



industriales
etsii

**Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Diseño de un sistema fotovoltaico integrado en vehículo: análisis del balance energético, ambiental y económico

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER UNIVERSITARIO EN ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Alberto del Puerto Melchor

Director: Antonio Urbina Yeregui



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

Cartagena, 23 de noviembre de 2020



Agradecimientos

Este trabajo quiero dedicarlo a Marina, por su gran apoyo, su paciencia inagotable y su cariño infinito. Si he vuelto a la universidad ha sido gracias a ella.

Gracias por estar siempre ahí y por hacerme ver que las metas siempre se pueden alcanzar.



Índice

1.	Introducción	8
1.1.	Motivación	8
1.2.	Estado del arte	8
2.	Objetivos	17
3.	Metodología	18
3.1.	Selección del vehículo de base.....	18
3.2.	Propuesta de diseño para el sistema fotovoltaico.....	19
3.3.	Comprobación de masas y dimensiones.....	21
3.4.	Balance energético.....	21
3.4.1.	Cálculo de la energía producida y autonomía.....	21
3.4.2.	Estimación del <i>Performance Ratio</i>	23
3.4.3.	Límites máximo y mínimo de irradiación recibida	25
3.4.4.	Consumo energético del vehículo.....	26
3.5.	Estudio ambiental	27
3.5.1.	Cálculo de las emisiones producidas por la versión diésel	28
3.5.2.	Cálculo de las emisiones producidas por la versión BEV alimentado de la red eléctrica nacional	29
3.5.3.	Cálculo de las emisiones producidas por la versión BEV con generador PV.....	30
3.6.	Análisis económico.....	32
4.	Resultados y discusión	36
4.1.	Balance energético y autonomía.....	36
4.2.	Estudio ambiental	42
4.3.	Análisis económico.....	45
5.	Conclusiones y trabajos futuros.....	47
6.	Bibliografía	49
	Anexo I. Información adicional del vehículo de base.....	52
	Anexo II. Estimación del área disponible en el techo del vehículo	54
	Anexo III. Tecnologías fotovoltaicas y generadores propuestos.....	56
	Anexo IV. Datos climáticos de la ciudad de Cartagena	59
	Anexo V. Hojas de datos técnicos	65

Índice de Figuras

Figura 1. Número de artículos publicados cada año que incluyen las palabras “roof”, “photovoltaic” y “vehicle” [4].....	9
Figura 2. Número de veces citados estos artículos al año [4].....	10
Figura 3. Shuanghuan Noble con módulos fotovoltaicos en su superficie [9].....	11
Figura 4. Comparación de la autonomía del vehículo con y sin módulos [9].	11
Figura 5. Panel fotovoltaico alojado en el techo y desplegado en el parabrisas [10].....	12
Figura 6. Aumento diario de la autonomía en función de los diferentes escenarios contemplados [10].	12
Figura 7. Superficie curva del techo del vehículo y su área proyectada [11].....	12
Figura 8. Factor de corrección anual por curvatura en función de la relación entre el área proyectada y la superficie curva del techo [11].....	13
Figura 9. Vehículos empleados durante los test de eficiencia [13].....	13
Figura 10. Prototipo de seguidor solar para vehículos [14].	14
Figura 11. Comparativa de tecnologías fotovoltaicas usadas en vehículos [16].....	14
Figura 12. Imagen del vehículo de base [31].....	18
Figura 13. Esquema del sistema fotovoltaico, del sistema eléctrico de la furgoneta y flujo de potencia. .	19
Figura 14. Evolución de la irradiancia y temperatura a lo largo del día medio de enero en Cartagena [37].	22
Figura 15. Eficiencia de la etapa DC/DC en modo convertidor elevador [38].....	24
Figura 16. Velocidad para cada instante de tiempo del ciclo WLTP [41].....	27
Figura 17. Energía generada y emisiones de CO ₂ equivalentes en el sistema peninsular durante el año 2019. Elaboración propia con los datos de REE [43].....	29
Figura 18. Evolución del factor de emisiones de CO ₂ equivalente asociado al mix energético nacional durante el año 2019 (sistema peninsular).	30
Figura 19. Origen de la energía eléctrica destinada a cubrir la demanda del vehículo para el límite superior e inferior de radiación solar recibida.....	31
Figura 20. Energía diaria almacenada en la batería durante el primer año.....	37
Figura 21. Energía anual producida y almacenada en batería durante 25 años de uso.	38
Figura 22. Autonomía diaria con uso exclusivo de energía fotovoltaica durante el primer año.	40
Figura 23. Porcentaje de distancia media diaria cubierta con energía solar durante el primer año.....	41
Figura 24. Emisiones de CO ₂ del vehículo de reparto en sus versiones diésel y eléctrico durante el año 2019.....	43
Figura 25. Emisiones de CO ₂ equivalente del vehículo BEV con y sin techo fotovoltaico, junto con las emisiones evitadas por el techo fotovoltaico durante el año 2019.....	44
Figura 26. Croquis acotado del vehículo de base [31].	53
Figura 27. Disposición del banco de baterías [32].	53
Figura 28. Digitalización del techo del vehículo. Captura 1.	54
Figura 29. Digitalización del techo del vehículo. Captura 2.	54
Figura 30. Dimensiones del techo. Cotas expresadas en milímetros.....	55
Figura 31. Digitalización del techo y proyección sobre un plano horizontal.	55
Figura 32. Disposición de las células Maxeon (mc-Si) sobre el techo de la furgoneta. 26x10 células.....	57
Figura 33. Disposición de las células MiaSolé (CIGS) sobre el techo de la furgoneta. 10x30 células.	57
Figura 34. Disposición de los módulos First Solar (CdTe) sobre el techo de la furgoneta. 5 módulos.	58



Índice de Tablas

Tabla 1. Acrónimos.....	6
Tabla 2. Variables.	7
Tabla 3. Peso y grosos de los generadores fotovoltaicos propuestos.	21
Tabla 4. Performance Ratio estimado para cada tecnología fotovoltaica.	25
Tabla 5. Autonomía de la furgoneta. Elaboración propia con la información de [31].....	26
Tabla 6. Índice de Precios de Consumo durante los últimos 5 años junto con su inflación. Elaboración propia partiendo de los datos del INE [45].	33
Tabla 7. Índice nacional de la subclase 04510-Electricidad de los últimos 5 años junto con su inflación. Elaboración propia con los datos del INE [45].	33
Tabla 8. Energía diaria almacenada en la batería durante el primer año.....	36
Tabla 9. Energía anual producida y almacenada en batería durante 25 años de uso.	38
Tabla 10. Autonomía diaria durante el primer año.....	39
Tabla 11. Porcentaje de distancia media diaria cubierta con energía solar durante el primer año.....	41
Tabla 12. Emisiones de CO ₂ calculadas para cada variante de la furgoneta estudiada durante el año 2019.	42
Tabla 13. Emisiones evitadas de CO ₂ por la inclusión del techo PV en la versión BEV del vehículo durante el año 2019.....	43
Tabla 14. Sobrecoste del vehículo asociado al sistema fotovoltaico, dependiendo del tipo de tecnología usada en las células.....	45
Tabla 15. Resultados del análisis económico realizado para el sistema fotovoltaico con generador de mc-Si.....	46
Tabla 16. Datos técnicos del vehículo. Elaboración propia con la información de [24] y [25].	52
Tabla 17. Comparativa de células y módulos según información suministrada por el fabricante [33]–[35], [46], [47].....	56
Tabla 18. Características técnicas de los generadores fotovoltaicos propuestos.	58



Acrónimos y variables

Acrónimos	
AC	<i>Alternating Current</i> ; Corriente Alterna
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i> ; Vehículo Eléctrico de Baterías
CdTe	Teluro de Cadmio
CIGS	Cobre, Indio, Galio y Selenio
DC	<i>Direct Current</i> ; Corriente Continua
FREVUE	<i>Validating Freight Electric Vehicles in Urban Europe</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i> ; Sistema de Posicionamiento Global
IEA	<i>International Energy Agency</i> ; Agencia Internacional de la energía.
INE	Instituto Nacional de Estadística
IPC	Índice de Precios de Consumo
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> ; Panel Internacional de Cambio Climático
JRC	<i>Joint Research Center</i> ; Centro Común de Investigación
mc-Si	<i>Monocrystalline Silicon</i> ; Silicio monocristalino
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracker</i> ; Seguidor del Punto de Máxima Potencia
NFAs	<i>Non-Fullerence Acceptors</i> ; Aceptores No Fullerenos
PV	<i>Photovoltaic</i> ; Fotovoltaico/a
PVGIS	<i>Photovoltaic Geographical Information System</i>
REE	Red Eléctrica de España
SEV	<i>Solar Electric Vehicle</i> ; Vehículo Solar Eléctrico
tCO₂ eq	Toneladas de CO ₂ equivalente
UE	Unión Europea
UPD	<i>Unit Power Distribution</i> ; Unidad de Distribución de Potencia
WLTP	<i>World Harmonized Light-duty Vehicle Test Procedure</i>

Tabla 1. Acrónimos.



Variables		
A_p	[m ²]	Área proyectada sobre plano horizontal de la superficie curva del techo del vehículo
A_{sc}	[m ²]	Área de la superficie curva del techo del vehículo
C_B	[Wh]	Capacidad de la batería
d_d	[km]	Distancia media diaria recorrida por el vehículo
d_{mes}	[km]	Distancia media mensual recorrida por el vehículo
$ECO_{2,km}$	[g/km]	Emisiones de CO ₂ por kilómetro recorrido
$ECO_{2,mes}$	[kg CO ₂ eq]	Emisiones de CO ₂ durante un mes completo
$EFCO_{2,mes}$	[tCO ₂ eq/MWh]	Factor de emisiones de CO ₂ equivalente en cada mes
$E_{red,mes}$	[Wh]	Energía eléctrica demandada a la red cada mes
$E_{útil}$	[Wh]	Energía útil
FC_t	[€]	<i>Net cash flow</i> ; Flujo de caja al finalizar el año t
G_h	[W/m ²]	Irradiancia global en plano horizontal
G_{STC}	[W/m ²]	Irradiancia en condiciones de test estándar: 1kW/m ² , AM1.5G
i	[%]	<i>Discount rate</i> ; Tasa de actualización (inflación asociada al IPC)
I_0	[€]	Importe de la inversión inicial
I_{mpp}	[A]	Corriente en el punto de máxima potencia de la célula / módulo
$I_{mpp,G}$	[A]	Corriente en el punto de máxima potencia del generador
I_{sc}	[A]	Corriente de cortocircuito de la célula / módulo
$I_{sc,G}$	[A]	Corriente de cortocircuito del generador
L_d	[Wh/día]	Consumo energético medio diario del vehículo
L_{km}	[Wh/km]	Consumo de energía por kilómetro recorrido
L_{mes}	[Wh/mes]	Consumo energético medio mensual del vehículo
n_{mes}	[días]	Número de días del mes
NOCT	[°C]	<i>Normal Operating Cell Temperature</i> ; Temperatura normal de operación de la célula
P	[W]	Potencia instantánea
PR	[%]	<i>Performance ratio</i>
PR_{curv}	[%]	Performance ratio producido por la curvatura del techo
P_{STC}	[W]	Potencia en condiciones de test estándar (o potencia "pico")
r	[km]	<i>Range</i> ; autonomía
t	[años]	Año para el que se calcula el valor actual neto
T_a	[°C]	Temperatura ambiente
T_c	[°C]	Temperatura de la célula
VAN	[€]	<i>Net Present Value (NPV)</i> ; Valor Actual Neto
V_{mpp}	[V]	Tensión en el punto de máxima potencia de la célula / módulo
V_{mpp,G}	[V]	Tensión en el punto de máxima potencia del generador
V_{oc}	[V]	Tensión de circuito abierto de la célula / módulo
V_{oc,G}	[V]	Tensión de circuito abierto del generador
γ	[%/°C]	Coefficiente de pérdidas en potencia por temperatura

Tabla 2. Variables.



1. Introducción

1.1. Motivación

Según el Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) las emisiones de gases de efecto invernadero derivados de la actividad humana son la principal causa del calentamiento global y el cambio climático [1]. La principal motivación de este proyecto es la búsqueda de soluciones que ayuden a reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Aunque los vehículos eléctricos de baterías (BEV, por sus siglas en inglés) puedan contener unas emisiones de CO₂ “embebidas” (las emitidas durante su fabricación o las producidas para generar la electricidad que consume), lo cierto es que estos vehículos no emiten gases de efecto invernadero durante su actividad. Sin embargo, su baja autonomía y sus altos tiempos de recarga no les permiten competir en prestaciones con los vehículos propulsados por motores de combustión.

La integración de tecnologías fotovoltaicas en la automoción puede ayudar a la penetración en el mercado de los vehículos eléctricos en varios aspectos. Por un lado, pueden aumentar la autonomía, alargar el tiempo entre recargas de la batería y reducir el tiempo de recarga. Por otro lado, la energía producida por el propio vehículo supondrá una reducción de energía demandada a la red y, por tanto, un ahorro económico para el usuario.

Otro de los problemas del aumento de vehículos eléctricos en el parque automovilístico es que la red eléctrica aún no está preparada para asumir una demanda energética tan grande, pero al funcionar cada vehículo como un generador de energía aislado, la demanda a la red sería inferior.

Debido a la baja eficiencia de la energía fotovoltaica y a que la superficie útil para instalar las células es pequeña, es previsible que las emisiones de CO₂ evitadas sean bajas. Por otro lado, en España el sector del transporte fue el que más emisiones de gases de efecto invernadero produjo durante 2018, suponiendo un 27 % del total [2]. El ahorro de emisiones de CO₂ será bajo, pero se estaría actuando sobre el sector que más contribuye al cambio climático. La suma de estas pequeñas emisiones puede suponer un valor significativo en el total de emisiones evitadas en toda España.

Todas estas razones justifican la alta motivación por realizar este diseño.

1.2. Estado del arte

El calentamiento global, propiciado principalmente por los gases de efecto invernadero, es una preocupación a nivel mundial. Sectores como el transporte, la industria o la energía tienen una elevada participación en la emisión de este tipo de gases [1]. La humanidad se enfrenta al reto de frenar el avance del cambio climático mediante acciones como, por ejemplo, la descarbonización del sector energético mediante el uso de energías renovables o la penetración del vehículo eléctrico en el sector del transporte.

Los vehículos eléctricos son silenciosos y no emiten gases de efecto invernadero durante su operación. Pero presentan una serie de características que limitan la flexibilidad del producto: baja autonomía,



tiempos de recarga altos, pocos puntos de recarga y una red eléctrica que no está preparada para asumir una demanda tan alta de potencia.

Los avances tecnológicos están generando reducciones de costes de producción. En 2018 el número de vehículos eléctricos en el mundo era de 5,1 millones, 2 millones más que el año anterior. Las expectativas son que este dato se incremente a lo largo del tiempo. Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA), la previsión para el año 2030 varía entre los 130 millones y los 250 millones de vehículos, en función del escenario contemplado [3].

La energía fotovoltaica es una energía silenciosa, limpia, abundante, presente en todos los continentes en mayor o menor medida, modulable y, lo más importante, no emite gases de efecto invernadero durante su actividad. Después de la inversión inicial, el coste de la energía producida es prácticamente nulo. Además, por sus características, puede ayudar a la integración del vehículo eléctrico aumentando su autonomía, reduciendo los tiempos de recarga, actuando como su propio generador de energía, manteniendo en un buen estado de carga las baterías durante largos tiempos de inactividad, etc.

Existen dos grandes líneas de trabajo para integrar la energía fotovoltaica en el sector de la automoción: electrolineras alimentadas por energía fotovoltaica de instalaciones cercanas y mediante la introducción de tecnologías fotovoltaicas integradas en las propias superficies exteriores del vehículo. En este apartado se ha realizado una recopilación de los últimos avances en la integración de células fotovoltaicas en vehículos, incluyendo publicaciones científicas, patentes y reglamentos europeos.

Para conocer el interés actual sobre esta línea de investigación en el mundo científico, se ha realizado una búsqueda en todas las bases de datos de Web of Science el día 8 de abril de 2020 con las palabras “roof”, “photovoltaic” y “vehicle” [4]. En la Figura 1 se observa un gráfico con el número de publicaciones científicas que contienen estas palabras. Se aprecia una tendencia ascendente hasta el año 2009, seguida de una caída brusca de publicaciones y, posteriormente, una nueva tendencia ascendente hasta hoy. Por otro lado, en la Figura 2 se ha representado un gráfico que incluye el número de veces que el conjunto de estas publicaciones han sido citadas. También se observa una tendencia ascendente. Hay que tener en cuenta que el valor que aparece en el año 2020 no es un dato representativo, ya que las gráficas se han generado con los datos recogidos hasta el 8 de abril del mismo año.

Total de publicaciones

174 Analizar

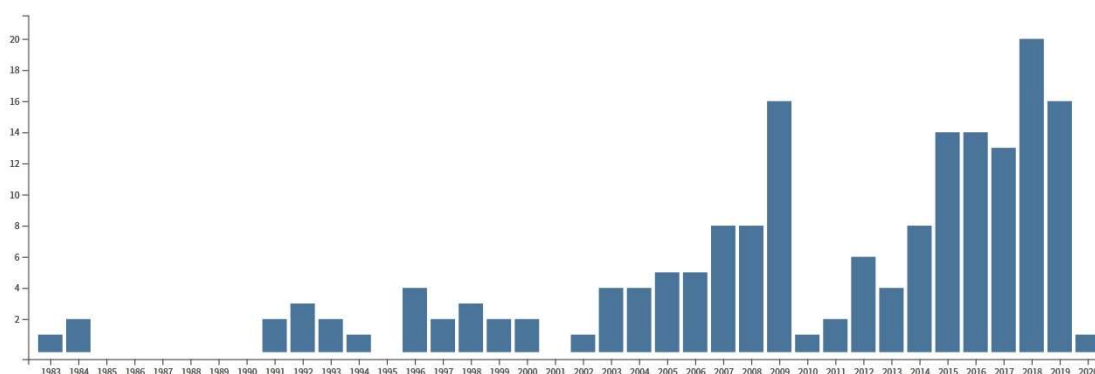


Figura 1. Número de artículos publicados cada año que incluyen las palabras “roof”, “photovoltaic” y “vehicle” [4].

Número de veces citado al año

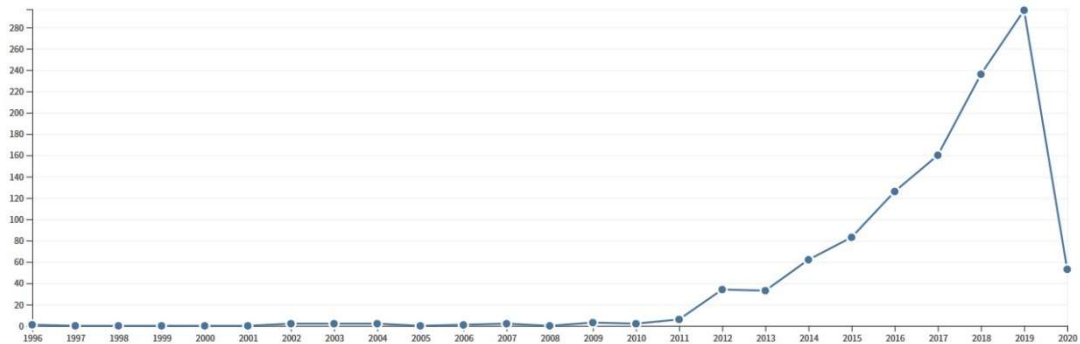


Figura 2. Número de veces citados estos artículos al año [4].

Una de las principales líneas de investigación persigue determinar las emisiones de CO₂ evitadas mediante el uso de estas tecnologías en el sector de la automoción. Łukasik *et al* han descrito un método para el cálculo de la reducción de emisiones de CO₂ de los turismos por el uso de techos solares fotovoltaicos que alimentan la batería auxiliar de 12 V [5]. Este es el método que se incluye en el Reglamento de Ejecución (UE) 725/2011 de la Comisión Europea para determinar la aprobación y certificación de tecnologías para reducir las emisiones de CO₂ en turismos (eco-innovaciones) [6]. Para poder asignar a un dispositivo el grado de eco-innovación es necesario demostrar que dicha tecnología es capaz de ahorrar, por lo menos, 1 g de CO₂/km [7].

Lodi *et al* han realizado el cálculo de la emisiones de CO₂ que se evitarían si todos los vehículos turismos europeos fueran equipados con techos solares fotovoltaicos [8]. El estudio incluye varios factores como, por ejemplo, patrones de conducción obtenidos por sistemas GPS, estudio de efectos de sombreado por obstáculos físicos, vehículos aparcados en estacionamientos interiores, etc. El resultado del estudio concluye que el techo fotovoltaico es capaz de captar el 58 % de la radiación solar disponible en condiciones reales. Asumiendo una capacidad de almacenamiento del 20 % de la batería de 12 V dedicada a la energía obtenida de los módulos fotovoltaicos, se estima que la reducción total de CO₂ se encontraría entre el 1 % y el 3 %. Hay que tener en cuenta que este estudio sólo incluye a los vehículos turismos con motor de combustión de Europa.

Otra de las líneas de investigación actuales busca aumentar la autonomía del vehículo eléctrico. Su y colaboradores han realizado un estudio de un vehículo eléctrico (Shuanghuan Noble) que incluye una modificación para convertirlo en un vehículo solar eléctrico (SEV) [9]. La tecnología empleada ha sido células *thin film* flexibles, colocadas sobre su techo y sobre el capó delantero. En la Figura 3 podemos ver una imagen del vehículo. Se ha demostrado que, en condiciones de día soleado, la autonomía del vehículo se puede incrementar hasta 35 km, proporcionando los módulos una energía de 2,5 kWh. En la Figura 4 se observan los resultados obtenidos de la autonomía alcanzada durante los ensayos, haciendo uso o no de los módulos fotovoltaicos.



Figura 3. Shuanghuan Noble con módulos fotovoltaicos en su superficie [9].

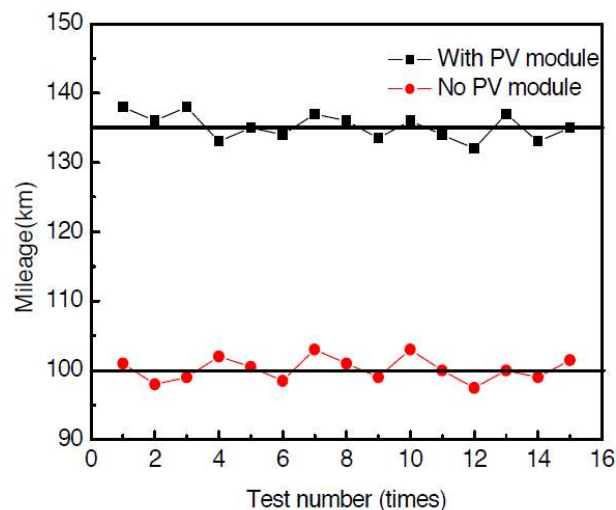


Figura 4. Comparación de la autonomía del vehículo con y sin módulos [9].

De Pinto y sus colaboradores han elaborado un estudio teórico del aumento de la autonomía en vehículos con paneles fotovoltaicos [10]. El diseño consiste en cuatro paneles fotovoltaicos de silicio cristalino, 3 de ellos ubicados sobre el techo del vehículo y un cuarto panel que se despliega y retrae desde la parte inferior del techo hasta el parabrisas del vehículo. Este cuarto panel solo se desplegará cuando se encuentre en condiciones de estacionamiento. Cuando el conductor esté dentro del habitáculo, el dispositivo retraerá el panel del parabrisas hasta el techo para permitir la conducción, según se aprecia en la Figura 5. El estudio incluye varios escenarios (A, B, C y D) para diferentes capitales europeas como Berlín, Budapest, Londres, Estocolmo y Turín. El escenario A es el más favorable, donde los cuatro paneles del diseño se encuentran activos y no hay ningún consumo de sistemas auxiliares del vehículo; mientras que el escenario D es el más desfavorable, con solo tres paneles activos (los del techo), un consumo de los sistemas auxiliares de 1060 W y un consumo debido al movimiento del vehículo de 39,7 Wh/km. Los resultados se muestran en la gráfica de la Figura 6. El estudio finaliza indicando la estimación del coste final del dispositivo para el comprador, que sería aproximadamente de 1500 €.

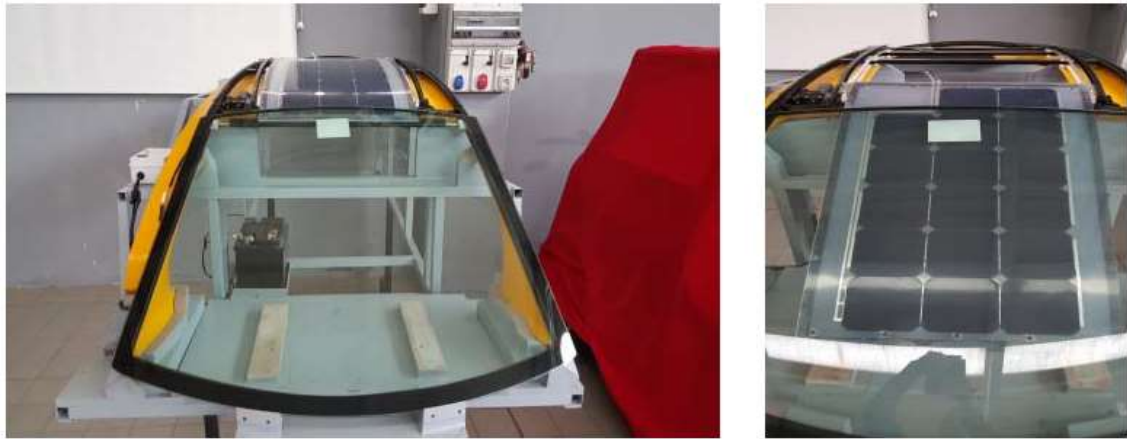


Figura 5. Panel fotovoltaico alojado en el techo y desplegado en el parabrisas [10].

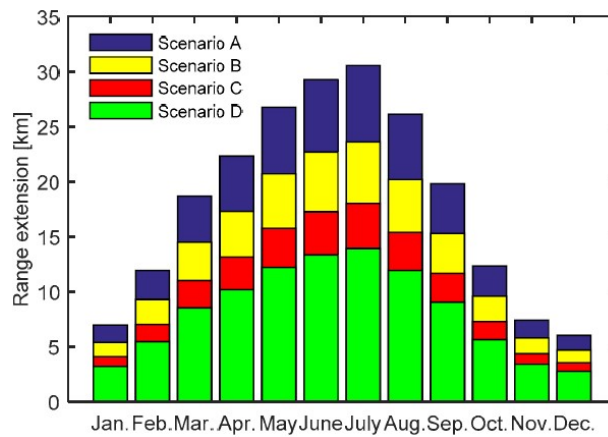


Figura 6. Aumento diario de la autonomía en función de los diferentes escenarios contemplados [10].

Muchos de los estudios pretenden determinar la eficiencia y las pérdidas de energía del sistema. Ota *et al* han estudiado el efecto que produce la curvatura del techo del vehículo en los paneles fotovoltaicos [11]. Según el estudio, existe una relación entre el área proyectada del techo y la superficie curva del techo entre 0,85 y 0,95 en la mayoría de los vehículos turismos del mercado. Para tener una mejor comprensión de esta relación entre áreas podemos ver la Figura 7. Según se observa en la gráfica de la Figura 8, el factor de corrección anual por curvatura tomará valores entre 0,7 y 0,9 en función de la relación entre áreas anteriormente definida.

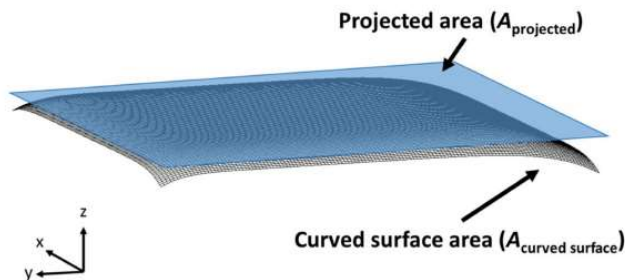


Figura 7. Superficie curva del techo del vehículo y su área proyectada [11].

