



Universidad de Jaén

Centro de Estudios de Postgrado

Vehicle integrated photovoltaics, ¿Futuro de la movilidad sostenible?

Autor: Leonardo Fernández Chana

Máster en Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos

Director: Gustavo Nofuentes Garrido
Departamento del director: Ingeniería Electrónica y Automática

Fecha: 12/2022



CREA



Universidad de Jaén

Centro de Estudios de Postgrado

VEHICLE INTEGRATED PHOTOVOLTAICS, ¿FUTURO DE LA MOVILIDAD SOSTENIBLE?

Alumno: Fernández Chana, Leonardo

Tutor: Prof. D. Gustavo Nofuentes Garrido
Dpto: Ingeniería Electrónica y Automática

Diciembre, 2022

ÍNDICE

1	Objeto.....	1
2	Introducción	1
2.1	¿Qué es la fotovoltaica integrada?	3
3	Vehicle integrated photovoltaics (VIPV)	4
3.1	Definición	4
3.2	Mercado	8
3.3	Clasificación.....	9
3.4	¿Por qué ahora?	10
3.5	Diferencias de un vehículo con VIPV y un vehículo eléctrico convencional	14
4	Desafíos de los VIPV	15
4.1	Normativa.....	18
4.1.1	Especificaciones generales	21
5.1.1	Protección eléctrica.....	21
6.1.1	Riesgo de incendio	22
7.1.1	Cargas mecánicas	22
4.2	Irradiancia solar.....	28
4.1.1	Características de la irradiancia solar en VIPV	29
4.3	Estandarización del diseño de los módulos	30
5.1.1	Caracterización.....	30
4.4	Análisis medioambiental	39
6.1.1	Emisiones en la electricidad producida por energía fotovoltaica	41
5	Historia de la fotovoltaica integrada en los vehículos	42
5.1	Los comienzos: década de los 50	44
5.2	Camino por el desierto	44
5.3	Resurgimiento: década de los 90 y 2000	44
5.4	Comienzo de la década de los 10	47
5.5	Presente y futuro.....	48
7.1.1	Aptera.....	48
8.1.1	Lightyear.....	51
9.1.1	Sono Motors.....	55
10.1.1	Fabricantes tradicionales	57
6	Revisión de la tecnología fotovoltaica, células y módulos.....	61
6.1	Módulos fotovoltaicos	63
6.2	Células fotovoltaicas	64

Máster en Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos

11.1.1	Módulos de silicio cristalino	65
12.1.1	Células multiunión III-V de capa fina.....	66
13.1.1	Módulos de silicio amorfo.....	67
14.1.1	Módulos de capa fina de calcogenuro	67
15.1.1	Módulos orgánicos y de perovskita	68
16.1.1	Problemática de las células/módulos para VIPV.....	68
7	Conclusiones.....	69
	Bibliografía	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Estimación del crecimiento de coches en el mundo. (Lightyear, 2022)	2
Fig. 2 Vehículo solar participante en la World Solar Challenge. (Wikipedia, 2022)	2
Fig. 3 Esto no es un VIPV, aunque lo parezca. Fuente: Internet.	3
Fig. 4 Esto no es integración fotovoltaica en edificios. Fuente: Internet.	4
Fig. 5 Estimación del potencial de la fotovoltaica integrada en diferentes ambitos. (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2022)	4
Fig. 6 Imagen de un VIPV que cuenta con 300 Watios de potencia en el techo. (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2022)	5
Fig. 7 Utilización de la energía solar de los VIPV según la demanda cubierta. (Ben Said-Romdhane & Skander-Mustapha, 2021)	6
Fig. 8 Esquema simple de funcionamiento de un vehículo con VIPV. (Ben Said-Romdhane & Skander-Mustapha, 2021)	6
Fig. 9 Unidad de MMPT del Sono Sion. (Sono Motors, 2021)	6
Fig. 10 Funcionamiento de los VIPV. (Hyundai Motor Group, 2020)	7
Fig. 11 Posible tamaño de mercado para diferentes tecnologías fotovoltaicas y precios estimados. (Ben Said-Romdhane & Skander-Mustapha, 2021)	8
Fig. 12 Clasificación de los vehículos con VIPV. (Ben Said-Romdhane & Skander-Mustapha, 2021)	9
Fig. 13 Tipología de híbridos. (Ben Said-Romdhane & Skander-Mustapha, 2021)	9
Fig. 14 De izquierda superior a derecha inferior se ven los esquemas básicos de híbrido en serie, híbrido en paralelo, híbrido serie-paralelo y finalmente compleja. (Ben Said-Romdhane & Skander-Mustapha, 2021)	10
Fig. 15 Disminución del precio de las baterías por kilowatio hora. En 2022 se podría ver el primer aumento de precios. (BloombergNEF, 2022)	11
Fig. 16 Disminución del precio de los paneles así como aumento de la eficiencia. (Sono Motors, 2022)	11
Fig. 17 Comparativo de las necesidades de recarga entre un vehículo eléctrico y un VIPV (Sion). (Sono Motors, 2022)	12
Fig. 18 Esquema para aumentar la eficiencia de los VIPV. (Lightyear, 2022)	12
Fig. 19 Principales consumos energéticos en un vehículo. (Lightyear, 2022)	13
Fig. 20 Explicación gráfica de como la reducción del coeficiente de arrastre mejora la autonomía. (Lightyear, 2022)	13
Fig. 21 Evolución en el tiempo de la resistencia aerodinámica de automóviles comparado con el cambio en geometría de diferentes objetos (desde aplanados hasta ovalados) Wikipedia	13
Fig. 22 Estimaciones de los beneficios de la integración fotovoltaica en un vehículo. (Kauf, 2021)	14
Fig. 23 Comparativo de las recargas realizadas por un vehículo eléctrico convencional y un vehículo eléctrico con fotovoltaica integrada. (Kauf, 2021)	15
Fig. 24 Curva IV de un módulo/generador fotovoltaico cuya morfología revela el impacto del sombreado.	16
Fig. 25 Variación de la irradiancia capturada por los paneles según localización. (Araki, et al., 2021)	17
Fig. 26 Normativa de automoción. (Markert, et al., 2021)	19
Fig. 27 Cargas eléctricas a aplicar según la ISO 16750.	20
Fig. 28 ISO 16750-1.	20

Fig. 29 Comparación de los tres ensayos de impacto, Ensayo de rotura (IEC 61730-2) Ensayo de caída fantasma (ECE-R43) y ensayo de cabeza de adulto (ECE R127). (Markert, et al., 2021) ...	24
Fig. 30 COMparacion de los ensayos climaticos según IEC 61730 y la ISO 16750-4. (Markert, et al., 2021).....	25
Fig. 31 Recomendaciones para un programa de cualificación definido a partir de la IEC 61730-2. (Markert, et al., 2021)	26
Fig. 32 Propuesta de programa de cualificación de módulos VIPV con la norma IEC 61730-2 como base y ensayos añadidos de la norma ISO 16750 (-1 a -5), ECE-R43, ECE-R127 e IEC 61215-2; se indican los ensayos añadidos, así como los eliminados de la estructura anterior existente; los ensayos de cualificación se etiquetan por separado.	27
Fig. 33 Orientación de un techo solar y de una puerta comparado con un módulo de una planta fotovoltaica de una planta fotovoltaica. (Araki, et al., 2021)	28
Fig. 34 Explicación gráfica de las sombras producidas por los alrededores, así como aquellas producidas por el propio panel. (Araki, et al., 2021)	28
Fig. 35 Resultados de las mediciones de la irradiancia en el techo solar en Sapporo. Características acordes a la ruta. (Araki, et al., 2021).....	30
Fig. 36 Autosombreado del panel fotovoltaico curvo. (Araki, et al., 2021)	31
Fig. 37 Puntos en discusión entre científicos e ingenieros. (Araki, et al., 2021).....	33
Fig. 38 Se observa la diferencia de tamaño entre el área proyectada y el área curva del módulo aplanada. (Ota, et al., 2022).....	34
Fig. 39 Infravaloración de la energía aportada para la medición del módulo fotovoltaico curvado. (New Energy and Industrial Technology Development Organization, 2019).....	35
Fig. 40. Inconsistencia entre las diferentes áreas, el área proyectada y el área total. (Araki, et al., 2020).....	35
Fig. 41 Diferencias entre el ensayo en interiores y lo que ocurre en el exterior. Esto produce pérdidas por coseno y auto sombreados: por ello se debe realizar un ensayo de la eficiencia angular. (Araki, et al., 2020)	36
Fig. 42 Ejemplo de área y curvatura de un módulo curvo situado en el techo.....	36
Fig. 43 Extracción de los parámetros de curva mediante CAD. (Ota, et al., 2022)	36
Fig. 44 Factores de corrección de curva. (New Energy and Industrial Technology Development Organization, 2019).....	37
Fig. 45 Factores de corrección de la curva y el parámetro representativo de la forma de la curva. (Araki, et al., 2021)	38
Fig. 46 Factores de corrección f1 y f2 (izquierda y derecha) y parámetro representativo de la forma de la curva “coving factor” en dos casos extremos, Bangkok y Omsk. (Araki, et al., 2020)	38
Fig. 47 Relación geométrica entre la curva del panel fotovoltaico y la fuente de luz. (Araki, et al., 2020).....	39
Fig. 48 Comparación de emisiones CO ₂ para distintas localizaciones con vehículos con o sin PV. Se ha utilizado un sistema de 800 Wp y en un recorrido diario de 15 km. (Araki, et al., 2021) .	39
Fig. 49 Relación entre las emisiones de CO ₂ de la red eléctrica, el porcentaje de uso de energía fotovoltaica y la reducción de CO ₂ estimada para VIPV. (Araki, et al., 2021).....	40
Fig. 50 Energía eléctrica generada mediante fotovoltaica y la cantidad de CO ₂ de la red eléctrica y el porcentaje mínimo de utilización de energía fotovoltaica para conseguir una reducción del CO ₂ . (Araki, et al., 2021)	40
Fig. 51 Emisión de CO ₂ en la electricidad generada mediante fotovoltaica. (Araki, et al., 2021)	41

Fig. 52 Emisión de CO ₂ en un sistema fotovoltaico integrado en un vehículo. (Araki, et al., 2021)	41
Fig. 53 Vehículos históricos con distintos niveles de integración fotovoltaica. (Sono Motors, 2021)	42
Fig. 54 Imágenes del Sunmobile. (Wikipedia, 2022)	44
Fig. 55 Sistema fotovoltaico cuyo uso es de climatización interior. (Ibañez, 2017)	45
Fig. 56 Sistema fotovoltaico en el techo solar del Mazda 929. (Yuan, 2017)	46
Fig. 57 Audi A8 D3 que contaba con un techo solar. (Valdivielso, 2022)	46
Fig. 58 Volkswagen Passat con techo solar. (Valdivielso, 2022)	46
Fig. 59 Mercedes Clase E (W211). (Valdivielso, 2022)	47
Fig. 60 Spoiler del Nissan Leaf. (Valdivielso, 2022)	47
Fig. 61 El Ford C-MAX Solar Energi Concept y explicación del funcionamiento de su cubierta. (Ibañez, 2017)	48
Fig. 62 Vehículo Aptera. (Aptera, 2022)	48
Fig. 63 Comparación del coeficiente aerodinámico (Cx) del Aptera con otros vehículos. (Aptera, 2022)	49
Fig. 64 Fotografías de los motores eléctricos “in-wheel”. (Aptera, 2022)	49
Fig. 65 Imágenes de las partes que componen el Aptera, por separado y juntas. (Aptera, 2022)	49
Fig. 66 Aptera donde se puede apreciar las células del capó y de la parte trasera. (Aptera, 2022)	50
Fig. 67 Esquema del Aptera donde se puede ver las células fotovoltaicas. (Aptera, 2022)	50
Fig. 68 características espectrales y eléctricas de las células Maxeon Gen III. (Sunpower, 2017)	51
Fig. 69 Dimensiones de la célula Maxeon Gen 3. (Sunpower, 2017)	51
Fig. 70 Lightyear 0 (Lightyear, 2022)	52
Fig. 71 Características del Lightyear 0 (Lightyear, 2022)	52
Fig. 72 Motor In-Wheel del Lightyear. (Lightyear, 2022)	52
Fig. 73 Ensayo aerodinámico (Lightyear, 2022)	53
Fig. 74 Sistema de baterías. (Lightyear, 2022)	53
Fig. 75 Sistema de gestión térmico del Lightyear 0 (Lightyear, 2022)	53
Fig. 76 Chasis del Lightyear 0 (Lightyear, 2022)	54
Fig. 77 Células sobre el capó (Lightyear, 2022)	54
Fig. 78 Sistema fotovoltaico del Lightyear 0 así como explicación del funcionamiento y autonomía (Lightyear, 2022)	54
Fig. 79 Sion, primer vehículo de Sono Motors (Sono Motors, 2022)	55
Fig. 80 Especificaciones técnicas del Sion. (Sono Motors, 2022)	55
Fig. 81 Batería del Sion (Sono Motors, 2022)	56
Fig. 82 Sistema de refrigeración del Sion. (Sono Motors, 2022)	56
Fig. 83 Sistema de recuperación de calor del Sion. (Sono Motors, 2022)	56
Fig. 84 Dimensiones del Sion. (Sono Motors, 2022)	57
Fig. 85 Techo Solar equipado en el Toyota Prius Plug in Hybrid. (Toyota Motor Corporation, 2021)	58
Fig. 86 Prototipo Toyota Prius PHV. (New Energy and Industrial Technology Development Organization; Sharp Corporation; Toyota Motor Corporation, 2019)	58
Fig. 87 Características de las células del Toyota Prius PVH así como una imagen de su colocación sobre el capó. (New Energy and Industrial Technology Development Organization; Sharp Corporation; Toyota Motor Corporation, 2019)	59

