fue una tarea relativamente sencilla ya que el aluminio anodizado es un material muy utilizado para conjuntos con condiciones de operación similares a las de este proyecto.

Además, gracias a las simulaciones realizadas se ha podido comprobar que soporta los casos de condiciones de operación extremas determinadas.

5.2.4. Objetivo 4

En cuanto a la optimización de peso y tamaño, no se ha podido entrar en mucho detalle por falta de información. Este diseño se ha optimizado para unos componentes que se seleccionaron como aproximación inicial, pero el objetivo del proyecto es cambiarlos y hacer un módulo más ligero y compacto.

Se detalla más este concepto en el apartado de "Líneas Futuras".

5.2.5. Objetivo 5

Los estudios mecánicos se han realizado utilizando COMSOL y gracias a ello se ha comprobado que el diseño definitivo soporta los esfuerzos a los que se verá sometido durante su utilización.

5.2.6. Objetivos 6 y 7

Al igual que los estudios mecánicos, también se han realizado los estudios térmicos utilizando COMSOL. Con ello se ha comprobado que el diseño definitivo de la estructura y los componentes no superan los límites de deformación y de temperatura establecidos.

5.2.7. Objetivo 8

Por último, en cuanto al sistema de aislamiento del módulo, la utilización de silicona en las zonas de contacto entre el módulo y el panel y el uso de prensaestopas para la salida de los cables, proporcionan el aislamiento requerido para el conjunto.

5.2.8. Resumen del cumplimiento de los objetivos

En conclusión, en la tabla 5.1 se puede ver que objetivos se han cumplido y en que aspectos habría que seguir trabajando.

| Objetivo | ¿Cumplido? |
|-----------------|--------------------------------|
| Objetivo 1 | Si (como primera aproximación) |
| Objetivo 2 | Si |
| Objetivo 3 | Si |
| Objetivo 4 | No |
| Objetivo 5 | Si |
| Objetivo 6 | Si |
| Objetivo 7 | Si |
| Objetivo 8 | Si |

Cuadro 5.1: Resumen de logro de los objetivos

Capítulo 6

LÍNEAS FUTURAS

Como ya se dijo en el apartado de Conclusiones, este proyecto se trata de una primera aproximación.

Víctor Vega Garita y su equipo están aún trabajando en el diseño de la mejor arquitectura posible para este sistema. Esto implica que en el futuro los componentes utilizados serán diferentes, por lo que será necesario hacer cambios en el modelo aquí presentado.

Además, una vez ya se hayan seleccionado los componentes apropiados, se pretende crear un circuito integrado que englobe todas las funciones que realizan los componentes, a excepción de las baterías. Con ello se conseguirán las siguientes mejoras del sistema:

- Menor peso.
- Menores dimensiones (tanto en grosor como en longitud).
- Más eficiencia del sistema.
- Menores esfuerzos sobre la estructura.

Con ello se logrará en un futuro cumplir con todos los objetivos que se plantearon para este proyecto.

Capítulo 7

PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO

7.1. Planificación del proyecto

En este apartado se presenta la planificación de este proyecto. Se describen los principales hitos a seguir y la asignación temporal de cada uno.

7.1.1. Estructura de descomposición del proyecto (EDP)

La estructura de descomposición del proyecto (EDP) es una división natural del proyecto para llegar al producto o productos finales con la finalidad de:

- Identificar y definir el trabajo a desarrollar.
- Identificar los centros responsables de estos trabajos.
- Concretar la estructura que contempla desde los objetivos estratégicos hasta la base divisible de los mismos, mediante la integración de la organización, planificación y control de los trabajos que se desarrollan.

En este proyecto la estructura es la siguiente:

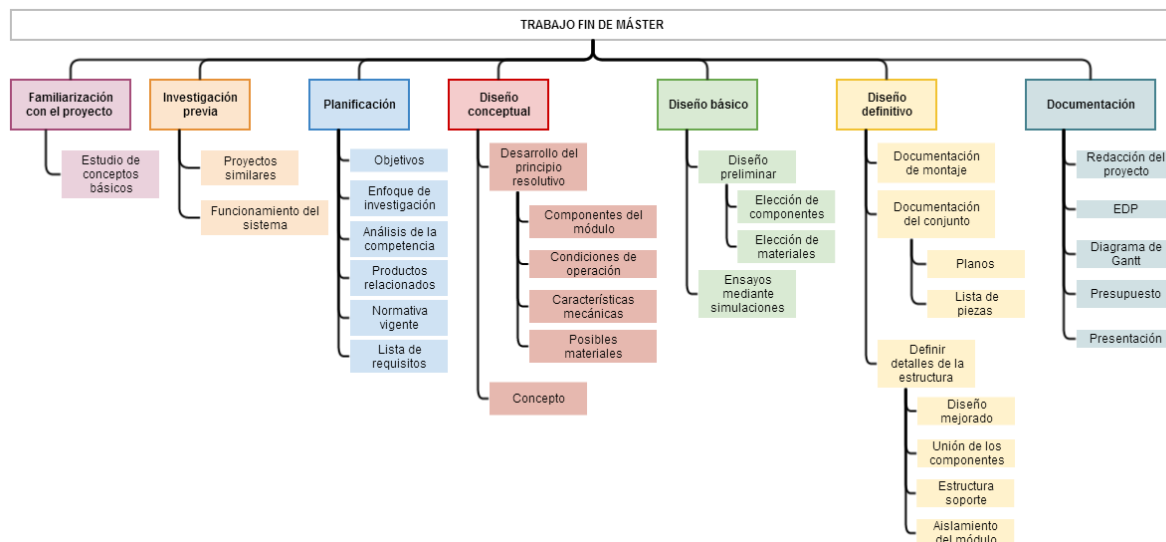


Figura 7.1: Estructura de Descomposición del Proyecto

Ver Anexo VI para más detalle.