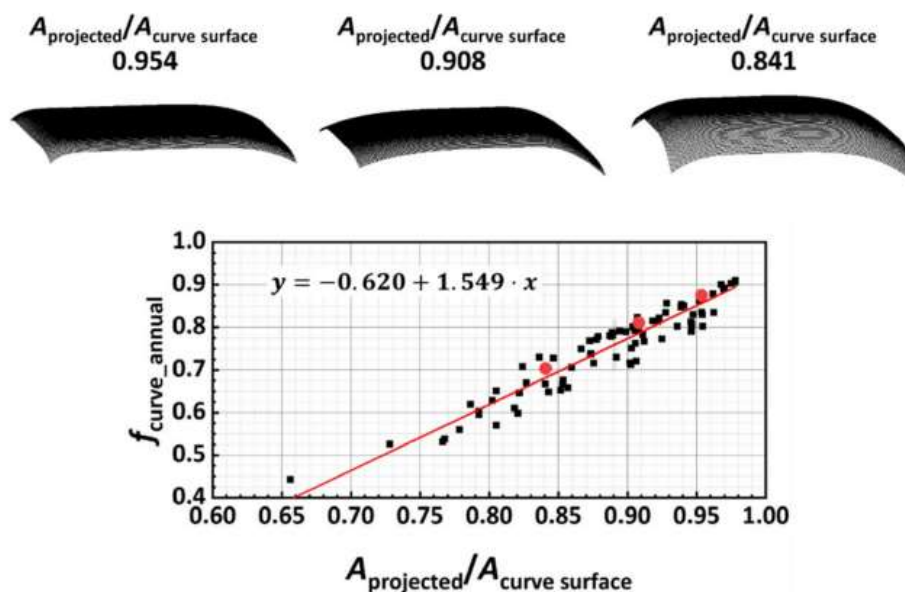


Figura 8. Factor de corrección anual por curvatura en función de la relación entre el área proyectada y la superficie curva del techo [11].

Siguiendo la misma línea de investigación, la Universidad Politécnica de Madrid ha presentado recientemente en el congreso EU PVSEC 2020 una aplicación informática capaz de estimar el aprovechamiento del recurso solar sobre la superficie del techo del vehículo, en función de la curvatura del mismo [12].

Para determinar la eficiencia completa del sistema, se realizaron pruebas durante un año (desde junio de 2010 hasta mayo de 2011) en la ciudad de Adiyaman (Turquía) a dos vehículos diferentes: un turismo y un microbús. El estudio pretendía obtener la eficiencia real de los vehículos, desde la irradiancia recibida por los paneles fotovoltaicos hasta la potencia entregada a las ruedas del vehículo. Las pruebas demostraron que la eficiencia total del sistema completo fue del 9 % [13]. En la Figura 9 encontramos fotografías de los dos vehículos empleados para las pruebas de eficiencia.



Figura 9. Vehículos empleados durante los test de eficiencia [13].

Cuando pensamos en techos solares fotovoltaicos para vehículos solemos pensar en instalaciones fijas, sin capacidad de orientación. Pisanti ha propuesto un seguidor solar para vehículos, con grados de libertad en ambos ejes [14]. La eficiencia de este dispositivo es variable, en función de la latitud donde se realice la medición. Para latitudes bajas se ha estimado una ganancia de energía del 30 %, mientras que para

latitudes altas este valor aumenta hasta el 47 %. En la Figura 10 encontramos una imagen del diseño propuesto.

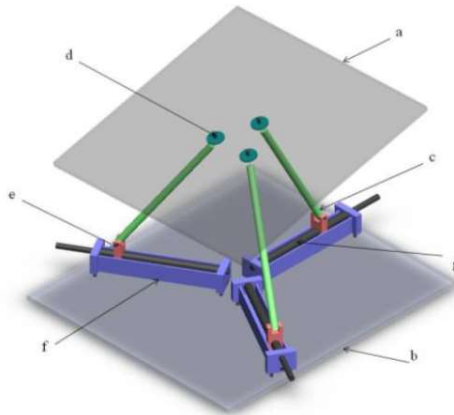


Figura 10. Prototipo de seguidor solar para vehículos [14].

Otras investigaciones tratan de averiguar qué tecnología fotovoltaica se ajusta mejor al sector de la automoción. Podemos encontrar un estudio para la integración de paneles solares en vehículos híbridos y eléctricos en [15]. Tras comparar diferentes tecnologías fotovoltaicas (silicio monocristalino, silicio policristalino y thin-film) se recomienda el uso de células de silicio monocristalino en automoción, siendo la tecnología más rentable. Por otro lado, su mayor desventaja es su alto peso por unidad de superficie. El estudio estima que el uso de paneles solares en vehículos híbridos puede ahorrar aproximadamente 100 l de combustible al año, recuperándose la inversión inicial en poco más de 4 años.

Parida y Mishra han realizado una comparativa de tres tecnologías fotovoltaicas para ser integradas en vehículos solares: silicio monocristalino, silicio policristalino y thin-film (a-Si) [16]. La comparación se ha realizado suponiendo 3 paneles de iguales dimensiones (1,96 m²), que ocuparían el 90 % de la superficie del vehículo (5,88 m²). Se estiman 6 horas solares pico y unas pérdidas del 85 %. Los costes están expresados en Rupias. En la Figura 11 se muestra la comparativa:

Types of Solar Cell	Monocrystalline Cell	Polycrystalline Cell	Thin-film (a-Si) Cell
Efficiency (%)	18	16	10
Watt-peak (Wp)	345	290	200
Watt/m ²	176.02	147.95	102.04
Total Energy Generated (KWh/day)	5.28	4.44	3.06
Cost (Rs. /Wp)	60	45	32

Figura 11. Comparativa de tecnologías fotovoltaicas usadas en vehículos [16].



No todas las publicaciones basan su estudio en producir energía destinada a la tracción del vehículo o a cargar la batería de 12V que alimenta los sistemas auxiliares. *Qi et al* describen un sistema completo de refrigeración para la cabina del vehículo durante su estacionamiento [17]. En este diseño, la potencia es entregada por un módulo fotovoltaico desplegable en la parte superior del vehículo. El dispositivo es capaz de reducir la temperatura del habitáculo hasta en 30 °C.

Muchos de los esfuerzos por mejorar las prestaciones de los vehículos fotovoltaicos toman como línea de investigación mejorar la electrónica de potencia del sistema. Podemos encontrar un cargador de baterías que realiza el seguimiento de máxima potencia de los paneles utilizando menos sensores, abaratando el diseño en un 5-10 % y, además, reduciendo el tiempo de carga entre un 15 y un 7,6 % [18]. Un circuito L3C resonante de cuarto orden es propuesto como cargador de baterías de vehículos solares, variando su respuesta en función del estado de carga de las baterías, mientras que mantiene a los módulos funcionando en su punto de máxima potencia [19]. Otras soluciones incluyen un sistema de control flexible con seis modos de operación para un vehículo solar con motor de reluctancia autoconmutado (SRM) [20], o la realización de mejoras en la etapa DC/DC del sistema de electrónica de potencia, aumentando el voltaje y mejorando su eficiencia [21].

Además de integración de células fotovoltaicas en turismos tradicionales también encontramos propuestas de diseño para integrar esta tecnología en vehículos menos usuales, como por ejemplo, una patente de un techo solar para vehículos de golf [22]; un sistema fotovoltaico para los tradicionales tuk-tuk de la India, compuesto por un techo solar de 500 W, una batería de 23 Ah y un motor de 0,75 kW [23]; un novedoso diseño de un vehículo híbrido, basado en tracción eléctrica y humana (similar a los pedales de una bicicleta)[24] y un sistema fotovoltaico para un vehículo de 4 ruedas para un solo pasajero, orientado para países en vías de desarrollo, cuyo coste de fabricación fue 950 dólares [25]. En aeronáutica también se pueden encontrar propuestas, como la planteada por Reddy y Poondla, quienes diseñan y fabrican un micro vehículo aéreo no tripulado con células fotovoltaicas en sus alas [26].

Los vehículos a motor con al menos cuatro ruedas pueden ser clasificados según su categoría, conforme a lo indicado en el Anexo II de la Directiva Marco 2007/46 del Parlamento Europeo y del Consejo [27]. La categoría M está destinada a vehículos diseñados y fabricados para el transporte de pasajeros, mientras que la categoría N engloba a los vehículos para el transporte de mercancías.

La categoría N1 solo contempla a los vehículos para el transporte de mercancías con una masa máxima técnica admisible igual o inferior a 3.500 kg (conocidos también como vehículos comerciales ligeros). Esta categoría suele ser la más presente en el parque de vehículos dentro de los vehículos a motor destinados al transporte de mercancías. Por ejemplo, en Madrid los vehículos comerciales ligeros con masa máxima igual o inferior a 3.500 kg representan el 82 % del parque de vehículos comerciales [28].

Aunque la mayoría de los estudios encontrados para la elaboración de este apartado estaban enfocados al vehículo turismo para el transporte de pasajeros, se empieza a observar el interés por la integración del vehículo eléctrico dedicado al transporte de mercancías. El Proyecto FREVUE (Validating Freight Electric Vehicles in Urban Europe), financiado por la Unión Europea, pretende probar la viabilidad de vehículos eléctricos destinados a la distribución de mercancías en grandes ciudades europeas [29].

Entre otras acciones, en el Proyecto FREVUE se ha realizado una monitorización GPS de vehículos eléctricos reales de carga (operados por grandes empresas de distribución, como UPS, SEUR, TNT, Heineken, Calidad Pascual, etc.), probados en varias ciudades europeas (Madrid, Londres, Lisboa, Ámsterdam y Milán entre ellas), desde 2013 hasta 2017. Se elaboraron estadísticas de uso con esta información. Para vehículos de categoría N1 la distancia media recorrida en un día es de 77,4 km, con una velocidad media de 17,2 km/h y un tiempo de uso de 5,8 horas [30].



Tras la realización de este estudio bibliográfico, se ha observado que algunas líneas de investigación podrían desarrollarse en mayor profundidad, e incluso plantear nuevos enfoques. Ejemplo de ello es que la mayoría de los trabajos consultados abordan el diseño del sistema fotovoltaico orientado a vehículos turismos. Sería interesante la realización de estudios dedicados a los vehículos de transporte de mercancías, más pesados, contaminantes y, que por lo general, presentan muchas más horas de uso diarias que los vehículos de pasajeros. También sería muy útil profundizar en estudios de viabilidad económica y análisis de ciclo de vida.

El presente documento se estructura como se describe en este párrafo. En la siguiente sección se presentan los objetivos del trabajo. La sección de metodología, estructurada en 6 partes, describe el proceso seguido durante la elaboración del estudio; en concreto, se presenta al vehículo de base, se propone el diseño fotovoltaico y se describe cada análisis paso a paso. Seguidamente, se dedicó una sección a los resultados y su discusión. El estudio finaliza con una sección de conclusiones y trabajos futuros para continuar esta línea de investigación. Se adjuntan varios anexos con información de interés, procedimientos adicionales y datos que complementan las distintas secciones del estudio.



2. Objetivos

El objetivo principal que se persigue en este proyecto es **enumerar y cuantificar las ventajas y desventajas de incorporar la energía solar en el sector de la automoción**. En concreto, integrar un diseño fotovoltaico en el techo de un vehículo eléctrico destinado a operaciones logísticas de transporte de mercancía.

Dentro de este objetivo global y ambicioso, encontraríamos una serie de subobjetivos secundarios. Alcanzar estos subobjetivos secundarios es fundamental para completar este estudio. Son los siguientes:

- **Comparar diferentes tecnologías fotovoltaicas** y, en función de sus características (precio, eficiencia, degradación, peso por unidad de superficie, grosor, etc.) **seleccionar la más adecuada para el sector de la automoción**, sin comprometer la dinámica del vehículo. Es necesario valorar diferentes características y no quedarnos con una sola. A priori, tecnologías como las de primera generación pueden darnos buenas eficiencias a bajo precio, pero el peso será determinante a la hora de seleccionar una u otra tecnología.
- **Cálculo del aumento de la autonomía del vehículo** (expresado en kilómetros) durante un año completo, dependiendo de las diferentes condiciones meteorológicas propias durante cada mes (irradiancia y temperatura). Uno de los grandes problemas de los vehículos eléctricos es su baja autonomía. Si podemos aumentar el tiempo que transcurre entre una recarga y otra podremos facilitar la penetración del vehículo eléctrico en el mercado.
- **Estimación de la demanda diaria cubierta con energía fotovoltaica**. Es importante conocer la cantidad de energía demandada por un vehículo de estas características y poder compararla con la energía producida por el propio vehículo. Este dato, junto a la autonomía diaria del vehículo, dará una visión objetiva a posibles clientes que pretendan incorporar vehículos eléctricos a sus flotas de vehículos.
- **Calcular las emisiones de CO₂ evitadas por el dispositivo fotovoltaico**. Los vehículos eléctricos no emiten gases de efecto invernadero durante su operación. Sin embargo, el origen de la energía eléctrica de la red de España no es 100 % renovable. Si se hace uso de ella para recargar las baterías, entonces el propio vehículo eléctrico llevará asociado una cantidad de CO₂ emitido a la atmósfera durante su servicio. La energía proporcionada por el sistema fotovoltaico del propio vehículo sí será de origen renovable y, por tanto, ayudará a evitar cierta cantidad de CO₂ emitido a la atmósfera.
- **Determinar el sobrecoste del vehículo** que supondría incluir el diseño fotovoltaico. Si el precio de este dispositivo es muy elevado y su coste va a repercutir en el comprador podremos encontrar una barrera de entrada difícil de superar para integrar esta tecnología en el mercado del automóvil.
- **Estimar el ahorro económico** que supondría hacer uso del dispositivo en cuanto a consumo de electricidad, teniendo en cuenta el aumento del precio de la electricidad y la degradación de las células solares. Si parte de la energía puede ser proporcionada por el propio vehículo, descenderá la necesidad de energía que demandemos de la red eléctrica.

3. Metodología

3.1. Selección del vehículo de base

El vehículo de base elegido para la realización de los estudios que se recogen en este trabajo es la furgoneta **Mercedes-Benz eVito Van Pure L3**. Este vehículo consiste en una furgoneta eléctrica BEV (Battery Electric Vehicle) de 2 ejes, con tracción delantera propulsada por un motor eléctrico de 85 kW de potencia máxima (70 kW de potencia constante). Este motor es alimentado por un banco de baterías bajo el suelo de 41,4 kWh de capacidad total (35 kWh de capacidad útil), que está compuesto a su vez por 3 baterías de alto voltaje de ion-litio conectadas en paralelo [31], [32]. Se pueden encontrar más datos técnicos del vehículo en el Anexo I.



Figura 12. Imagen del vehículo de base [31].

Dentro de las dos versiones disponibles para este modelo se escogió la L3/A3 (extralargo). Esta versión dispone de 230 mm adicionales de longitud, que permitirán disponer de una superficie mayor para el generador fotovoltaico respecto a la versión L2/A2. La superficie del techo es un 6,9 % superior en comparación con la versión más corta, mientras que la autonomía se ve reducida en algo menos de un 1 % por sus mayores dimensiones.

Para la estimación de las dimensiones de la superficie disponible para el generador fotovoltaico se digitalizó la superficie del techo del vehículo con el programa Catia v5. La superficie del techo es de 4,522 m², con unas dimensiones aproximadas de 1341 x 3238 mm. El área proyectada del techo sobre un plano horizontal es de 4,502 m². El procedimiento seguido en Catia V5, junto con las dimensiones obtenidas, se encuentran contenidos en el Anexo II de este documento.

Se pretende enfocar este trabajo a vehículos de uso comercial, debido a que existen menos estudios desarrollados para este sector del transporte. La categoría del vehículo de base es N1 – Vehículos de motor concebidos y fabricados principalmente para el transporte de mercancías, cuya masa máxima no sea superior a 3,5 toneladas, según la Directiva Marco 2007/46 CE del Parlamento Europeo y el Consejo [27]. Se ha decidido seleccionar un vehículo de esta categoría debido a que, dentro de los vehículos comerciales, los vehículos ligeros representan un porcentaje superior en número respecto a los pesados.

3.2. Propuesta de diseño para el sistema fotovoltaico

El diseño propuesto para el sistema fotovoltaico del vehículo consiste en un generador fotovoltaico, controlado por un regulador MPPT (del inglés, *Maximum Power Point Tracker*) y una etapa elevadora de tensión entre éste y la batería de alto voltaje del vehículo. Para todos los elementos que conforman el diseño se buscaron soluciones comerciales reales en internet. En la Figura 13 se muestra de forma esquemática el sistema fotovoltaico, junto con los elementos más característicos del sistema eléctrico de la propia furgoneta y su flujo de potencia.

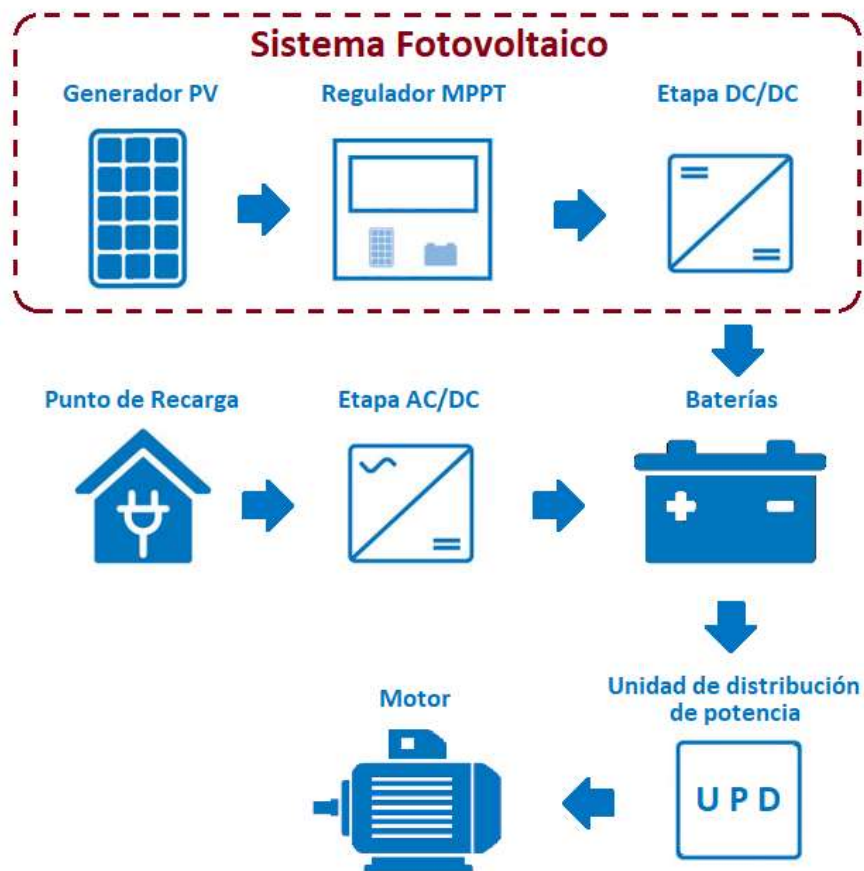


Figura 13. Esquema del sistema fotovoltaico, del sistema eléctrico de la furgoneta y flujo de potencia.

El **generador fotovoltaico** está ubicado en los 4,522 m² disponibles del techo del vehículo. Se plantearon varios diseños con diferentes tecnologías fotovoltaicas para poder comparar y decidir cuál de ellas es la más apropiada para esta aplicación. Cuando fue posible se utilizaron células fotovoltaicas en lugar de módulos, de este modo es más sencillo aprovechar al máximo la limitada superficie disponible. Los criterios de selección fueron buscar tecnologías fotovoltaicas maduras, con soluciones comerciales reales, con altas eficiencias y óptimas dimensiones que permitieran cubrir la mayor parte de área disponible.



Las tecnologías fotovoltaicas elegidas, junto con sus módulos y células seleccionados, fueron:

- Silicio monocristalino (mc-Si) / Células **Maxeon Gen III 3.72** [33]
- Cobre, Indio, Galio y Selenio (CIGS) / Células **MiaSolé** (eficiencia 17 %) [34]
- Telururo de Cadmio (CdTe) / Módulos **First Solar FS-4122-3 ó FS-4122A-3** [35]

En el Anexo III se detallan las características técnicas de cada generador fotovoltaico propuesto. En el Anexo V se pueden consultar los datos técnicos de los catálogos de cada célula y módulo fotovoltaico empleado.

Además de las tecnologías propuestas, existen otras emergentes de próxima comercialización que podrían ser interesantes para esta aplicación por su bajo peso y su flexibilidad. Es el caso de las células orgánicas poliméricas con Non-Fullerene Acceptors (NFAs), tecnologías híbridas con capa activa de perovskita o células tándem de perovskita sobre silicio cristalino. Son tecnologías muy prometedoras, que han alcanzado eficiencias en conversión de potencia con valores superiores a 18 % y 25 % respectivamente, valores que son ya similares a las tecnologías comerciales arriba citadas. El principal problema por resolver que todavía impide la entrada en el mercado de estas tecnologías es su vida útil, pues los módulos se degradan rápidamente, quedando todavía lejos de las vidas útiles garantizadas de 25 o 30 años típicas de las tecnologías inorgánicas. En futuros estudios podría incluirse en los modelos de cálculo este tipo de tecnologías orgánicas e híbridas.

Para el **regulador**, que incluye un **seguidor del punto de máxima potencia MPPT**, se pretendió obtener un dispositivo capaz de mantener al generador fotovoltaico trabajando en su punto de máxima potencia, mantener a las baterías en un estado óptimo de carga y, a su vez, conseguir a la salida una tensión lo suficientemente elevada como para cargar las baterías de alto voltaje, pero no fue posible encontrar una solución comercial capaz de alcanzar estos valores a su salida. Como segunda opción se buscó un regulador MPPT que poseyera una entrada capaz de soportar las tensiones y corrientes proporcionadas por el generador fotovoltaico, una salida con una tensión lo más alta posible, capaz de realizar el seguimiento del punto de máxima potencia del generador junto con un coste lo más reducido posible. El modelo seleccionado fue el **SmartSolar MPPT 100/20-48V**, de la marca **Victron Energy**. Su hoja de datos técnicos se encuentra en el Anexo V.

La **etapa DC/DC** fue el dispositivo más complicado de seleccionar. Se trata de un convertidor elevador cuya función es aumentar la tensión desde los 48 V de la salida del regulador MPPT hasta los 365 V (420 V máximo) del banco de baterías del vehículo. Los criterios de búsqueda fueron que el dispositivo fuera capaz de soportar la potencia desarrollada por el generador fotovoltaico y unas tensiones a la entrada y salida apropiadas. El modelo elegido fue **TIDA-00951**, del fabricante **Texas Instruments**. Este convertidor realmente está diseñado para suministrar energía a una red con un alto nivel de tensión desde una fuente de 48 V, pero al tratarse de un dispositivo bidireccional las necesidades de este diseño quedan cubiertas. La potencia que es capaz de soportar este convertidor es de 2 kW, aproximadamente el doble que la potencia máxima capaz de soportar el generador fotovoltaico con la tecnología más eficiente. El elevador DC/DC está claramente sobredimensionado, lo que provocará una disminución de la eficiencia del sistema, pero las búsquedas en la red no ofrecieron una solución más apropiada. Su hoja de datos técnicos se encuentra en el Anexo V.

Además de estos dispositivos, el vehículo disponía de origen de una etapa AC/DC que permite la carga de la batería desde la red eléctrica y una unidad de distribución de potencia que gestiona la demanda de energía del motor eléctrico de la furgoneta.



3.3. Comprobación de masas y dimensiones

Se realizó una pequeña comprobación de las masas y dimensiones del vehículo para asegurar el comportamiento dinámico de la furgoneta. Para ello se siguieron las indicaciones que el fabricante impone en el documento *Directrices para la construcción y el montaje de carrocerías y estructuras adosadas en Vito y Clase V* [36]. Las restricciones son las siguientes:

- Carga sobre el techo no superior a 150 kg
- Altura máxima autorizada de 4000 mm

Los pesos y grosores de los generadores propuestos aparecen indicados en el Anexo III. La Tabla 3 se incluye a modo de resumen.

Fabricante / Modelo	MAXEON / GEN III 3.72	MiaSolé / Eficiencia 17 %	First Solar / FS-4122-3 ó FS-4122A-3
Tecnología	mc-Si	CIGS	CdTe
Dimensiones - grosor (mm)	40	2,5	6,8
Peso generador PV (kg)	47,5	11,88	60

Tabla 3. Peso y grosos de los generadores fotovoltaicos propuestos.

Se comprobó que el peso del generador no sobrepasara los 150 kg. El generador de CdTe es el más desfavorable en este aspecto, con una masa de 60 kg, por debajo del peso máximo permitido.

La altura máxima tras la reforma se calculó como la suma de la altura del vehículo de base (1910 mm) más el grosor del generador. El resultado más desfavorable fue para el generador de mc-Si, con una altura total de 1950 mm, por debajo del límite máximo permitido.

Sería necesario un cálculo adicional que confirmara la posición del centro de gravedad del vehículo tras la reforma, pero el fabricante solicita que se realice de forma empírica, pesando los ejes del vehículo cargado utilizando una rampa. No obstante, al encontrarse todos los generadores dentro de los pesos y dimensiones máximos admitidos por el fabricante y que además la masa está uniformemente distribuida a lo largo de todo el techo, se estima que la variación de la posición del centro de gravedad se encuentra dentro de los límites. Por otro lado, será necesario parametrizar en la centralita del vehículo el control de estabilidad y la ayuda a la frenada para el nuevo centro de gravedad.

3.4. Balance energético

3.4.1. Cálculo de la energía producida y autonomía

Para el cálculo de la energía producida por el generador fotovoltaico se tomaron los datos meteorológicos de la ciudad de Cartagena desde la página web de PVGIS, del *Joint Research Centre (JRC)* de la Comisión Europea [37]. La información recogida fueron los valores de irradiancia para un plano horizontal (valores de inclinación y azimut de 0°) y temperatura ambiente a cada hora del día medio de cada mes. Las coordenadas consultadas fueron 37.600, -0.979 para la base de datos PVGIS-SARAH. Se ha incluido la

Figura 14 como ejemplo de valores de irradiancia en plano horizontal y temperatura ambiente a cada hora del día medio del mes de enero. Los datos obtenidos para cada mes han sido clasificados en el Anexo IV.

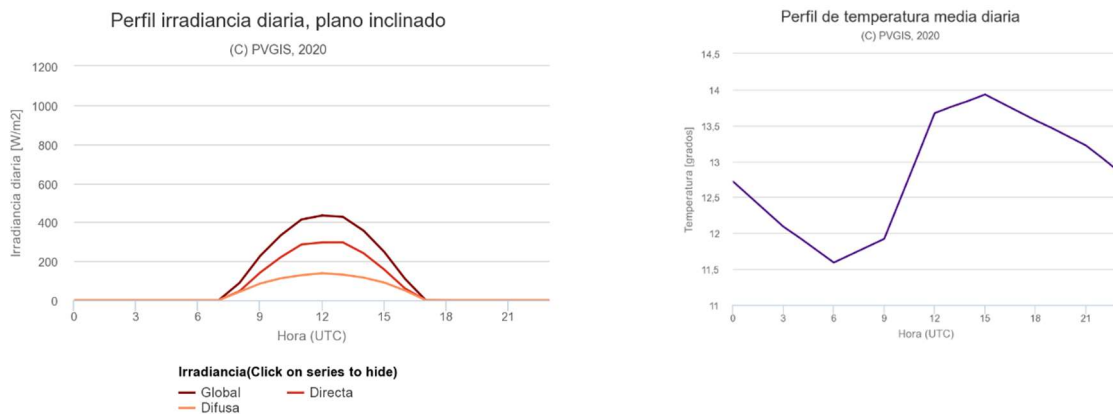


Figura 14. Evolución de la irradiancia y temperatura a lo largo del día medio de enero en Cartagena [37].

Se calculó la **potencia instantánea** producida por el generador fotovoltaico para cada hora del día medio de cada mes en función de la irradiancia recibida en plano horizontal y de la temperatura ambiente. La ecuación empleada fue la siguiente:

$$P = P_{STC} \cdot \frac{G_h}{G_{STC}} \cdot \left(1 + \frac{\gamma}{100} \cdot (T_c - 25)\right)$$

Es importante indicar que γ , el coeficiente de pérdidas de potencia por temperatura, tendrá un valor negativo. En las hojas de especificaciones de los módulos fotovoltaicos pueden aparecer hasta seis coeficientes térmicos diferentes. Para este cálculo se utilizó el que describe las pérdidas en términos de un porcentaje de la potencia nominal (STC).