Fig. 88 Hoja de ruta de Hyundai y Kia para la inclusión de fotovoltaica en sus vehiculos. (Hyundai, 2019)	59
Fig. 89 Paneles en el techo del Sonata Hybrid (Hyundai Motor Group, 2019)	60
Fig. 90 Células del Hyundai Sonata (Young, 2022)	60
Fig. 91 Prototipo Mercedes Vision Eqqx.....	60
Fig. 92 Comparativo entre el Sonata Hybrid y el Toyota Prime (Hyundai Motor Group, 2020) .	61
Fig. 93 Eficiencia de distintas tecnologías fotovoltaicas según su uso y su coste. (Araki, et al., 2020)	62
Fig. 94 Relacion entre la eficiencia del módulo y su area de colocación. (Araki, et al., 2020)....	62
Fig. 95 Módulo de celulas mutiunión II-V de capa fina. (Heinrich, et al., 2020)	66
Fig. 96 Prototipos de VIPV usando celulas solares multiunion III-V en el Nissan e-NV200	67
Fig. 97 Célula de CIGS flexible. (Heinrich, et al., 2020).....	68
Fig. 98 A la izquierda un módulo de células flexibles orgánicas, a la derecha una célula de perovskita. (Heinrich, et al., 2020)	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Listado de vehículos VIPV. Listado no exhaustivo. (Araki, et al., 2021)	43
Tabla 2 Módulos ligeros y/o flexibles. (Araki, et al., 2020)	64
Tabla 3 Eficiencias de módulos terrestres medidas en condiciones CEM. (Araki, et al., 2021)..	65
Tabla 4 Resumen de las características de los vehículos desarrollados con estas células.	67

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Fórmula de aerodinámica adimensional.	13
Ecuación 2 Calculo de la eficiencia de un módulo.	34
Ecuación 3 Calculo de la potencia de entrada en un módulo o célula.....	34
Ecuación 4 Definición del factor de curva.....	36
Ecuación 5 Factor de corrección de curva.	37

RESUMEN

Hoy en día existen un gran número de aplicaciones en las que se puede integrar la energía fotovoltaica. Cuando esta se produce en vehículos se denomina VIVP (por las siglas en inglés de *Vehicle Integrated Photovoltaics*).

Aunque surgió a comienzos de la década de 1950, el resurgimiento con fuerza en esta década de los VIPV se produce por la mejora de la tecnología fotovoltaica y por las políticas medioambientales llevadas a cabo por diversos gobiernos e instituciones con el fin de reducir las emisiones de CO₂.

Aún persisten incógnitas en la VIPV debido a la necesidad de estimar cuán efectiva es la fotovoltaica a bordo, las estimaciones de reducción de CO₂ así como otras problemáticas de funcionamiento que se pueden producir durante la vida útil del propio vehículo a los cuales los módulos tradicionales no se han enfrentado. Este trabajo pretende realizar una revisión del estado de la técnica del VIPV, con una cierta perspectiva histórica sobre el mismo.

ABSTRACT

Nowadays, there are a wide number of applications in which photovoltaics can be integrated. When it is produced on vehicles, it is called VIVP (*Vehicle Integrated Photovoltaics*).

Although it emerged in the early 1950s, the strong resurgence of VIVP in this decade is due to the improvement of photovoltaic technology and the environmental policies pursued by various governments and institutions to reduce CO₂ emissions.

There are still unknowns in VIPV due to the need to estimate how effective on-board photovoltaics are, estimates of CO₂ reduction as well as other operational issues that may occur during the lifetime of the vehicle itself that traditional modules have not faced. This work aims to provide a review of the state of the art of VIPV, with some historical perspective on it.

1 OBJETO

El presente Trabajo Fin De Máster tiene como objetivo dar a conocer la integración fotovoltaica en los vehículos, lo cual se conoce como VIPV (por las siglas en inglés de *Vehicle Integrated Photovoltaics*) que está empezando a ser común debido al desarrollo de la tecnología fotovoltaica, especialmente por el aumento de la eficiencia de las células, nuevos materiales y la integración de estas en distintos ámbitos, así como el aumento de la conciencia medioambiental de la mayoría de la población.

En este trabajo se realizará una revisión bibliografía del estado del arte; sus ventajas y desventajas, normativa aplicable, pasado, presente y futuro.

2 INTRODUCCIÓN

El sector del automóvil se ha desarrollado y prosperado gracias a una fuente de energía abundante y barata, el petróleo. Durante más de un siglo, su dominio ha sido indiscutible y durante décadas la mejoría tecnológica se hizo sin tener en cuenta las cuestiones medioambientales.

Tras la crisis del petróleo y de la atestiguación de que esta fuente de energía es finita, se produjo una mejora las prestaciones de los vehículos térmicos; reducción del consumo y emisiones, así como el resurgimiento de otras tecnologías motrices anteriormente desechadas. Desde entonces la industria del automóvil ha invertido en el desarrollo de nuevos motores menos contaminantes, en la hibridación, la electrificación, así como otras fuentes energéticas como pueden ser los combustibles sintéticos e el hidrogeno.

Para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de los automóviles, se han puesto en marcha en países de todo el mundo iniciativas encaminadas a un rápido despliegue de los vehículos eléctricos (VE) y vehículos híbridos eléctricos (HEV). Sin embargo, a menos que se pueda suministrar energía limpia obtenida de fuentes de energía renovables, estos vehículos tendrán un efecto limitado en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Es por ello por lo que la electromovilidad es uno de los principales pilares de los esfuerzos mundiales de descarbonización. Cada vez hay más vehículos eléctricos disponibles en todo el mundo y cada vez son más competitivos, gracias a la continua reducción del coste de las baterías (International Energy Agency, 2022). Los VE podrían dominar pronto los mercados de turismos y de furgonetas de reparto ligeras en Europa. En cuanto a las energías renovables, la fotovoltaica se encuentra entre las tecnologías de generación de electricidad más rentables y ha sido la fuente de generación de energía que más ha crecido en los últimos años. (International Energy Agency, 2022)

Dentro de los vehículos eléctricos puros o híbridos podemos encontrarnos con la tipología de vehículos en la que se centra este trabajo, los vehículos con fotovoltaica integrada. El desarrollo del VIPV resultará crucial para reducir las emisiones de CO₂. Además, estos pueden servir como infraestructura de energía limpia, que es esencial para lograr una sociedad descarbonizada. Aunque los vehículos eléctricos, los vehículos con pila de combustible y los vehículos eléctricos híbrido tienen la ventaja de que las emisiones de CO₂ son menores que las

de los vehículos con motor de combustión interna es necesaria una mayor reducción de las emisiones de CO₂ para lograr una sociedad neutra en carbono. Se espera que la integración de módulos fotovoltaicos en los vehículos sea una forma eficaz de reducir las emisiones de CO₂.

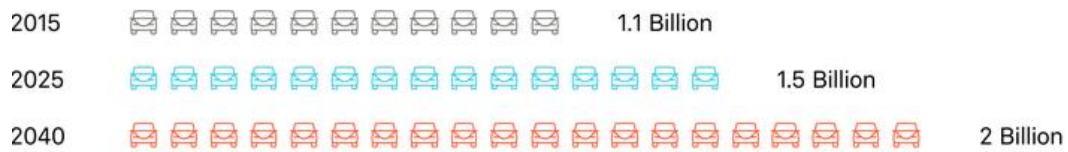


Fig. 1 Estimación del crecimiento de coches en el mundo. (Lightyear, 2022)

Para ello se instalan módulos fotovoltaicos en el techo del vehículo cubriendo una parte de la demanda energética mediante energía solar. Esto es debido a la situación del techo, que es el mejor lugar de la carrocería del vehículo para colocar paneles fotovoltaicos debido a que otros lugares como puertas y capó tienen menos luz solar disponible de media anual y requisitos mecánicos más estrictos. Estas dificultades (planitud, falta de normativa, requerimientos mecánicos) serán tratadas posteriormente en este trabajo.

Hoy en día, los fabricantes de coches tradicionales están desarrollando soluciones fotovoltaicas integradas en el vehículo (por ejemplo, el Toyota Prius PHEV, el Hyundai Sonata, el Hyundai Ioniq 5). También se suman empresas de nueva creación, Lightyear, Sono Motors, Aptera, las cuales han anunciado coches que contarán con energía fotovoltaica integrada con una capacidad cercana o superior a un kW de potencia en Condiciones Estándares de Medida (CEM), lo que podría proporcionar más de 30 km de autonomía adicional en un día soleado de verano en climas templados. (Newman, 2020)

Pero para una mejor integración de la fotovoltaica en los VIPV hay que recurrir a diseños muy especiales, extremadamente aerodinámicos y maximizando la superficie horizontal del coche, y a su vez recurrir a componentes y materiales ligeros.

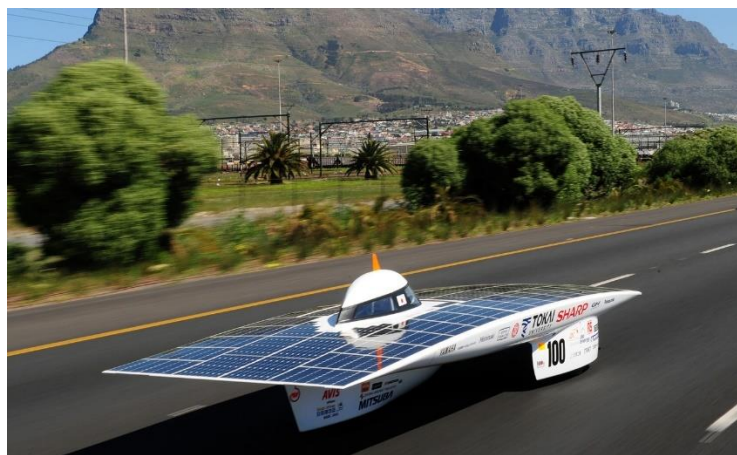


Fig. 2 Vehículo solar participante en la World Solar Challenge. (Wikipedia, 2022)

Para explorar el potencial de estos vehículos es necesario conocer la energía generada. Lo que permitirá cuantificar la frecuencia de carga, la cantidad de energía necesaria que deberá suministrar la red eléctrica y a aclarar la cantidad de reducción de CO₂. En particular, los módulos en los VIPV pueden montarse en el techo de varias formas en lugar de necesitar que la carrocería del vehículo se diseñe para alojarlos. Se espera que las carrocerías de los vehículos tengan superficies curvas aerodinámicas; sin embargo, esto puede dar lugar a

problemas estructurales, debido a la superficie curva. La estimación de la capacidad de instalación de VIPV requiere cuantificar la cantidad de fotovoltaica que se puede instalar en los techos de los vehículos de pasajeros actuales y cómo distribuirla, lo que está limitado por cuestiones ópticas, mecánicas y eléctricas, cuando esto no ocurre suceden cosas como la situación representada en la Figura 3.



Fig. 3 Esto no es un VIPV, aunque lo parezca. Fuente: Internet.

Por otra parte, la bibliografía científica sobre la eficiencia del VIPV es todavía escasa y los análisis publicados hasta ahora sólo abarcan períodos de tiempo cortos o lugares únicos (Araki, et al., 2021).

2.1 ¿QUÉ ES LA FOTOVOLTAICA INTEGRADA?

Actualmente la electricidad generada mediante energía solar procede mayoritariamente de instalaciones cuya función principal y única es captar la mayor posible de irradiancia para convertirla en electricidad. Esto no es así en la fotovoltaica integrada.

En la fotovoltaica integrada se puede llegar a colocar en la superficie externa de edificios, carreteras, superficies agrícolas, lagos, vías de tren y en los vehículos, de manera que las células solares a veces no son visibles camuflándose en las superficies de estos objetos cuya función principal no es la generación eléctrica. Los nuevos tipos de tecnología y opciones de diseño permiten elegir libremente los formatos y colores de los módulos integrados, de modo que las conexiones y el propio módulo con los elementos que lo componen pueden disimularse completamente si es necesario. Los requerimientos necesarios del uso del objeto o instalación donde se realiza la integración fotovoltaica se deben tener en cuenta, ya sea su peso o su resistencia mecánica, realizando una adecuada elección de la tecnología fotovoltaica que mejor se adapte. Estos requerimientos no siempre se cumplen, sucediendo situaciones como la de Figura 4.



Fig. 4 Esto no es integración fotovoltaica en edificios. Fuente: Internet

Mientras que el potencial teórico abarca el uso completo de los recursos correspondientes, el potencial técnico se limita a aquellas aplicaciones para las que la utilización es técnicamente plausible. La siguiente figura muestra las estimaciones del potencial técnico de integración de la energía fotovoltaica en Alemania. La fotovoltaica integrada en edificios (BIPV) y la agrivoltaica ya ofrecen por sí solas superficies para generar una potencia nominal de 1.700 GWp y 1.000 GWp en ese país. Los potenciales económico-prácticos que son relevantes para la implementación se determinan a partir de los potenciales técnicos cuando también se tienen en cuenta otras condiciones límite económicas, normativas y prácticas y cuestiones de aceptación (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2022).