Se ha dividido en diferentes paquetes de trabajo, cada uno de los cuales corresponde a una fase determinada del proyecto. Las tareas son las siguientes:

1. Familiarización con el proyecto: en esta primera fase se entra en contacto con el Trabajo de Doctorado de Víctor Vega Garita y se realiza un estudio de los conceptos básicos.
2. Investigación previa: una vez ya se conocen los principios básicos del sistema se realiza un estudio más a fondo del proyecto. Se diferencian las siguientes tareas:
 - Estudio de proyectos similares.
 - Estudio del funcionamiento del sistema.
3. Planificación: el primer paso para poder a empezar con el diseño es planificar como se va a llevar a cabo. Para ello debemos desarrollar las siguientes tareas:
 - Establecer los objetivos del proyecto.
 - Plantear un enfoque de investigación.
 - Analizar la competencia existente.
 - Estudiar el funcionamiento de productos similares.
 - Estudiar la normativa vigente aplicable a este producto.
 - Establecer la lista de requisitos del diseño.
4. Diseño conceptual: tras terminar la fase de planificación y contar con la lista de requisitos del producto, podemos empezar a determinar las características básicas que este deberá tener.
 - Determinar los componentes del módulo.
 - Establecer las condiciones de operación.
 - Estudiar posibles materiales.

- Definir las características mecánicas que deberá tener el conjunto.

Una vez se hayan definido todas estas características se llega a un concepto preliminar del producto.

5. Diseño básico: consiste en desarrollar un diseño preliminar y realizar las simulaciones necesarias para comprobar que cumple los requisitos establecidos en las fases anteriores. Se divide en las siguientes tareas:
 - Elección de los componentes.
 - Elección del material.
 - Realización de simulaciones.

Una vez terminada esta fase ya se puede determinar el diseño definitivo del producto.

6. Diseño definitivo: se trata de la última fase de diseño del producto. Consiste en las siguientes tareas:
 - Mejorar el diseño.
 - Determinar el sistema de unión del conjunto.
 - Elegir la estructura soporte más apropiada.
 - Definir el sistema de aislamiento.
 - Lista de piezas.
 - Planos detallados.
 - Documentación de montaje.

Además, es necesario documentar todo el trabajo realizado a lo largo del proyecto.

7.1.2. Diagrama de Gantt

Distribución de tareas

Para desarrollar el proyecto de una manera estructurada, se han repartido las distintas tareas de modo que el proyecto pueda terminarse a tiempo.



Figura 7.2: Calendario de distribución de tareas

Para ver el calendario a mayor tamaño ver Anexo VII.

Diagrama de Gantt

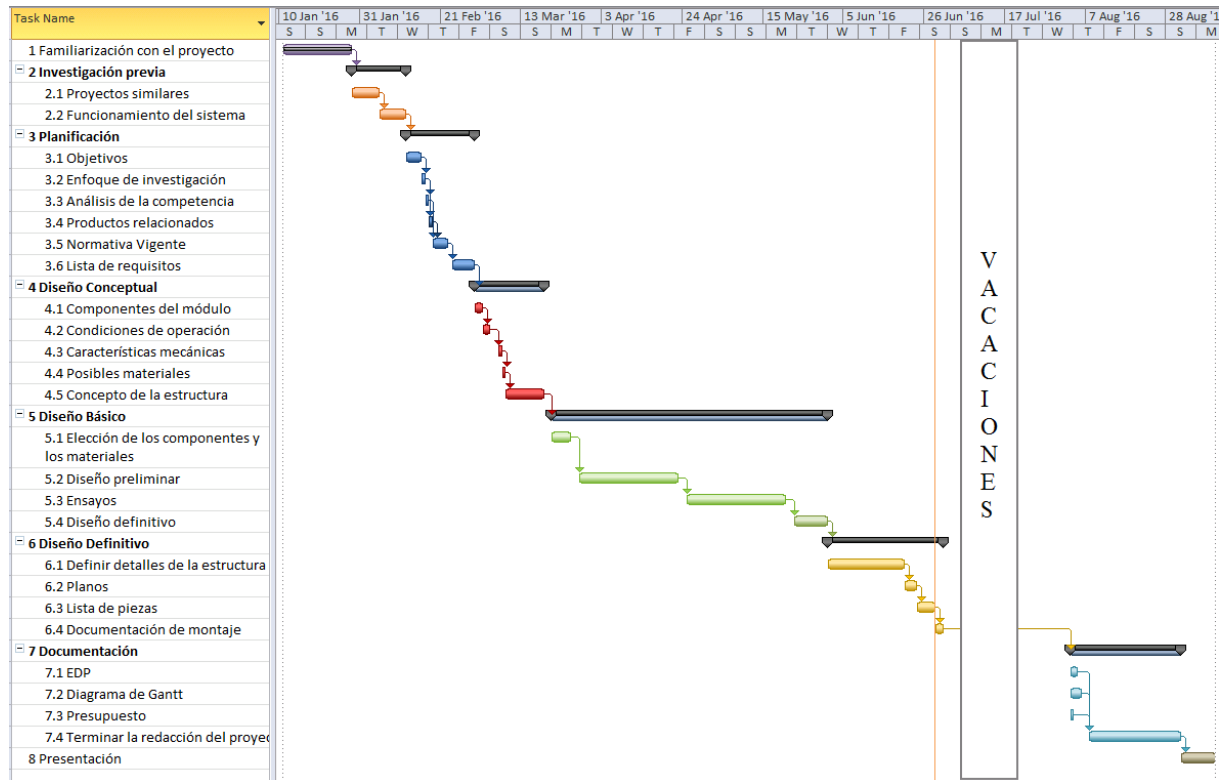


Figura 7.3: Diagrama de Gantt del proyecto

Para ver el Diagrama de Gantt a mayor tamaño ver Anexo VIII.