Según la ecuación anterior, para conocer la potencia instantánea es necesario calcular antes la temperatura de la célula fotovoltaica T_c . Se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} \cdot G$$

Como se ha indicado anteriormente, se calculó la potencia instantánea para cada hora del día medio de cada mes. Estos valores pueden ser representados como puntos en una gráfica donde el eje horizontal sea el tiempo y el eje vertical sea la potencia. Los puntos definirían una curva. La **energía diaria** aportada por el generador sería igual a la integral durante un día completo de la potencia instantánea producida por el generador. En otras palabras, el área encerrada bajo la curva definida por los puntos de la potencia instantánea. El eje x (eje temporal) toma los valores desde 0 hasta 24 h. Para el cálculo de esta área se hizo uso de la aproximación de la suma de trapecios, tomando la expresión siguiente:

$$\int_a^b f(x) dx \approx \sum_{i=1}^n \frac{f(x_{i-1}) + f(x_i)}{2} \cdot (x_i - x_{i-1})$$



Se aplicó un *performance ratio* que contenía el conjunto de pérdidas que sufrirá el sistema (detallado en el punto 3.4.2) y los límites máximo y mínimo de irradiación recibida (desarrollado en el punto 3.4.3). De este modo se calculó la energía útil disponible.

Con este dato, junto con el consumo de energía por kilómetro recorrido (calculado en el punto 3.4.4), se puede calcular la **autonomía diaria** como el cociente entre la energía útil y el consumo por kilómetro recorrido.

$$r = \frac{E_{\text{útil}}}{L_{km}}$$

La **energía anual** producida y almacenada en batería se calculó como el sumatorio de la energía producida diaria por el número de días que posee cada mes. Este planteamiento es válido para el cálculo de la energía durante el primer año de uso. Para los años siguientes es preciso aplicar el coeficiente de pérdidas por degradación de la célula, indicado por el fabricante del dispositivo.

3.4.2. Estimación del *Performance Ratio*

Además de las pérdidas por irradiación y temperatura, junto con las pérdidas de degradación de las células fotovoltaicas, se ha establecido un coeficiente de pérdidas (*performance ratio*) que contempla los siguientes factores:

Pérdidas por curvatura del techo

Debido a que la superficie del techo no es completamente plana, cada célula recibirá la irradiación solar desde un ángulo diferente, y por tanto, provocará pérdidas de potencia debido principalmente al desajuste de las corrientes fotogeneradas en cada ristra de células conectadas en serie. Este efecto se producirá en los generadores conformados por células fotovoltaicas (células Maxeon de mc-Si y células MiaSolé de CIGS), mientras que en el generador conformado por módulos no se originará dicho fenómeno. Este planteamiento supone una complicación, tanto analítica como tecnológica. Por otro lado, mejorará la estética y la aerodinámica del vehículo.

Para estimar la reducción de potencia debido a la curvatura del techo se ha hecho uso de la expresión desarrollada por Ota *et al* [11], donde el factor de pérdidas por curvatura es función de la relación entre el área del techo proyectada sobre un plano horizontal y la superficie curva del techo. La ecuación es la siguiente:

$$PR_{\text{curv}} = -0,620 + 1,549 \cdot \frac{A_p}{A_{sc}}$$

En el Anexo II se indica el procedimiento para la digitalización del techo con el programa Catia V5, donde se obtuvo que el área de la superficie curva del techo es 4,552 m² y su proyección sobre un plano horizontal es 4,502 m². Aplicando la ecuación se estima que el *performance ratio* asociado a la curvatura del techo es del **92,21 %**.

Pérdidas por eficiencia del regulador MPPT

Para las pérdidas asociadas a eficiencia del regulador MPPT se tomó el valor declarado por el fabricante que aparecía en catálogo: **98 %**. La hoja de datos de este elemento puede encontrarse en el Anexo V.

Pérdidas por eficiencia de la etapa DC/DC

Según el fabricante de este dispositivo, la eficiencia del convertidor elevador viene definida por una curva en función de la potencia de salida. Aunque en buenas condiciones de irradiancia se podrían conseguir potencias instantáneas cercanas a la potencia pico del generador fotovoltaico, se estima que el valor promedio será inferior a la mitad. En la Figura 15 se muestra la gráfica que define la eficiencia, extraída del catálogo del fabricante (Ver Anexo V).

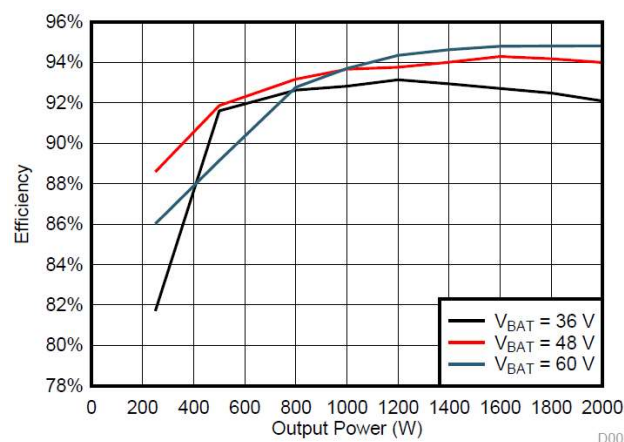


Figura 15. Eficiencia de la etapa DC/DC en modo convertidor elevador [38].

El elemento que se encuentra justo antes de la etapa DC/DC es el regulador MPPT, que se ha programado a 48 V. Se haría uso de la curva de color rojo para estimar la eficiencia de la etapa. Se ha tomado como hipótesis que la eficiencia promedio de la etapa DC/DC es del **90 %**, un valor que es conservador, pues supone que buena parte del tiempo el regulador funcionará por debajo de su punto óptimo; esto producirá unos resultados globales del estudio con un margen de seguridad elevado en relación a las estimaciones de posibles ahorros económicos y de emisiones.

Pérdidas por suciedad en el generador fotovoltaico

La suciedad acumulada en la superficie colectora provocará unas pérdidas en potencia. Un estudio realizado a pie de campo por la Universidad de Málaga muestra que el promedio de las pérdidas energéticas mensuales ocasionadas por el polvo es inferior al 2 % para la mayoría de los meses. En verano, cuando la falta de lluvia favorece la acumulación de polvo, las pérdidas pueden ascender hasta el 15 % [39].

Tomando como hipótesis que las condiciones atmosféricas de la ciudad de Málaga pueden ser similares a las de la ciudad de Cartagena (ciudades costeras situadas al sur de España) y que, por imagen de marca, el propio mantenimiento de la furgoneta llevará implícito una limpieza periódica del exterior del vehículo, se ha estimado que las pérdidas por suciedad no llegarán a ser superiores al 2 % (*performance ratio* por suciedad del **98 %**). Además, el propio movimiento del vehículo favorecerá la autolimpieza del generador.



Pérdidas por el proceso de carga de la batería

Para estimar la eficiencia de la batería durante el proceso de carga se tomó el mismo criterio que en [40], suponiendo un valor del **94 %**.

En este apartado sólo se han tenido en cuenta las pérdidas en el proceso de carga de la batería y no para el proceso de descarga. Esto es debido a que las pérdidas durante la descarga deberían estar ya incluidas en los consumos del vehículo declarados por el fabricante.

Otras pérdidas

Se han despreciado las pérdidas por dispersión de parámetros de los fabricantes, debido a que en la actualidad estos valores son muy pequeños.

También se han despreciado las pérdidas en cableado, ya que la distancia que deben cubrir es muy corta: desde el techo (posición del generador) hasta el suelo del vehículo (ubicación del banco de baterías).

Performance ratio global

Se puede calcular un *performance ratio* global del sistema completo como producto de todas las eficiencias asociadas a cada fenómeno. De este modo, se obtendrían los siguientes valores:

Tecnología PV	mc-Si	CIGS	CdTe
PR - Performance Ratio (%)	74,92	74,92	81,25

Tabla 4. Performance Ratio estimado para cada tecnología fotovoltaica.

3.4.3. Límites máximo y mínimo de irradiación recibida

Es importante mencionar que el generador fotovoltaico sobre el techo de la furgoneta no es una instalación fija y que el frecuente movimiento de ésta provocará en ocasiones sombras indeseadas. Según el estudio realizado por Lodi *et al*, en condiciones reales el techo de un vehículo turismo es capaz de recibir el 58 % de la irradiación horizontal disponible (incluyendo factores como, por ejemplo, patrones de conducción obtenidos por sistemas GPS, estudio de efectos de sombreado por obstáculos físicos, vehículos aparcados en estacionamientos interiores, etc.) [8].

No se encontró ningún estudio similar a éste dedicado a vehículos para el transporte de mercancías, con más horas de uso diarias que un turismo (prácticamente toda la jornada laboral), y que no suelen ser estacionados bajo techo (sobre todo durante las operaciones de carga y descarga). Previsiblemente, el porcentaje de irradiación horizontal que una furgoneta es capaz de aprovechar sería superior al valor que encontramos en [8]. No obstante, al no disponer de un estudio más acorde al uso del vehículo de base, se ha tomado el valor del 58 % como límite inferior.



De este modo, para este trabajo se han establecido dos límites, uno superior y otro inferior, suponiendo que la mayoría de los vehículos de similares características al estudiado se encuentren acotados por dichos límites.

- **Límite superior.** Se trata de un escenario ideal, imposible de alcanzar, donde el techo del vehículo es capaz de aprovechar el 100 % de la radiación horizontal disponible.
- **Límite inferior.** Es un escenario más desfavorable, donde se toma como hipótesis que la furgoneta tendrá un uso similar al de un turismo. El generador fotovoltaico solo recibe el 58 % de la radiación.

3.4.4. Consumo energético del vehículo

Es complicado establecer un patrón de consumo para la furgoneta, ya que éste ira asociado al tipo de uso que se haga del vehículo. Este apartado podría extenderse sin tener fin, entendiéndose que se encontrarían tantos modelos de consumo como usuarios de vehículos comerciales. Por este motivo, en este trabajo se ha pretendido mantener el foco en usuarios que produzcan un mayor impacto. Es el caso de los vehículos ligeros dedicados a operaciones logística en grandes ciudades.

Se buscaron patrones de consumo elaborados para el proyecto FREVUE (Validating Freight Electric Vehicles in Urban Europe), financiado por la Unión Europea, que pretenden probar la viabilidad de vehículos eléctricos destinados a la distribución de mercancías en grandes ciudades europeas [29]. La monitorización GPS de vehículos eléctricos reales de carga, probados en varias ciudades europeas desde 2013 hasta 2017, determinó que **los vehículos de categoría N1 recorrían una distancia media diaria de 77,4 km, con una velocidad media de 17,2 km/h y un tiempo de uso de 5,8 horas** [30].

Por otro lado, según los documentos técnicos del vehículo [31], el fabricante declara las siguientes autonomías para un ciclo de descarga completo de la batería en función de la velocidad del test WLTP [41]:

Velocidad del test WLTP	Autonomía (km)
Ciclo combinado	148
Low (extraurbano)	166
Medium (urbano)	166
High (rural)	153
Extra High (autovía)	130

Tabla 5. Autonomía de la furgoneta. Elaboración propia con la información de [31].

Fue necesario determinar cuál de los ciclos WLTP de la Tabla 5 se acerca más al patrón de uso de la furgoneta de reparto. En la Figura 16 se muestra la velocidad para cada instante de tiempo que debe seguirse durante el procedimiento del ensayo WLTP. Se observa que la parte del ciclo que más se asemejaría a la estadística de uso del vehículo (velocidad media de 17,2 km/h) sería la del ciclo extraurbano (*Low*).

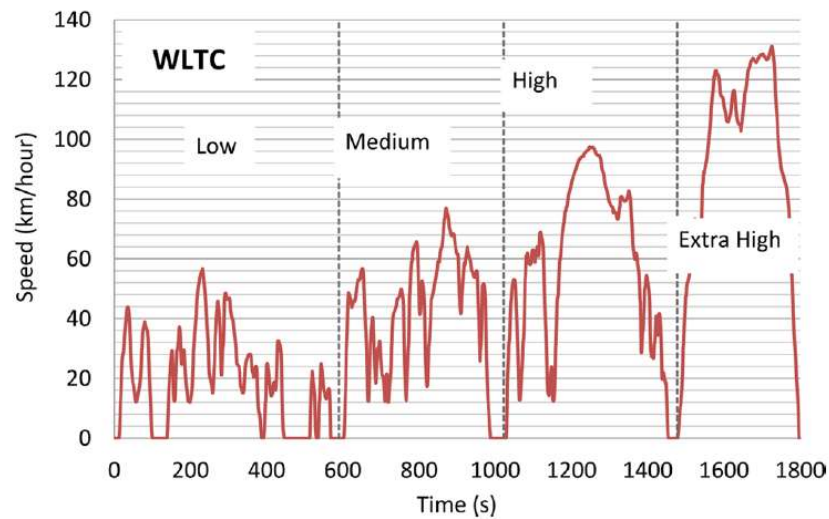


Figura 16. Velocidad para cada instante de tiempo del ciclo WLTP [41].

Por lo tanto, el **consumo de energía por kilómetro recorrido** se calcularía como el cociente entre la capacidad total del banco de baterías (41,4 kWh, según el fabricante) y la autonomía del vehículo alcanzada en condiciones extraurbanas (tramo *Low* del ciclo WLTP). El consumo energético por kilómetro recorrido será **249,4 Wh/km**.

$$L_{km} = \frac{C_B}{r} = \frac{41,4 \text{ kWh}}{166 \text{ km}} = 249,4 \text{ Wh/km}$$

El **consumo diario de energía** del vehículo fue calculado como el producto de la distancia media diaria recorrida (77,4 km, según la estadística de uso del proyecto FREVUE) por el consumo de energía por kilómetro recorrido (249,4 Wh/km). El resultado es que la furgoneta consumirá **19,3 kWh** de energía eléctrica todos los días para poder realizar su actividad.

$$L_d = d_d \cdot L_{km} = 77,4 \text{ km/día} \cdot 249,4 \text{ Wh/km} = 19,3 \text{ kWh/día}$$

Con este dato, junto con la energía diaria producida por el sistema fotovoltaico (desarrollado en el punto 3.4.1), se calculó el **porcentaje de la demanda cubierto por el sistema fotovoltaico** cada mes.

3.5. Estudio ambiental

El análisis ambiental propuesto en este trabajo consiste en una comparación de las emisiones de CO₂ equivalentes producidas por vehículos de categoría N1, destinados al transporte logístico en centros urbanos de grandes ciudades europeas. Se calcularon dichas emisiones para vehículos propulsados por diferentes motores y energías con distinto origen:



- Furgoneta propulsada por un motor diésel.
- Furgoneta BEV, alimentada por energía de la red eléctrica nacional (sistema peninsular).
- Furgoneta BEV equipada con tecnología fotovoltaica mc-Si en su techo, alimentada en primer lugar por la energía producida por su propio generador fotovoltaico y después de la red nacional hasta cubrir las necesidades energéticas diarias.

En el apartado 3.2 se propusieron generadores fotovoltaicos conformados por tres tecnologías distintas: mc-Si, CIGS y CdTe. Para el análisis ambiental sólo se ha considerado el generador de mc-Si, debido a su gran superioridad para producir energía frente a las demás opciones contempladas. Por tanto, a mayor cantidad de energía de origen renovable mayor será la reducción en emisiones de CO₂ del vehículo.

Para todos los casos se tomó como hipótesis que la distancia media diaria recorrida por el vehículo es de 77,4 km, según la estadística incluida en el proyecto FREVUE [30]. La distancia media mensual recorrida se calculó como el producto de la distancia media diaria recorrida y el número de días de cada mes. Los cálculos están referidos al año 2019, por lo que el número de días del mes de febrero fue 28 para los cálculos.

$$d_{mes} = n_{mes} \cdot d_d$$

3.5.1. Cálculo de las emisiones producidas por la versión diésel

Se buscó la versión diésel más próxima al vehículo de base para este cálculo. El modelo seleccionado fue la furgoneta Mercedes-Benz Vito Panel Van L3 - Progressive 110 CDI, con dimensiones idénticas al vehículo estudiado en este trabajo. La potencia de su motor es de 75 kW (la potencia máxima del vehículo de base es de 85 kW, con 70 kW de potencia constante) [42].

En la documentación disponible, el fabricante declara unas emisiones de CO₂ de 175 g/km en ciclo combinado durante el test WLTP. Según se vio en el punto 3.4.4, el ciclo WLTP que más se ajusta al modo de uso del vehículo de mercancías es el ciclo extraurbano (Low), no el ciclo combinado. En vehículos con motor de combustión el ciclo combinado indicará un nivel de emisiones menos contaminante que el extraurbano. Por otro lado, el vehículo diésel seleccionado tiene una masa en orden de marcha 300 kg inferior respecto a su versión BEV, debido a la ausencia del banco de baterías.

Aunque el ciclo combinado muestre un nivel inferior de emisiones, la reducción de 300 kg del vehículo diésel (más ligero) puede contrarrestar esta desviación.

Se calculó la **masa de CO₂ emitida para cada mes del año por el vehículo diésel** como el producto de la distancia media mensual recorrida por las emisiones en ciclo combinado por kilómetro recorrido.

$$ECO_{2,mes} = d_{mes} \cdot ECO_{2,km}$$

Así mismo, las **emisiones producidas durante un año completo** se calcularon como el sumatorio de las emisiones de cada mes del año.

3.5.2. Cálculo de las emisiones producidas por la versión BEV alimentado de la red eléctrica nacional

Para este cálculo se consideró que el vehículo es recargado exclusivamente por la red eléctrica nacional (sistema peninsular). La generación de energía de dicha red está compuesta por un conjunto de tecnologías (mix energético) de diferentes orígenes, algunas de las cuales llevan asociadas unas emisiones de gases de efecto invernadero durante su generación. La participación de cada una de estas energías es variable en el tiempo, en función de la demanda de energía y de las condiciones climáticas. Por ejemplo, los meses más ventosos estarán asociados a un mix energético con una mayor participación de energía eólica. Tomando este mismo ejemplo, al ser la eólica una energía de origen renovable, estos meses también se caracterizarán por una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Para valorar el impacto ambiental del mix energético nacional, se recopilamos los datos que Red Eléctrica de España (REE) ofrece en sus boletines mensuales. En concreto, se tomaron los valores mensuales de generación de energía y las emisiones equivalentes de CO₂ durante un año completo (el año 2019) [43]. En la Figura 17 se muestra la representación gráfica de las dos series de datos.

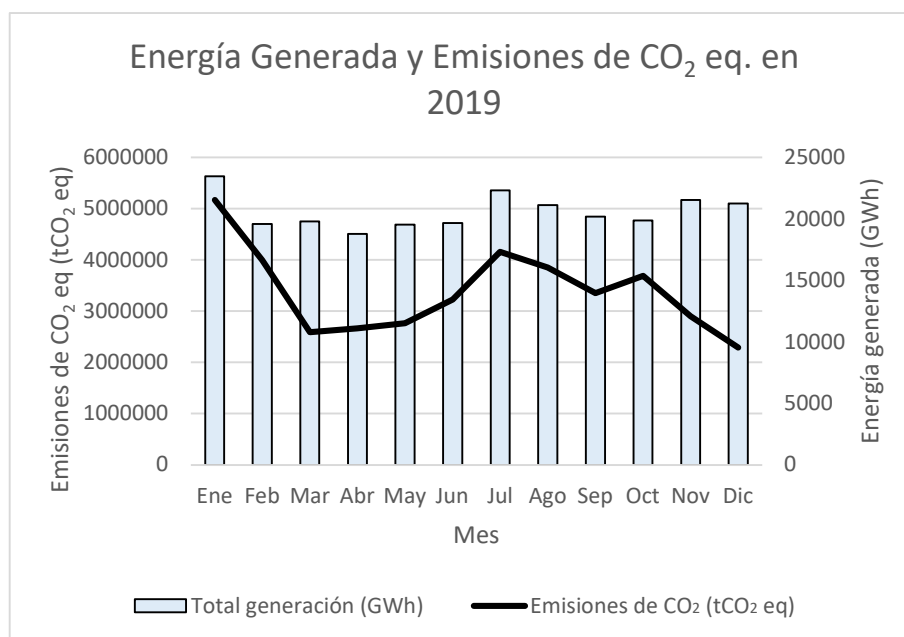


Figura 17. Energía generada y emisiones de CO₂ equivalentes en el sistema peninsular durante el año 2019. Elaboración propia con los datos de REE [43].

El **factor de emisiones de CO₂ equivalente** es una magnitud que puede ayudar a comprender el impacto ambiental del mix energético en lo que respecta a emisión de gases de efecto invernadero. Su cálculo se realizó como el cociente entre las emisiones de CO₂ equivalentes vertidas a la atmósfera y la energía generada durante un mismo periodo de tiempo. Como ya se indicó en este mismo apartado, la participación de las energías que componen el mix energético es variable en el tiempo, por tanto, el factor de emisiones sufrirá modificaciones a lo largo del año. Se calculó el factor de emisiones del mix energético peninsular para cada mes durante el año 2019. En la Figura 18 se muestra su evolución.

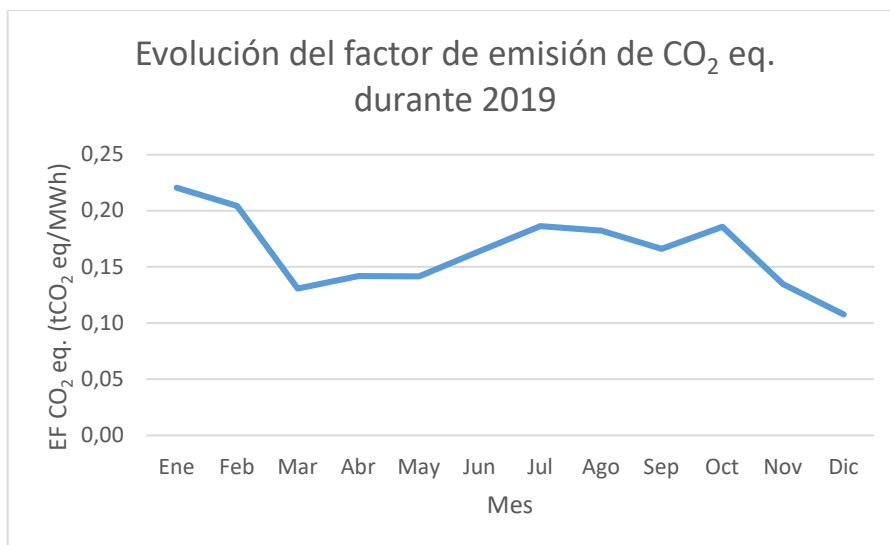


Figura 18. Evolución del factor de emisiones de CO₂ equivalente asociado al mix energético nacional durante el año 2019 (sistema peninsular).

El **consumo mensual de energía eléctrica** de la furgoneta fue estimado de forma independiente para cada mes. Su cálculo se obtuvo como el producto del consumo medio diario de cada mes (incluido en el punto 3.4.4 de este documento, con un valor de 19,3 kWh/día) por el número de días de cada mes.

$$L_{mes} = n_{mes} \cdot L_d$$

Las **emisiones de CO₂ equivalente para cada mes** se calcularon como el consumo energético del vehículo en cada mes por el factor de emisiones de cada mes.

$$ECO_{2,mes} = L_{mes} \cdot EFCO_{2,mes}$$

Así mismo, las **emisiones producidas durante un año completo** se calcularon como el sumatorio de las emisiones de cada mes del año.

3.5.3. Cálculo de las emisiones producidas por la versión BEV con generador PV

Mientras que la energía de la red eléctrica lleva asociada una cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero durante su generación, la energía producida por el techo fotovoltaico del vehículo está libre de emisiones durante la producción de energía (no así durante la fabricación de las células).

En este apartado se ha tomado como premisa que, para cubrir la demanda energética del vehículo, el banco de baterías es alimentado en primer lugar por la energía autogenerada por la superficie fotovoltaica del vehículo. El resto de energía necesaria para cubrir las necesidades del vehículo sería suministrada por la red nacional, del mismo modo que se indicó en el punto 3.5.2. Este planteamiento ayudará a reducir la cantidad de energía de la red suministrada al vehículo. Por lo tanto, el primer paso será conocer cuánta energía consume la furgoneta de cada origen (red eléctrica o techo fotovoltaico).



La **energía mensual producida por el generador fotovoltaico** se calculó como el producto del número de días del mes por la energía diaria generada, manteniendo los límites superior e inferior establecidos en el punto 3.4.3 que dependen de la exposición al sol del vehículo.

La **energía mensual demandada a la red** se calculó como la diferencia entre el consumo mensual del vehículo (calculado en el punto 3.5.2) y la energía mensual producida por el generador fotovoltaico. Al igual que en el párrafo anterior, este dato variará en función de la exposición del vehículo a la radiación solar (límites superior e inferior).

En la Figura 19 aparece representada de forma gráfica la cantidad de energía de cada origen suministrada al vehículo para cubrir la demanda mensual. Se recuerda que el límite superior se corresponde a un escenario donde el vehículo recibe toda la radiación solar disponible, mientras que el límite inferior solo aprovecha el 58 % de esta.

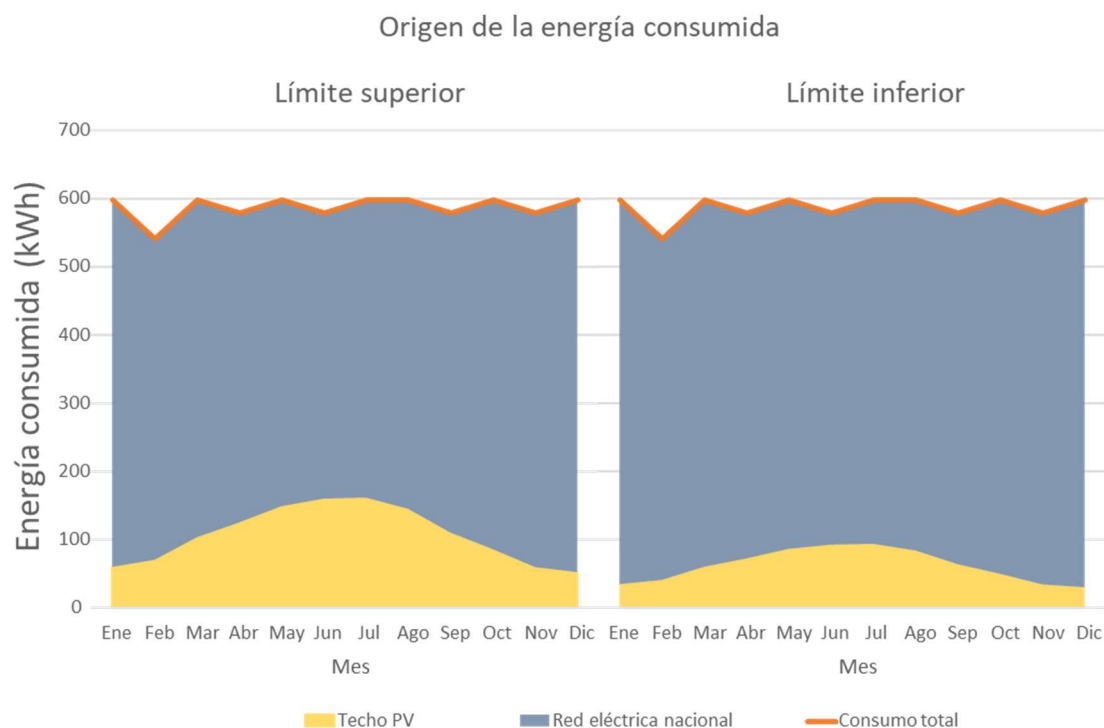


Figura 19. Origen de la energía eléctrica destinada a cubrir la demanda del vehículo para el límite superior e inferior de radiación solar recibida.

Para la obtención de las **emisiones de CO₂ equivalente** se debería calcular por separado la cantidad de CO₂ originado por cada fuente de energía y, posteriormente, realizar la suma de las dos. No obstante, debido a que la energía fotovoltaica generada en el techo de la furgoneta no produce CO₂ durante su operación, este término sería nulo. Por lo tanto, las emisiones de CO₂ equivalente para cada mes será el resultado del producto de la energía consumida de la red eléctrica nacional por el factor de emisiones de cada mes.

$$ECO_{2,mes} = E_{red,mes} \cdot EFCO_{2,mes}$$

Al igual que en los casos anteriores, las **emisiones producidas durante un año completo** se calcularon como el sumatorio de las emisiones de cada mes del año.