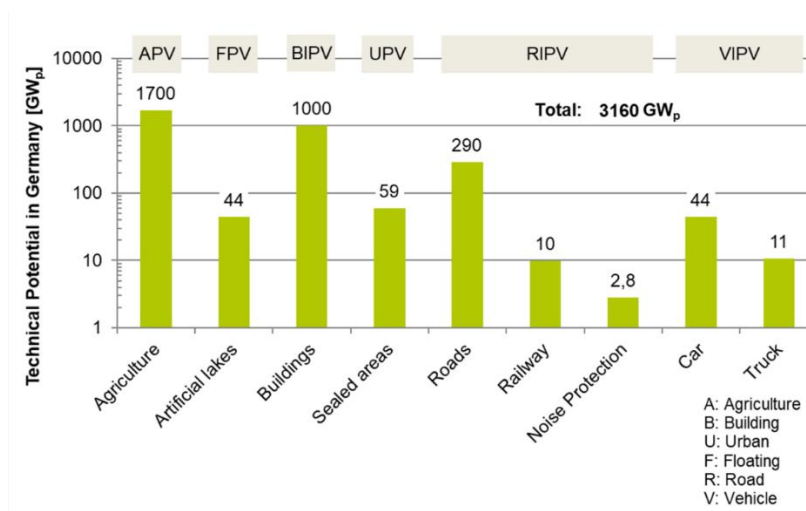


Fig. 5 Estimación del potencial de la fotovoltaica integrada en diferentes ambitos. (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2022)

3 VEHICLE INTEGRATED PHOTOVOLTAICS (VIPV)

3.1 DEFINICIÓN

Como se ha comentado anteriormente, VIPV designa la integración mecánica, eléctrica y de diseño de los módulos fotovoltaicos en los vehículos. Los módulos fotovoltaicos se colocan en el exterior del vehículo y se conectan a la batería principal o auxiliar de este. Al mismo

tiempo, los módulos fotovoltaicos se integran en zonas o componentes del vehículo, como son el techo o el capó. El VIPV aumenta la autonomía de los vehículos eléctricos reduciendo el balance de CO₂. La estética de un vehículo es importante, por ello se debe realizar una buena integración de los módulos en el diseño del vehículo (diseños y curvaturas). La electricidad adicional generada en el vehículo aumenta la autonomía en varios kilómetros al día, es decir su producción energética es suministrada parcial o totalmente mediante energía solar, permitiendo la carga de la batería principal o auxiliar.



Fig. 6 Imagen de un VIPV que cuenta con 300 Watios de potencia en el techo. (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2022)

En la actualidad para solventar la poca potencia obtenible mediante fotovoltaica, los fabricantes sortean estos problemas reduciendo las necesidades energéticas de los vehículos utilizando materiales ligeros para reducir el peso y mejorando la aerodinámica. Las características de estos vehículos dependerán de si son eléctricos totalmente o híbridos.

Los vehículos con integración de energía fotovoltaica pueden ofrecer grandes beneficios a los conductores y ser aliados en la transición energética. La introducción en el mercado supondrá un gran cambio debido a las características especiales de los VIPV como ha sucedido con los eléctricos puros; se deberá cambiar el tipo de vehículo en venta, concienciar a los compradores sobre su uso y los cambios que se deberá realizar para conducirlos. En un primer momento los vehículos que supondrán el desembarco de los VIPV serán aquellos de corta autonomía, poco peso y eléctricos de alta eficiencia. Esta integración tendrá como función principal alimentar los componentes auxiliares como puede ser el sistema de aire acondicionado/calefacción y refrigeración. Esto ya ha sido desarrollado como puede verse en algunos vehículos de pasajeros tratándose en otro punto del presente trabajo. Es decir, la integración fotovoltaica tiene varios grados de aplicación según la demanda energética que vaya a cubrir, como se ve en la Figura 7.

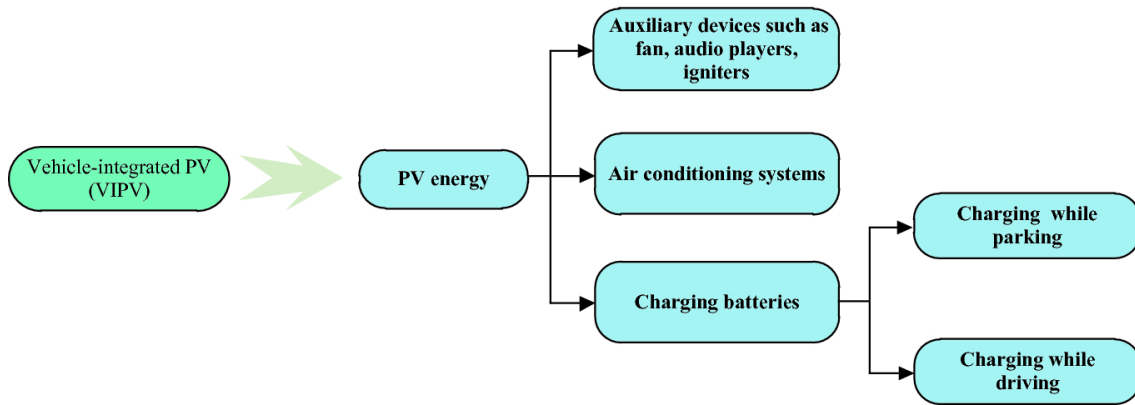


Fig. 7 Utilización de la energía solar de los VIPV según la demanda cubierta. (Ben Said-Romdhane & Skander-Mustapha, 2021)

En el caso de los vehículos comerciales pesados, remolques de camiones, vehículos de mercancías y autobuses, la integración de energía fotovoltaica a bordo puede cubrir la demanda eléctrica de los sistemas auxiliares debido a la gran superficie disponible. Estos vehículos pesados con fotovoltaica integrada están siendo introducido en el mercado actualmente.

El funcionamiento de la fotovoltaica en los VIPV es exactamente igual a una planta solar híbrida convencional; están compuestos por el panel solar o conjunto de células, el regulador y la batería. Cuando la luz solar es absorbida por el módulo fotovoltaico, se produce electricidad que es almacenada en baterías.

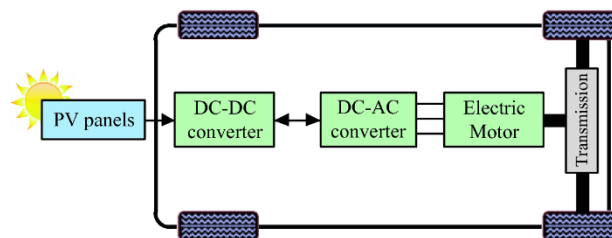


Fig. 8 Esquema simple de funcionamiento de un vehículo con VIPV. (Ben Said-Romdhane & Skander-Mustapha, 2021)

El controlador realiza el cambio de voltaje y el MPPT (*Maximum power point tracking*) controla y modifica la corriente. Este proceso ajusta la carga eléctrica del módulo solar para que las células puedan ofrecer su rendimiento óptimo; debido al movimiento del Sol y del vehículo la energía captada por las células no es la misma. Además, no todas las células solares en un VIPV poseen la misma orientación o inclinación.



Fig. 9 Unidad de MMPT del Sono Sion. (Sono Motors, 2021)

Esto significa, que la irradiancia y la temperatura en los módulos fotovoltaicos cambian. Por lo tanto, antes que la electricidad generada pueda almacenarse en la batería, la intensidad es ajustada por el MPPT. El MPPT combina las diferentes tensiones de los módulos hasta un nivel común inferior en continua y una vez pasada por el controlador, se cambia el voltaje a la tensión del automóvil y se almacena en la batería de arranque, así como en la batería auxiliar. Esta electricidad almacenada en la batería auxiliar tiene la función de aumentar la autonomía del vehículo, mientras que la de la batería de arranque reduce el tiempo que necesita el alternador para cargar el motor de arranque, reduciendo así la carga para el motor y mejorando la eficiencia del combustible.

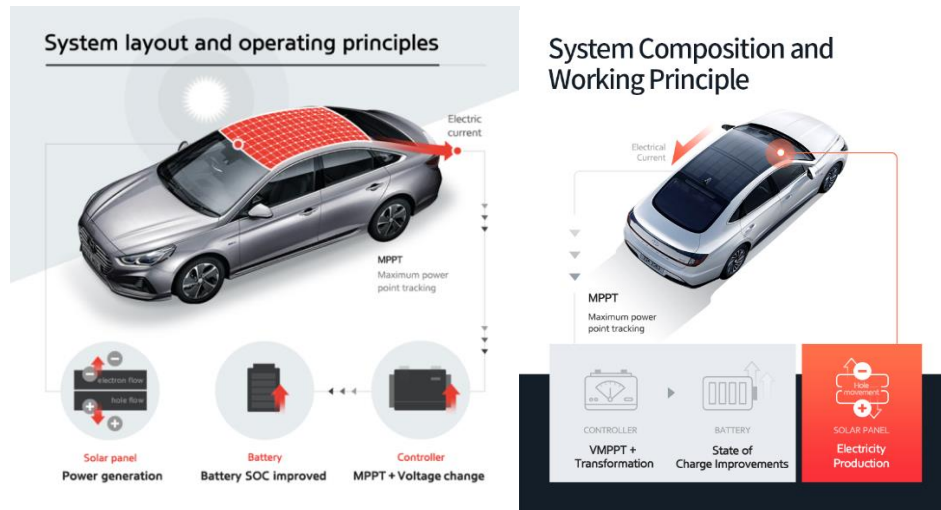


Fig. 10 Funcionamiento de los VIPV. (Hyundai Motor Group, 2020)

Las ventajas de los VIPV son:

- Aumento de la autonomía.
- Reducción de uso de la red eléctrica, así como de la infraestructura de recarga.
- Ahorro económico debido a la menor necesidad de recarga eléctrica.
- Reducción del CO₂ emitido ya sea en coches de combustión interna como totalmente eléctricos.
- Reducción de la necesidad de centrales fotovoltaicas convencionales, al reducirse las necesidades energéticas.

Pero también cuentan con numerosos desafíos:

- Necesidad de aplicar nuevos materiales y métodos de fabricación respecto a la fotovoltaica tradicional.
- Tamaños cambiantes de células adaptándose a cada vehículo.
- Limitación de la superficie de los paneles fotovoltaicos/células.
- Necesidad de una mayor eficiencia respecto a la superficie utilizada.
- Gestión y utilización de la energía generada:
 - Diferentes tipos de vehículos.
 - Perfiles de conducción.
 - Lugares y épocas del año con diferentes niveles de recurso solar.
 - Irradiancia variable, sombreado parcial de células.
- Integración de los componentes fotovoltaicos a bordo manteniendo la fiabilidad y la seguridad mecánica y física.

- Normalización y estandarización mediante normativa.

3.2 MERCADO

Los vehículos eléctricos (VE) actualmente constituyen un mercado nicho para la fotovoltaica, pero se espera su aumento los próximos años. El bagaje técnico que se puede conseguir en los VIPV es difícilmente obtenible en la fotovoltaica tradicional debido a los grandes retos de la integración fotovoltaica comentados anteriormente.

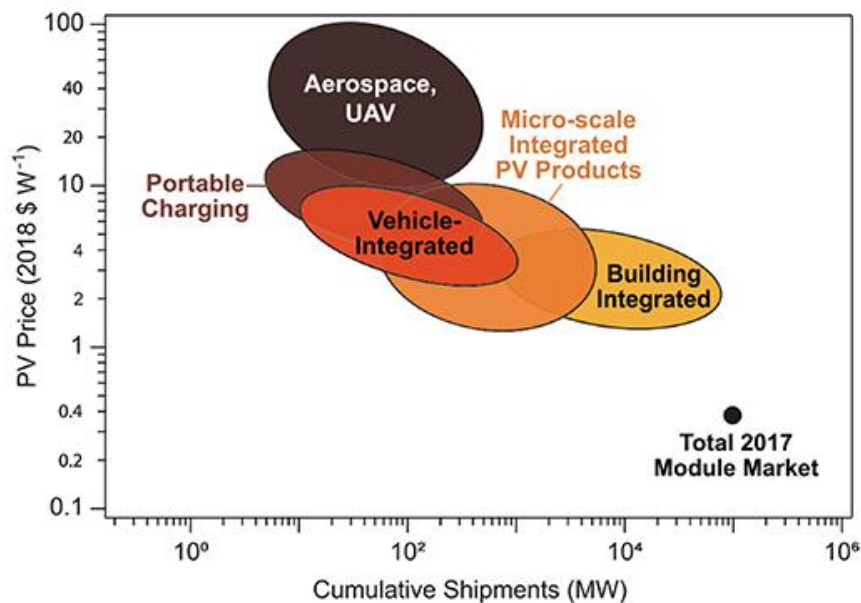


Fig. 11 Posible tamaño de mercado para diferentes tecnologías fotovoltaicas y precios estimados. (Ben Said-Romdhane & Skander-Mustapha, 2021)

En el anterior gráfico se estima varios tamaños de mercado y precios de la fotovoltaica no tradicional. La parte superior de cada burbuja corresponde a una estimación del rango más alto de precios en 2017 y la parte inferior estima las reducciones potenciales de precios durante 10 años asumiendo una tasa de reducción igual que en el mercado tradicional fotovoltaico. La izquierda de cada burbuja corresponde a una estimación del tamaño del mercado al principio del periodo, la derecha tras un crecimiento anual compuesto del 20% durante 10 años.