7.2. Presupuesto

Durante la realización de este proyecto se han tenido los siguientes costes:

| PRESUPUESTO DEL PROYECTO | | | |
|---|--------------------|---------------------|-----------------------|
| Concepto | Meses/Horas | Coste(€)/mes | Coste total(€) |
| Estudiante de máster | 825 horas | 10,8 €/h | 8910 € |
| Tutor del TFM | 15 horas | 30,71 €/h | 460,65 € |
| Supervisor del TFM en TU Delft | 150 horas | 30,71 €/h | 4606,5 € |
| Amortización COMSOL Multiphysics CKL | 5 meses | 3,34 €/mes | 16,68 € |
| Amortización SolidWorks Student Edition | 7 meses | 3,75 €/mes | 27,25 € |
| Amortización MacBook Pro | 8 meses | 40,25 €/mes | 322 € |
| TOTAL | | | 14343,08 € |

Cuadro 7.1: Presupuesto del proyecto

Para el cálculo de las horas de trabajo invertidas se han tenido en cuenta los siguientes cálculos.

$$12 \text{ ECTS TFM} + 18 \text{ ECTS Ampliación TFM} = 30 \text{ ECTS}$$

$$1 \text{ ECTS} = 25/30 \text{ h de trabajo}$$

Un total de 750-900 horas de trabajo.

De modo que vamos a considerar que se han empleado unas 825 horas para realizar este proyecto.

En cuanto al supervisor del TFM en TU Delft se estima una dedicación de 150h en labores de supervisión y dirección.

Además, dado que el trabajo se ha realizado a distancia, el tutor del TFM se estima que ha dedicado exclusivamente unas 15h de trabajo.

Por último, para el cálculo de las amortizaciones se ha considerado un periodo de 3 años para la amortización de software y equipos informáticos.

Bibliografía

- [1] Bricosimax. <https://www.bricosimax.com/tornillo-hexagonal-din-933-m10x20-clase-88-200u-fontana-p-14438.html>.
- [2] Countersunk flat socket head cap screws. <http://www.unitedfasteners.com.au/hexagon-socket-screws/socket-head-cap-screws-106/countersunk-flat-socket-head-cap-screws>.
- [3] Gerich, prensaestopas. http://en.gerich.eu/cable_glands_plastic_and_metal/type_kbvz_cable_gland_with_strain_relief.
- [4] *Guía resumida del clima en España (1981-2010) - Madrid*. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).
- [5] *IEC 60529: Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- [6] Inoxmat, tuercas de acero inoxidable. http://www.inox-mat.com/tornillos_tuercas.html.
- [7] Jrp (just real power). <http://www.justrealpower.com/en/show.php?id=126>.
- [8] Limpiatumundo. <http://www.limpiatumundo.com/generacion-energia-renovable/solar-fotovoltaica/>.
- [9] *Manual Jinko Solar JKM265P-60*. [http://www.jinkosolar.com/ftp/EN-JKM265P-60\(4BB\).pdf](http://www.jinkosolar.com/ftp/EN-JKM265P-60(4BB).pdf).
- [10] Monsolar. <http://www.monsolar.com/fotovoltaica-aislada/estructuras/para-paneles-solares-de-60-celulas.html>.
- [11] Monsolar. <http://www.monsolar.com/estructura-de-aluminio-para-superficie-plana-1-panel-solar-60-celulas-vertical.html>.
- [12] *Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red, PCT-C-REV-Julio 2011*. IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- [13] Shenzhen intefly electronics. <http://www.intefly.com/html/20141211/13.html>.
- [14] Silicona domosil. http://www.isomat.com.es/Sellados-Elasticos-de-Juntas/DOMOSIL/flypage_centiva.tpl.html.
- [15] Waka-waka. <https://nl.waka-waka.com>.
- [16] Wikipedia: Batería de litio. <https://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa-de-litio-ferrofosfato>.

- [17] (COIT), G. N. Energía solar fotovoltaica.
- [18] ITER. Energía solar fotovoltaica.
- [19] REYNAUD, J.-F. Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques.
- [20] VLASMAN, I. Developing a charge controller for a new solar panel system.
- [21] WEB XATAKA. 2015 es el año en que podemos plantearnos el autoabastecimiento eléctrico en serio: estos son los números.

Índice de figuras

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Esquema detallado de la arquitectura del sistema | 4 |
| 2. | Esquema de conexión | 4 |
| 3. | Diseño preliminar | 5 |
| 4. | Estudio mecánico y térmico del diseño 3 | 5 |
| 5. | Diseño definitivo | 6 |
| 6. | Estructura soporte | 6 |
| 1.1. | Fuente: SPE, Global Market Outlook 2015, junto con las previsiones de la industria para 2015. | 13 |
| 1.2. | Célula de silicio monocristalino | 13 |
| 1.3. | Esquema del campo eléctrico creado en una célula fotovoltaica mediante la unión p-n entre dos capas de semiconductores dopados | 14 |
| 1.4. | Panel Fotovoltaico | 15 |
| 1.5. | Sistemas fotovoltaicos [8] | 17 |
| 3.1. | Fases de desarrollo de un producto | 21 |
| 3.2. | Componentes de una instalación solar fotovoltaica convencional | 23 |
| 3.3. | Sistema conectado a red (a) e instalación fotovoltaica autónoma (b) | 23 |
| 3.4. | Luz exterior solar de Intefly | 24 |
| 3.5. | Waka-Waka Power | 25 |
| 3.6. | Diseño del módulo. | 25 |
| 3.7. | Condiciones para la instalación de paneles en cubiertas planas | 28 |
| 3.8. | Significado de las siglas del grado de protección IP | 28 |
| 3.9. | Sistema de anclaje al tejado | 29 |
| 3.10. | Estructura de anclaje sobre superficies horizontales [10] | 29 |
| 3.11. | Esquema de la arquitectura 1 | 32 |
| 3.12. | Esquema de la arquitectura 2 | 33 |
| 3.13. | Esquema de la arquitectura 3 | 33 |
| 3.14. | Esquema de la arquitectura 4 | 33 |
| 3.15. | Esquema detallado de la arquitectura 1 | 34 |
| 3.16. | Figura a escala de los componentes del módulo | 34 |
| 3.17. | Esquema de conexión | 35 |
| 3.18. | Planos del panel solar JMK265P-60 | 36 |
| 3.19. | Comportamiento eléctrico y térmico | 37 |
| 3.20. | Microinversor | 37 |
| 3.21. | Batería prismática | 38 |
| 3.22. | Convertor DC-DC | 39 |
| 3.23. | Posición del módulo | 41 |
| 3.24. | Plano diseño preliminar del módulo | 41 |