Adicionalmente, se calculó la reducción de emisiones de CO₂ equivalente que supone el uso del techo fotovoltaico para un BEV como la diferencia entre los valores obtenidos en el punto 3.5.2 y los resultados del presente apartado. Se puede visualizar el mismo resultado en términos de emisiones “evitadas”, es decir, las emisiones que se hubieran producido si el porcentaje de energía consumida de origen fotovoltaico hubiera sido consumido a partir del mix eléctrico nacional. Este valor se obtiene simplemente restando emisiones (BEV menos el combinado BEV+techo fotovoltaico). Suministra un dato informativo que permite concienciar a la opinión pública sobre las ventajas ambientales del uso de las energías renovables también en el sector transporte.

3.6. Análisis económico

El objetivo de realizar este tipo de análisis es comprobar la viabilidad económica del diseño. De nada serviría proyectar un sistema fotovoltaico con un coste inicial demasiado alto, difícil de asumir por el cliente final, o que dejara pérdidas económicas al final de su vida útil.

En caso de que el proyecto no fuera rentable, una opción podría ser que los gobiernos propusieran ayudas económicas para los usuarios que decidan adquirir vehículos con este dispositivo, con el fin de reducir el nivel de CO₂ emitido por el sector del transporte. El problema es que estas ayudas pueden desaparecer y los vehículos en stock que incorporen este dispositivo resultarían más difíciles de vender debido al coste adicional.

Otra opción, en caso de que el proyecto no fuera económicamente viable, sería que el Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea impusiera mediante reglamentación la incorporación de estos dispositivos a todos los fabricantes de vehículos, con el fin de reducir emisiones. Estas acciones no son tan inusuales, por ejemplo, en su Reglamento General de Seguridad se impuso la obligatoriedad de la incorporación de sistemas avanzados de frenado de emergencia o sistemas de advertencia de abandono de carril; y en sus Reglamentos de Emisiones se establecen los límites de gases de efecto invernadero por kilómetro recorrido.

En cualquier caso, para no depender de ayudas económicas, es más interesante que el diseño sea económicamente viable. El análisis económico planteado en este documento pretende esclarecer cuestiones como, por ejemplo, cuál sería el sobrecoste del vehículo, cuándo se recuperaría esta inversión inicial y qué beneficios netos se obtendrían.

Para poder desarrollar estos cálculos fue necesario estimar previamente los parámetros económicos del análisis para establecer un escenario futuro a corto plazo en el que realizar la estimación económica para el vehículo fotovoltaico.

Precio de la energía eléctrica en España

El precio de la energía eléctrica en España fue tomado de las estadísticas realizadas por Eurostat durante la segunda mitad del año 2019. En este caso, el valor que se tomó fue el correspondiente a un consumidor no doméstico, entendiendo que el uso del vehículo está orientado a la empresa. Además, no se incluyeron impuestos como el IVA, ya que la empresa tendría la capacidad de deducirlo. Por todo ello, el precio de la energía eléctrica utilizado para el análisis económico fue **0,1104 € / kWh** [44].



Inflación asociada al IPC

Para actualizar los importes a valores actuales se empleó la inflación como tasa de actualización. Para ello se recopilaron los valores del IPC a la finalización de los últimos 5 años. Estos valores fueron obtenidos de la página web del Instituto Nacional de Estadística (INE) [45].

La inflación asociada al IPC se calculó como el promedio de la variación porcentual de este índice respecto al año anterior, tomando un valor de **1,16 %**. Los valores del IPC junto con la inflación asociada al IPC calculada son los que se muestran en la Tabla 6.

Año	IPC	Inflación IPC (%)
2015	100,472	
2016	102,049	1,57
2017	103,184	1,11
2018	104,405	1,18
2019	105,228	0,79

Tabla 6. Índice de Precios de Consumo durante los últimos 5 años junto con su inflación. Elaboración propia partiendo de los datos del INE [45].

Inflación asociada a la energía eléctrica

La actualización del precio de la energía eléctrica para cada año se calculó con la inflación asociada a la energía eléctrica. Para ello se tomaron los índices nacionales de la subclase 04510-Electricidad del INE [45]. La muestra incluye a los últimos 5 años.

La inflación asociada a la energía eléctrica para cada año fue calculada como la variación porcentual del índice nacional 04510-Electricidad respecto al año anterior.

Año	Índice 04510-Electricidad	Inflación electricidad (%)
2015	111,426	
2016	115,604	3,75
2017	115,374	-0,20
2018	115,977	0,52
2019	96,916	-16,44

Tabla 7. Índice nacional de la subclase 04510-Electricidad de los últimos 5 años junto con su inflación. Elaboración propia con los datos del INE [45].

La inflación de la electricidad se calculó como el promedio de las inflaciones obtenidas para cada año, con una salvedad: el dato del año 2019 se consideró un valor atípico y no se incluyó en el cálculo. El valor obtenido para este parámetro económico fue **1,36 %**.

Una posible explicación de la fuerte caída de los precios de la electricidad al finalizar el año 2019 puede ser la gran cantidad de potencia subastada para energías renovables. Esta circunstancia puede haber generado movimientos coyunturales en los precios al abaratar los costes de la producción de energía en el mix nacional que distorsionan la tendencia observada de los últimos años. No obstante, en el futuro se podrá consolidar un descenso de precios de la electricidad conforme se integran energías renovables en



la red eléctrica, justo lo contrario de lo estimado hace pocos años. Para este trabajo se ha optado por una solución que contempla cierta inercia de precios y minimiza la oscilación coyuntural.

Importe de la inversión inicial

El coste de la inversión inicial se calculó como la suma de los costes de todos los dispositivos que conforman el sistema fotovoltaico. Estos son: el generador fotovoltaico, el regulador y la etapa elevadora de tensión DC/DC.

Los precios de cada uno de los generadores fotovoltaicos están incluidos en el Anexo III. El precio del regulador es de 134,83 €. Por otro lado, se encontraron dificultades para conseguir el precio de la etapa DC/DC, por este motivo se tomó como hipótesis estimar un precio de 150 € para este dispositivo, siendo un criterio conservador. Se decidió asignar este valor por similitud con otras etapas elevadoras.

Adicionalmente, este apartado incluiría también el precio del cableado y de las protecciones. No obstante, al tratarse de un sistema fotovoltaico sencillo y de escasas dimensiones, se ha supuesto que estos costes son despreciables, debido a la mínima longitud de los cables y al bajo número de protecciones necesarias.

Gastos

Dejando a un lado el coste de la inversión inicial, los gastos asociados al sistema fotovoltaico serían los que van relacionados con su mantenimiento. Teniendo en cuenta que la principal tarea del mantenimiento del techo fotovoltaico consistiría en la limpieza regular de las células y que esta acción debería ir implícita dentro de la propia limpieza exterior del vehículo, se ha supuesto que los gastos de mantenimiento de la instalación son nulos o despreciables.

Ingresos

En realidad, el término “ingreso” no sería correcto tal como se ha planteado el diseño, ya que la finalidad no es obtener liquidez por la venta de la energía generada. En lugar de esto, se entenderán por ingresos los ahorros económicos que supone el uso del dispositivo. En otras palabras, dinero no gastado.

El ahorro se calculó como el producto de la energía producida cada año por el precio al que pagaríamos la energía. Hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- 1) Tal y como se planteó en el punto 3.4.3, existen unos valores límite superior e inferior de radiación recibida por el vehículo, en función de la exposición de éste al sol. Por tanto, la cantidad de dinero ahorrado se presentará como un valor entre unos límites superior e inferior.
- 2) Debido a la degradación de las células fotovoltaicas a lo largo del tiempo, la producción de energía eléctrica irá decreciendo a lo largo de los años según el coeficiente de degradación de cada tecnología fotovoltaica.
- 3) El precio de la energía eléctrica es variable a lo largo del tiempo, por lo que se realizó una actualización anual del precio de la energía eléctrica según su inflación (calculada anteriormente en este mismo apartado, con un valor estimado de 1,36 %).

Por estos motivos, los ahorros percibidos cada año no serán constantes.



Valor actual neto (VAN)

Se calculo el valor actual neto (*net present value*, NPV) del proyecto al final de cada año con la siguiente ecuación:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t}$$

Teniendo en cuenta que:

- I_0 es el importe de la inversión inicial, calculado en este mismo apartado.
- FC_t (*net cash flow*) es el flujo de caja al finalizar el año t . Debido a que se supuso que el único coste (el de mantenimiento) es nulo, el flujo de caja será igual a los ingresos. En otras palabras, los ahorros económicos.
- i (*discount rate*) es la tasa de actualización del dinero. En este caso se tomó la inflación asociada al IPC, calculada en este apartado y con un valor de 1,16 %.
- t es el año para el que se está calculado el valor actual neto.




El VAN, al ser función del flujo de caja, también será representado con un valor límite superior e inferior que dependerá del tiempo de exposición del vehículo al sol y la radiación recibida.



4. Resultados y discusión

4.1. Balance energético y autonomía

Para diferenciar cada tecnología fotovoltaica, en las representaciones gráficas se ha empleado el mismo código de colores, siendo azul para mc-Si, naranja para CIGS y amarillo para CdTe. Al mismo tiempo, para identificar los valores correspondientes a cada límite de radiación recibida (definidos en el punto 3.4.3), se han empleado líneas continuas para los límites superiores y líneas discontinuas para los límites inferiores.

Código de colores	
	mc-Si
	CIGS
	CdTe

El primer dato que se calculó fue la cantidad de energía diaria almacenada en la batería. Los resultados son los que aparecen en la Tabla 8. La representación gráfica de estos valores se muestra en la Figura 20.

Energía diaria producida durante el primer año (kWh)						
Mes	mc-Si		CIGS		CdTe	
	Lím. Sup.	Lím. Inf.	Lím. Sup.	Lím. Inf.	Lím. Sup.	Lím. Inf.
Ene	1,92	1,11	1,37	0,80	1,32	0,76
Feb	2,51	1,46	1,79	1,04	1,72	1,00
Mar	3,32	1,93	2,36	1,37	2,28	1,32
Abr	4,15	2,41	2,93	1,70	2,85	1,65
May	4,78	2,77	3,36	1,95	3,29	1,91
Jun	5,30	3,08	3,70	2,15	3,65	2,12
Jul	5,20	3,02	3,62	2,10	3,58	2,08
Ago	4,66	2,70	3,25	1,89	3,21	1,86
Sep	3,66	2,12	2,57	1,49	2,52	1,46
Oct	2,76	1,60	1,95	1,13	1,90	1,10
Nov	1,96	1,14	1,40	0,81	1,35	0,78
Dic	1,68	0,97	1,20	0,70	1,15	0,67

Tabla 8. Energía diaria almacenada en la batería durante el primer año.

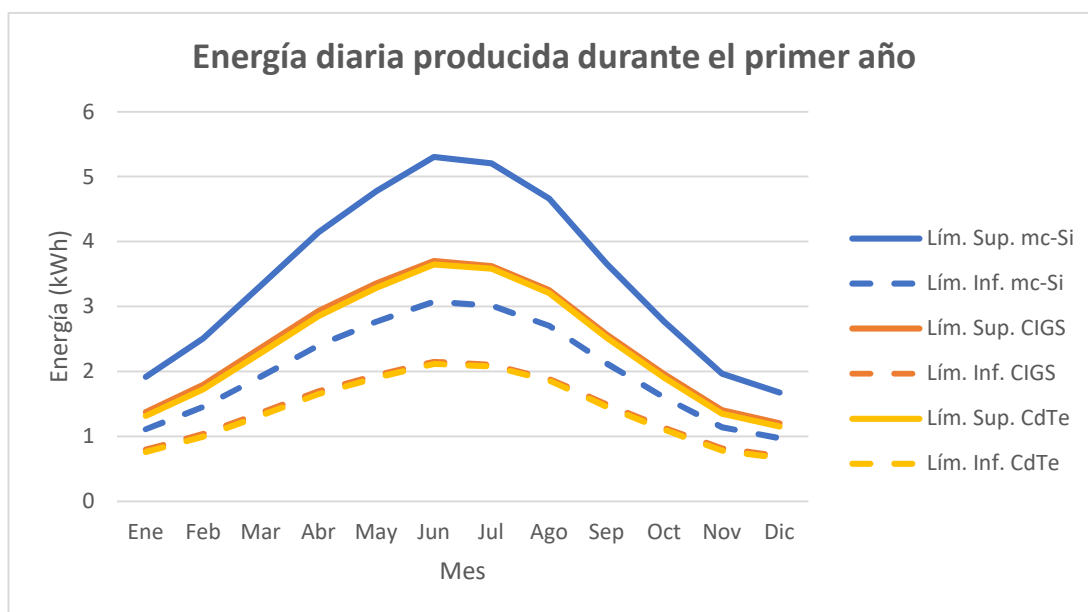


Figura 20. Energía diaria almacenada en la batería durante el primer año.

Se observa claramente que el generador conformado por células de mc-Si tiene una capacidad mayor para producir energía eléctrica que los generadores de CIGS y CdTe. Esto es debido a que la mayor eficiencia del mc-Si permitió diseñar un generador con una potencia pico más elevada que el resto. A su vez, los generadores de CIGS y CdTe fueron proyectados con materiales fotovoltaicos con eficiencias similares. Esto hizo que la potencia pico instalada para estos generadores fuera muy parecida, y por tanto, los resultados obtenidos son similares.

Por otro lado, se observa una gran variabilidad de energía producida a lo largo del año. La energía diaria almacenada en la batería durante los meses de verano será más del doble que la energía diaria almacenada durante los meses de invierno.

Estos valores se corresponden al primer año de uso de la instalación, ya que cada generador sufrirá un deterioro a lo largo del tiempo por su uso. Las pérdidas en potencia por degradación para cada generador serán las siguientes (basándose en una interpolación lineal del valor T_{80} de las características de las células y módulos empleados):

- Coef. degradación del mc-Si: 0,32 %/año
- Coef. degradación del CIGS: 0,80 %/año
- Coef. degradación del CdTe: 0,56 %/año

Se calculó la energía anual producida por cada generador durante 25 años de uso. En este caso, se hace de nuevo notable la mayor eficiencia del generador de mc-Si, proporcionando una energía anual muy superior a la del resto de generadores. Además, el bajo coeficiente de degradación del mc-Si permite que las pérdidas por este fenómeno sean menos acusadas año tras año que para las otras tecnologías. Los resultados aparecen representados en la Tabla 9 y en la Figura 21. Energía anual producida y almacenada en batería durante 25 años de uso.



Energía anual producida (kWh)						
Año	mc-Si		CIGS		CdTe	
	Lím. Sup.	Lím. Inf.	Lím. Sup.	Lím. Inf.	Lím. Sup.	Lím. Inf.
0	1276,33	740,27	899,21	521,54	877,70	509,07
1	1272,24	737,90	892,01	517,37	872,78	506,21
2	1268,16	735,53	884,82	513,20	867,87	503,36
3	1264,07	733,16	877,63	509,02	862,95	500,51
4	1259,99	730,79	870,43	504,85	858,04	497,66
5	1255,91	728,43	863,24	500,68	853,12	494,81
6	1251,82	726,06	856,05	496,51	848,21	491,96
7	1247,74	723,69	848,85	492,33	843,29	489,11
8	1243,65	721,32	841,66	488,16	838,38	486,26
9	1239,57	718,95	834,46	483,99	833,46	483,41
10	1235,48	716,58	827,27	479,82	828,55	480,56
11	1231,40	714,21	820,08	475,64	823,63	477,71
12	1227,32	711,84	812,88	471,47	818,72	474,86
13	1223,23	709,47	805,69	467,30	813,80	472,01
14	1219,15	707,11	798,50	463,13	808,89	469,15
15	1215,06	704,74	791,30	458,96	803,97	466,30
16	1210,98	702,37	784,11	454,78	799,06	463,45
17	1206,90	700,00	776,92	450,61	794,14	460,60
18	1202,81	697,63	769,72	446,44	789,23	457,75
19	1198,73	695,26	762,53	442,27	784,31	454,90
20	1194,64	692,89	755,33	438,09	779,40	452,05
21	1190,56	690,52	748,14	433,92	774,48	449,20
22	1186,47	688,15	740,95	429,75	769,57	446,35
23	1182,39	685,79	733,75	425,58	764,65	443,50
24	1178,31	683,42	726,56	421,40	759,74	440,65
25	1174,22	681,05	719,37	417,23	754,82	437,80

Tabla 9. Energía anual producida y almacenada en batería durante 25 años de uso.

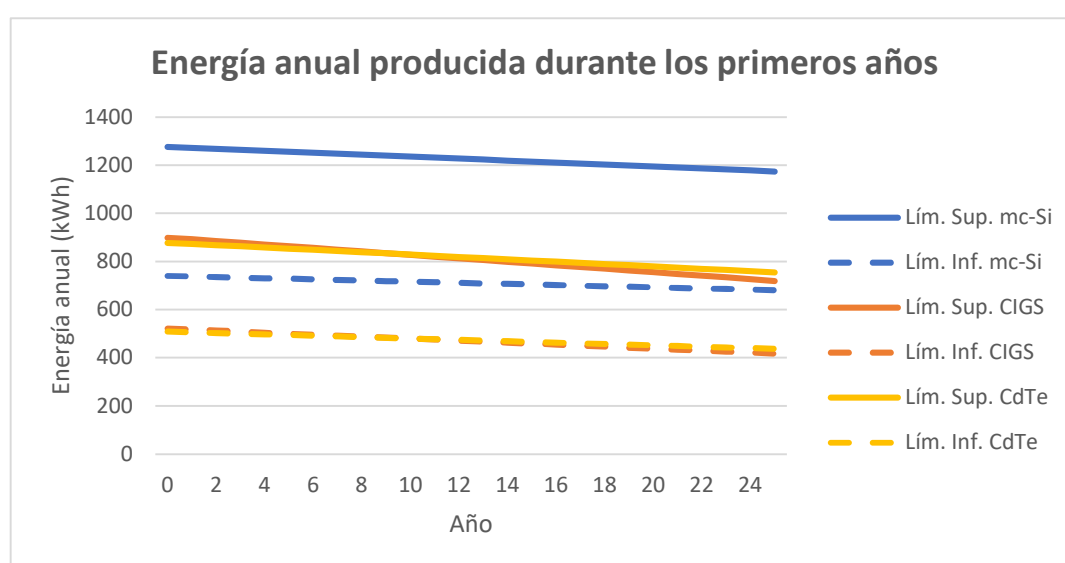


Figura 21. Energía anual producida y almacenada en batería durante 25 años de uso.



Curiosamente, aunque la eficiencia de los generadores de CIGS y CdTe es similar, la potencia instalada es algo superior en el generador de CIGS. Esto es debido a que para esta tecnología se utilizaron células en lugar de módulos, lo que permitió aprovechar de forma más eficiente el limitado espacio disponible. No obstante, el coeficiente de degradación es superior para el CIGS que para el CdTe, lo que hace que con el paso del tiempo el generador de CdTe llegue incluso a superar en energía producida al generador de CIGS.

Se quiso orientar el estudio a los vehículos destinados a operaciones logísticas en grandes ciudades europeas, lo que supone un patrón de uso que se corresponden con un consumo de 249,4 Wh/km. La Tabla 10 muestra los valores de autonomía diaria para este modo de utilización del vehículo, cubiertos de forma exclusiva con energía fotovoltaica. En la Figura 22 su representación gráfica. Una vez más, es necesario dejar constancia que estos valores se corresponden con el primer año de utilización y que, para conocer autonomía en años posteriores, es necesario aplicar los coeficientes de degradación de las células fotovoltaicas.

Como era de esperar, la eficiencia superior del generador de mc-Si proporciona una mayor autonomía al vehículo, permitiendo durante el mes de junio recorrer una distancia entre 21,27 y 12,33 km, en función de la cantidad de radiación recibida. El mes más desfavorable será diciembre, ofreciendo una autonomía que varía entre 6,73 y 3,9 km.

Por su parte, los generadores de CIGS y CdTe presentan valores similares entre ellos de autonomía, muy por debajo a la obtenida con mc-Si.

Autonomía diaria durante el primer año (km)						
Mes	mc-Si		CIGS		CdTe	
	Lím. Sup.	Lím. Inf.	Lím. Sup.	Lím. Inf.	Lím. Sup.	Lím. Inf.
Ene	7,68	4,46	5,51	3,19	5,28	3,06
Feb	10,06	5,83	7,19	4,17	6,91	4,01
Mar	13,33	7,73	9,47	5,49	9,16	5,31
Abr	16,63	9,64	11,75	6,82	11,43	6,63
May	19,16	11,11	13,46	7,81	13,17	7,64
Jun	21,27	12,33	14,85	8,62	14,63	8,49
Jul	20,86	12,10	14,52	8,42	14,36	8,33
Ago	18,70	10,84	13,04	7,56	12,87	7,46
Sep	14,66	8,50	10,30	5,97	10,09	5,85
Oct	11,07	6,42	7,84	4,55	7,61	4,42
Nov	7,87	4,57	5,62	3,26	5,41	3,14
Dic	6,73	3,90	4,83	2,80	4,62	2,68

Tabla 10. Autonomía diaria durante el primer año.

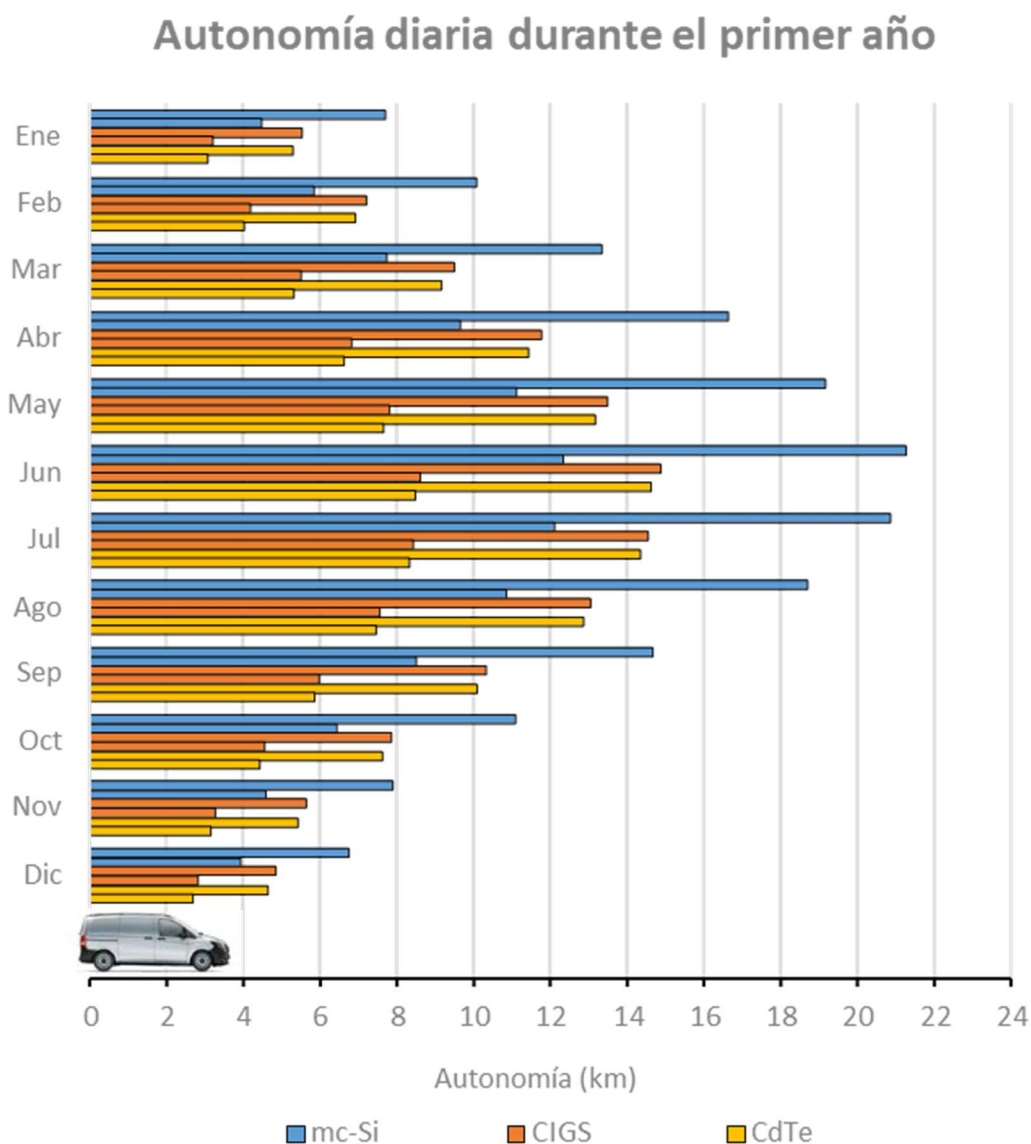


Figura 22. Autonomía diaria con uso exclusivo de energía fotovoltaica durante el primer año.

Comparado con otros estudios, los resultados que se muestran en este documento son algo inferiores a los recogidos en [9] y en [10], con autonomías que podían alcanzar hasta los 35 km y los 30 km respectivamente. Esto puede ser debido a varios factores, por ejemplo, los vehículos empleados para estos estudios eran mucho más ligeros, con consumos de un orden de magnitud por debajo de los valores calculados para la furgoneta. Además, se actuó de forma bastante conservadora a la hora de establecer el *performance ratio* en este trabajo, especialmente en cuanto a la eficiencia del bloque electrónico convertidor DC/DC (ver punto 3.4.2). Igualmente, las pérdidas por el proceso de carga de batería pueden ser mejoradas, dado el rápido avance tecnológico que se está observando en el desarrollo de baterías eléctricas para vehículos.

Conociendo la distancia diaria media recorrida por un vehículo de estas características (77,4 km, según [30]), se quiso conocer qué porcentaje de esta distancia sería cubierto con energía fotovoltaica. El resultado fue el que se muestra en la Tabla 11.



Porcentaje de distancia media diaria cubierta con energía solar (%)						
Mes	mc-Si		CIGS		CdTe	
	Lím. Sup.	Lím. Inf.	Lím. Sup.	Lím. Inf.	Lím. Sup.	Lím. Inf.
Ene	9,93	5,76	7,11	4,13	6,82	3,95
Feb	13,00	7,54	9,28	5,39	8,93	5,18
Mar	17,22	9,99	12,24	7,10	11,83	6,86
Abr	21,48	12,46	15,19	8,81	14,77	8,56
May	24,75	14,35	17,39	10,09	17,02	9,87
Jun	27,48	15,94	19,19	11,13	18,91	10,97
Jul	26,95	15,63	18,76	10,88	18,55	10,76
Ago	24,15	14,01	16,84	9,77	16,63	9,64
Sep	18,94	10,99	13,30	7,72	13,03	7,56
Oct	14,31	8,30	10,13	5,87	9,84	5,70
Nov	10,17	5,90	7,27	4,21	6,99	4,05
Dic	8,69	5,04	6,23	3,62	5,97	3,46

Tabla 11. Porcentaje de distancia media diaria cubierta con energía solar durante el primer año.

Como en los casos anteriores, el generador de mc-Si supera ampliamente a las demás tecnologías estudiadas, siendo capaz de cubrir en el mes de junio entre un 27,48 % y un 15,94 %. El mes más desfavorable vuelve a ser diciembre, donde el generador de mc-Si solo aportaría entre el 8,69 % y el 5,04 % de las necesidades diarias del vehículo.

Al igual que en los demás cálculos, estos valores se corresponden al primer año de utilización. Para conocer cómo evoluciona este dato a lo largo de los años es necesario aplicar los coeficientes de degradación anteriormente mencionados.

La representación gráfica de estos resultados se muestra en la Figura 23.