Las estadísticas de producción anual de vehículos proporcionan una indicación aproximada del tamaño potencial del mercado de los VIPV. En 2019, se fabricaron un total de 87 millones de vehículos de pasajeros y comerciales ligeros junto con un total de 4,4 millones de autobuses y camiones. Suponiendo una eficiencia del módulo del 22%, la existencia de 4 m² disponibles en un vehículo de pasajeros y 30 m² en autobuses y camiones, esto equivale a una capacidad anual total de aproximadamente 100 GWp, similar al tamaño actual del mercado de fabricación fotovoltaica terrestre. A corto plazo, el mercado VIPV será atendido de las tecnologías fotovoltaicas que se pueden adaptar de la fabricación fotovoltaica terrestre y espacial, pero este mercado es lo suficientemente grande como para que surja un nuevo tipo de productos VIPV que combinen los requisitos únicos de esta aplicación, ocupando la zona de alta eficiencia y coste moderado. (Ben Said-Romdhane & Skander-Mustapha, 2021)

3.3 CLASIFICACIÓN

Según la clasificación de los VE presentada en la siguiente figura se tiene que los vehículos con VIPV pueden clasificarse en dos grandes grupos: vehículos eléctricos híbridos (HEV) y vehículos totalmente eléctricos (AEV).

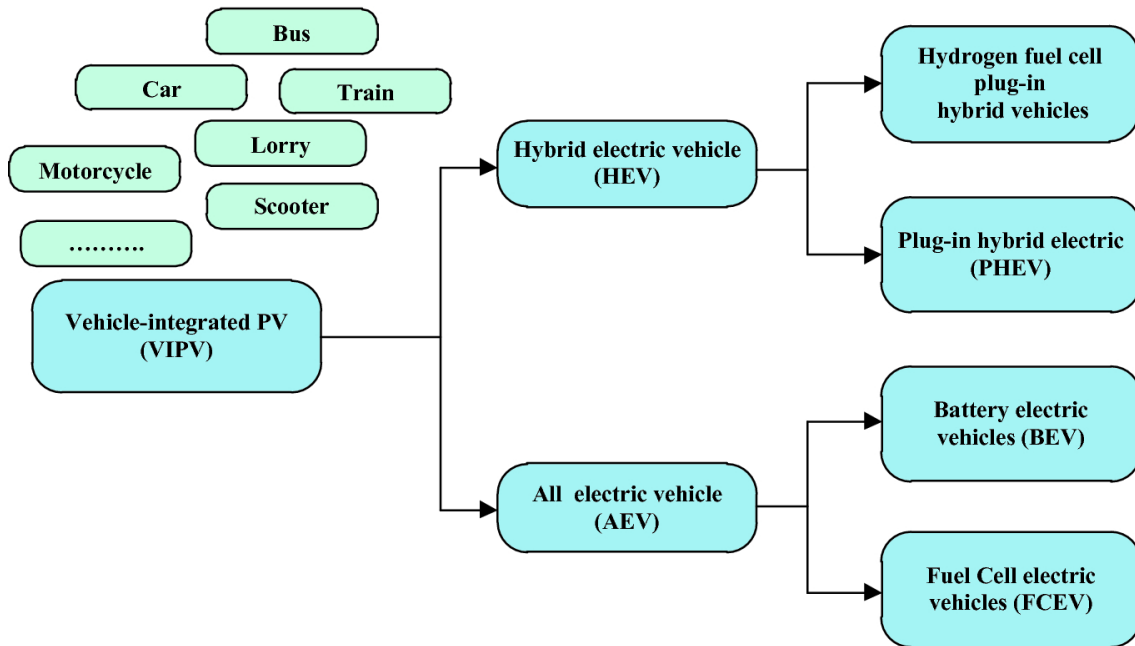


Fig. 12 Clasificación de los vehículos con VIPV. (Ben Said-Romdhane & Skander-Mustapha, 2021)

Los HEV son vehículos que incorpora varios motores de propulsión (combustión interna y eléctrica) e incluye los vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV) que incorporan baterías y conexión para la carga externa y los vehículos híbridos enchufables de pila de combustible de hidrógeno que se encuentran en un estado inicial de desarrollo.

El grupo de los vehículos totalmente eléctricos (AEV) comprende los vehículos de pila de combustible (FCEV), los cuales no son comunes y es un mercado nicho y los vehículos eléctricos de batería (BEV) que empiezan a ser comunes en las carreteras.

La integración de la fotovoltaica se puede llevar a cabo en cualquier tipo de vehículo híbrido o eléctrico.

Las tipologías de híbridos que existen actualmente es la siguiente:

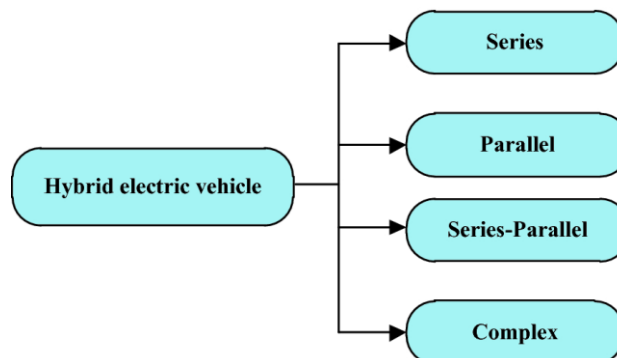


Fig. 13 Tipología de híbridos. (Ben Said-Romdhane & Skander-Mustapha, 2021)

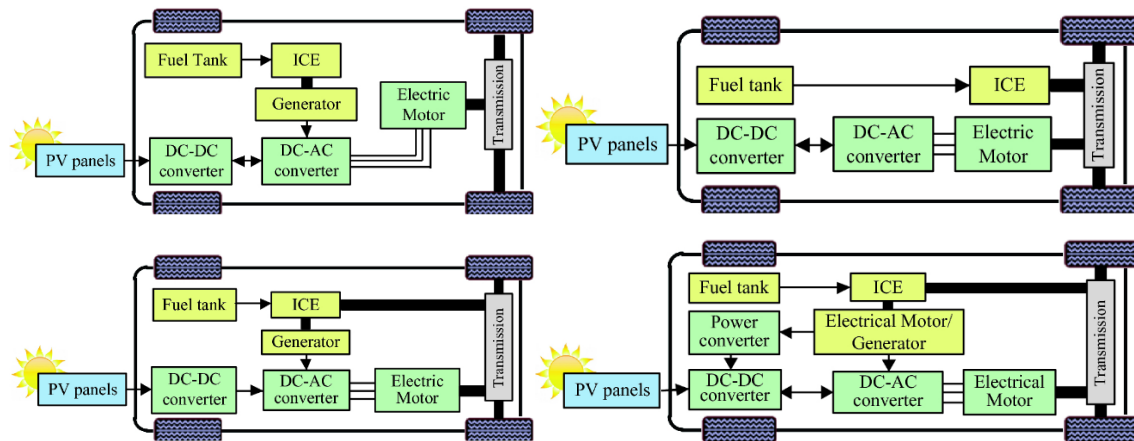


Fig. 14 De izquierda superior a derecha inferior se ven los esquemas básicos de híbrido en serie, híbrido en paralelo, híbrido serie-paralelo y finalmente complejo. (Ben Said-Romdhane & Skander-Mustapha, 2021)

En la Figura 14 se tienen los esquemas de los vehículos híbridos más la integración fotovoltaica que se puede realizar en ellos.

En la Figura 14 parte superior izquierda es la tipología de híbrido en serie; el motor eléctrico produce la fuerza motriz del vehículo y el motor térmico se utiliza únicamente para recargar la batería mediante un generador.

En la Figura 14 parte superior derecha es la tipología de híbrido en paralelo; el motor eléctrico y el motor térmico producen la fuerza motriz del vehículo. En este tipo de híbrido el motor eléctrico puede funcionar como generador recargando la batería.

En la Figura 14 parte inferior izquierda es la tipología de híbrido serie- paralelo; se combina las características de los dos tipos anteriores.

Finalmente, en la Figura 14 parte inferior derecha muestra la tipología compleja en la cual se cuenta con dos motores eléctricos uno de los cuales puede funcionar como generador.

3.4 ¿POR QUÉ AHORA?

Los VIPV han comenzado a ser un tipo de vehículo que está al alcance de la mayoría de la población, se ha abandonado la situación anterior en la que eran vehículos “normales” con una opción extra de incluir tecnología fotovoltaica o eran simplemente prototipos. Esto es debido a una serie de factores, entre los que se encuentran los siguientes:

- Mejoras tecnológicas:
 - El aumento de la eficiencia de algunas tecnologías (tandem perovskita/C-Si) de las células solares alrededor de un 2% por año. (Newman, 2020)
 - Mejora de la tecnología de baterías utilizadas.
- Disminución de costes:
 - Desde 2008 se ha producido una caída del coste de las células en un 80% (International Energy Agency, 2022).
 - Caída de los precios de las baterías. Su precio disminuye cada año al menos un 10% respecto al año anterior. Desde el 2010 se ha reducido un 89%.
- Aumento de la demanda del mercado de los vehículos eléctricos, alrededor de un 30% de crecimiento. (International Energy Agency, 2022)

- Las políticas gubernamentales favoreciendo las energías limpias y los vehículos eléctricos.

Hasta cierto punto, los VIPV sustituyen la electricidad de la red o de las estaciones de carga por la generada a bordo gracias a la integración fotovoltaica. Esto supone la reducción de las emisiones de CO₂ durante la conducción (en la mayoría de los países, se ha de analizar el *mix* energético de cada país), ahorro de costes y reducción de la frecuencia de carga de la red, así como beneficios menos cuantificables en términos de autonomía e independencia.

Según Bloomberg (BloombergNEF, 2022), los precios de los paquetes de baterías han disminuido un 89 % desde 2010. Mientras que el precio por kWh era de 1.220 dólares en 2010, se ha reducido a tan solo 132 dólares en 2021. A su vez la tecnología de las baterías ha mejorado sobre todo la densidad energética de estas. Actualmente, las baterías de iones de litio tienen una mejor potencia específica que las de níquel-hidruro metálico o plomo-ácido, así como sus consecuencias medioambientales.

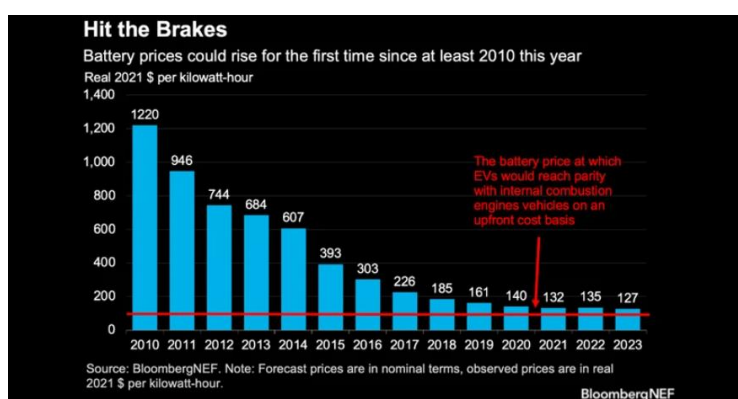


Fig. 15 Disminución del precio de las baterías por kilovatio hora. En 2022 se podría ver el primer aumento de precios. (BloombergNEF, 2022)

Las baterías actualmente ofrecen una mayor autonomía a un menor coste, siendo esta una de las muchas razones de la popularización de los coches eléctricos, siendo a su vez un elemento importante para los vehículos con integración fotovoltaica.

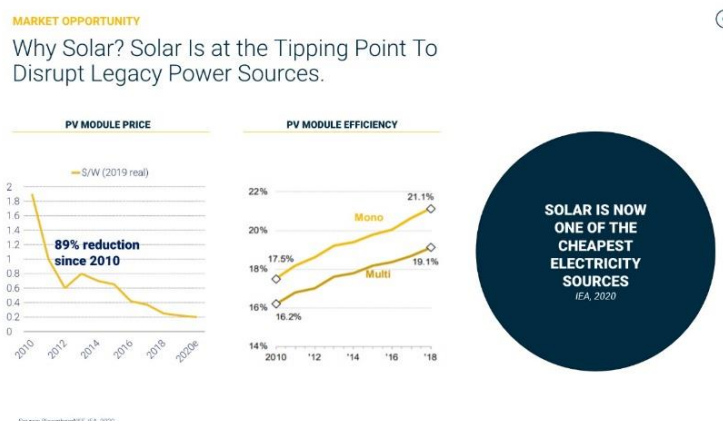


Fig. 16 Disminución del precio de los paneles así como aumento de la eficiencia. (Sono Motors, 2022)

En 2020, la Agencia Internacional de la Energía (AIE) identificó la energía solar como la fuente de energía más asequible en todo el mundo. La integración fotovoltaica en los vehículos hace

requerir un menor número de recargas que un coche eléctrico con la misma capacidad de batería y consumo energético.