| | |
|---|----|
| 3.25. Diseño preliminar del módulo | 42 |
| 3.26. Diseño preliminar del conjunto | 42 |
| 3.27. Conjunto preliminar | 43 |
| 3.28. Geometría en Comsol | 44 |
| 3.29. Estudio mecánico de la simulación inicial | 45 |
| 3.30. Estudio térmico de la simulación inicial | 46 |
| 3.31. Temperatura alcanzada por los componentes | 46 |
| 3.32. Geometría de la simulación del modelo modificado | 47 |
| 3.33. Estudio mecánico de la simulación del segundo modelo (factor de escala=70) | 48 |
| 3.34. Estudio térmico de la simulación del segundo diseño | 48 |
| 3.35. Temperatura alcanzada por los componentes en el segundo diseño | 49 |
| 3.36. Superficies de apoyo del panel sobre los raíles | 50 |
| 3.37. Estudio mecánico de la simulación del tercer diseño (factor de escala=10) | 50 |
| 3.38. Estudio térmico de la simulación del tercer diseño | 51 |
| 3.39. Temperatura alcanzada por los componentes en el tercer diseño | 51 |
| 3.40. Temperatura alcanzada por los componentes a máxima temperatura ambiente | 52 |
| 3.41. Temperatura alcanzada por los componentes a mínima temperatura ambiente | 52 |
| | |
| 4.1. Dimensiones básicas del diseño definitivo | 55 |
| 4.2. Diseño definitivo del módulo sin rejilla | 56 |
| 4.3. Detalle del apoyo de la rejilla sobre el módulo | 56 |
| 4.4. Vista frontal del módulo con la rejilla | 56 |
| 4.5. Detalle de las bisagras | 57 |
| 4.6. Tornillos de sujección de la rejilla al módulo | 57 |
| 4.7. Unión de las bisagras al módulo | 58 |
| 4.8. Tuerca hexagonal DIN 439 | 58 |
| 4.9. Vista frontal del módulo completo | 58 |
| 4.10. Dimensiones de la bisagra | 59 |
| 4.11. Diseño definitivo del módulo | 59 |
| 4.12. Estructura de aluminio para superficie plana, un panel solar de 60 células en vertical [11] | 60 |
| 4.13. Pinzas para módulos fotovoltaicos [11] | 60 |
| 4.14. Estructura soporte | 61 |
| 4.15. Apoyo del módulo sobre la estructura soporte | 61 |
| 4.16. Unión del modulo con la estructura soporte | 61 |
| 4.17. Tornillo hexagonal DIN933 M10x20 | 62 |
| 4.18. Colocación del conjunto sobre la estructura soporte | 62 |
| 4.19. Prensaestopa | 62 |
| 4.20. Posición de las prensaestopas | 63 |
| 4.21. DOMOSIL | 63 |
| | |
| 7.1. Estructura de Descomposición del Proyecto | 72 |
| 7.2. Calendario de distribución de tareas | 74 |
| 7.3. Diagrama de Gantt del proyecto | 74 |

Índice de cuadros

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Objetivos | 3 |
| 2. | Análisis de los distintos diseños preliminares analizados | 5 |
| 3. | Resultados obtenidos con el tercer diseño | 5 |
| 4. | Objetivos del proyecto | 7 |
| 3.1. | Características de "70W Integrated Solar LED Street Light" | 25 |
| 3.2. | Normativa vigente | 27 |
| 3.3. | Requisitos de diseño | 30 |
| 3.4. | Requisitos mecánicos | 30 |
| 3.5. | Estudio de posibles materiales | 31 |
| 3.6. | Características Mecánicas. | 36 |
| 3.7. | Especificaciones | 36 |
| 3.8. | Datos técnicos del Microinversor | 38 |
| 3.9. | Datos técnicos de la batería | 39 |
| 3.10. | Datos técnicos del convertor DC-DC | 40 |
| 3.11. | Propiedades del aluminio anodizado | 40 |
| 3.12. | Temperaturas de operación de los componentes | 43 |
| 3.13. | Resultados obtenidos con el primer diseño | 47 |
| 3.14. | Resultados obtenidos con el segundo diseño | 49 |
| 3.15. | Resultados obtenidos con el tercer diseño | 51 |
| 3.16. | Resultados con temperaturas extremas | 53 |
| 3.17. | Análisis de los distintos diseños preliminares analizados | 53 |
| 4.1. | Parámetros de los tornillos de unión de la rejilla al módulo | 57 |
| 4.2. | Parámetros de las tuercas de la rejilla | 58 |
| 4.3. | Parámetros de la prensaestopa | 63 |
| 4.4. | Lista de piezas | 64 |
| 5.1. | Resumen de logro de los objetivos | 67 |
| 7.1. | Presupuesto del proyecto | 75 |

Capítulo 8

ANEXOS

8.1. Anexo I: Presentación de la Tesis de Doctorado que se está desarrollando en TU Delft

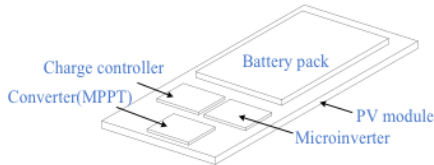
PV-BATTERY INTEGRATED MODULE

QR code



RESEARCH GOAL

Goal → Develop and design a single PV-Battery Integrated Module (PBIM) considering a suitable battery technology, storage scenarios, PV-Battery architectures and intelligent power management.



RESEARCH OBJECTIVES

- Find the scenarios that enable the PV-Battery Integrated Module as a technical solution for the solar energy.
- Define the battery size for different energy storage motivations.
- Identify the most feasible battery technology.
- Evaluate the effect of different heat management approaches.
- Implement an intelligent power management that increases the performance of the single PV-Battery Integrated Module.

RESEARCH METHODOLOGY

Storage motivations: energy source in emergency moments, increase self-consumption, reduce the electricity bill, and peak shaving.