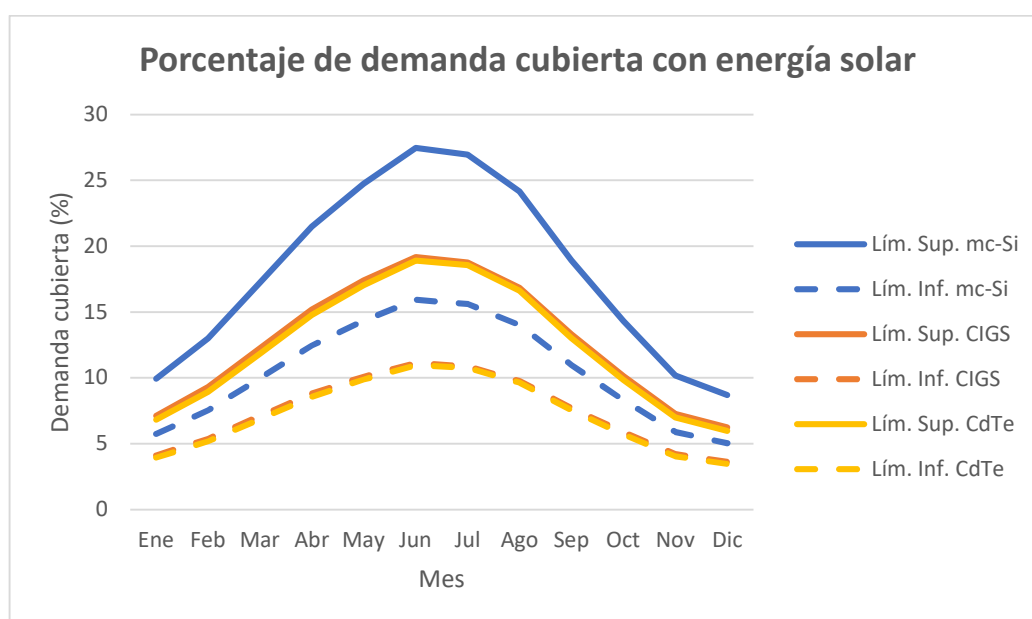


Figura 23. Porcentaje de distancia media diaria cubierta con energía solar durante el primer año.



4.2. Estudio ambiental

Como ya se indicó en el punto 3.5, el análisis ambiental sólo contiene los resultados del generador conformado por células de mc-Si, debido a su gran superioridad para producir energía frente a las demás tecnologías estudiadas y a que la reducción de emisiones de CO₂ es proporcional a la energía autogenerada por el propio vehículo. Es evidente que el mc-Si ofrecerá mejores resultados en este tipo de análisis.

Los resultados de las emisiones calculadas para cada versión del vehículo aparecen representados en la Tabla 12. Se calculó este dato para cada mes del año 2019. El Límite superior de la versión BEV con techo fotovoltaico representa un escenario ideal en el cual el vehículo aprovecha toda la radiación disponible, mientras que en el límite inferior este valor se ve reducido al 58 %. La tecnología fotovoltaica utilizada para este apartado es mc-Si.

Emisiones de CO ₂ de los vehículos estudiados durante el año 2019 (kg CO ₂ eq)				
Mes	Diésel	BEV	BEV + Techo PV	
			Lím. Sup.	Lím. Inf.
Ene	419,9	131,9	118,8	124,3
Feb	379,3	110,3	96,0	102,0
Mar	419,9	78,2	64,7	70,4
Abr	406,4	82,2	64,5	71,9
May	419,9	84,7	63,8	72,6
Jun	406,4	95,0	68,9	79,8
Jul	419,9	111,5	81,4	94,0
Ago	419,9	109,1	82,8	93,8
Sep	406,4	96,2	78,0	85,6
Oct	419,9	111,1	95,2	101,9
Nov	406,4	78,1	70,1	73,5
Dic	419,9	64,6	58,9	61,3
Anual	4943,9	1152,7	943,1	1031,1

Tabla 12. Emisiones de CO₂ calculadas para cada variante de la furgoneta estudiada durante el año 2019.

Si se restan las emisiones obtenidas para los dos límites (inferior y superior) del vehículo BEV con techo fotovoltaico del caso BEV sin techo fotovoltaico se obtienen los valores límite para las “emisiones evitadas” gracias a la inclusión de la tecnología fotovoltaica en el techo del vehículo. Estas cantidades se muestran para cada mes en la Tabla 13.



Emisiones evitadas de CO ₂ por el techo PV durante el año 2019 (kg CO ₂ eq)		
Mes	Lím. Superior	Lím. Inferior
Ene	13,1	7,6
Feb	14,3	8,3
Mar	13,5	7,8
Abr	17,6	10,2
May	21,0	12,2
Jun	26,1	15,1
Jul	30,0	17,4
Ago	26,4	15,3
Sep	18,2	10,6
Oct	15,9	9,2
Nov	7,9	4,6
Dic	5,6	3,3
Anual	209,7	121,6

Tabla 13. Emisiones evitadas de CO₂ por la inclusión del techo PV en la versión BEV del vehículo durante el año 2019.

En la Figura 24 se han representado de forma gráfica los valores obtenidos de las versiones Diésel y BEV para facilitar su comparación. Se observa claramente que el vehículo diésel es mucho más contaminante que el vehículo eléctrico. Aproximadamente cuatro veces superior. También es importante mencionar que, mientras que la furgoneta con motor diésel presenta emisiones constantes a lo largo del año, la furgoneta BEV lleva asociada una variabilidad que dependerá de la participación de cada energía en el mix energético de la red eléctrica nacional.

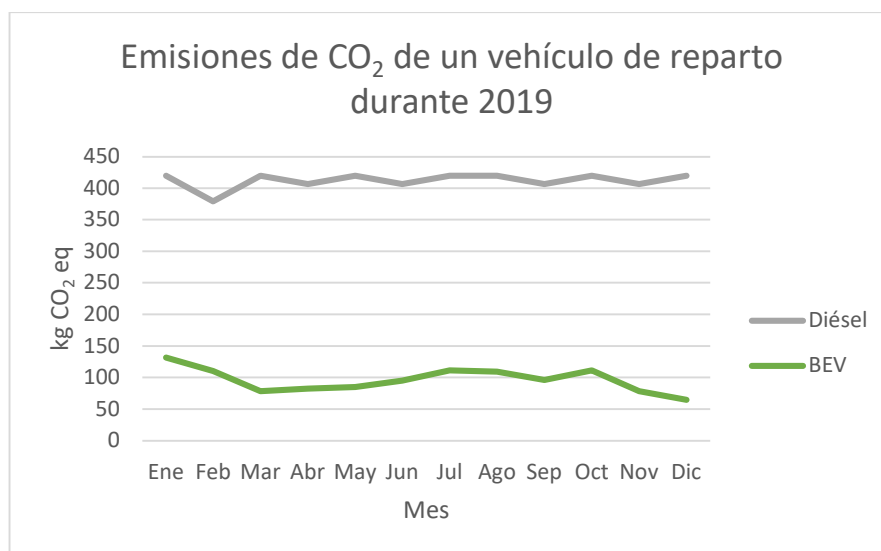


Figura 24. Emisiones de CO₂ del vehículo de reparto en sus versiones diésel y eléctrico durante el año 2019.

Se ha representado de forma aislada en la Figura 25 los resultados de las emisiones de la versión BEV con y sin techo fotovoltaico, junto con las emisiones evitadas por el techo fotovoltaico. Como era de esperar, el verano es el momento del año donde se aprecia una mayor diferencia entre los resultados obtenidos, siendo estos meses en los que el dispositivo fotovoltaico es capaz de reducir más las emisiones del vehículo eléctrico.

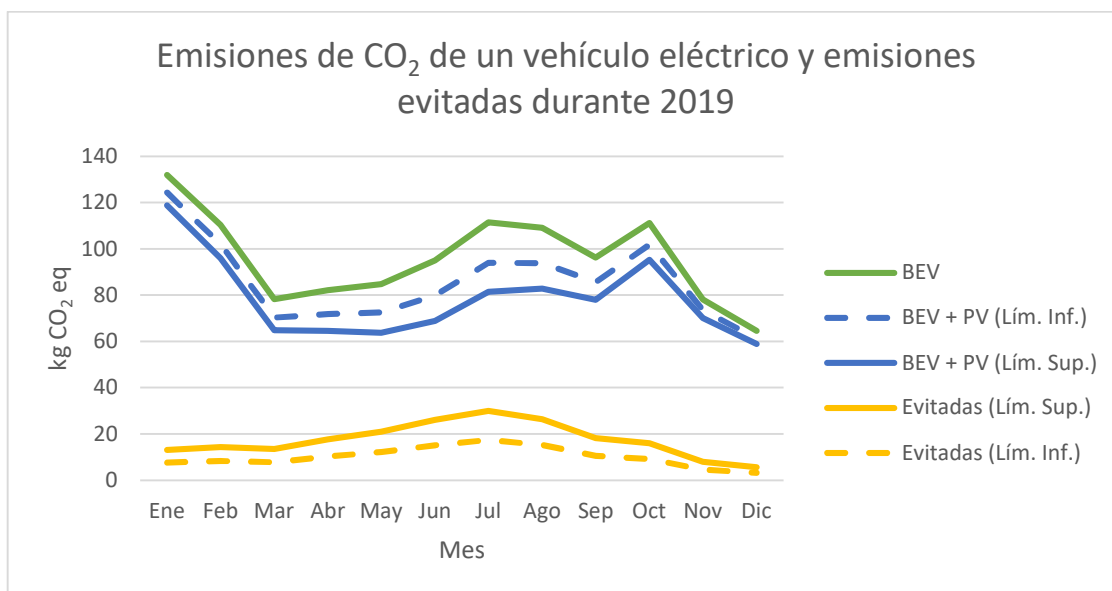


Figura 25. Emisiones de CO₂ equivalente del vehículo BEV con y sin techo fotovoltaico, junto con las emisiones evitadas por el techo fotovoltaico durante el año 2019.

Por otro lado, es interesante destacar los meses de febrero y marzo. Mientras que marzo es un mes con mayor irradiancia que febrero, la reducción de emisiones que produce el techo fotovoltaico es mayor en febrero que en marzo. A priori esto tendría poco sentido, ya que a mayor irradiancia mayor sería la energía autogenerada, y por tanto, mayores serían las emisiones evitadas.

No obstante, hay que destacar que el mes de marzo fue un mes donde la participación de energías libres de emisiones en el mix energético nacional fue más notable que en febrero. El factor de emisiones de CO₂ eq cayó fuertemente en marzo, lo que hizo que el efecto del uso del techo fotovoltaico se hiciera menos destacable.

El caso extremo lo tendríamos para un mix energético donde el 100 % de la energía fuese limpia. En este caso no tendría sentido la utilización de este dispositivo en lo que respecta a la reducción de gases de efecto invernadero.

Por último, dejar constancia de que **para una sola furgoneta BEV de reparto, el uso de un techo fotovoltaico supone una reducción entre 209,7 y 121,6 kg CO₂ eq. durante un año completo**, tal y como se muestra en la Tabla 13.



4.3. Análisis económico

El primer resultado a destacar del análisis económico es el importe de la inversión inicial (o sobre coste del vehículo). En la Tabla 14 se muestran los resultados.

Sobrecoste asociado al sistema fotovoltaico	
Tecnología	Inversión inicial (€)
mc-Si	1006,52
CIGS	1988,93
CdTe	1215,47

Tabla 14. Sobrecoste del vehículo asociado al sistema fotovoltaico, dependiendo del tipo de tecnología usada en las células.

El sistema fotovoltaico propuesto con tecnología de mc-Si es el más económico. Además, es el que más energía es capaz de producir por su superior potencia pico instalada. Estos dos factores provocan que, para esta tecnología, la inversión inicial sea más baja (fácil de amortizar y barrera de entrada más baja) y que los ahorros en energía sean mayores (beneficios más elevados y periodo de amortización más corto). Por lo tanto, no tiene sentido presentar los resultados de los sistemas fotovoltaicos basados en tecnologías de CIGS y CdTe, ya que desde el punto de vista económico tienen menos interés que el diseño con mc-Si.

Los resultados del balance económico elaborado para el sistema fotovoltaico basado en un generador de mc-Si se presentan en la Tabla 15. La columna flujo de caja muestra los resultados antes de la actualización de los precios (con la inflación asociada al IPC).

Los resultados muestran que para el límite superior se obtendrían VAN positivos en el año 8, mientras que para el límite inferior no se obtendría hasta el año 13. Este dato demuestra que **la recuperación de la inversión se producirá entre los años 8 y 13, en función de la radiación recibida por el sistema fotovoltaico.**

Por otro lado, la Tabla 15 muestra además los beneficios económicos en función de la vida útil del vehículo. Por ejemplo, **si el vehículo logra alcanzar una vida útil de 25 años, los beneficios económicos por el uso del dispositivo fotovoltaico estarán comprendidos entre 980,38 y 2419,16 €**, dependiendo de los niveles de radiación solar recibido por el techo del vehículo. Este dato para la vida útil puede parecer algo exagerado, ya que las compañías logísticas poseen planificaciones de renovación de flota con periodos de tiempo mucho más cortos. No obstante, que un vehículo sea renovado no significa que sea desechado, ya que muy probablemente sea vendido a otro usuario con otras necesidades, prolongando así la vida del vehículo.



Resultados del balance económico para el generador de mc-Si							
Año	Energía producida (kWh)		Precio de la energía (€/kWh)	Flujo de caja (€)		VAN (€)	
	Lím. Sup.	Lím. Inf.		Lím. Sup.	Lím. Inf.	Lím. Sup.	Lím. Inf.
0				-1006,51		-1006,51	
1	1276,33	740,27	0,1104	140,91	81,73	-867,22	-925,72
2	1272,24	737,90	0,1119	142,36	82,57	-728,12	-845,04
3	1268,16	735,53	0,1134	143,83	83,42	-589,19	-764,46
4	1264,07	733,16	0,1150	145,32	84,28	-450,44	-683,99
5	1259,99	730,79	0,1165	146,81	85,15	-311,88	-603,62
6	1255,91	728,43	0,1181	148,32	86,03	-173,50	-523,36
7	1251,82	726,06	0,1197	149,85	86,91	-35,31	-443,21
8	1247,74	723,69	0,1213	151,39	87,81	102,70	-363,17
9	1243,65	721,32	0,1230	152,94	88,71	240,52	-283,23
10	1239,57	718,95	0,1246	154,51	89,62	378,16	-203,40
11	1235,48	716,58	0,1263	156,09	90,53	515,60	-123,69
12	1231,40	714,21	0,1281	157,69	91,46	652,85	-44,08
13	1227,32	711,84	0,1298	159,30	92,39	789,91	35,41
14	1223,23	709,47	0,1316	160,92	93,34	926,77	114,79
15	1219,15	707,11	0,1333	162,56	94,29	1063,44	194,06
16	1215,06	704,74	0,1352	164,22	95,25	1199,92	273,22
17	1210,98	702,37	0,1370	165,89	96,22	1336,20	352,26
18	1206,90	700,00	0,1388	167,57	97,19	1472,28	431,19
19	1202,81	697,63	0,1407	169,27	98,18	1608,15	510,00
20	1198,73	695,26	0,1426	170,99	99,17	1743,83	588,69
21	1194,64	692,89	0,1446	172,72	100,18	1879,31	667,26
22	1190,56	690,52	0,1465	174,47	101,19	2014,58	745,72
23	1186,47	688,15	0,1485	176,23	102,21	2149,64	824,06
24	1182,39	685,79	0,1505	178,01	103,24	2284,50	902,28
25	1178,31	683,42	0,1526	179,80	104,29	2419,16	980,38

Tabla 15. Resultados del análisis económico realizado para el sistema fotovoltaico con generador de mc-Si.



5. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se propone el diseño de un sistema fotovoltaico aislado, orientado a vehículos de categoría N1 dedicados al transporte logístico en núcleos urbanos de grandes ciudades europeas. Para determinar el comportamiento y las necesidades energéticas de estos vehículos se buscaron estadísticas de usos dentro del proyecto FREVUE, que determinaron que los vehículos de categoría N1 orientados a tareas logísticas recorrían una distancia media diaria de 77,4 km, con una velocidad media de 17,2 km/h y un tiempo de uso de 5,8 horas.

Para el diseño del generador fotovoltaico se plantearon varios diseños con diferentes tecnologías fotovoltaicas para poder comparar y decidir cuál de ellas es la más apropiada para esta aplicación. Los criterios de selección fueron buscar tecnologías fotovoltaicas maduras, con soluciones comerciales reales, con altas eficiencias y óptimas dimensiones que permitieran cubrir la mayor parte de área disponible. Las tecnologías fotovoltaicas elegidas fueron: mc-Si, CIGS y CdTe.

El vehículo en movimiento provocará en ocasiones sombras indeseadas sobre la superficie de las células. Para este trabajo se establecieron límites de radiación recibida que acotarían a la mayoría de los vehículos con similares características. El límite superior consiste en un escenario ideal donde el techo aprovecharía el 100 % de la radiación horizontal disponible, mientras que el límite inferior define un escenario donde el generador fotovoltaico solo recibe el 58 % de la radiación. Todos los resultados obtenidos están acotados siguiendo este criterio.

Dentro de las tres tecnologías estudiadas, el mc-Si es la que demostró mejores resultados en el análisis energético gracias a su alta eficiencia. Se obtuvieron mejores resultados durante los meses de verano, debido a los elevados niveles de irradiancia. El mc-Si sería capaz de cubrir entre el 27,48 % y el 15,94 % de la demanda diaria de energía durante el mes de junio, alcanzando una autonomía diaria entre 21,27 y 12,33 km. El mes más desfavorable sería diciembre, donde solo se aportaría entre el 8,69 % y el 5,04 % de las necesidades diarias del vehículo. Estos datos se corresponden con el primer año de uso del vehículo, que decrecerían año tras año según el coeficiente de degradación del mc-Si (0,32 %/año según el fabricante).

El análisis ambiental demostró que las emisiones evitadas por un único vehículo con techo fotovoltaico de mc-Si durante un año completo se encontrarían entre los 209,7 y 121,6 kg CO₂ eq., dentro de las condiciones del mix energético español. Estos valores decrecerían año tras año al ritmo marcado por el coeficiente de degradación de las células.

El sistema fotovoltaico más rentable es el propuesto con tecnología de mc-Si, debido a su bajo coste y a la capacidad de producir más energía que las otras tecnologías estudiadas. Los resultados muestran que la recuperación de la inversión se producirá entre los años 8 y 13 de vida del vehículo. Por otro lado, si el vehículo logra alcanzar una vida útil de 25 años, los beneficios económicos estarán comprendidos entre 980,38 y 2419,16 €.

El conjunto de análisis realizados en este trabajo determinó que el mc-Si es la tecnología más interesante para este tipo de aplicaciones. Su elevada eficiencia (24,3 %) es fundamental a la hora de conseguir la máxima potencia pico en una superficie reducida. Al ser una tecnología madura es fácil encontrar soluciones comerciales en forma de células, en lugar de módulos; lo que supone una ventaja por su



modularidad a la hora de aprovechar al máximo la superficie disponible. Su precio, relativamente bajo, minimiza el importe de la inversión inicial y asegura la viabilidad económica.

Como trabajos futuros para continuar esta línea de trabajo se proponen estudios con tecnologías fotovoltaicas emergentes (su ligereza y mejoras en eficiencia pueden ayudar a disminuir el consumo y aumentar la energía producida). Estudios de campo orientados a vehículos para el transporte de mercancías donde se estime la cantidad de radiación recibida por su techo. Estudios de campo para vehículos comerciales donde se determine la influencia del techo fotovoltaico en la dinámica y los consumos.



6. Bibliografía

- [1] Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, «CAMBIO CLIMÁTICO 2014. Informe de síntesis».
- [2] «Informe de inventario nacional gases de efecto invernadero», Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Gobierno de España, abr. 2020.
- [3] International Energy Agency, *Global EV Outlook 2019: Scaling-up the transition to electric mobility*. OECD, 2019.
- [4] «Web Of Science». <https://www.recursoscientificos.fecyt.es/>.
- [5] Z. Łukasik, «A method of calculating CO₂ emission savings obtained by the use of innovative technology of photovoltaic roof of cars supporting battery charge», *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, vol. 1, n.º 2, pp. 191-194, feb. 2018, doi: 10.15199/48.2018.02.43.
- [6] «DECISIÓN DE EJECUCIÓN (UE) 2016/ 1926 DE LA COMISIÓN - de 3 de noviembre de 2016 - relativa a la aprobación del techo fotovoltaico cargador de baterías como tecnología innovadora para la reducción de las emisiones de CO₂ de los turismos de conformidad con el Reglamento (CE) n.º 443/ 2009 del Parlamento Europeo y del Consejo», p. 7.
- [7] «Reglamento de Ejecución (UE) no 725/2011 de la Comisión, de 25 de julio de 2011, por el que se establece un procedimiento de aprobación y certificación de tecnologías innovadoras para reducir las emisiones de CO₂ de los turismos, de conformidad con el Reglamento (CE) no 443/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo Texto pertinente a efectos del EEE», p. 6.
- [8] C. Lodi, A. Seitsonen, E. Paffumi, M. De Gennaro, T. Huld, y S. Malfettani, «Reducing CO₂ emissions of conventional fuel cars by vehicle photovoltaic roofs», *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, vol. 59, pp. 313-324, mar. 2018, doi: 10.1016/j.trd.2018.01.020.
- [9] Q. Su, G. Zhang, J. Lai, S. Feng, y W. Shi, «Green Solar Electric Vehicle Changing the Future Lifestyle of Human», *World Electr. Veh. J.*, vol. 4, n.º 1, pp. 128-132, mar. 2010, doi: 10.3390/wevj4010128.
- [10] S. De Pinto *et al.*, «Electric Vehicle Driving Range Extension Using Photovoltaic Panels», en *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Hangzhou, China, oct. 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/VPPC.2016.7791674.
- [11] Y. Ota, T. Masuda, K. Araki, y M. Yamaguchi, «Curve-Correction Factor for Characterization of the Output of a Three-Dimensional Curved Photovoltaic Module on a Car Roof», *Coatings*, vol. 8, n.º 12, p. 432, nov. 2018, doi: 10.3390/coatings8120432.
- [12] J. Macías Rodríguez, R. Herrero, I. Antón Hernández, y R. Núñez, «6CV.2.21 Evaluation of the Solar Resource and Energy Generation in Vehicle Integrated Photovoltaics», EU PVSEC, sep. 09, 2020, [En línea]. Disponible en: https://www.eupvsec-planner.com/presentations/c49461/evaluation_of_the_solar_resource_and_energy_generation_in_vehicle_integrated_photovoltaics.htm.
- [13] T. Koyuncu, «Practical Efficiency of Photovoltaic Panel Used for Solar Vehicles», *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 83, p. 012001, ago. 2017, doi: 10.1088/1755-1315/83/1/012001.
- [14] C. Pisanti, «Design and Energetic Evaluation of a Mobile Photovoltaic Roof for Cars», *Energy Procedia*, vol. 81, pp. 182-192, dic. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.073.
- [15] M. Giannouli y P. Yianoulis, «Study on the incorporation of photovoltaic systems as an auxiliary power source for hybrid and electric vehicles», *Sol. Energy*, vol. 86, n.º 1, pp. 441-451, ene. 2012, doi: 10.1016/j.solener.2011.10.019.
- [16] S. K. Parida y D. Mishra, «Proposal of an Integrated Photovoltaic Solar Powered Vehicle», vol. 5, n.º 2, p. 8.



- [17] L. Qi *et al.*, «A portable solar-powered air-cooling system based on phase-change materials for a vehicle cabin», *Energy Convers. Manag.*, vol. 150, pp. 148-158, oct. 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.07.067.
- [18] T.-T. Nguyen, H. W. Kim, G. H. Lee, y W. Choi, «Design and implementation of the low cost and fast solar charger with the rooftop PV array of the vehicle», *Sol. Energy*, vol. 96, pp. 83-95, oct. 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.07.006.
- [19] N. Shafiei, M. Ordóñez, M. A. Sabet Tokaldani, y S. A. Arefifar, «PV Battery Charger Using an $\$L3C\$\$ Resonant Converter for Electric Vehicle Applications», *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 4, n.º 1, pp. 108-121, mar. 2018, doi: 10.1109/TTE.2018.2792323.$
- [20] Y. Hu, C. Gan, W. Cao, Y. Fang, S. J. Finney, y J. Wu, «Solar PV-Powered SRM Drive for EVs With Flexible Energy Control Functions», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, n.º 4, pp. 3357-3366, jul. 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2533604.
- [21] Z. H. Yu, J. Zeng, y J. F. Liu, «An ultra-high-voltage gain DC-DC converter for roof-mounted solar cells electric vehicle», en *2017 7th International Conference on Power Electronics Systems and Applications - Smart Mobility, Power Transfer & Security (PESA)*, Hong Kong, dic. 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESA.2017.8277723.
- [22] D. S. Shugar y S. Bruno, «PHOTOVOLTAIC ROOFASSEMBLY», p. 17.
- [23] V. Khare y A. Bunglowala, «Design and assessment of solar-powered electric vehicle by different techniques», *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 30, n.º 4, abr. 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12271.
- [24] M. A. Spina *et al.*, «Some Issues on the Design of a Solar Vehicle Based on Hybrid Energy System», *Int. J. Energy Eng.*, vol. 2, n.º 1, pp. 15-21, ago. 2012, doi: 10.5923/j.ijee.20120201.03.
- [25] M. Farooq, A. Salman, S. A. Siddiqui, M. Ibrahim Khalil, y W. Mukhtar, «Economically designed solar car for developing countries (Pakistan)», en *IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC 2014)*, San Jose, CA, oct. 2014, pp. 356-360, doi: 10.1109/GHTC.2014.6970305.
- [26] K. R. B.S. y A. Poondla, «Performance analysis of solar powered Unmanned Aerial Vehicle», *Renew. Energy*, vol. 104, pp. 20-29, abr. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.12.008.
- [27] «Directiva 2007/46/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de septiembre de 2007». .
- [28] FENERCOM, «Guía del Vehículo Eléctrico II». 2015.
- [29] «FREVUE Project (Validating Freight Electric Vehicles in Urban Europe)». <https://frevue.eu/>.
- [30] Terje Tretvik, Isabelle Roche Cerasi, y Erlend Dahl, «Validating Freight Electric Vehicles in Urban Europe. Publishable Executive Summary of D3.1 Technical Suitability of EVs or Logistics», may 2017. [En línea]. Disponible en: <https://frevue.eu/wp-content/uploads/2017/08/FREVUE-D3.1-Publishable-Technical-Summary.pdf>.
- [31] Mercedes-Benz, «The Mercedes-Benz eVito. Model information & price list.» ene. 2020.
- [32] Mercedes-Benz, «Directriz para el montaje de carrocerías de furgonetas. eVito - Directriz adicional a la Directriz para el montaje de carrocerías Vito/Clase V.» 2019.
- [33] «Catálogo Maxeon. Células Maxeon Gen III.» <https://us.sunpower.com/solar-resources/sunpower%20AE-maxeon%E2%84%A2-gen-iii-solar-cells>.
- [34] «Catálogo Células Miasolé.» http://miasole.com/wp-content/uploads/2014/09/SolarCell_Datasheet_5.pdf.
- [35] «Catálogo First Solar. Módulos FS-4122-3 y FS-4122A-3.» <http://www.firstsolar.com/en-Emea/-/media/First-Solar/Technical-Documents/Series-4-Datasheets/Series-4V3-Module-Datasheet.ashx>.
- [36] Mercedes-Benz, «Directrices para la construcción y el montaje de carrocerías y estructuras adosadas en Vito/Clase V - BR 447, Edición AeJ2019-1a». 2019.
- [37] «PVGIS - Photovoltaic Geographical Information System». <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>.
- [38] «Catálogo Texas Instruments. TIDA-00951».
https://www.ti.com/lit/ug/tidud04/tidud04.pdf?ts=1597918224858&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Ftool%252FTIDA-00951.
- [39] J. Zorrilla-Casanova *et al.*, «Analysis of Dust Losses in Photovoltaic Modules», nov. 2011, pp. 2985-2992, doi: 10.3384/ecp110572985.



- [40] M. Zima-Bockarjova, A. Sauhats, L. Petrichenko, y R. Petrichenko, «Charging and Discharging Scheduling for Electrical Vehicles Using a Shapley-Value Approach», *Energies*, vol. 13, n.º 5, p. 1160, mar. 2020, doi: 10.3390/en13051160.
- [41] A. Marotta, J. Pavlovic, B. Ciuffo, S. Serra, y G. Fontaras, «Gaseous Emissions from Light-Duty Vehicles: Moving from NEDC to the New WLTP Test Procedure», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, n.º 14, pp. 8315-8322, jul. 2015, doi: 10.1021/acs.est.5b01364.
- [42] Mercedes-Benz, «The Mercedes-Benz Vito. Panel and Crew Van models.» ene. 2020.
- [43] Red Eléctrica de España, «Boletín mensual. Diciembre 2019», dic. 2019.
<https://www.ree.es/es/datos/publicaciones/boletines-mensuales/boletin-mensual-diciembre-2019>.
- [44] «Eurostat. Electricity price statistic». https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_price_statistics.
- [45] «Instituto Nacional de Estadística. Índice de Precios de Consumo». <https://www.ine.es/dynt3/inebase/es/index.htm?padre=3470&capsel=3466>.
- [46] «Catálogo Maxeon. Módulo Maxeon 3 / 400W.» https://sunpower.maxeon.com/uk/sites/default/files/2019-12/sp_MAX3-400-395-390_ds_en_a4_mc4_532418B.v4.pdf.
- [47] «Catálogo Miasolé. Módulo Flex-02N». http://miasole.com/wp-content/uploads/2015/08/FLEX-02N_Datasheet_6.pdf.
- [48] «Catálogo Victron energy. SmartSolar MPPT 100/20-48V.» https://www.victronenergy.com/es/upload/documents/Datasheet-SmartSolar-charge-controller-MPPT-75-10,-75-15,-100-15,-100-20,-100-20_48V-ES.pdf.