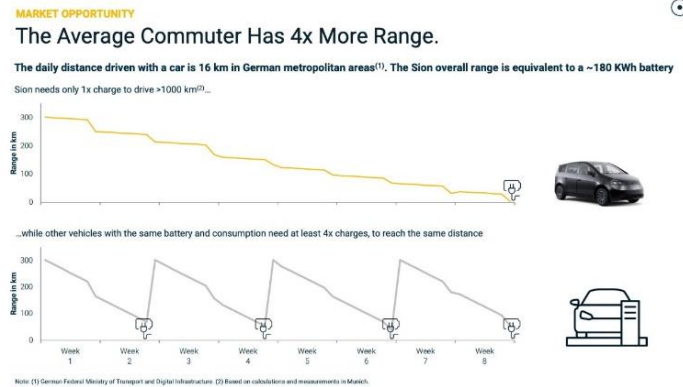


Fig. 17 Comparativo de las necesidades de recarga entre un vehículo eléctrico y un VIPV (Sion). (Sono Motors, 2022)

Todos los fabricantes de automóviles han ido aplicando, sobre todo en la última década, diversas medidas para ir consiguiendo coches más eficientes. Las más importantes han sido:

- Reducir la masa (y en consecuencia, el peso), empleando nuevos materiales y aligerando componentes, pues a menor masa, menos esfuerzo tiene que hacer el motor y menor es el consumo.
- Mejorar la aerodinámica, pues con menor superficie frontal y menor resistencia al aire, menor es el consumo, sobre todo a alta velocidad. Disminución del coeficiente de arrastre C_x .
- Emplear neumáticos de baja resistencia a la rodadura y menor peso, que ayudan a consumir menos, esto se traduce en neumáticos con una huella menor, menor anchura del neumático.
- Y sobre todo desarrollar motores más modernos cada vez más eficientes, con diseños mejorados de la cámara y de la admisión, modificando el ciclo (Atkinson, Miller), con inyección directa, con más compresión, con turbocompresores, reduciendo rozamientos internos.

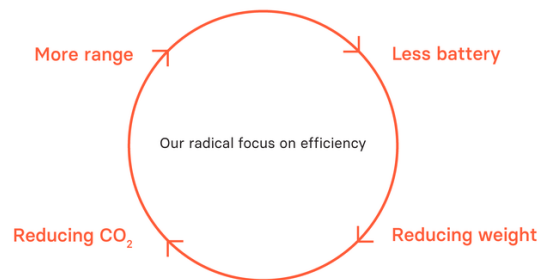


Fig. 18 Esquema para aumentar la eficiencia de los VIPV. (Lightyear, 2022)

Energy consumption of the car depends on three parts:

- 1 Heating system
- 2 Rolling resistance
- 3 Aerodynamics

Fig. 19 Principales consumos energéticos en un vehículo. (Lightyear, 2022)

La necesidad energética para mover un vehículo se eleva a la potencia de dos con la velocidad, la aerodinámica es un gran consumidor de energía.

Ecuación 1. Fórmula de aerodinámica adimensional.

$$\frac{1}{2} \rho V^2 S_{\text{ref}}$$

Donde ρ es la densidad del fluido donde se mueve el cuerpo en Kg/m^3 , V es la velocidad relativa de la corriente del fluido incidente sin perturbar en m/s y S_{ref} la superficie de referencia en m^2 .

De hecho, a velocidades de autopista, la energía necesaria para vencer la oposición realizada por el aire al movimiento del vehículo representa alrededor del 60% del consumo total de energía.

How do our aerodynamics work?

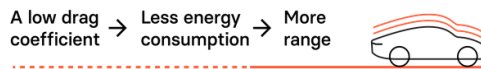


Fig. 20 Explicación gráfica de como la reducción del coeficiente de arrastre mejora la autonomía. (Lightyear, 2022)

Un bajo coeficiente aerodinámico C_x se traduce en un coche más económico que consume menos energía y, por tanto, puede llegar más lejos con una sola carga.

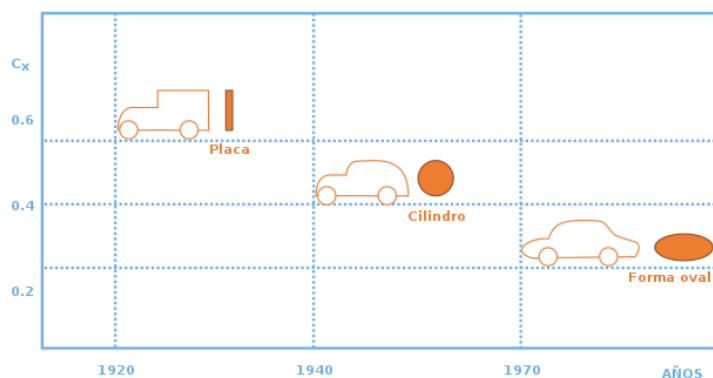


Fig. 21 Evolución en el tiempo de la resistencia aerodinámica de automóviles comparado con el cambio en geometría de diferentes objetos (desde aplanados hasta ovalados) Wikipedia

3.5 DIFERENCIAS DE UN VEHÍCULO CON VIPV Y UN VEHÍCULO ELÉCTRICO CONVENCIONAL

Los vehículos que cuentan con integración fotovoltaica y los eléctricos convencionales pueden parecer muy parecidos, pero tienen grandes diferencias.

Los VIPV tienen una serie de ventajas respecto a los VE (Kauf, 2021):

- Reducción de la dependencia de la red eléctrica, menor necesidad de recargar la batería, lo que conlleva a un alivio del consumo de la red, favoreciendo los consumos locales.
- Económica al disminuir el uso de la red eléctrica para la recarga de estos.
- Aumento de la autonomía de la batería y posibilidad de reducción de la capacidad de está obteniendo los mismos km recorridos gracias a la recarga “gratuita”.
- Reducción del vaciado de la batería debido a consumos fantasmas (consumos auxiliares).
- La no necesidad de inversor: se produce en CC y se consume en CC.
- Posible ahorro de costes de 200-350 euros al año.

Las investigaciones muestran que, en lugares con muchas horas de luz solar, los momentos de carga pueden reducirse en un 50%, respecto a un vehículo eléctrico convencional con los mismo consumos y autonomía de la batería. Esto supone un cambio de paradigma en cuanto a la utilidad de los vehículos eléctricos para los desplazamientos diarios, puesto que para estos desplazamientos (<30 km) se pueden realizar sin necesidad de recargar el vehículo (Newman, 2020). Los datos muestran que, en verano, algunos conductores no tienen que enchufar sus vehículos EV para cargarlos durante un periodo de 3 a 4 meses. Esto podría significar que añadir energía solar a un VE puede convertirse en una poderosa propuesta de venta única para los fabricantes de automóviles. (Kauf, 2021).

Location	Energy demand [kWh / year]	Potential PV Generation (% of energy dem.)	Reduced Grid Dependence (CMs)	Savings (/year)	CO ₂ (/year)
Maastricht	1486	53%	56%	€ 234	273 kg
Madrid	1518	80%	32%	€ 354	410 kg
Stockholm	1537	48%	62%	€ 218	254 kg
• Simple driving profile – 10k km/year commuting • Conservative charging strategy • Grid charging cost – € 0.30 / kWh • CO₂ emission factor, grid consumption – 0.5 kg-CO₂/kWh • Irradiance data from 2018 © Anna Carr, Teun Burgers, Erik van den Tillaart, Bonna Newman					

TNO innovation
for life

Fig. 22 Estimaciones de los beneficios de la integración fotovoltaica en un vehículo. (Kauf, 2021)

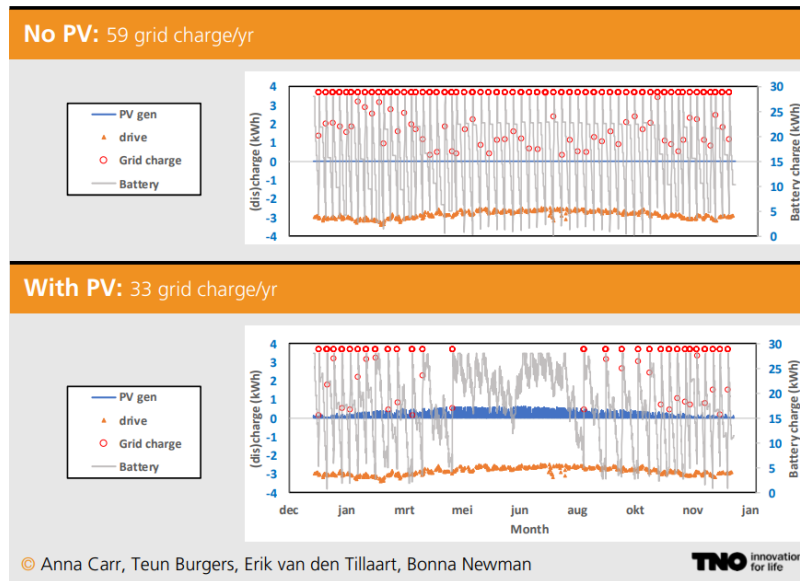


Fig. 23 Comparativo de las recargas realizadas por un vehículo eléctrico convencional y un vehículo eléctrico con fotovoltaica integrada. (Kauf, 2021)

Sin embargo, existen desventajas a tener en cuenta:

- La distancia recorrida por un vehículo solar utilizando únicamente el sol depende totalmente de las condiciones atmosféricas y de localización del vehículo.
- En localizaciones de meteorologías extrema pueden no suponer ninguna ventaja e incluso una desventaja

4 DESAFÍOS DE LOS VIPV

Como se ha comentado anteriormente no todo son ventajas ya que actualmente la integración fotovoltaica en los vehículos tiene los siguientes desafíos:

- Existencia de un gran rango de temperatura, desde -40°C hasta 120°C o superiores, este rango de temperaturas es aquel donde cualquier elemento eléctrico del vehículo debe funcionar según esta especificado en la normativa automotriz. .
- Posibilidad de altas irradiancia y gran variabilidad de estas, lo que conlleva sombreado parcial.
- Grandes estreses mecánicos:
 - Conexión al vehículo.
 - Vibraciones de la carretera.
 - Pequeños impactos (pequeños escombros que se encuentran en la carretera)
 - Grandes impactos debidos a accidentes y otras situaciones.
- Combinación de choques térmico y mecánico.
- Alto riesgo de daños por sombreado parcial causando puntos calientes entre otros problemas
- La inexistencia de normativa actual referente a la integración de fotovoltaica en los vehículos.
- Limitada área de colocación para los paneles solares.
- Requerimientos de funcionamiento.

- Limitaciones de la conducción en el tráfico urbano.

La temperatura de las células fotovoltaicas a bordo es mayor en comparación con una central fotovoltaica con módulos montados sobre una estructura fija debido a la menor convección. Además, las variaciones no uniformes de la temperatura de las células fotovoltaicas se sumarán a las pérdidas por desajuste ya existentes.

El hecho del continuo movimiento de los VIPV y del movimiento relativo del Sol genera una irradiancia variable que es causada principalmente por el sombreado parcial de los paneles fotovoltaicos por las infraestructuras cercanas a la carretera. Registrando una gran variabilidad en la tensión del panel solar reduciendo la eficiencia del conjunto fotovoltaico.

El seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) y el rendimiento del convertidor DC/DC pueden ser menos eficaces y eficientes debido a los diferentes mecanismos de pérdida de energía descritos anteriormente. De hecho, la uniformidad de la irradiación debido al (auto)sombreado y a la temperatura de las células fotovoltaicas, darán lugar a curvas I-V no ideales que pueden añadir pérdidas por un seguimiento erróneo del MPPT o debido a un seguimiento retrasado.

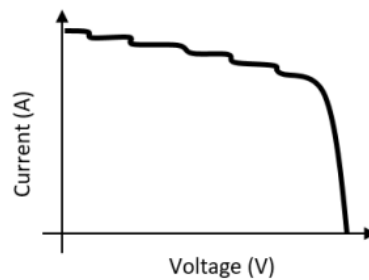


Fig. 24 Curva IV de un módulo/generador fotovoltaico cuya morfología revela el impacto del sombreado.

Debido a la variabilidad de la irradiancia es importante optimizar la integración fotovoltaica del vehículo y la eficiencia de las células reduciendo así los sombreados parciales. Esto será posible cuando se mejoren los procesos de fabricación de las células fotovoltaicas consiguiendo que tengan formas curvadas, adaptándose de esta forma a la carrocería.

Para la caracterización de este tipo de módulos/células en unas condiciones CEM se debe simular la luz solar mediante diodos LED colocados en una matriz X-Y sobre un plano. El haz de luz se enfoca en un plano que está a una distancia determinada de la fuente de luz. Si la célula no es plana, la luz incidirá en ella con un ángulo que no es perpendicular a la célula provocando distorsiones en la homogeneidad y la intensidad de la luz incidente, como se observa en la siguiente figura.

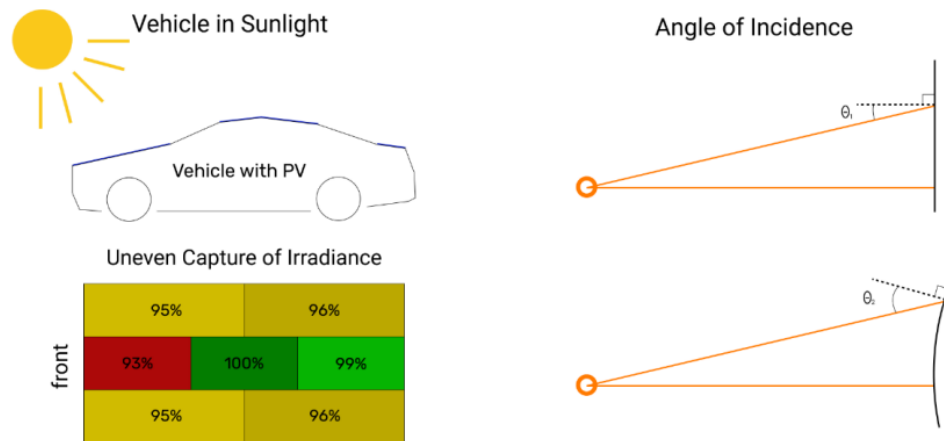


Fig. 25 Variación de la irradiancia capturar por los paneles según localización. (Araki, et al., 2021)

Por tanto, una parte de la luz se pierde y no puede convertirse en energía eléctrica. Sin embargo, los resultados reales de la eficiencia de las células no pueden obtenerse de esta manera. Es posible que los fabricantes de automóviles tengan problemas con esto en el futuro cuando los consumidores exijan una eficiencia y una potencia cada vez mayor para su vehículo con VIPV.