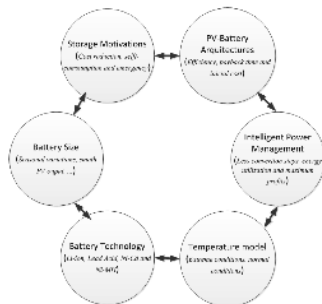
PV-Battery architectures: dc coupled, ac coupled, dc/ac coupled, and in line.

Intelligent power management: most suitable architecture, and best algorithm.

Storage size: space availability, heat generation and storage motivations.

Battery technology: light, high life time, and specific capacity.

Temperature conditions: influence of charge/discharge methods in heat generation, heat management and aging mechanism.

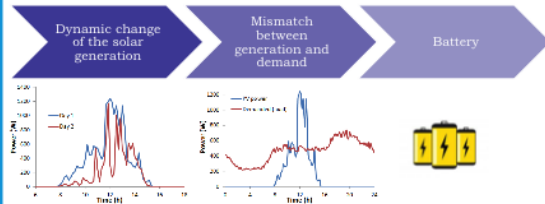


BENEFITS THE PHYSICAL INTEGRATION

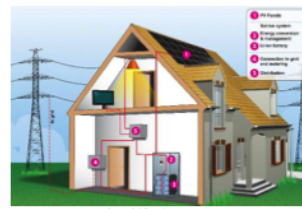
- Plug and play solution (reduction of complexity)
- Reduction of installations costs
- Flexible output device
- Space saving solution
- Modular approach
- Compatibility with existent electrical installations
- Portability
- More safe solution

RESEARCH PROBLEMS

- Changing nature of PV generation



- Normal installations: complex and expensive



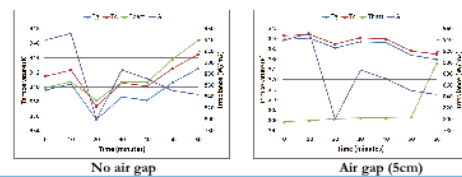
Disadvantages

- A lot of space used
- Low integration degree
- High installation cost

THERMAL MODEL

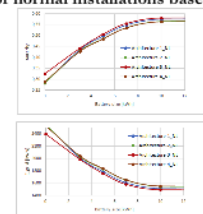
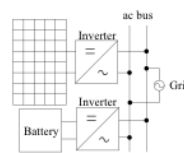
A simple 1D thermal model is proposed to estimate the temperature of the components under extreme conditions.

| | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|
| | T_{amb} | T_{sky} | T_{ref} |
| Glass (R_{ext}, T_g) | T_g | T_g | T_g |
| Cell (R_{int}, T_c) | T_c | T_c | T_c |
| Tedlar (R_{ext}, T_{td}) | T_{td} | T_{td} | T_{td} |
| Upper casing (R_{ext}, T_u) | T_u | T_u | T_u |
| Battery ($Q_{loss}, R_{int}, T_{bat}, A_{bat}$) | T_{bat} | T_{bat} | T_{bat} |
| Lower casing (R_{ext}, T_l) | T_l | T_l | T_l |



PV-BATTERY ARCHITECTURES

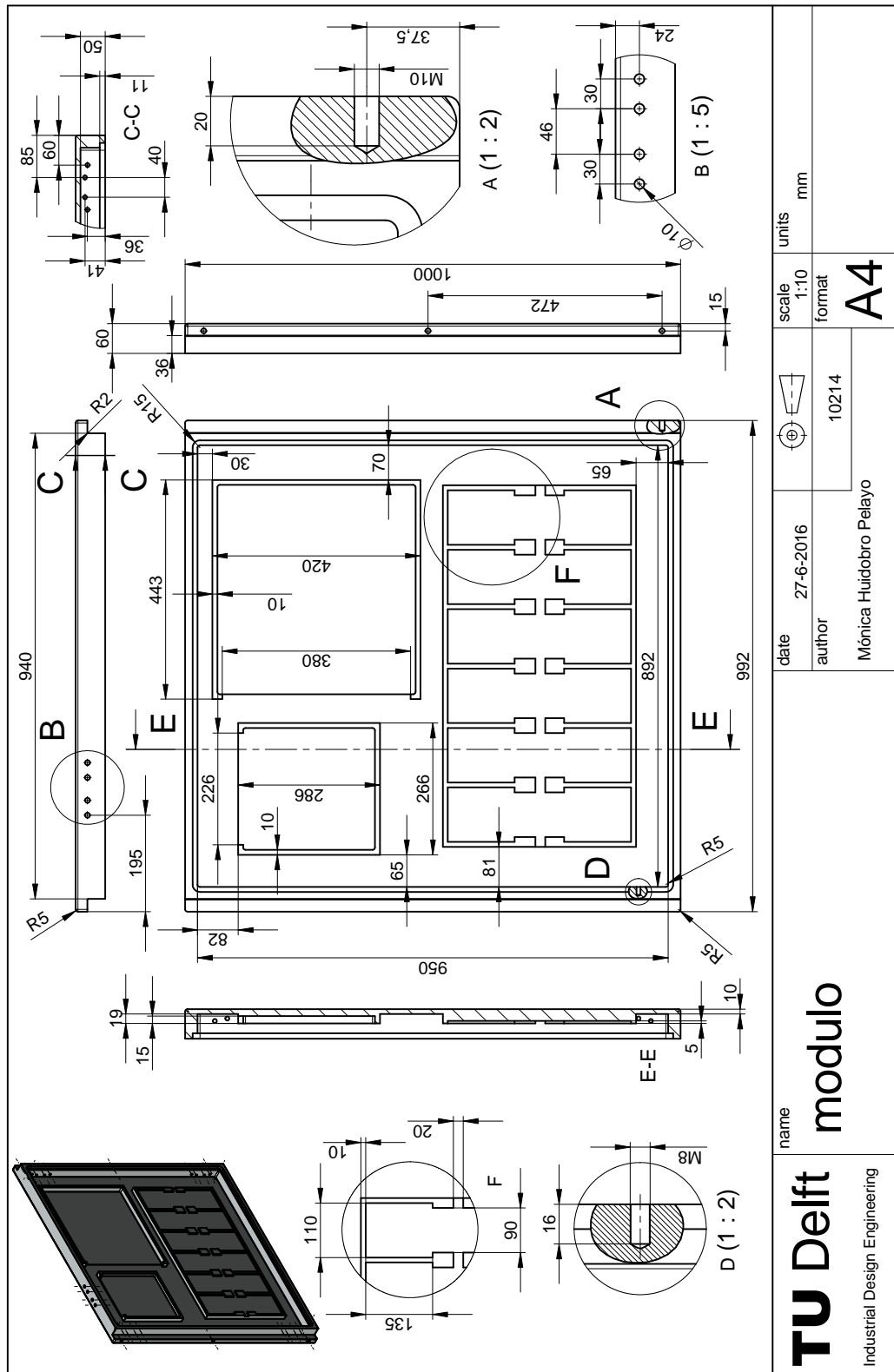
- The best PV-Battery architecture for normal installations based on performance and autarky.