Anexo I. Información adicional del vehículo de base

El vehículo elegido para realizar los estudios que se recogen en este trabajo ha sido la furgoneta Mercedes-Benz eVito Van Pure L3. Toda la información contenida en este anexo ha sido seleccionada de los documentos *The Mercedes-Benz eVito. Model information & price list* [31] y *Directriz para el montaje de carrocerías de furgonetas. eVito - Directriz adicional a la Directriz para el montaje de carrocerías Vito/Clase V* [32].

Datos técnicos

Masas	
Masa máxima técnicamente admisible	3.200 kg
Masa en orden de marcha	2.302 kg
Carga útil	898 kg

Motor	
Potencia máxima del motor	85 kW (116 CV)
Potencia constante del motor	70kW
Par motor máximo	295 Nm
Tracción	Eje delantero

Batería	
Capacidad máxima de batería	41,4 kWh
Capacidad útil de batería	35 kWh
Tensión nominal de batería	365 V (hasta un máximo de 420 V)
Tipo de batería	Ion-Litio
Recarga (Potencia / tiempo)	CA 7,2 kW / 6 horas aprox. (de 0 % a 100 %)

Autonomía	
Ciclo combinado	148 km
Low (extra urbano)	166 km
Medium (urbano)	166 km
High (rural)	153 km
Extra High (autovía)	130 km

Tabla 16. Datos técnicos del vehículo. Elaboración propia con la información de [24] y [25].

Dimensiones

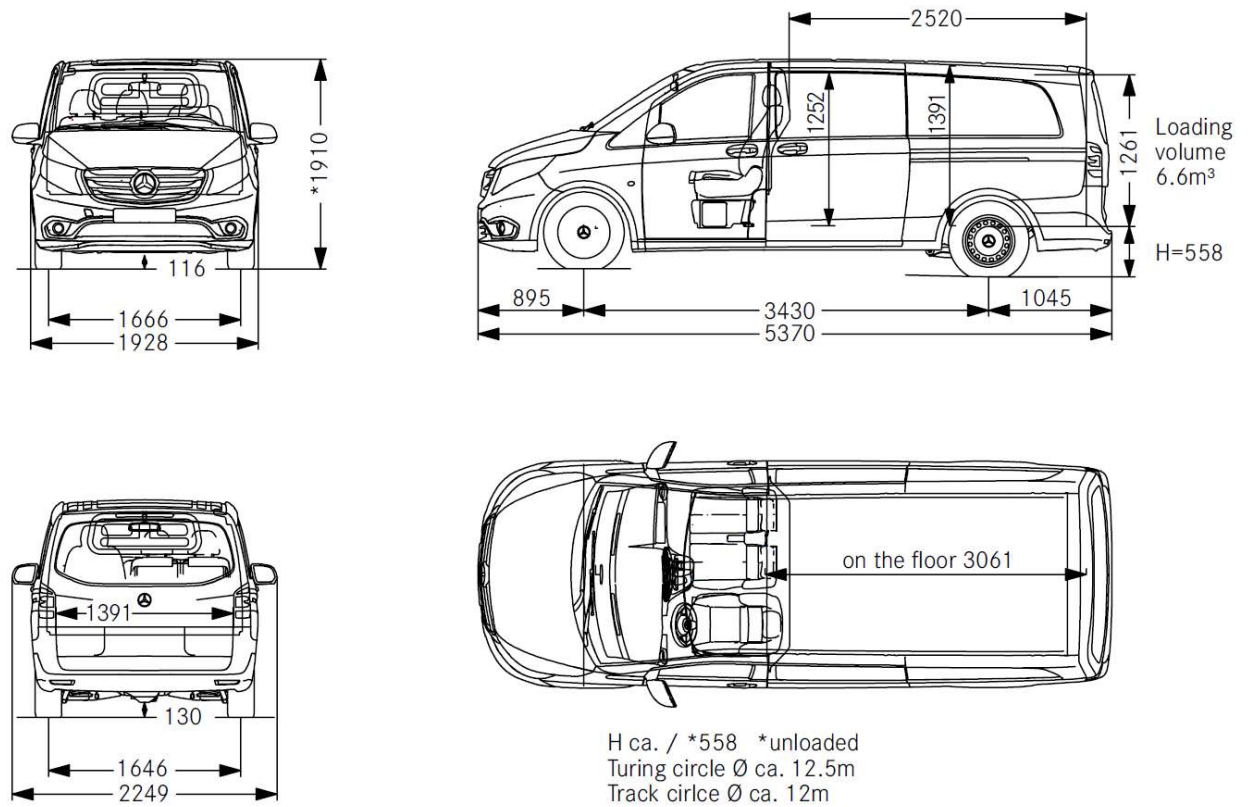


Figura 26. Croquis acotado del vehículo de base [31].

Disposición del banco de baterías

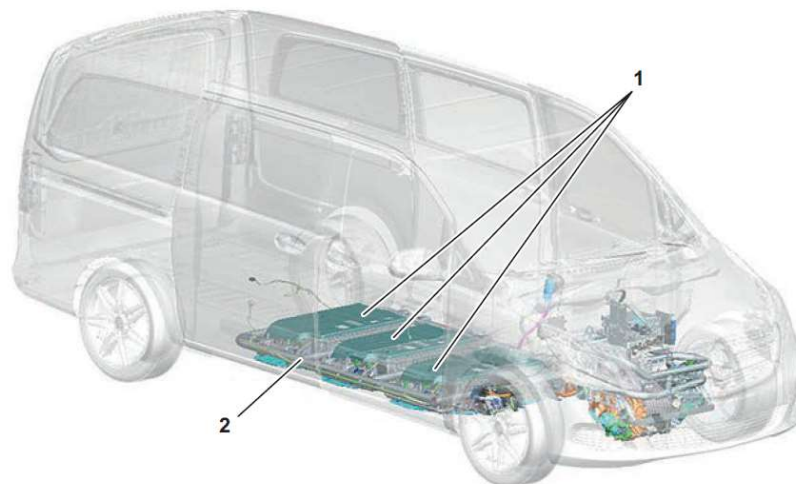


Figura 27. Disposición del banco de baterías [32].

- (1) Baterías de alto voltaje
- (2) Marco protector para las baterías de alto voltaje

Anexo II. Estimación del área disponible en el techo del vehículo

El sistema fotovoltaico a diseñar presenta, por sus peculiaridades, una serie de condiciones iniciales atípicas y complejas. La primera de ellas es la limitada e irregular superficie disponible para la ubicación del generador fotovoltaico. El techo, por su disposición y dimensiones, es la parte de la carrocería del vehículo que presenta mayores ventajas para la colocación del generador fotovoltaico.

Para la estimación de la superficie disponible se tomaron los planos acotados del vehículo que se incluyen en el documento *The Mercedes-Benz eVito. Model information & price list*, emitido en enero de 2020 [31]. Dichos planos fueron importados al programa Catia v5 y dispuestos en los planos horizontal, longitudinal y transversal para ser usados como proyecciones. Se definieron las aristas del perímetro del techo del vehículo mediante combinaciones de líneas realizadas con la herramienta *Sketch* en los diferentes planos. La superficie del techo fue definida mediante la herramienta *Multi-sections Surface*, tomando como secciones y guías las aristas que definen el perímetro del techo. El resultado se muestra en la Figura 28 y Figura 29.

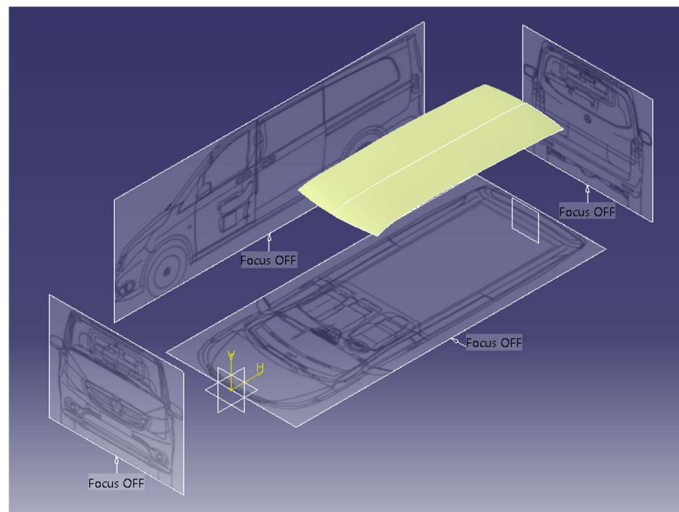


Figura 28. Digitalización del techo del vehículo. Captura 1.

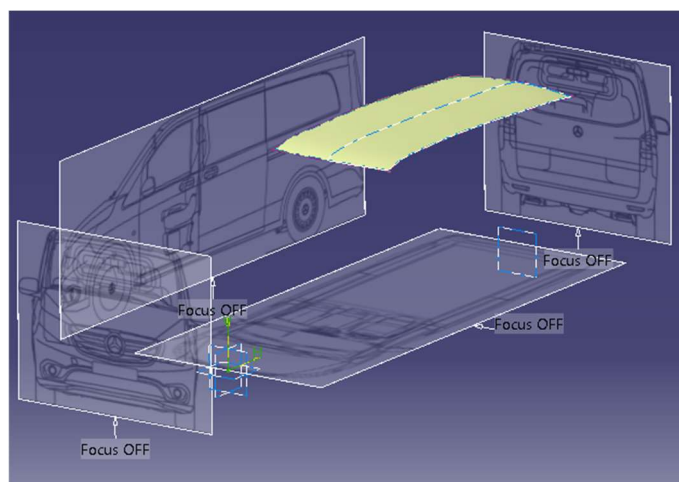


Figura 29. Digitalización del techo del vehículo. Captura 2.

El área disponible en la superficie del techo es de $4,522 \text{ m}^2$. Este dato fue obtenido haciendo uso de la herramienta *Measure Item* de Catia v5.

En la Figura 30 se muestran las dimensiones del techo del vehículo. Las cotas están expresadas en milímetros.

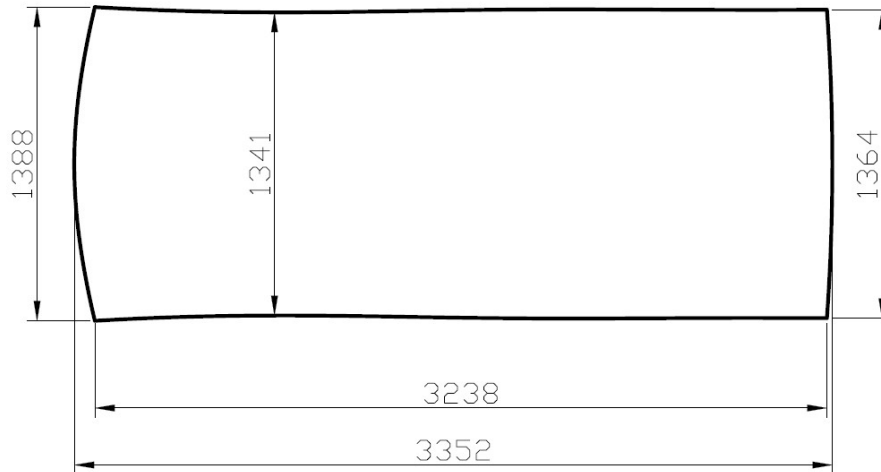


Figura 30. Dimensiones del techo. Cotas expresadas en milímetros.

Para cálculos posteriores se quiso conocer el área de la superficie del techo proyectada sobre un plano horizontal. Para ello se definió un plano horizontal adicional para realizar dicha proyección, tal y como se ve en la Figura 31. El área proyectada del techo sobre el plano horizontal es de $4,502 \text{ m}^2$.

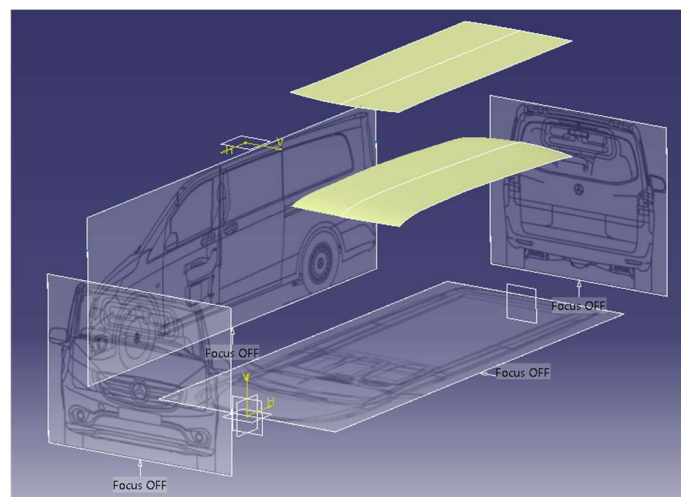


Figura 31. Digitalización del techo y proyección sobre un plano horizontal.



Anexo III. Tecnologías fotovoltaicas y generadores propuestos

Dentro de los objetivos del proyecto se pretendía realizar una comparación de diferentes tecnologías fotovoltaicas para así poder determinar cuál de ellas se ajusta mejor a esta aplicación. La búsqueda realizada atendió a los criterios: tecnologías maduras con soluciones comerciales reales, eficiencias elevadas y dimensiones adecuadas para aprovechar al máximo la limitada superficie disponible. Siempre que fue posible se seleccionaron células fotovoltaicas en lugar de módulos, ya que permite mayor flexibilidad a la hora de colocarlas sobre el techo.

Las tecnologías fotovoltaicas elegidas, junto con sus módulos y células seleccionados, son:

- Silicio monocristalino (mc-Si) / Células **Maxeon Gen III 3.72**
- Cobre, Indio, Galio y Selenio (CIGS) / Células **MiaSolé** (eficiencia 17 %)
- Telururo de Cadmio (CdTe) / Módulos **First Solar FS-4122-3 ó FS-4122A-3**

Se ha elaborado la siguiente tabla a modo de comparativa desde los datos de catálogo [33]–[35], [46], [47]. En el Anexo V se pueden consultar los datos técnicos de los catálogos.

Fabricante / Modelo	MAXEON / GEN III 3.72	MiaSolé / Eficiencia 17 %	First Solar / FS-4122-3 ó FS-4122A-3
Tecnología	mc-Si	CIGS	CdTe
Potencia por unidad (Wp)	3,72	2,32	122,5
Eficiencia según fabricante (%)	24,3	17	17
V_{mpp} (V)	0,632	0,545	71,5
I_{mpp} (A)	5,89	4,25	1,71
V_{oc} (V)	0,73	0,673	88,7
I_{sc} (A)	6,18	4,7	1,85
Peso del módulo (kg)	19 kg /módulo ⁽¹⁾	2,9 kg/m ² ⁽¹⁾	12
NOCT (°C)	45 ⁽²⁾	48	45
Coef. Temp. potencia (%/°C)	-0,29	-0,38	-0,28
Dimensiones - longitud (mm)	125	312	1200
Dimensiones - anchura (mm)	125	43,75	600
Dimensiones - grosos (mm)	40 ⁽³⁾	2,5	6,8
Potencia a los 25 años (%)	92 ⁽⁴⁾	80 ⁽⁴⁾	86

Tabla 17. Comparativa de células y módulos según información suministrada por el fabricante [33]–[35], [46], [47].

Para estimar algunos de los datos de la Tabla 17 se tomaron las siguientes consideraciones:

- ⁽¹⁾ Para poder realizar una aproximación del peso de los generadores fotovoltaicos conformados por células (el caso de las células Maxeon y MiaSolé), se han tomado los valores de módulos de la misma marca que utilizan las mismas células [46], [47]. Se ha tomado esta hipótesis ya que el módulo fotovoltaico contiene más elementos además de las células (conexiones, marcos, vidrios, etc.) que también deben ser tomados en consideración para estimar el peso. En el caso del

Módulo Maxeon el peso es de 19 kg para un módulo de 140 células. Para el módulo MiaSolé, el fabricante declaraba el valor del peso por unidad de superficie: 2,9 kg/m².

- (2) No se encontró el valor del NOCT para la célula Maxeon. Este valor fue tomado de catálogos de la misma marca que usan la misma tecnología fotovoltaica.
- (3) El grosor del generador conformado por células Maxeon se estimó de los datos del módulo que usa las mismas células, para tener en cuenta el grosor de los marcos [46]. Esta estimación no fue necesaria para las células de MiaSolé, ya que en este caso, las células disponen de un adhesivo en su parte posterior y no precisan de marco.
- (4) La degradación de la célula a los 25 años se obtuvo de la página web del fabricante.

Partiendo de las dimensiones indicadas por los fabricantes en sus catálogos, se planteó el modo óptimo para colocar las células y módulos en el techo del vehículo. En las siguientes figuras se muestra de forma gráfica la disposición propuesta para cada modelo.

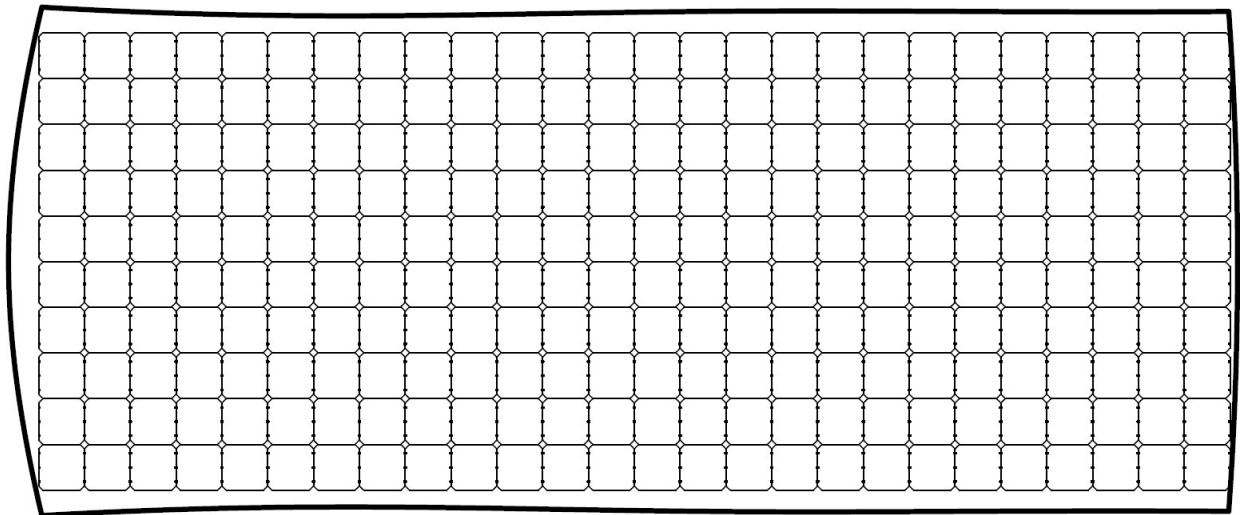


Figura 32. Disposición de las células Maxeon (mc-Si) sobre el techo de la furgoneta. 26x10 células.

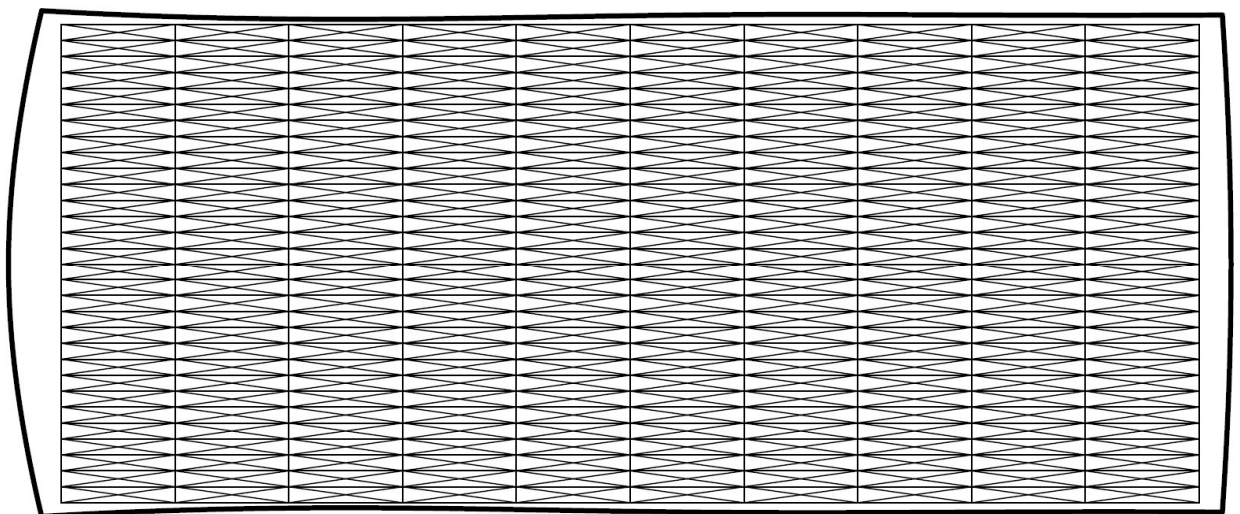


Figura 33. Disposición de las células MiaSolé (CIGS) sobre el techo de la furgoneta. 10x30 células.

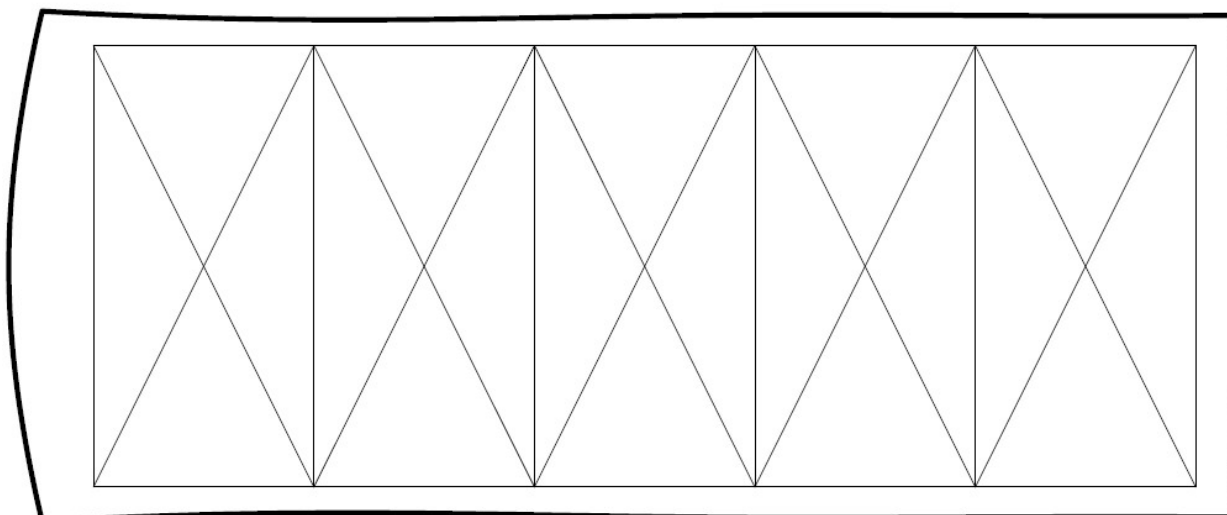


Figura 34. Disposición de los módulos First Solar (CdTe) sobre el techo de la furgoneta. 5 módulos.

Una vez conocido la cantidad de células o módulos que el techo es capaz de albergar se determinaron las características técnicas del generador fotovoltaico para cada tecnología, recogidas en la Tabla 18. La configuración de elementos conectados en serie y paralelo se realizó acorde a los valores máximos de tensión y corriente que la entrada del regulador MPPT puede soportar.

Fabricante / Modelo	MAXEON / GEN III 3.72	MiaSolé / Eficiencia 17 %	First Solar / FS-4122-3 ó FS-4122A-3
Tecnología	mc-Si	CIGS	CdTe
Disposición sobre el techo	26x10	10x30	5x1
No. total de unidades	260	300	5
Asociación en serie/paralelo	130 / 2	100 / 3	1 / 5
V_{mpp,G} (V)	82,16	54,5	71,5
I_{mpp,G} (A)	11,78	12,75	8,55
V_{oc,G} (V)	94,9	67,3	88,7
I_{sc,G} (A)	12,36	14,1	9,25
Area real del generador PV (m2)	4,063	4,095	3,6
Potencia del generador PV (Wp)	967,2	696	612,5
Peso generador PV (kg)	47,5 ⁽¹⁾	11,88	60
Precio estimado generador PV (€)	721,68 ⁽²⁾	1704,1 ⁽³⁾	930,64 ⁽⁴⁾

Tabla 18. Características técnicas de los generadores fotovoltaicos propuestos.

Para algunos de los valores estimados se tomaron las siguientes consideraciones:

- (1) Dato estimado partiendo de los 19 kg que pesa el módulo de 140 células del mismo fabricante.
- (2) Dato estimado partiendo de los 291 € que vale el módulo de 390 Wp del mismo fabricante.
- (3) Dato estimado partiendo de los 293,81 € que vale el módulo de 120 Wp del mismo fabricante.
- (4) Dato estimado partiendo de los 182,33 € que vale el módulo de 120 Wp del mismo fabricante.



Anexo IV. Datos climáticos de la ciudad de Cartagena

Los datos meteorológicos de la ciudad de Cartagena se tomaron de la página web de PVGIS, de la Comisión Europea, para las coordenadas 37.600, -0.979 y de la base de datos PVGIS-SARAH [37].