La variabilidad de la irradiancia sumada a la forma del vehículo tiene una gran influencia en la energía que se pueda obtener. Por ello es necesario medir y modelar la irradiación solar del vehículo. Algunos estudios (Ota, et al., 2022) (New Energy and Industrial Technology Development Organization, 2019) sugieren aplicar la corrección de la superficie curva de los módulos fotovoltaicos para tener en cuenta la distribución aleatoria de los elementos de sombra y la dirección del vehículo.

El peso, el proceso de refrigeración y la conversión de energía son puntos fundamentales que deben considerarse para la integración fotovoltaica en los vehículos. Los compuestos ligeros son una buena opción para los VIPV, ya que cuanto más ligero es el vehículo, menos energía se utiliza como se ha visto anteriormente.

La conducción urbana se caracteriza por las situaciones de tráfico transitorio. Lo que induce a frecuentes arranques y paradas. En consecuencia, el vehículo eléctrico presenta una corriente eléctrica aleatoria y fluctuante. El elemento más afectado por este problema es la batería puesto que debe ser capaz de seguir las fluctuaciones adaptándose a este comportamiento. Este problema no es específico del vehículo con VIPV también se tiene en cualquier AEV

El principal reto es garantizar la longevidad del funcionamiento del VIPV, para ello es necesario establecer pruebas y ensayos de fiabilidad, donde se tengan en cuenta las vibraciones a lo largo de un período de al menos 10 años con condiciones de conducción variadas. Para realizarlas será necesario establecer un punto de partida para un sistema nuevo, no dañado y no degradado. Para esto, es necesario que saber cuánta irradiancia puede ser obtenida. Se debe realizar estudios donde se recojan mediciones del mundo real, en movimiento, parados, vías urbanas, vías extraurbanas, etc. en todo el mundo. Actualmente no existe estos conjuntos de datos. La cantidad de irradiancia que reciben los vehículos en función de la conducción, la parada o el estacionamiento se desconoce en su mayor parte.

Se deberá crear un ciclo de pruebas estándar para los VIPV siguiendo las necesidades de la industria del automóvil. Esto sería comparable a los Ciclos Internacionales de Pruebas de

Emisiones y Economía de Combustible para los motores de combustión. Esta nueva normativa incluiría probablemente un perfil estándar de la luz solar recibida a lo largo del tiempo. Esto ayudará a determinar la autonomía real que un conductor puede esperar alcanzar durante el funcionamiento estándar. Esto se está realizando en el grupo de trabajo TC 82/PT 600 con la elaboración de las siguientes normativas:

- IEC TR 6XXXX: *Monitoring three-dimensional solar irradiance around the automobile using array of pyranometers.*
- IEC TR 6XXXX: *Modelling solar irradiance and its distribution and its distribution to VIPV affected by shading by buildings.*

4.1 NORMATIVA

Como se ha comentado antes, actualmente no existe una normativa específica para los VIPV. Por ello se ha propuesto en el estudio (Markert, et al., 2021) realizar una unión entre la normativa de cualificación de los módulos (IEC 61730 e IEC 61215) y la normativa que aplique en el sector de la automoción, acelerando así la normalización y estandarización de los procesos de homologación que se puedan llevar a cabo. Para la realización de este comparativo se ha tenido en cuenta la normativa europea de automoción y la IEC 61215 de módulos terrestres planos de silicio cristalino.

El punto de partida es la cualificación de seguridad de los módulos fotovoltaicos (FV), definida en la norma IEC 61730, la cual debe ser comparada con la norma ISO 16750, donde se establecen los ensayos generales, las cargas eléctricas, los riesgos de incendio, las cargas mecánicas, las tensiones ambientales y la estabilidad química, es decir los requisitos de seguridad para los módulos fotovoltaicos de los VIPV, así como con la normativa ECE-R43, seguridad contra la rotura de cristales y vidrios laminados en los vehículos y la seguridad de los peatones (ECE R127).

También y no menos importante se deberán establecer ensayos opcionales relativos a la estabilidad a largo plazo de los módulos VIPV. Todos los anteriores ensayos serán los que deberán superar los módulos utilizados en los VIPV para verificar su correcto funcionamiento y su integración en el vehículo.

Una vez garantizada la seguridad integral de los componentes mediante la superación de todos los ensayos de las normas anteriormente mencionadas, el nuevo diseño deberá someterse al proceso de homologación.

Los requisitos para que un vehículo o componente sea homologado es definido en el apartado número 13 de la directiva 2009/661/CE. Dado que los cambios aplicados al vehículo en el caso de los módulos VIPV se limitan al "exterior del vehículo y a los accesorios", son relevantes las normas IEC para fotovoltaica, las ISO, así como las normas ECE que se aplican a estos elementos exteriores. En la siguiente tabla se recoge las normas pertinentes que pueden ser aplicables a los módulos VIPV.

Standard	Scope
ISO 16750 (-1, -2, -3, -4, -5) [18]	Road vehicles—Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment:
	Part 1: General
	Part 2: Electrical loads
	Part 3: Mechanical loads
	Part 4: Climatic loads
	Part 5: Chemical loads
ISO 20653 [19]	Road vehicles—Degrees of protection (IP code)—Protection of electrical equipment against foreign objects, water, and access
ECE-R10 [20]	Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to electromagnetic compatibility
ECE-R43 [21]	Uniform provisions concerning the approval of safety glazing materials and their installation on vehicles
ECE-R95 [22]	Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants in the event of a lateral collision
ECE-R100 [23]	Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train
ECE-R118 [24]	Uniform technical prescriptions concerning the burning behavior of materials used in the interior construction of certain categories of motor vehicles
ECE-R127 [25]	Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to their pedestrian safety performance

Fig. 26 Normativa de automoción. (Markert, et al., 2021)

El siguiente programa de cualificación de seguridad para módulos VIPV surge al comparar los requisitos de la norma IEC 61730 y la norma IEC 61215 con las normas específicas del sector de la automoción, como se muestra en la tabla anterior. Este programa de cualificación es para VIPV que se encuadre dentro de los de vehículos M (vehículos que tienen al menos cuatro ruedas y se utilizan para el transporte de pasajeros) y N (vehículos que tienen al menos cuatro ruedas y se utilizan para el transporte de mercancías), de acuerdo con el decreto de la UE 2018/858.

Respecto a los ensayos relativos a la calidad y el rendimiento de los módulos sólo se añaden si están relacionadas con la estabilidad y la seguridad ambiental.

La integración de los módulos/células fotovoltaicas en el vehículo implica una evaluación exhaustiva de la seguridad antes del proceso de homologación. Además, la seguridad de los módulos/células deben garantizarse también durante el funcionamiento en un estado dañado o después de un accidente; lo cual no es evaluado en la normativa fotovoltaica actual.

La norma IEC 61730 proporciona directrices para la cualificación de la seguridad de los módulos fotovoltaicos convencionales. La norma ISO 16750 describe las posibles tensiones ambientales, así como los ensayos y los requisitos para los componentes eléctricos y electrónicos de los vehículos.

Para la comparativa se realiza una subdivisión de ambas normas en las siguientes secciones:

- General.
- Cargas eléctricas.
- Riesgos de incendio.
- Cargas mecánicas.
- Cargas ambientales/climáticas.
- Cargas químicas.

Los requisitos de cada subsección de la norma ISO 16750 se definen mediante las denominadas "letras de código", que dan cuenta de un conjunto específico de parámetros en la sección de prueba respectiva aplicable al dispositivo sometido a prueba (DUT), que están determinados por la ubicación de montaje, la temperatura máxima de funcionamiento, la clase de vehículo y/o la clase de rendimiento.

Table 6: Code Letter for Electrical Loads

Code Letter	Test Voltage	
	U_{min}	U_{max}
A	4.5 V	16 V
B	6 V	16 V
C (most common)	9 V	16 V
D	9 V	18 V
E	10 V	16 V
F	12 V	16 V
Z	As Agreed Upon	

GMW3172

Fig. 27 Cargas eléctricas a aplicar según la ISO 16750.

En el caso de los módulos VIPV, los parámetros acordados y especificados deben comprobarse cuidadosamente y, si es necesario, puede aplicarse una nueva letra de código "Z" con parámetros de ensayo adaptados cuando el proveedor y/o el fabricante del vehículo determinen que las condiciones o los ensayos definidos en la serie ISO 16750 no son adecuados para alcanzar los objetivos de calidad/fiabilidad del producto deseados y/o no son prácticos.

8.2 Use of Code Z "As agreed"

ISO 16750 accommodates special needs and situations through the use of Code Z "As agreed". The use of Code Z should be restricted to cases where the equipment supplier or vehicle manufacturer or both determine that the conditions or tests defined in ISO 16750 are

- unsuitable for achieving desired product quality/reliability objectives, and/or
- not practical.

When Code Z "As agreed" is used, the following should be documented:

- the rationale (reason) for not using the provided conditions or tests;
- the complete description of the "As agreed" condition or test;
- the data and rationale for supporting the suitability of the "As agreed" condition or test;
- any specific information regarding Code Z "As agreed" given in ISO 16750-1 to ISO 16750-5.

In addition, the equipment supplier and vehicle manufacturer shall agree that the "As agreed" documentation is adequate.

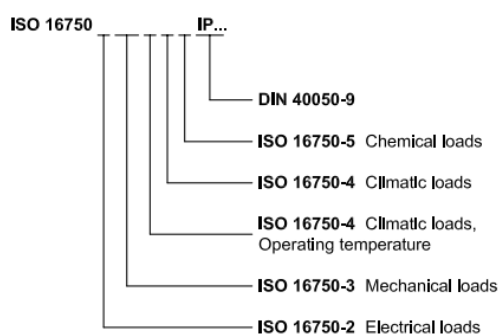


Figure 1 — Coding architecture

Fig. 28 ISO 16750-1

Los criterios de aprobación según la norma ISO 16750-1, se asocian a clasificaciones de estado funcional específicas. Sin embargo, la clasificación de un módulo VIPV de acuerdo con esas clases no es suficiente; se deben seguir los criterios de aprobación definidos en la norma IEC 61730 garantizando así el seguro funcionamiento de los módulos VIPV.

En cuanto a la calidad del módulo, se sugiere cumplir con los criterios de pérdida de potencia del 5% especificados en la norma IEC 61215 para los módulos fotovoltaicos terrestres.

4.1.1 Especificaciones generales

La certificación de la norma IEC 61730-2 comienza con pruebas de inspección cuya finalidad es demostrar la funcionalidad y la calidad de del módulo:

- Inspección visual (Ensayo de seguridad de módulo (MST) 01).
- Medición del rendimiento en condiciones CEM (MST 02).
- Determinación de la potencia máxima (MST 03).
- Espesor de materiales (MST 04).
- Durabilidad del marcado (MST 05).
- Bordes afilados (MST 06).
- Funcionalidad de los diodos de paso (MST 07).

Los criterios de aprobación tras los ensayos de envejecimiento en la IEC 61730-2 se definen, en general, por la superación del MST 01 (inspección visual) y de los ensayos de aislamiento MST 16 y MST 17. Los ensayos relativos a la inspección general de los dispositivos no están definidos en la norma ISO 16750.

5.1.1 Protección eléctrica

Los módulos fotovoltaicos deben tener una protección adecuada contra las descargas eléctricas, que se garantiza mediante el cumplimiento de los requisitos de la clase II según la IEC 61140 o de la clase A definida en la norma IEC 61730-1. Otro aspecto importante es la tensión máxima del sistema según la IEC 61730-1. En consecuencia, todos los módulos deben contar con especificaciones adecuadas de grosor de aislamiento y distancia de fuga (según la tabla 3 de la norma IEC 61730 1).

Ambas normas (IEC 61730 e ISO 16750-2) cubren el tema de las cargas eléctricas, pero de forma totalmente opuesta. Los DUT de la norma ISO 16750-2 se refieren principalmente a cargas de consumo y un módulo fotovoltaico es un generador en condiciones normales de operación. La norma ISO 16750-2 define los requisitos correspondientes a la tensión de alimentación máxima de los dispositivos de 12 V y 24 V. Es por ello que se puede introducir una nueva letra de código "Z" para reflejar las tensiones suministradas para un sistema fotovoltaico respectivo en funcionamiento.

Las pruebas de la norma IEC 61730-2 en esta sección comprenden:

- Ensayo de accesibilidad (MST 11).
- Ensayo de susceptibilidad al cortado (MST 12).
- Ensayo de continuidad para la conexión equipotencial (MST 13).
- Ensayo de impulsos de tensión (MST 14): permite saber si un módulo puede soportar sobretensiones de origen atmosférico.
- Ensayo de aislamiento (MST 16): los módulos VIPV se clasifican como clase II según la norma IEC 61140, por lo cual en este ensayo se reproduce adecuadamente las condiciones de un módulo VIPV.
- Ensayo de corriente de fugas en mojado (MST 17).