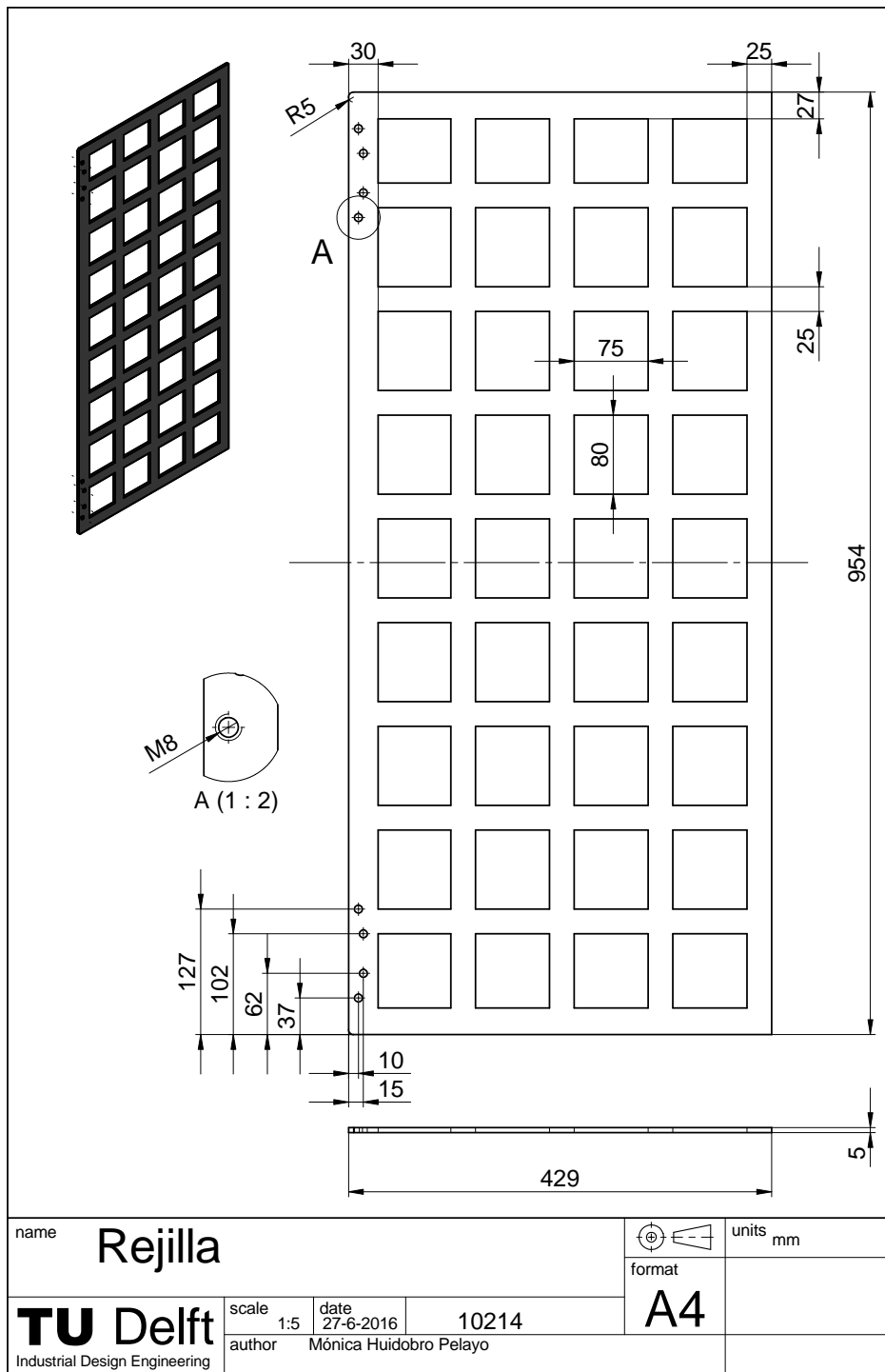
CONTACT

Victor Vega Garita, V.E.VegaGarita@tudelft.nl

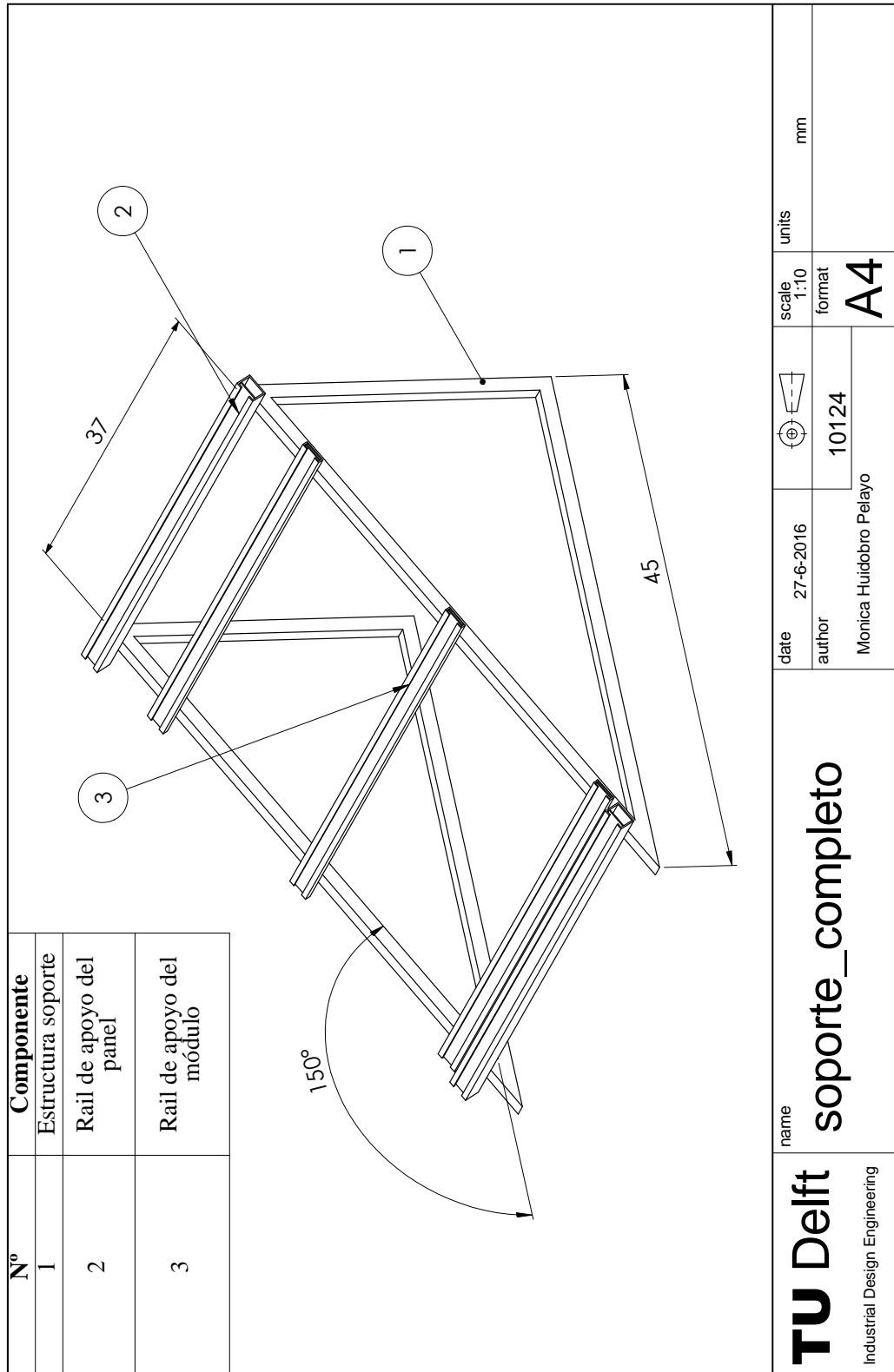
8.2. Anexo II: Plano del módulo



8.3. Anexo III: Plano de la rejilla




8.4. Anexo IV: Plano de la estructura soporte

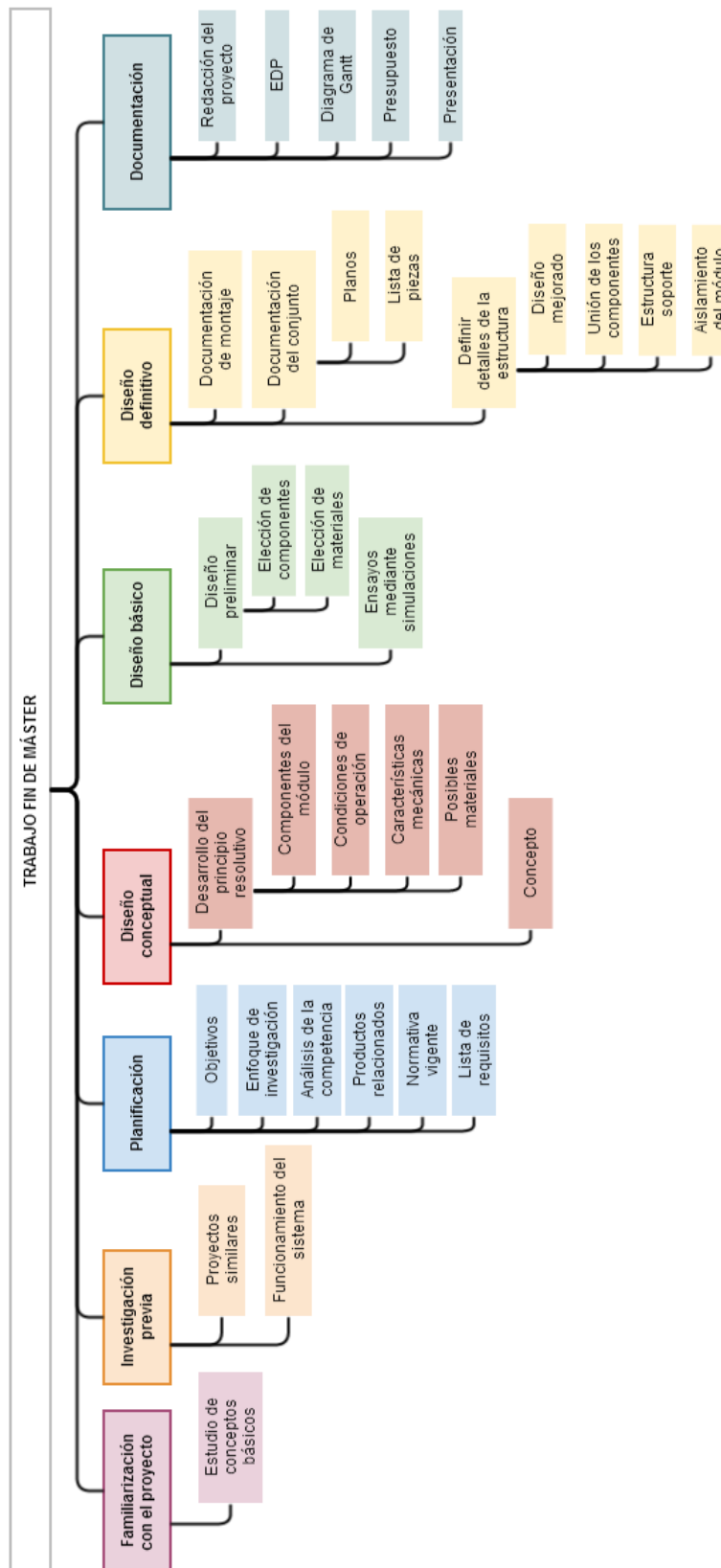


8.5. Anexo V: Componentes del conjunto

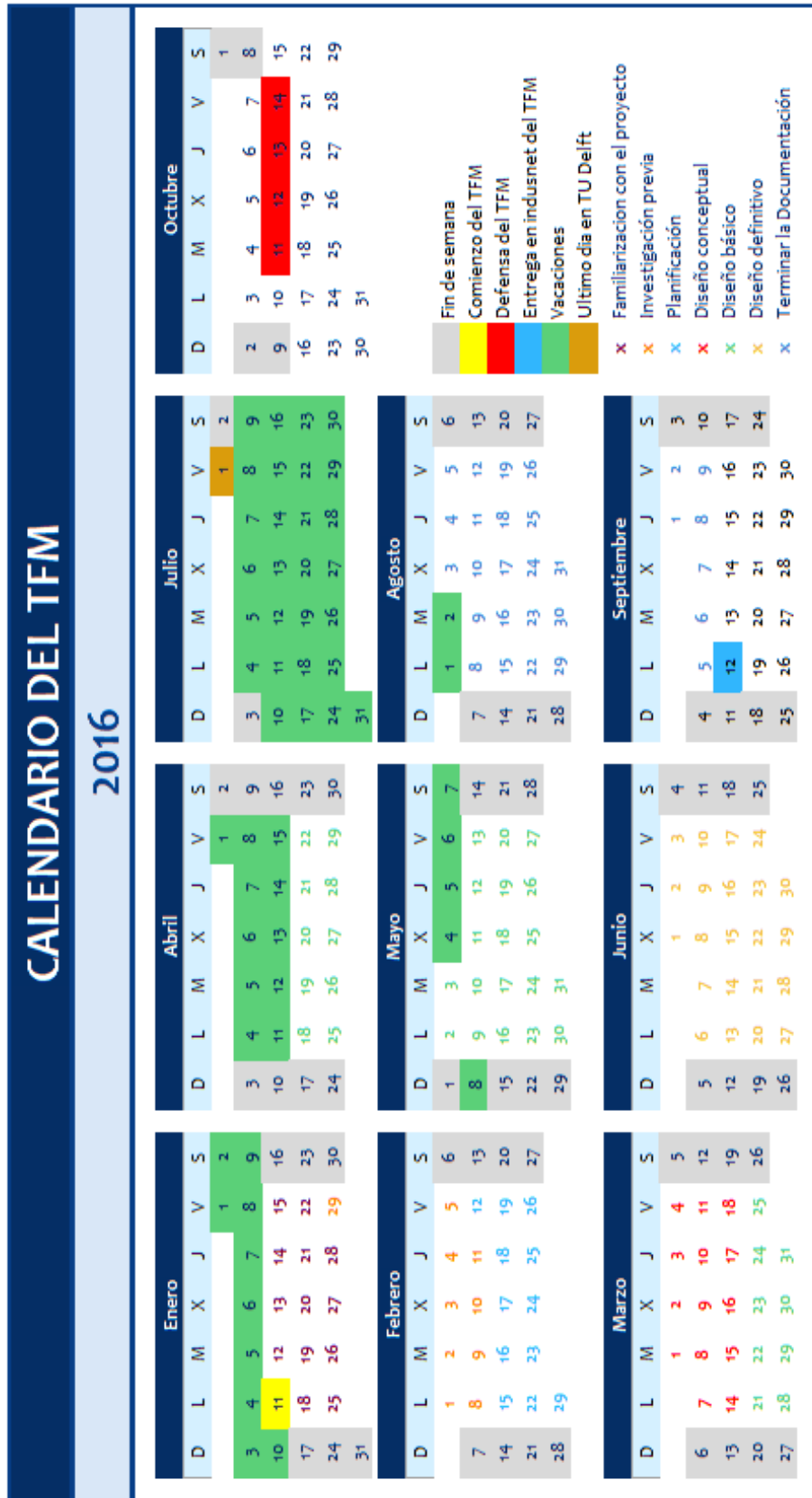
| Nº | Componente | Cant. |
|----|---------------------------|-------|
| 1 | Módulo | 1 |