Enero

Hora	Irradiancia global en plano horizontal (W/m ²)	Temperatura ambiente (°C)
0:45	0	12,85
1:45	0	12,72
2:45	0	12,51
3:45	0	12,3
4:45	0	12,09
5:45	0	11,93
6:45	0	11,76
7:45	0	11,59
8:45	0	11,7
9:45	88	11,81
10:45	227	11,92
11:45	333	12,5
12:45	414	13,08
13:45	434	13,67
14:45	427	13,76
15:45	356	13,84
16:45	247	13,93
17:45	110	13,81
18:45	1	13,69
19:45	0	13,57
20:45	0	13,46
21:45	0	13,34
22:45	0	13,22
23:45	0	13,04

Febrero

Hora	Irradiancia global en plano horizontal (W/m ²)	Temperatura ambiente (°C)
0:45	0	12,82
1:45	0	12,68
2:45	0	12,47
3:45	0	12,26
4:45	0	12,05
5:45	0	11,89
6:45	0	11,73
7:45	0	11,57
8:45	11	11,70
9:45	149	11,84
10:45	289	11,98
11:45	409	12,50
12:45	508	13,02
13:45	535	13,54
14:45	517	13,59
15:45	456	13,64
16:45	352	13,68
17:45	205	13,57
18:45	44	13,45
19:45	0	13,34
20:45	0	13,22
21:45	0	13,10
22:45	0	12,98
23:45	0	12,90



Marzo

Hora	Irradiancia global en plano horizontal (W/m ²)	Temperatura ambiente (°C)
0:45	0,00	13,62
1:45	0,00	13,36
2:45	0,00	13,17
3:45	0,00	12,99
4:45	0,00	12,81
5:45	0,00	12,64
6:45	0,00	12,48
7:45	0,00	12,31
8:45	100,00	12,74
9:45	265,00	13,18
10:45	413,00	13,61
11:45	545,00	13,99
12:45	627,00	14,37
13:45	657,00	14,76
14:45	639,00	14,78
15:45	559,00	14,80
16:45	440,00	14,83
17:45	288,00	14,70
18:45	125,00	14,58
19:45	1,00	14,45
20:45	0,00	14,30
21:45	0,00	14,16
22:45	0,00	14,01
23:45	0,00	13,81

Abril

Hora	Irradiancia global en plano horizontal (W/m ²)	Temperatura ambiente (°C)
0:45	0,00	15,42
1:45	0,00	15,23
2:45	0,00	15,05
3:45	0,00	14,88
4:45	0,00	14,70
5:45	0,00	14,59
6:45	0,00	14,48
7:45	57,00	14,37
8:45	212,00	14,88
9:45	383,00	15,39
10:45	544,00	15,90
11:45	677,00	16,03
12:45	744,00	16,15
13:45	765,00	16,28
14:45	722,00	16,30
15:45	657,00	16,31
16:45	536,00	16,33
17:45	362,00	16,26
18:45	197,00	16,19
19:45	31,00	16,12
20:45	0,00	15,99
21:45	0,00	15,86
22:45	0,00	15,73
23:45	0,00	15,57



Mayo

Hora	Irradiancia global en plano horizontal (W/m ²)	Temperatura ambiente (°C)
0:45	0,00	18,23
1:45	0,00	18,01
2:45	0,00	17,89
3:45	0,00	17,77
4:45	0,00	17,66
5:45	0,00	17,58
6:45	6,00	17,50
7:45	130,00	17,42
8:45	290,00	17,91
9:45	455,00	18,41
10:45	615,00	18,90
11:45	749,00	18,94
12:45	837,00	18,97
13:45	857,00	19,01
14:45	821,00	19,01
15:45	732,00	19,01
16:45	597,00	19,02
17:45	434,00	18,99
18:45	260,00	18,96
19:45	96,00	18,93
20:45	0,00	18,77
21:45	0,00	18,61
22:45	0,00	18,46
23:45	0,00	18,35

Junio

Hora	Irradiancia global en plano horizontal (W/m ²)	Temperatura ambiente (°C)
0:45	0,00	21,40
1:45	0,00	21,17
2:45	0,00	21,04
3:45	0,00	20,91
4:45	0,00	20,78
5:45	0,00	20,75
6:45	23,00	20,71
7:45	165,00	20,68
8:45	342,00	21,19
9:45	527,00	21,69
10:45	684,00	22,20
11:45	825,00	22,27
12:45	895,00	22,35
13:45	924,00	22,42
14:45	898,00	22,42
15:45	807,00	22,42
16:45	676,00	22,41
17:45	508,00	22,33
18:45	329,00	22,25
19:45	148,00	22,16
20:45	6,00	22,00
21:45	0,00	21,83
22:45	0,00	21,67
23:45	0,00	21,53



Julio

Hora	Irradiancia global en plano horizontal (W/m ²)	Temperatura ambiente (°C)
0:45	0,00	24,23
1:45	0,00	24,05
2:45	0,00	23,92
3:45	0,00	23,79
4:45	0,00	23,66
5:45	0,00	23,63
6:45	5,00	23,60
7:45	137,00	23,57
8:45	313,00	24,09
9:45	498,00	24,61
10:45	670,00	25,13
11:45	803,00	25,21
12:45	888,00	25,29
13:45	931,00	25,37
14:45	905,00	25,34
15:45	825,00	25,32
16:45	696,00	25,29
17:45	522,00	25,20
18:45	333,00	25,10
19:45	150,00	25,00
20:45	5,00	24,83
21:45	0,00	24,65
22:45	0,00	24,47
23:45	0,00	24,35

Agosto

Hora	Irradiancia global en plano horizontal (W/m ²)	Temperatura ambiente (°C)
0:45	0,00	24,79
1:45	0,00	24,75
2:45	0,00	24,62
3:45	0,00	24,48
4:45	0,00	24,35
5:45	0,00	24,28
6:45	0,00	24,20
7:45	81,00	24,13
8:45	250,00	24,57
9:45	432,00	25,01
10:45	610,00	25,44
11:45	749,00	25,56
12:45	841,00	25,68
13:45	877,00	25,80
14:45	848,00	25,79
15:45	760,00	25,78
16:45	623,00	25,77
17:45	450,00	25,65
18:45	262,00	25,53
19:45	82,00	25,40
20:45	0,00	25,25
21:45	0,00	25,10
22:45	0,00	24,95
23:45	0,00	24,87



Septiembre

Hora	Irradiancia global en plano horizontal (W/m ²)	Temperatura ambiente (°C)
0:45	0,00	23,39
1:45	0,00	23,38
2:45	0,00	23,24
3:45	0,00	23,10
4:45	0,00	22,96
5:45	0,00	22,81
6:45	0,00	22,65
7:45	24,00	22,49
8:45	177,00	22,85
9:45	346,00	23,21
10:45	498,00	23,56
11:45	624,00	23,77
12:45	697,00	23,97
13:45	724,00	24,17
14:45	695,00	24,13
15:45	603,00	24,10
16:45	469,00	24,07
17:45	304,00	23,97
18:45	134,00	23,88
19:45	3,00	23,78
20:45	0,00	23,71
21:45	0,00	23,63
22:45	0,00	23,56
23:45	0,00	23,48

Octubre

Hora	Irradiancia global en plano horizontal (W/m ²)	Temperatura ambiente (°C)
0:45	0,00	20,62
1:45	0,00	20,60
2:45	0,00	20,45
3:45	0,00	20,29
4:45	0,00	20,14
5:45	0,00	20,00
6:45	0,00	19,87
7:45	0,00	19,73
8:45	102,00	19,98
9:45	258,00	20,23
10:45	394,00	20,48
11:45	508,00	20,82
12:45	571,00	21,16
13:45	590,00	21,50
14:45	550,00	21,45
15:45	453,00	21,41
16:45	321,00	21,36
17:45	166,00	21,26
18:45	17,00	21,16
19:45	0,00	21,06
20:45	0,00	20,99
21:45	0,00	20,93
22:45	0,00	20,86
23:45	0,00	20,74



Noviembre

Hora	Irradiancia global en plano horizontal (W/m²)	Temperatura ambiente (°C)
0:45	0,00	16,38
1:45	0,00	16,37
2:45	0,00	16,20
3:45	0,00	16,04
4:45	0,00	15,88
5:45	0,00	15,71
6:45	0,00	15,55
7:45	0,00	15,38
8:45	24,00	15,59
9:45	158,00	15,80
10:45	275,00	16,01
11:45	378,00	16,47
12:45	438,00	16,93
13:45	446,00	17,38
14:45	410,00	17,45
15:45	321,00	17,51
16:45	208,00	17,58
17:45	75,00	17,43
18:45	0,00	17,28
19:45	0,00	17,13
20:45	0,00	16,99
21:45	0,00	16,86
22:45	0,00	16,73
23:45	0,00	16,56

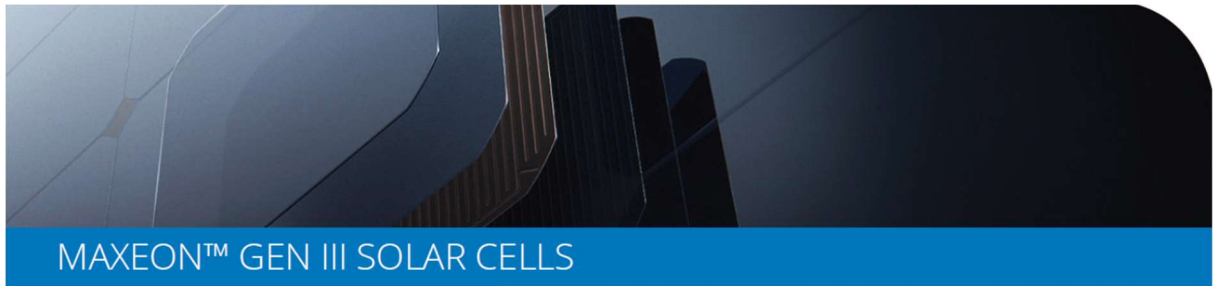
Diciembre

Hora	Irradiancia global en plano horizontal (W/m²)	Temperatura ambiente (°C)
0:45	0,00	13,85
1:45	0,00	13,66
2:45	0,00	13,53
3:45	0,00	13,41
4:45	0,00	13,28
5:45	0,00	13,13
6:45	0,00	12,98
7:45	0,00	12,84
8:45	0,00	12,88
9:45	95,00	12,92
10:45	217,00	12,96
11:45	314,00	13,42
12:45	383,00	13,87
13:45	400,00	14,33
14:45	374,00	14,44
15:45	296,00	14,55
16:45	189,00	14,67
17:45	40,00	14,59
18:45	0,00	14,52
19:45	0,00	14,45
20:45	0,00	14,39
21:45	0,00	14,32
22:45	0,00	14,26
23:45	0,00	14,06



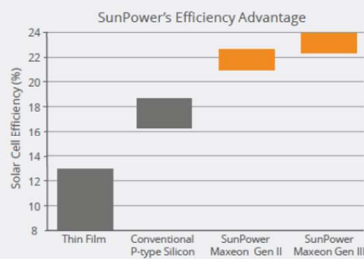
Anexo V. Hojas de datos técnicos

Células Maxeon Gen III [33]



Power Advantage

SunPower designs, manufactures, and delivers high-performance solar electric technology worldwide. SunPower™ cells produce 25-35% more power compared to Conventional Cells¹ with outstanding aesthetics.



Energy Advantage

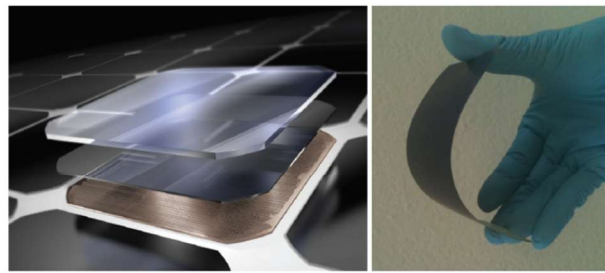
SunPower panels deliver the highest energy per rated watt compared to a Conventional Panel. (Photon International, Mar 2013, out of 151 panels tested).

- No Light-Induced Degradation = 2 - 3% more energy.
- No Temperature Coefficient = 1 - 2% more energy at 35-40°C ambient temperature.
- Low Light and Broad Spectral Response = up to 1% more energy in overcast and low-light conditions.

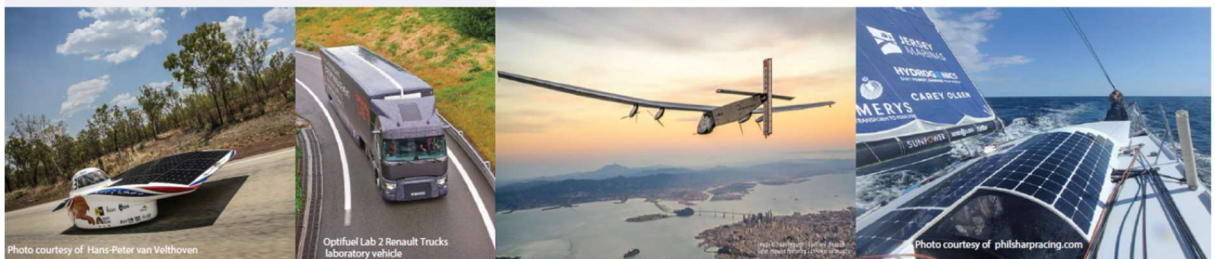
¹ As used throughout, "Conventional Cells" are silicon cells that have many thin metal lines on the front and 2 or 3 interconnect ribbons soldered along the front and back. "Conventional Panel" means a panel with 240W, 15% efficiency and approximately 1.6m² made with Conventional Cells.

Durability Advantage

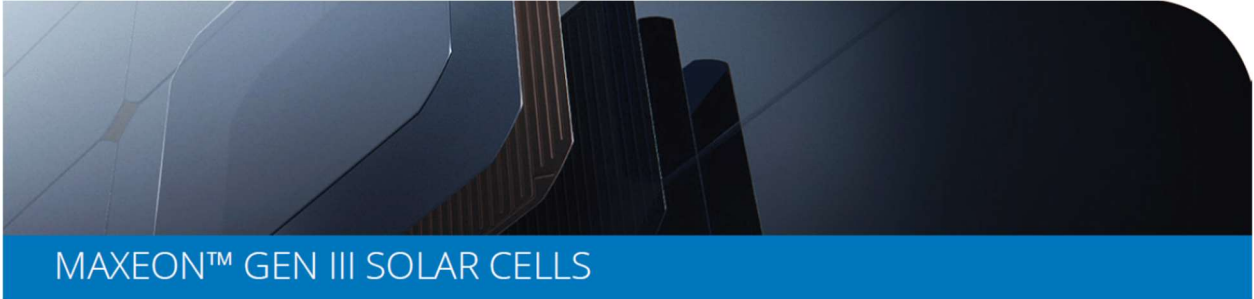
The Maxeon cell has strength and durability to survive extreme conditions year after year, enabling SunPower to provide superior, long-term performance in a broad range of applications.



- Corrosion Resistance: SunPower's tin-copper metal system is more corrosion resistant compared to the porous metal paste used in Conventional Cells, which can crack more easily and corrode.
- Crack Resistance: SunPower's cells are thinner and more flexible than Conventional Cells. When a SunPower cell does crack, the backside copper metal foundation keeps the cell intact and maintains a high power output. When Conventional Cells crack, the cell breaks apart with typically a significant loss of power.
- Eco-Friendly: SunPower cells solder to lead-free components and are RoHS compliant. Conventional Cells often require components with lead.



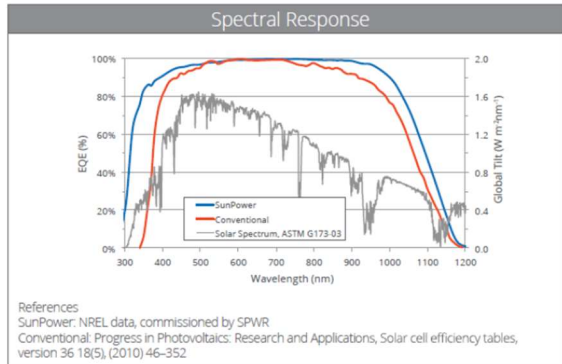
SUNPOWER



Electrical Characteristics of a typical Maxeon Gen III Cell
At Standard Test Conditions (STC)
STC: 1000W/m², AM 1.5G and cell temp 25°C

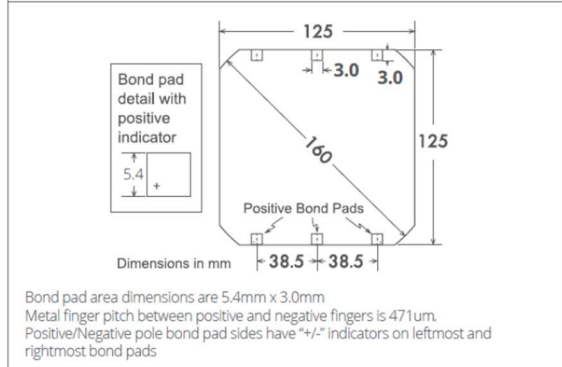
	Cell Bin	Pmpp (Wp)	Eff. (%)	Vmpp (V)	Imp (A)	Voc (V)	Isc (A)
Ultra Peak Performance	Me1	3.72	24.3	0.632	5.89	0.730	6.18
Ultra Premium Performance	Le1	3.63	23.7	0.621	5.84	0.721	6.15
Ultra High Performance	Ke1	3.54	23.1	0.612	5.79	0.713	6.11

Electrical parameters are nominal values.
Temp. Coefficients in SunPower Panels: Voltage: -1.74mV/°C, Current: 2.9mA/°C, Power: -0.29%/°C



Cell Physical Characteristics

Wafer:	Monocrystalline silicon
Design:	All back contact
Front:	Uniform, black antireflection coating
Back:	Tin-coated, copper metal grid
Cell Area:	Approximately 153cm ²
Cell Weight:	Approximately 6.5grams
Cell Thickness:	150µm +/- 30µm



Positive Electrical Grounding

If cell voltage is below frame ground the cell power output will be reduced. Therefore, modules and systems produced using these cells should be configured as "positive ground systems." If this creates a problem, please consult with SunPower.

Interconnect Tab and Process Recommendations

SunPower recommends customers use SunPower's patented tin-plated copper strain-relieved interconnect tabs, which can be purchased from SunPower. These interconnects are easily solderable and compatible with lead free processing. Tabs weigh approximately 0.3 grams.

Our patented interconnect tabs are packaged in boxes of 3600 or 36,000 each.

<http://us.sunpower.com/about/sunpower-technology/patents/>

Production Quality

ISO 9001:2015 certified

Soft handling procedures to reduce breakage and crack formation

100% cell performance testing and visual inspection

Packaging

Cells are packed in boxes of 1500 each; grouped in 10 shrink-wrapped stacks of 150 with interleaving. 24 boxes are packed in a water-resistant "Master Carton" containing 36,000 cells suitable for air transport.

Purchase Terms

Customers shall not reverse engineer, disassemble or analyze the Solar Cells or any prototype, process, product, or other item that embodies Confidential Information of SunPower. Customers shall not cause or allow any inspection, analysis, or characterization of any properties (whether mechanical, structural, chemical, electrical, or otherwise) of the Solar Cells, whether by itself or by a third party.

Customer agrees that it will not transfer (whether by sale, loan, gift, or other conveyance) the Solar Cells from its possession.

SunPower solar cells are provided "AS IS" without warranty.

Full terms and conditions are in the Cell Purchase Agreement





Módulo Maxeon [46]



MAXEON® 3 | 400 W

Residential Solar Panel

SunPower Maxeon panels combine the top efficiency, durability and warranty available in the market today, resulting in more long-term energy and savings. ^{1,2}



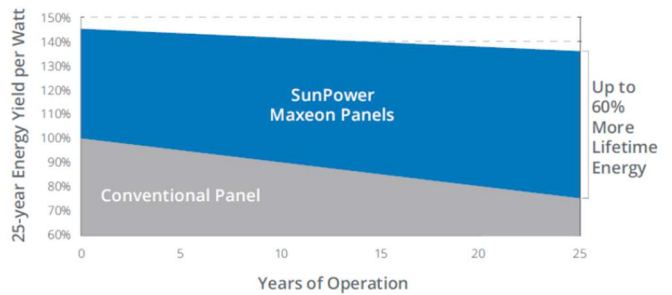
Maximum Power. Minimalist Design.

Industry-leading efficiency means more power and savings per available space. With fewer panels required, less is truly more.



Highest Lifetime Energy and Savings

Designed to deliver 55% more energy in the same space over 25 years in real-world conditions like partial shade and high temperatures. ²



Fundamentally Different. And Better.



The SunPower Maxeon® Solar Cell

- Enables highest efficiency panels available ²
- Unmatched reliability ³
- Patented solid metal foundation prevents breakage and corrosion



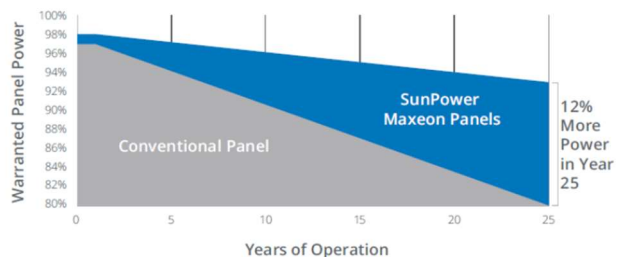
As Sustainable As Its Energy

- Ranked #1 in Silicon Valley Toxics Coalition Solar Scorecard ⁴
- First solar panels to achieve Cradle Certified™ Silver recognition ⁵ (pending)
- Contributes to more LEED categories than conventional panels ⁶



Better Reliability, Better Warranty

With more than 25 million panels deployed around the world, SunPower technology is proven to last. That's why we stand behind our panel with an exceptional 25-year Combined Power and Product Warranty, including the highest Power Warranty in solar.

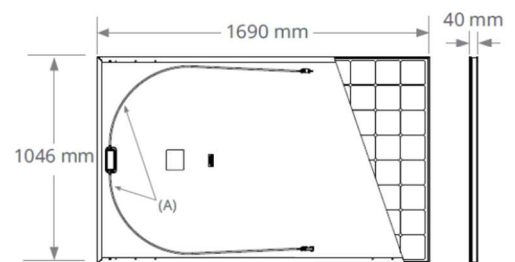


MAXEON® 3 | 400 W Residential Solar Panel

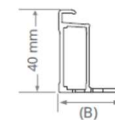
Electrical Data			
	SPR-MAX3-400	SPR-MAX3-395	SPR-MAX3-390
Nominal Power (P _{nom}) ⁷	400 W	395 W	390 W
Power Tolerance	+5/0%	+5/0%	+5/0%
Panel Efficiency	22.6%	22.3%	22.1%
Rated Voltage (V _{mpp})	65.8 V	65.1 V	64.5 V
Rated Current (I _{mpp})	6.08 A	6.07 A	6.05 A
Open-Circuit Voltage (V _{oc})	75.6 V	75.4 V	75.3 V
Short-Circuit Current (I _{sc})	6.58 A	6.56 A	6.55 A
Max. System Voltage	1000 V IEC		
Maximum Series Fuse	20 A		
Power Temp Coef.	-0.29% / °C		
Voltage Temp Coef.	-176.8 mV / °C		
Current Temp Coef.	2.9 mA / °C		

Operating Condition And Mechanical Data	
Temperature	-40°C to +85°C
Impact Resistance	25 mm diameter hail at 23 m/s
Solar Cells	104 Monocrystalline Maxeon Gen III
Tempered Glass	High-transmission tempered anti-reflective
Junction Box	IP-68, Stäubli (MC4), 3 bypass diodes
Weight	19 kg
Max. Load ⁹	Wind: 2400 Pa, 244 kg/m ² front & back Snow: 5400 Pa, 550 kg/m ² front
Frame	Class 1 black anodized (highest AAMA rating)

Tests And Certifications	
Standard Tests ⁸	IEC 61215, IEC 61730
Quality Management Certs	ISO 9001:2015, ISO 14001:2015
EHS Compliance	RoHS (Pending), OHSAS 18001:2007, lead free, REACH SVHC-163 (Pending)
Sustainability	Cradle to Cradle Certified™ (Pending)
Ammonia Test	IEC 62716
Desert Test	MIL-STD-810G
Salt Spray Test	IEC 61701 (maximum severity)
PID Test	1000 V: IEC 62804
Available Listings	TUV



FRAME PROFILE



A. Cable Length: 1200 mm +/-10 mm
B. LONG SIDE: 32 mm
SHORT SIDE: 24 mm

Please read the safety and installation guide.

1 SunPower 400 W, 22.6% efficient, compared to a Conventional Panel on same-sized arrays (310 W, 16% efficient, approx. 2 m²), 8% more energy per watt (based on PVsyst pan files for avg EU climate), 0.5%/yr slower degradation rate (Jordan, et. al. "Robust PV Degradation Methodology and Application." PVSC 2018).

2 DNV "SunPower Shading Study," 2013. Compared to a conventional front contact panel.

3 #1 rank in "Fraunhofer PV Durability Initiative for Solar Modules: Part 3". PVTech Power Magazine, 2015.

4 SunPower is rated #1 on Silicon Valley Toxics Coalition's Solar Scorecard.

5 Cradle to Cradle Certified is a multi-attribute certification program that assesses products and materials for safety to human and environmental health, design for future use cycles, and sustainable manufacturing.

6 Maxeon2 and Maxeon3 panels additionally contribute to LEED Materials and Resources credit categories.

7 Standard Test Conditions (1000 W/m² irradiance, AM 1.5, 25° C). NREL calibration Standard: SOMS current, LACCS FF and Voltage.

8 Class C fire rating per IEC 61730.

9 Safety factor 1.5 included.

Designed in USA
Made in Philippines (Cells)
Modules Assembled in Mexico

Visit www.sunpowercorp.co.uk for more information.
Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

©2019 SunPower Corporation. All rights reserved. SUNPOWER, the SUNPOWER logo and MAXEON are trademarks or registered trademarks of SunPower Corporation. Cradle to Cradle Certified™ is a certification mark licensed by the Cradle to Cradle Products Innovation Institute.

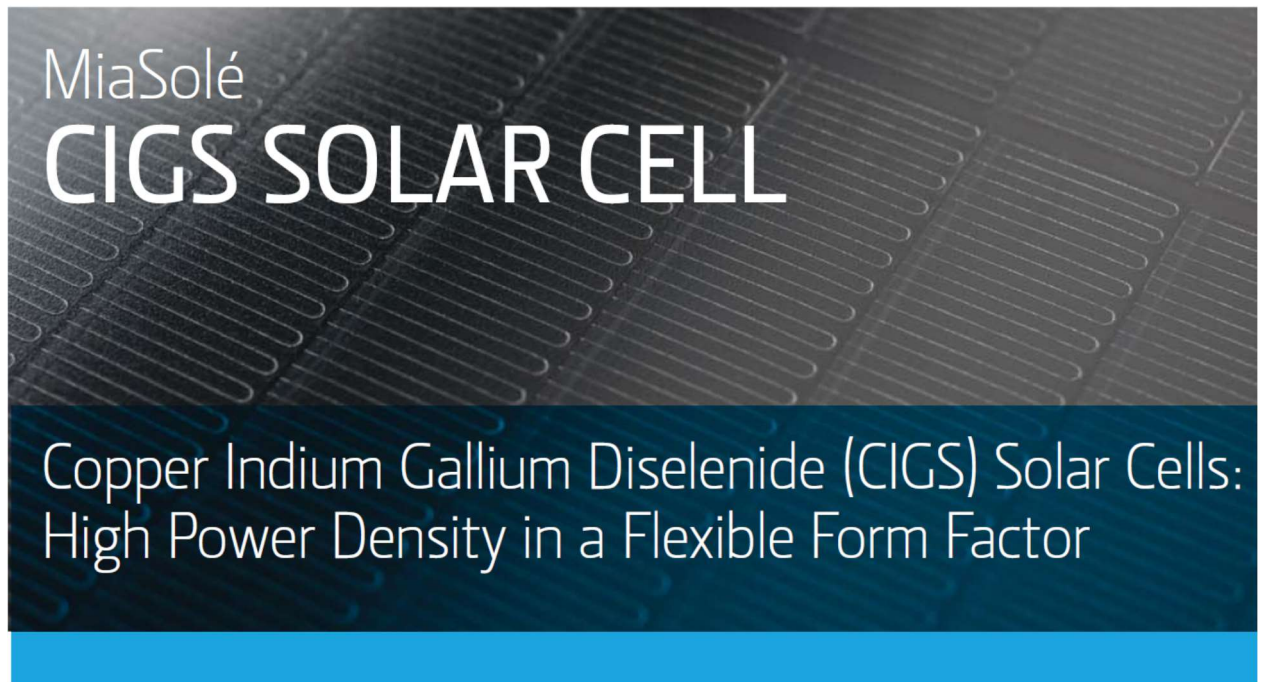
UK: 0 8082818718 | Other EU: 00 800 855 81111

SUNPOWER®
MAXEON®

532418 REV B / A4_EN
Publication Date: November 2019



Células MiaSolé [34]



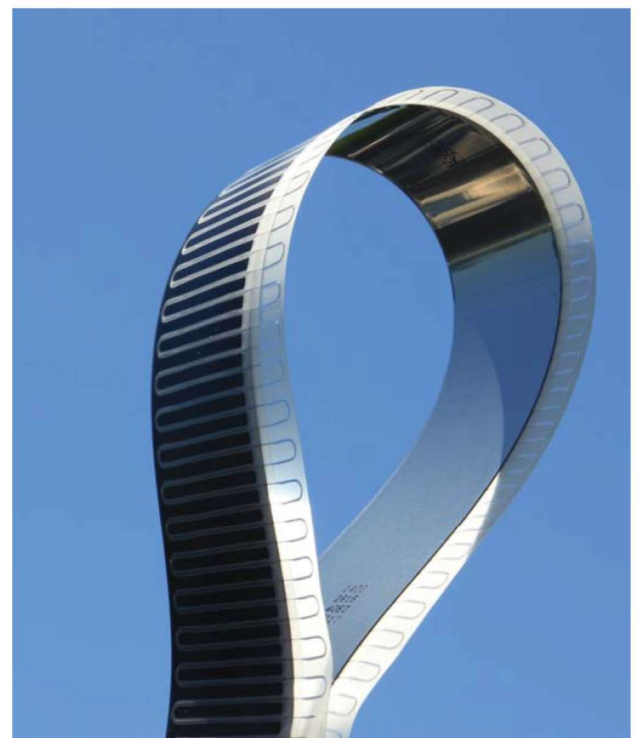
MiaSolé thin-film CIGS solar cells on stainless steel substrate have high efficiency levels and provide significant advantages over conventional, rigid solar cells.