Los ensayos que no están directamente relacionadas con la cualificación de la seguridad de los módulos utilizados en los VIPV, pero que pueden ser importantes en los ensayos de homologación finales del vehículo son:

- Ensayo de tensión alterna superpuesta (4.4) ISO 16750-2.
- Ensayos de compatibilidad electromagnética (EMC).

Aquí que considerar que la normativa ECE-R100 define la homologación de vehículos por sus requisitos relativos al accionamiento eléctrico y menciona unos requisitos de seguridad mayores.

6.1.1 Riesgo de incendio

La protección contra los riesgos de incendio es crucial e importante durante y después de los accidentes. Las pruebas definidas en la norma IEC 61730-2 que se relación con este punto comprenden:

- Un ensayo de temperatura (MST 21).
- Un ensayo de puntos calientes (MST 22).
- Un ensayo de inflamabilidad (MST 24).
- Un ensayo térmico del diodo de paso (MST 25).
- Un ensayo de sobrecarga de corriente inversa (MST 26): La corriente de ensayo respectivo puede ser adaptada por el diseño de seguridad del concepto del módulo.
- Un ensayo de fuego (MST 23) se refiere directamente a las normas de construcción para aplicaciones BIPV.

Aparte de la prueba de inflamabilidad, en la norma IEC 61730-1 se exige una clase de inflamabilidad mínima V1 según la norma IEC 60695-11-10 para los materiales que se utilizan en el exterior (no en capas finas) de los módulos fotovoltaicos. Si se garantiza que no pueden penetrar astillas inflamables en el interior del vehículo tras la rotura del módulo, lo que puede ser hecho mediante el cumplimiento de la resistencia a la rotura y a las astillas de la norma ECE-R43, no es necesario cumplir ninguna normativa a mayores de la IEC 61730-2, si no es así, se debería aplicar la normativa ECE-R118.

Se prestará especial atención a la formación de puntos calientes en los módulos VIPV y al desarrollo de una secuencia de pruebas de certificación adecuada puesto que las vibraciones esperables durante el funcionamiento de los módulos VIPV, aumentan la probabilidad de formación y/o propagación de grietas en las células solares aumentando el riesgo de formación de puntos calientes, que podría superar el peor escenario examinado a lo largo del ensayo de puntos calientes según la norma IEC 61730-2. Se propone realizar una prueba de vibración según la norma ISO 16750-3, antes de la prueba de puntos calientes en la secuencia de certificación.

7.1.1 Cargas mecánicas

Robustez mecánica y cargas vibratorias

Los ensayos relativos a las cargas mecánicas en la norma IEC 61730-2 comprenden:

- Un ensayo de susceptibilidad al cortado (MST 12): Este ensayo podría modificarse cambiando la forma y el material de la cuchilla y ajustando la carga, la velocidad de arrastre y las repeticiones aplicadas al DUT, para simular así diferentes escenarios de tensión independientemente de los tipos de materiales utilizados.
- Un ensayo de rotura del módulo (MST 32).
- Un ensayo de conexiones atornilladas (MST 33).
- Un ensayo de carga mecánica estática (MST 34): aunque no simula las cargas mecánicas que surgen durante el funcionamiento del vehículo puede servir de base

según el tipo de montaje y su ubicación. También puede ser necesario garantizar la carga mecánica estática de un módulo en situaciones excepcionales como un vuelco o choque.

- Un ensayo de pelado (MST 35).
- Un ensayo de deslizamiento de materiales (MST 37).
- Un ensayo de robustez de las terminaciones (MST 38).

Es necesario tener en cuenta la estructura de soporte y el montaje en el vehículo para reproducir las condiciones mecánicas que deberán soportar los módulos VIPV. Además, las cargas en forma de vibraciones pasan a ser cruciales para afirmar la estabilidad y, en consecuencia, la seguridad de los módulos VIPV. Se deben ampliar las pruebas de carga mecánica mediante las pruebas de la norma ISO 16750-3. Dependiendo de la clase de vehículo (M o N) y del lugar de montaje, existen diferentes requisitos, que en el caso de los módulos VIPV se limitan a la sección "Montaje en el exterior" y a las correspondientes letras de código D, E, K y L, según la norma ISO 16750-3. En virtud de esta directiva, los DUT deben superar un ensayo de vibración relativa a las masas suspendidas (prueba IV-vehículos de pasajeros o prueba VII-vehículos comerciales) y a un ensayo de choque mecánico que simule un portazo.

En lugares de montaje especialmente expuestos (por ejemplo, el guardabarros delantero, las puertas laterales, etc.), un ensayo relativo a la seguridad contra la rotura por bombardeo de grava, como se indica en la norma ISO 16750-3, es adecuado para evaluar la estabilidad mecánica del módulo y a largo plazo, así como un ensayo de granizo según norma IEC 61215-2 (MQT 17).

De forma opcional hay un ensayo denominado "Resistencia a la superficie/rayado y abrasión" en la norma ISO 16750-3 el cual no es obligatorio, debe ser acordado entre el fabricante y el cliente. Sin embargo, es recomendable su realización para garantizar la resistencia al rayado de los módulos en distintos escenarios.

Seguridad contra roturas

Para garantizar la seguridad completa de los módulos es necesario realizar pruebas adicionales, según la norma ECE-R43 (vidrio laminado de seguridad) y la norma ECE-R127 (seguridad de los peatones). En la norma ECE-R43, en función del tipo y el grosor del vidrio utilizado en el módulo (vidrio templado, vidrio laminado o vidrio-polímero) o del acristalamiento de polímero (polímero rígido o doble acristalamiento), los ensayos deben seleccionarse de acuerdo con las tablas de la sección 8.2.1.1-"Acristalamientos distintos de los parabrisas" y 8.2.1.2 "Acristalamientos de polímero distintos de los parabrisas", respectivamente. Un ensayo mecánico, aplicable en todos los casos, pero con diferentes alturas de caída y con diferentes temperaturas de preacondicionamiento en función del material y el espesor del DUT, es el ensayo de caída de bola de 227 g. La seguridad de ruptura se garantiza al superar la prueba, sin que la bola penetre en el material y sin que se rompa en trozos afilados. Sin embargo, en el caso de los polímeros laminados, la fragilidad y la adherencia deben determinarse también con el ensayo de corte transversal, tal como se define en la norma A3/13 de ECE-R43.

Seguridad de peatones

Otro requisito esencial para los módulos VIPV es la seguridad de los peatones. Superar estos requisitos es crucial, ya que no se podrá homologar ningún vehículo si no se garantiza la seguridad de los peatones. Por lo tanto, los módulos VIPV montados externamente tienen que pasar pruebas con dos puntos de enfoque diferentes:

- El ensayo de la forma de la pierna al parachoques - DUTs montados en la parte delantera del vehículo.
- El ensayo de la forma de la cabeza - aplicable a DUTs montados en el área del capó.

Comparación de los tres ensayos de impacto

En la siguiente tabla se muestra un ejemplo de cómo varían las pruebas equivalentes de las diferentes normas en sus especificaciones. En cada norma, se eligió un ensayo que incluía un tipo de impacto diferente representando la carga máxima aplicable en a los módulos VIPV:

- Ensayo de rotura del módulo (MST 32) de la norma IEC 61730-2.
- Ensayo de caída fantasma de la norma ECE-R43.
- Ensayo de cabeza de adulto de la norma ECE-R127.

Siendo la energía calculada del ensayo de caída fantasma, tal como se define en la ECE-R43 del impactador mayor. Debido a los criterios de aprobación equivalentes, el ensayo de rotura según la norma IEC 61730-2 puede omitirse cuando el ensayo de caída fantasma se aplique a módulos completos en lugar de a muestras de material, como se pide en la norma ECE-R43. La prueba de la forma de la cabeza, según la norma ECE-R127, debe ejecutarse independientemente en el caso de los módulos situados en el capó, para que la seguridad de los peatones esté garantizada.

	IEC 61730-2 Module Breakage Test	ECE-R43 Phantom Fall Test	ECE-R127 Adult Headform Test
Impactor Weight	45 kg	10 kg	4.5 kg
Test Setup	Pendulum $l \geq 1525$ mm	Free fall	Free fall
Test Specification	Drop height = 300 mm	Drop height = 3 m (when head injury is expected)	Impact velocity = 9.7 m/s
Sample Specifications	PV module	Material sample 6 plane samples: 1100 × 500 mm ² (glass) 1170 × 570 mm ² (Polymer) or complete unit	Whole vehicle front (with bonnet)
Energy of Impact	132 J	294 J	212 J
Pass Criteria	No separation from mounting structure or framing and no breakage or no opening $> \varnothing = 76$ mm shall develop and no particles > 65 cm ² shall be ejected from the sample.	Rigid and Double Polymer Glazing: Sample shall not be penetrated or break into separated pieces; When head injury is expected: HIC < 1000 Glass: Sample shall not be penetrated or break into separated pieces, breakage of glass allowed	HIC recorded shall not exceed 1000 over two thirds of the combined child and adult headform test areas. The HIC for the remaining areas shall not exceed 1700 for both headforms.

Fig. 29 Comparación de los tres ensayos de impacto, Ensayo de rotura (IEC 61730-2) Ensayo de caída fantasma (ECE-R43) y ensayo de cabeza de adulto (ECE R127). (Markert, et al., 2021)

Cargas climáticas

Debido a la situación de los módulos/células de los VIPV se debe pasar la cualificación del módulo según la norma 61730-2.

Estos ensayos son:

- Ciclo de temperatura (MST 51).
- La congelación de la humedad (MST 52).
- El calor húmedo (MST 53).
- El preacondicionamiento UV (MST 54).
- El acondicionamiento en frío (MST 55).
- El acondicionamiento en caliente seco (MST 56).

En la norma ISO 16750-4 se definen también pruebas similares para aplicaciones eléctricas en el sector de la automoción, en función del lugar de montaje en el vehículo.

Dado que las condiciones de prueba de la norma IEC 61730-2 son más duras que las de la norma ISO 16750-4, son suficientes para garantizar la resistencia a la intemperie y garantizar la seguridad del sistema eléctrico en diferentes condiciones climáticas.

IEC 61730-2		ISO 16750-4	
Tests	Conditions	Tests	Conditions
MST 51—Temperature Cycle—TC50 or TC200	-40–85 °C, max. 100 °C/h, min. 10 min dwell time	5.2 Temperature step test	5 °C steps from 20 °C -> T _{min} -> T _{max} (acc. to code letter G)
		5.3.1 Temperature Cycling (TC30)	150 min at T _{min} + 410 min at T _{max} (acc. to code letter G)
MST 52—Humidity Freeze	10 cycles, -40–85 °C, 85% rH	5.6 Humid heat cyclic test (2 and 3 acc. To code letter H)	5 cycles, 25–80 °C, max 95% rH
MST 53—Damp Heat (DH1000)	85 °C, 85% rH, 1000 h	5.7 Damp heat steady state test	40 °C, 85% rH, 500 h
MST 54—UV Preconditioning	280–320 nm/320–400 nm, 15 kWh/m ² or 60 kWh/m ²	5.9 Solar radiation	If required, resistance to solar radiation shall be ensured by the choice of a suitable material.
MST 55—Cold Conditioning	-40 °C, 48 h	5.1.1 Low temperature	-40 °C, 24 h
MST 56—Dry Hot Conditioning	105 °C, <50% rH, 200 h	5.1.2 High temperature	85 °C, 48 h

Fig. 30 Comparación de los ensayos climáticos según IEC 61730 y la ISO 16750-4. (Markert, et al., 2021)

Las pruebas adicionales de estrés climático para los componentes del vidrio de seguridad dependen del material y se definen en la norma ECE-R43. En ella, los vidrios de seguridad deben superar pruebas que comprenden:

- el aumento de las temperaturas (A3/5).
- la resistencia a la radiación (A3/6).
- la resistencia a la humedad (A3/7).
- la resistencia a los ciclos de temperatura (A3/8).

Los materiales poliméricos deben superar los siguientes ensayos:

- un ensayo de resistencia a la intemperie (A3/6.4), que incluye la radiación UV en condiciones de calor húmedo.
- Ensayo de resistencia a la humedad (A14/6.4 o A16/6.4).
- Ensayo de ciclos de temperatura (A3/8).
- Ensayo de aumento de las temperaturas (A3/5).

Estos ensayos exigidos son más estrictos en comparación con la norma IEC 61730-2.

Carga química

Según la norma IEC 61730-2, los módulos fotovoltaicos estándar no tienen que superar ensayos relativos a su resistencia química frente a sustancias específicas. Considerando los módulos VIPV en el tráfico rodado, se espera la exposición a una variedad de sustancias químicas. En la norma ECE-R43 se describe una prueba de resistencia contra sustancias químicas, pero se recomienda sustituirla por la norma ISO 16750-5, debido a la mayor cantidad de sustancias y a los criterios más estrictos de aprobación/reprobación. En la norma ISO 16750-5, se define una colección específica de sustancias químicas para el ensayo de aplicaciones eléctricas montadas en el exterior mediante la referencia a la letra de código D, según la Tabla 1. Durante el invierno los módulos estarán expuestos a ambientes altamente

corrosivos por ello y para garantizar la resistencia de estos se debe realizar ensayos de niebla salina según la norma IEC 61701 y la norma IEC 60068-2-52.