| 2 | Convertor DC-DC | 1 |
| 3 | Microinversor | 1 |
| 4 | Panel solar | 1 |
| 5 | Batería | 12 |
| 6 | Bisagra (parte 1) | 4 |
| 7 | Bisagra (parte 2) | 4 |
| 8 | Bulon de la bisagra | 4 |
| 9 | Rejilla | 2 |
| 10 | Tornillo Allen M8x20 | 16 |
| 11 | Tornillo Allen M8x10 | 16 |
| 12 | Tuerca DIN439 M8x4 | 16 |
| 13 | Triángulo soporte | 2 |
| 14 | Rail (soporte del panel) | 2 |
| 15 | Rail (soporte del módulo) | 3 |
| 16 | Abrazadera del panel | 4 |
| 17 | Abrazadera unión módulo | 6 |
| 18 | Tornillo DIN933 M10x20 | 6 |
| 19 | Prensaestopa | 4 |
| 20 | Cables | 4 |

| | | |
|--|----------------------------------|-------------|
|  10214 | scale 1:10 | units mm |
| | format A4 | |
| date 27-6-2016 | author Mónica Huidobro Pelayo | |
| name conjunto | | |
| TU Delft Industrial Design Engineering | | |

8.6. Anexo VI: Estructura de Descomposición del Proyecto



8.7. Anexo VII: Calendario



8.8. Anexo VIII: Diagrama de Gantt