KEY FEATURES

- ▶ Aperture efficiency of up to 17% in a flexible form factor.
- ▶ Thin—0.33mm
- ▶ Lightweight—7.5 gm
- ▶ Ideal for many specialized uses. Versatile cell architecture means the size can be modified to suit various applications.
- ▶ Bendable and shatter-proof

HANDLING AND STORAGE NOTES

- ▶ Cells are sensitive to temperature and humidity. They must be stored either in vacuum-sealed containers or in a dry box with $\leq 5\%$ relative humidity. Cells should be kept between 20–25 °C.
- ▶ Cells require encapsulation before use to protect against moisture and the environment.





MiaSolé CIGS SOLAR CELL

ELECTRICAL PERFORMANCE BY 0.5% EFFICIENCY BINS

Cell Efficiency			15.5%	16.0%	16.5%	17%
Nominal Power	P_{MPP}	[W]	2.12	2.18	2.25	2.32
Power Output Tolerance		[W]	+0.1/-0	+0.1/-0	+0.1/-0	+0.1/-0
Maximum Power Voltage	V_{MPP}	[V]	0.526	0.531	0.538	0.545
Maximum Power Current	I_{MPP}	[A]	4.04	4.11	4.17	4.25
Open Circuit Voltage	V_{OC}	[V]	0.661	0.664	0.670	0.673
Short Circuit Current	I_{SC}	[A]	4.70	4.70	4.70	4.70

THERMAL CHARACTERISTICS*

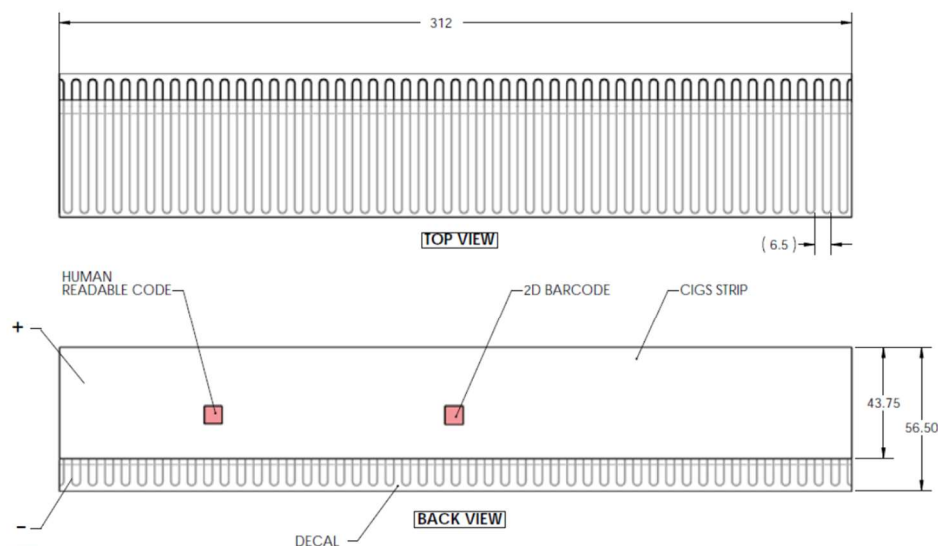
NOCT	[°C]	48
Temperature Coefficient of P_{MPP}	[%/°C]	-0.38
Temperature Coefficient of V_{OC}	[%/°C]	-0.28
Temperature Coefficient of I_{SC}	[%/°C]	0.008

*based on MiaSolé FLEX-02 module measurements

PHYSICAL AND MECHANICAL SPECIFICATIONS

Length	312 mm +2/-4 mm
Width	43.75 mm ± .005 mm
Thickness	0.33 mm ± 0.1 mm
Weight	7.5 gm ± 0.1 gm
Cell Type	Copper Indium Gallium Diselenide (CIGS)

CELL DIAGRAM



2590 Walsh Avenue, Santa Clara, California 95051, USA
1.408.919.5700 info@miasole.com www.miasole.com

MiaSolé and the MiaSolé logo are registered trademarks.
© Jan 2015 MiaSolé. All rights reserved. Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.
MiaSolé Approved for Public Release.
Part Number 990-189851-00_5



Módulo MiaSolé [47]

MiaSolé FLEX SERIES -02N

CIGS Flexible Modules: High Power Density in a Flexible Form Factor

KEY FEATURES

- ▶ Record efficiency levels in a CIGS flexible form factor
- ▶ Low installed weight at less than 2.9kg/m² (<0.6lb/ft²)
- ▶ No penetrations, ballast or racking required
- ▶ Applicable for high wind load and high seismic hazard areas
- ▶ Bypass diode every two cells reduces PV system shading losses
- ▶ Directly bonds to many approved surfaces

RELIABILITY AND SAFETY

- ▶ IEC 61646, IEC 61730-1 & -2, IEC 61701, IEC 62716
- ▶ UL 1703, ULC ORD C1703, UL 2703

WARRANTY

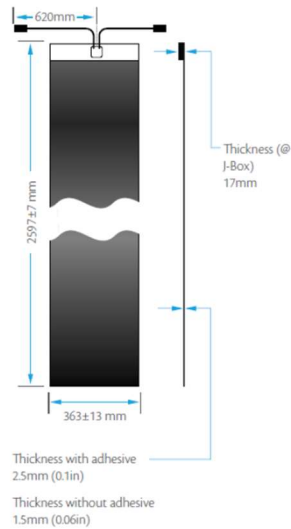
- ▶ 5 year workmanship
- ▶ 10/25 year warranty against power loss





MiaSolé FLEX SERIES

FLEX-02N SERIES CIGS MODULE



ELECTRICAL PERFORMANCE AT STC¹

			FLEX-02 110N	FLEX-02 115N	FLEX-02 120N	FLEX-02 125N	FLEX-02 130N
Nominal Power	P_{MPP}	[W]	110	115	120	125	130
Aperture Efficiency	η	[%]	14.4%	15.0%	15.7%	16.4%	17.0%
Power Output Tolerance		[W]	+5/-0	+5/-0	+5/-0	+5/-0	+5/-0
Maximum Power Voltage	V_{MPP}	[V]	28.9	29.7	30.5	31.3	32.0
Maximum Power Current	I_{MPP}	[A]	3.81	3.87	3.93	4.00	4.06
Open Circuit Voltage	V_{OC}	[V]	37.1	37.6	38.1	38.6	39.1
Short Circuit Current	I_{SC}	[A]	4.50	4.52	4.53	4.55	4.57
Maximum Series Fuse Rating		[A]	10				
Maximum System Voltage (IEC/UL)		[V]	1000/600				

¹Standard Test Conditions (STC): 1000 W/m², 25°C cell temperature, AM 1.5 spectrum

THERMAL CHARACTERISTICS

NOCT	[°C]	48
Temperature Coefficient of P_{MPP}	[%/°C]	-0.38
Temperature Coefficient of V_{OC}	[%/°C]	-0.28
Temperature Coefficient of I_{SC}	[%/°C]	0.008

PHYSICAL AND MECHANICAL SPECIFICATIONS

Length	2597±7 mm (102.2±.3 in)
Width	363±13 mm (14.3±.5 in)
Thickness, Maximum at J-Box*, Module	17 mm (0.7 in), 2.5 mm (.1 in)
Weight (Module without adhesive)	2.0 kg (4.3 lb)
Weight (Module with adhesive)	2.7 kg (5.9 lb)
Weight/Area (Module without adhesive)	2.0 kg/m ² (0.4 lb/ft ²)
Weight/Area (Module with adhesive)	2.9 kg/m ² (0.6 lb/ft ²)
Junction Box Type	IP68
Cable Connections	Amphenol H ₄
Cell Type	Copper Indium Gallium Diselenide (CIGS)
Warranty**	5 year workmanship; 10/25 year power output
Certifications	UL 1703, ULC ORD C1703, UL 2703, IEC 61646, IEC 61730-1 & -2, IEC 61701, IEC 62716, DEWA
Packaging Info	15 modules per crate, 150 modules per pallet, 600 modules per 20' ISO container, 2400 modules per 40' ISO container

*2.5 mm (0.1 in) for the rest of the module with adhesive

*1.5 mm (0.06 in) for the rest of module without adhesive

**Please see full warranty for details

FLEX modules are manufactured in the United States and China



2590 Walsh Avenue, Santa Clara, California 95051, USA
1.408.919.5700 info@miasole.com www.miasole.com

MiaSolé and the MiaSolé logo are registered trademarks.
©2017 MiaSolé. All rights reserved. Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.
MiaSolé Approved for Public Release.
Part Number 990-187776-00_6



Módulo First Solar [35]



First Solar Series 4™ PV Module

ADVANCED THIN FILM SOLAR TECHNOLOGY



**122.5 WATT MODULE
EFFICIENCY OF 17.0%**

INDUSTRY BENCHMARK SOLAR MODULES

As a global leader in PV energy, First Solar's advanced thin film solar modules have set the industry benchmark with over 17 gigawatts (GW) installed worldwide and a proven performance advantage over conventional crystalline silicon solar modules. Generating more energy than competing modules with the same power rating, First Solar's Series 4™ and Series 4A™ PV Modules deliver superior performance and reliability to our customers.



PROVEN ENERGY YIELD ADVANTAGE

- Generates more energy than conventional crystalline silicon solar modules with the same power due to superior temperature coefficient and superior spectral response
- Anti-reflective coated glass (Series 4A™) enhances energy production



ADVANCED PERFORMANCE & RELIABILITY

- Compatible with advanced 1500V plant architectures
- Independently certified for reliable performance in high temperature, high humidity, extreme desert and coastal environments
- Visit PlantPredict.com - The only Energy Prediction Software designed for Utility Scale PV



CERTIFICATIONS & TESTS

- PID-Free, Thresher Test, Long-Term Sequential Test, and ATLAS 25+¹
- IEC 61215/61646 1500V, IEC 61730 1500V, CE
- IEC 61701 Salt Mist Corrosion, IEC 60068-2-68 Dust and Sand Resistance
- ISO 9001:2015 and ISO 14001:2015
- UL 1703 Listed Fire Performance PV Module Type 10²
- CSI Eligible, FSEC, MCS, CEC Listed (Australia), SII, InMetro

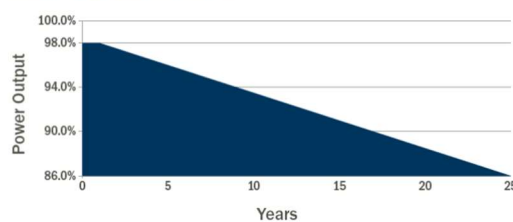


END-OF-LIFE RECYCLING

- Recycling services available through First Solar's industry-leading recycling program or customer-selected third party.



MODULE WARRANTY³

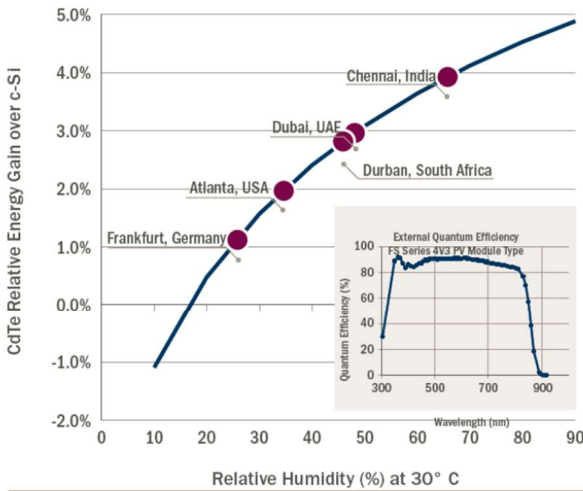


- 25-Year Linear Performance Warranty⁴
- 10-Year Limited Product Warranty

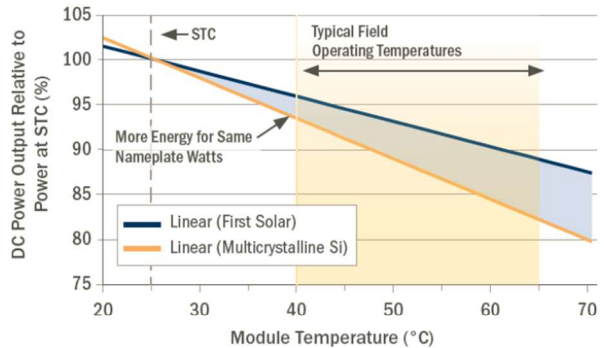
FIRST SOLAR SERIES 4™ PV MODULE

MECHANICAL DESCRIPTION		MODULE NUMBERS AND RATINGS AT STANDARD TEST CONDITIONS (1000W/m ² , AM 1.5, 25°C) ⁵							
Length	1200mm	NOMINAL VALUES							
Width	600mm		FS-4110-3 FS-4110A-3	FS-4112-3 FS-4112A-3	FS-4115-3 FS-4115A-3	FS-4117-3 FS-4117A-3	FS-4120-3 FS-4120A-3	FS-4122-3 FS-4122A-3	
Weight	12kg	Nominal Power ⁶ (-0/+5W)	P _{MPP} (W)	110.0	112.5	115.0	117.5	120.0	122.5
Thickness	6.8mm	Voltage at P _{MAX}	V _{MPP} (V)	67.8	68.5	69.3	70.1	70.8	71.5
Area	0.72m ²	Current at P _{MAX}	I _{MPP} (A)	1.62	1.64	1.66	1.68	1.70	1.71
Individual Leadwire	2.5mm ² , 657mm (minimum from strain relief to connector mating surface)	Open Circuit Voltage	V _{OC} (V)	86.4	87.0	87.6	88.1	88.7	88.7
Connectors	MC4 or MC4-EVO 2 ⁹	Short Circuit Current	I _{SC} (A)	1.82	1.83	1.83	1.83	1.84	1.85
Bypass Diode	None	Module Efficiency	%	15.3	15.6	16.0	16.3	16.7	17.0
Cell Type	Thin-film CdTe semiconductor, up to 216 cells	Maximum System Voltage	V _{SYS} (V)	1500 ^{7,8}					
Frame Material	None	Limiting Reverse Current	I _R (A)	4.0					
Front Glass	3.2mm heat strengthened Series 4A™ includes anti-reflective coating	Maximum Series Fuse	I _{CF} (A)	4.0					
Back Glass	3.2mm tempered	RATINGS AT NOMINAL OPERATING CELL TEMPERATURE OF 45°C (800W/m², 20°C air temperature, AM 1.5, 1m/s wind speed)⁵							
Encapsulation	Laminate material with edge seal	Nominal Power	P _{MPP} (W)	83.2	85.1	87.0	89.0	90.8	92.7
Load Rating	2400Pa ¹⁰	Voltage at P _{MAX}	V _{MPP} (V)	63.5	64.5	64.9	65.9	66.3	67.2
		Current at P _{MAX}	I _{MPP} (A)	1.31	1.32	1.34	1.35	1.37	1.38
		Open Circuit Voltage	V _{OC} (V)	81.6	82.1	82.7	83.2	83.7	83.7
		Short Circuit Current	I _{SC} (A)	1.47	1.47	1.48	1.48	1.48	1.49
		TEMPERATURE CHARACTERISTICS							
		Module Operating Temperature Range	(°C)	-40 to +85					
		Temperature Coefficient of P _{MPP}	T _K (P _{MPP})	-0.28%/°C [Temperature Range: 25°C to 75°C]					
		Temperature Coefficient of V _{OC}	T _K (V _{OC})	-0.28%/°C					
		Temperature Coefficient of I _{SC}	T _K (I _{SC})	+0.04%/°C					

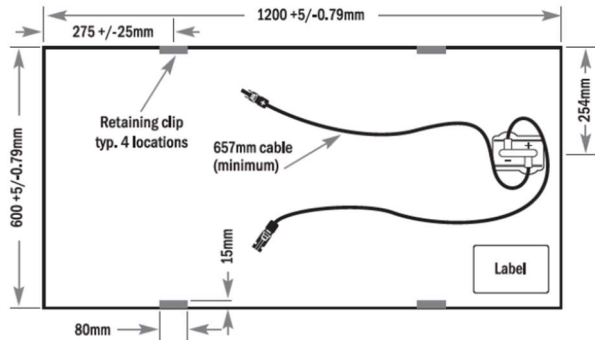
SUPERIOR SPECTRAL RESPONSE



SUPERIOR TEMPERATURE COEFFICIENT



MECHANICAL DRAWING



- 1 Device package meets Atlas 25+
- 2 Class A Spread of Flame / Class B Burning Brand. Roof mounted fire rating is established by assessing rack and solar module as a unit
- 3 Limited power output and product warranties subject to warranty terms and conditions
- 4 Ensures 98% rated power in first year, -0.5%/year through year 25
- 5 All ratings ± 10%, unless specified otherwise. Specifications are subject to change
- 6 Measurement uncertainty applies
- 7 UL 1703 1500V Listed / ULC 1703 1000V Listed
- 8 Application Class A for 1000V (class II), Application Class B for 1500V (class 0) with MC4; Application Class A for 1000V and 1500V (class II) with MC4-EVO 2
- 9 Multi-Contact: MC4 (PV-KST4/PV-KBT4) or MC4-EVO 2 (PV-KST-EVO 2 / PV-KBT-EVO 2).
- 10 Higher load ratings can be met with additional clips or wider clips, subject to testing

Disclaimer

The information included in this Module Datasheet is subject to change without notice and is provided for informational purposes only. No contractual rights are established or should be inferred because of user's reliance on the information contained in this Module Datasheet. Please refer to the appropriate Module User Guide and Module Product Specification document for more detailed technical information regarding module performance, installation and use.

The First Solar logo, First Solar™, and all products denoted with ® are registered trademarks, and those denoted with a ™ are trademarks of First Solar, Inc.

Regulador MTPP Victron Energy [48]

Controladores de carga BlueSolar

MPPT 75/10, 75/15, 100/15, 100/20 y 100/20-48V



Controlador de carga solar
MPPT 75/15



Seguimiento ultrarrápido del Punto de Máxima Potencia (MPPT, por sus siglas en Inglés).

Especialmente con cielos nublados, cuando la intensidad de la luz cambia continuamente, un controlador MPPT ultrarrápido mejorará la recogida de energía hasta en un 30%, en comparación con los controladores de carga PWM, y hasta en un 10% en comparación con controladores MPPT más lentos.

Salida de carga

Se puede evitar que la batería se descargue en exceso conectando todas las cargas a la salida de carga. Esta salida desconectará la carga cuando la batería se haya descargado cuando llegue a una tensión preestablecida. También se puede optar por establecer un algoritmo de gestión inteligente de la batería: ver BatteryLife. La salida de carga es a prueba de cortocircuitos.

Algunas cargas (especialmente los inversores) pueden conectarse directamente a la batería, y el control remoto del inversor a la salida de carga. Puede que se necesite un cable de interfaz especial; por favor, consulte el manual.

BatteryLife: gestión inteligente de la batería

Cuando un controlador de carga solar no es capaz de recargar la batería a plena capacidad en un día, lo que sucede es que el ciclo de la batería cambia continuamente entre los estados "parcialmente cargada" y "final de descarga". Este modo de funcionamiento (sin recarga completa periódica) destruirá una batería de plomo-ácido en semanas o meses.

El algoritmo BatteryLife controlará el estado de carga de la batería y, si fuese necesario, incrementará día a día el nivel de desconexión de la carga (esto es, desconectará la carga antes hasta que la energía solar recogida sea suficiente como para recargar la batería hasta casi el 100%. A partir de ese punto, el nivel de desconexión de la carga se modulará de forma que se alcance una recarga de casi el 100% alrededor de una vez a la semana.

Algoritmo de carga de batería programable

Consulte la sección Asistencia y Descargas > Software en nuestra página web para más información.

Temporizador día/noche y opción de regulador de luminosidad

Consulte la sección Asistencia y Descargas > Software en nuestra página web para más información.

Programación y opciones de visualización del historial y de datos en tiempo real

- ColorControl GX u otros dispositivos GX: consulte los documentos Venus en nuestro sitio web.
- Un *smartphone* u otro dispositivo con Bluetooth: se necesita la mochila VE.Direct Bluetooth Smart.

Controlador de carga BlueSolar	MPPT 75/10	MPPT 75/15	MPPT 100/15	MPPT 100/20	MPPT 100/20-48V
Tensión de la batería (Selección auto)	12/24V				12/24/48V
Corriente de carga nominal	10A	15A	15A	20A	20A
Potencia FV nominal, 12V 1 a,b)	145W	220W	220W	290W	290W
Potencia FV nominal, 24V 1 a,b)	290W	440W	440W	580W	580W
Potencia FV nominal, 48V 1 a,b)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1160W
Máxima corriente de corto circuito FV 2)	13A	15A	15A	20A	20A
Desconexión automática de la carga	Sí				
Tensión máxima del circuito abierto FV	75V		100V		
Eficiencia máxima	98%				
Autoconsumo	12V: 25 mA 24V: 15 mA		25 / 15 / 10 mA		
Tensión de carga de "absorción"	14,4V / 28,8V (ajustable)				14,4V / 28,8V / 57,6V (adj)
Tensión de carga de "flotación"	13,8V / 27,6V (ajustable)				13,8V / 27,6V / 55,2V (adj)
Algoritmo de carga	adaptativo multifase				
Compensación de temperatura	-16 mV / °C, -32 mV / °C resp.				
Corriente de carga continua	15A		20A		20A / 20A / 1A
Desconexión de carga por baja tensión	11,1V/22,2V/44,4V u 11,8V/23,6V/47,2V o algoritmo BatteryLife				
Reconexión de carga por baja tensión	13,1V/26,2V/52,4V o 14V/28V/56V o algoritmo BatteryLife				
Protección	Cortocircuito de salida / Sobretemperatura				
Temperatura de trabajo	De -30 a +60 °C (potencia nominal completa hasta los 40°C)				
Humedad	95%, sin condensación				
Puerto de comunicación de datos	VE.Direct (consulte el libro blanco sobre comunicación de datos en nuestro sitio web)				
CARCASA					
Color	Azul (RAL 5012)				
Terminales de conexión	6 mm ² / AWG10				
Grado de protección	IP43 (componentes electrónicos), IP22 (área de conexión)				
Peso	0,5 kg		0,6 kg		0,65 kg
Dimensiones (al x an x p)	100 x 113 x 40 mm		100 x 113 x 50 mm		100 x 113 x 60 mm
NORMATIVAS					
Seguridad	EN/IEC 62109-1, UL 1741, CSA C22.2				



Etapa DC/DC Texas Instruments[38]

TI Designs: TIDA-00951 2-kW, 48- to 400-V, >93% Efficiency, Isolated Bidirectional DC-DC Converter Reference Design for UPS



1 Description

The TIDA-00951 design provides a reference solution for a 2-kW isolated bidirectional DC-DC converter capable of power transfer between a 400-V DC bus and a 12- to 14-cell Lithium battery pack for use in UPS, battery backup and power storage applications.

This TI Design works as a >93% efficient, current fed, active clamped boost converter with ZVS in the backup mode and voltage fed full-bridge batter charger with >93% efficiency in the charging mode. This TI Design has built-in protection for DC bus overcurrent and overvoltage and battery overcurrent.

2 Resources

TIDA-00951	Design Folder
SN6505B	Product Folder
CSD19536KCS	Product Folder
UCC27211A	Product Folder
UCC27517A	Product Folder
AMC1301	Product Folder
TMP300	Product Folder
LM4041A12	Product Folder
TPS62160	Product Folder
TLV1117	Product Folder
OPA376	Product Folder
TIDA-01281	Design Folder
TIDA-01141	Design Folder
TIDA-01159	Design Folder

3 Features

- Digitally Controlled Isolated Bidirectional DC-DC Converter
- Operates as Active Clamped Full Bridge Boost Converter With ZVS For All Low-Voltage Switches at High Loads
- Operates as Active Clamped Voltage Fed Buck Converter With Synchronous Rectification to Improve Efficiency When Charging Battery
- Wide Operating Range From 36- to 60-V Battery and 300- to 400-V DC Bus
- Cost Optimized Design Using 100-V FET on Low-Voltage Side, Eliminates Requirement for Paralleling Multiple FETs up to 2 kW
- Built-in Cold Start Procedure and Fast Mode Transfer (< 100 μ S) From Battery Charger to Backup Power Supply
- Onboard Isolated Communication Interface for CAN, I²C, and RS-485

4 Applications

- Server PSUs and Telecom Rectifiers
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Industrial Power Supplies
- Battery Chargers
- Energy Storage Systems



[ASK Our E2E Experts](#)



5.1 Key System Specifications

Table 1. Key System Specifications

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	NOM	MAX	UNIT
BACKUP SUPPLY MODE					
INPUT CONDITIONS					
Input battery voltage (V_{BAT})	—	36	44.4	60	V
Input battery current (I_{BAT_MAX})	—	—	—	60	A
OUTPUT CONDITIONS					
Output bus voltage (V_{BUS})	—	300	380.0	400	V
Output bus current (I_{BUS_MAX})	$V_{BAT} > 40\text{ V}$	—	—	5	A
Line regulation		—	—	1	%
Load regulation	10% to 100% load	—	—	1	%
Output voltage ripple	—	—	—	—	—
Input voltage ripple	—	—	—	—	—
Average efficiency	20% to 100%	—	—	—	%
Full load efficiency	—	—	—	—	%
BATTERY CHARGER					
INPUT CONDITIONS					
Input bus voltage (V_{BUS})	—	300	380.0	400	V
Input bus current (I_{BUS_MAX})	—	—	—	60	A
OUTPUT CONDITIONS					
Output battery voltage (V_{BAT})	—	36	44.4	60	V
Output battery current (I_{BAT})	—	—	—	16	A
SYSTEM SPECIFICATIONS					
Operating ambient	—	−10	25	55	°C
Board size	Length × Width × Height	185 × 173 × 8			mm



8.8 Boost Mode Efficiency

Figure 22 shows the boost mode output power versus efficiency data captured for various battery voltage.

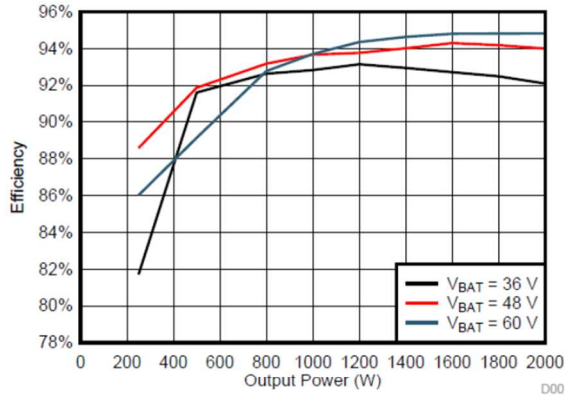


Figure 22. Boost Mode Output Power versus Efficiency

8.9 Buck Mode Efficiency

Figure 23 shows the buck mode efficiency at various battery voltage and charging current. The 400-V bus voltage was fixed at 380-V DC for conducting this test.

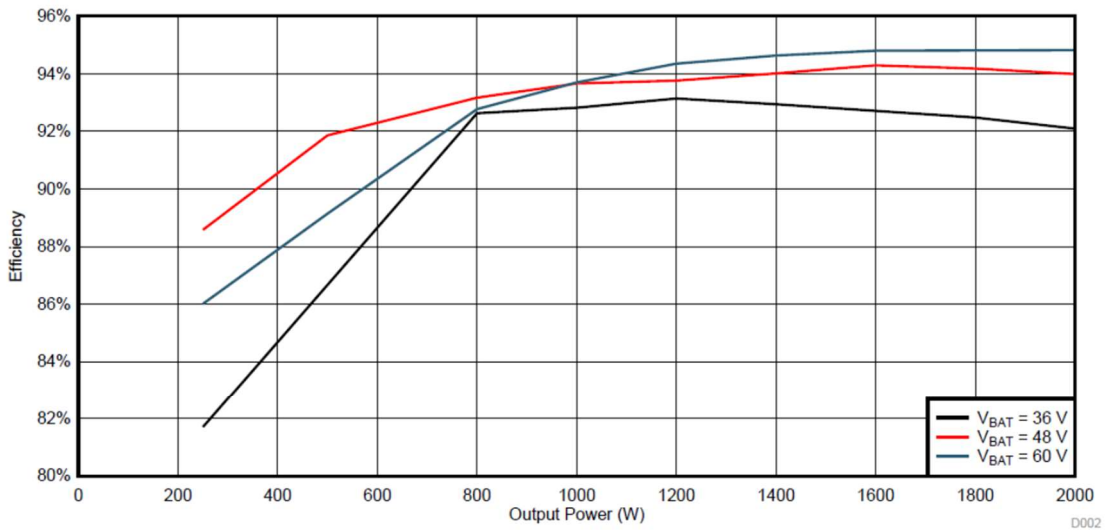


Figure 23. Buck Mode Charging Current versus Efficiency