Dado que las pruebas mencionadas en esta sección no aparecen en la norma IEC 61730-2, pero son indispensables para garantizar la resistencia de los módulos frente a las cargas químicas, especialmente en entornos urbanos, se recomienda añadir estos ensayos al programa de cualificación.

Conclusiones de la integración de la normativa fotovoltaica y vehicular

En comparación con la certificación de los módulos fotovoltaicos planos terrestres, la homologación de los módulos VIPV supone un cumplimiento de un mayor número de requerimientos. Se debe a la necesidad de asegurar la seguridad del módulo en todas las condiciones de funcionamiento requeridas cumpliendo la normativa pertinente del lado automotriz.

Los ensayos de seguridad ya existentes, definidos en las normas IEC 61730 e IEC 61215 son una base sólida para un programa completo de cualificación de la seguridad de los módulos VIPV, pero debe ser complementados añadiendo y/o modificando los ensayos relativos de resistencia química, vibraciones mecánicas, de choques y de impactos. Los cambios y modificaciones aplicados a las secuencias de ensayo de la norma IEC 61730:2016 se resumen en la siguiente tabla.

Recommended Alignments	Motivation
5% power loss allowed during stress tests (acc. To IEC 61215:2021)	Ensure module quality for market acceptance
Addition of vibrational tests from ISO 16750-3	Ensure mechanical stability throughout vehicle operation, e.g., during door slamming or rough road driving
Chemical testing from ISO 16750-5	Ensure module stability against chemical loads
Salt mist corrosion testing acc. to IEC 61701 and IEC 60068-2-52 (method 7 + 8)	Ensure environmental stability of modules in winter
Separate climatic testing acc. to ECE-R43	Climatic testing for safety glass
Definition of tests for surface strength/scratch and abrasion resistance	Important for market acceptance in case of snow removal, shopping cart collision, branch scratching -> enhancement of cut susceptibility test (IEC 61730-2, MST 12), also other than polymer materials shall be tested
Gravel bombardment test	Ensure module quality for market acceptance
Continuative testing after breakage	Ensure safety of possibly damaged modules during continuative operation
Increase in max. T during climatic testing to 95 °C	Reproduce realistic operation scenarios, e.g., broken VIPV module -> possible undetected hot-spot formation

Fig. 31 Recomendaciones para un programa de cualificación definido a partir de la IEC 61730-2. (Markert, et al., 2021)

En la siguiente figura se presenta un programa de cualificación para los módulos VIPV, con las secuencias de prueba de la norma IEC 61730-2 como estructura básica.

Máster en Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos

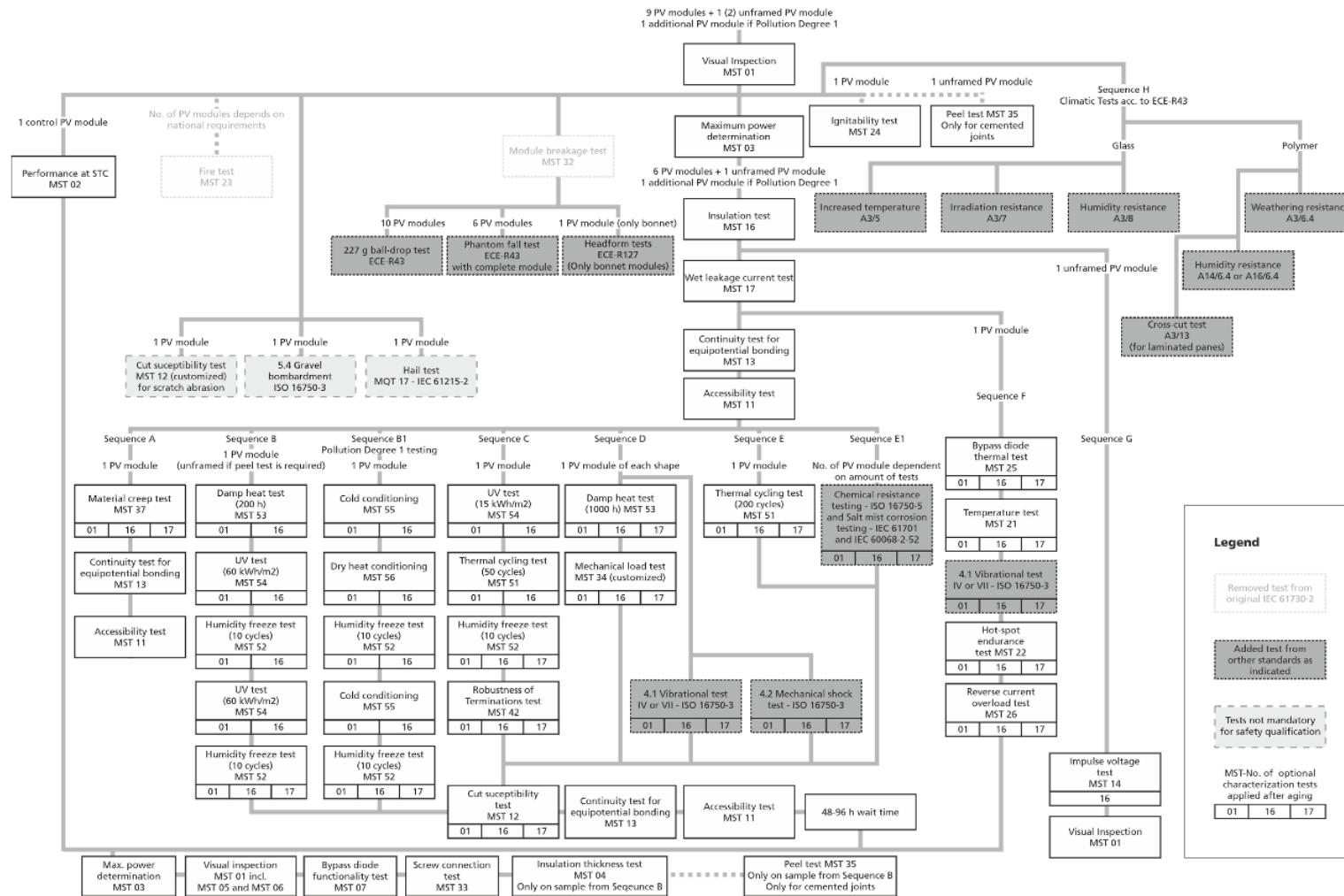


Fig. 32 Propuesta de programa de cualificación de módulos VIPV con la norma IEC 61730-2 como base y ensayos añadidos de la norma ISO 16750 (-1 a -5), ECE-R43, ECE-R127 e IEC 61215-2; se indican los ensayos añadidos, así como los eliminados de la estructura anterior existente; los ensayos de cualificación se etiquetan por separado.

4.2 IRRADIANCIA SOLAR

Para promover el desarrollo y la adopción de vehículos con energía fotovoltaica integrada es necesario entender los efectos de su entorno que ocurren. La cantidad de energía fotovoltaica generada a bordo depende de diversos factores como pueden ser la irradiación solar y la temperatura. La irradiación solar incidente sobre un VIPV depende de su ubicación y de su dirección. Además, la irradiación solar durante la conducción es siempre cambiante debido al entorno de la ruta: edificios, estructuras o follaje que causan sombra o reflejar la luz en el vehículo.



Fig. 33 Orientación de un techo solar y de una puerta comparado con un módulo de una planta fotovoltaica de una planta fotovoltaica. (Araki, et al., 2021)

Aunque todavía no se han recogido suficientes datos para hacer generalizaciones sobre las características de la irradiación solar, algunos estudios indican ciertas tendencias.

Las sombras de los edificios, los árboles, los postes eléctricos y similares provocan una caída en la irradiancia en las partes afectadas del vehículo, pudiendo cubrir las sombras toda la superficie o parcialmente. A su vez los reflejos de los edificios provocan un aumento de la irradiancia pudiendo producir episodios de sobreirradiancia. Tanto las sombras ocasionadas por los alrededores, así como las situaciones de sobreirradiancia son fluctuaciones de poca duración (menos de 0,1 segundos). (New Energy and Industrial Technology Development Organization, 2019)

Además del impacto del sombreado ambiental, el impacto de la curvatura inherente de la fotovoltaica a bordo aumenta con la disminución de la altura del sol, es decir, aumentando la latitud. Sin embargo, el estudio basado en un modelo en Japón encontró que tanto el factor de corrección de la curva—el cual se explicará más adelante— como la irradiancia capturada por el techo, normalizado a la irradiancia global horizontal (GHI, por las siglas del inglés *Global Horizontal Irradiance*, en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) no muestran una fuerte correlación con la latitud y, a diferencia de otros parámetros típicos del recurso solar se ven más afectados por condiciones meteorológicas locales. Además, tanto el factor de corrección de la curva como la irradiancia respecto al GHI, están fuertemente influenciados por la sombra de los objetos.

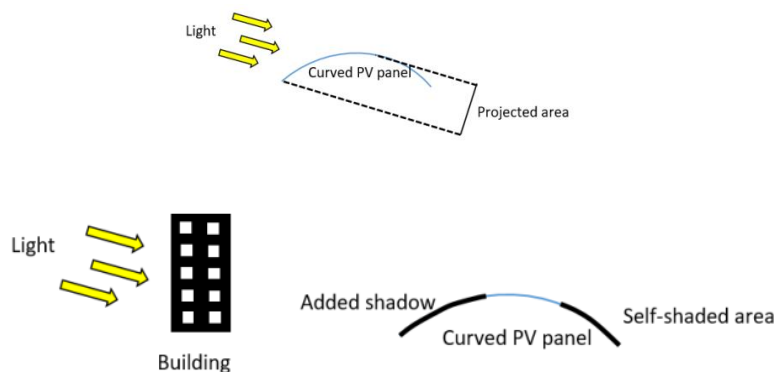


Fig. 34 Explicación gráfica de las sombras producidas por los alrededores, así como aquellas producidas por el propio panel. (Araki, et al., 2021)

Aunque se dispone de muy pocos datos para hacer generalizaciones sobre las características de la irradiación solar en los vehículos, se puede afirmar que la proporción de la irradiación solar en el techo del vehículo durante la conducción en relación con la GHI puede oscilar entre el 50% y el 90%, por ejemplo, desde las zonas urbanas y al aire libre. (New Energy and Industrial Technology Development Organization, 2019)

Los datos sobre la irradiación solar adquiridos por un vehículo son un primer paso hacia el uso de la energía fotovoltaica en los automóviles proporcionando información vital para evaluar la importancia, el diseño óptimo y el efecto de los sistemas fotovoltaicos a bordo.

Se necesitan más mediciones de la irradiancia para cuantificar con mayor precisión los posibles rendimientos energéticos y distancias de conducción de la energía solar a lo largo del año en distintos lugares y rutas de conducción.

4.1.1 Características de la irradiancia solar en VIPV

Como se ha comentado anteriormente, estimar la irradiancia incidente sobre los VIPV es la puerta de entrada hacia la integración de la energía fotovoltaica en los automóviles, así como para el diseño y correcto funcionamiento del sistema de control de la energía fotovoltaica generada.

La irradiancia que incide en un vehículo no es igual en todas sus superficies y las características de esta cambia, aunque tiene una característica en común:

- En los tramos urbanos, la irradiancia solar sobre el vehículo puede provocar episodios de sobreirradiación. Dichos episodios obedecen a los reflejos de los edificios a lo largo de la carretera.
- Los edificios, los árboles y los postes eléctricos que se encuentran a lo largo de la carretera hacen sombra, produciendo un descenso de la irradiancia en los tramos correspondientes.

Aparte de la característica anterior, a irradiancia captada por el techo del se caracteriza por:

- La disminución de la irradiancia debido a las sombras causadas por la infraestructura, así como otros elementos a lo largo de la carretera.
- Las sombras producidas por los edificios se dan en tramos urbanos y de forma intermitente. Aunque poco frecuentes, también se producen sombras en las secciones al aire libre (puentes, árboles, postes).
- Debido a las sombras de edificios e infraestructura, las fluctuaciones de la irradiancia se producen en ciclos extremadamente cortos (varios cientos de W/m^2 en 0,1 segundos). (New Energy and Industrial Technology Development Organization, 2019)
- Aunque la irradiancia tiene un nivel similar al del punto de referencia en los tramos sin sombras, se produce una caída de unos 50 a 100 W/m^2 en los tramos en las que se producen sombras, y el rango de fluctuaciones de la irradiancia aumenta a medida que aumenta la elevación solar. (New Energy and Industrial Technology Development Organization, 2019)
- La caída del ritmo de crecimiento de la irradiación solar acumulada depende de la duración del periodo en el que se producen las sombras. Este periodo es más largo en los tramos de edificios altos y más corto en las zonas al aire libre.
- La aparición de sombras depende en gran medida de la relación entre la dirección de la carretera (la dirección en la que circula el vehículo) y la orientación del sol, y cuando éstas son coincidentes, la influencia de las sombras es pequeña.

- Se considera que las sombras causadas por los edificios situados a lo largo de la carretera están influidas por la anchura de la misma y el carril por el que circula el vehículo.

En cambio, la irradiancia en los laterales del vehículo se caracteriza por:

- La irradiación solar y la aparición de sombras en el vehículo dependen en gran medida de la relación entre la orientación solar y la dirección de la carretera. Las superficies que se enfrentan a la orientación del sol (una o dos de la parte delantera, trasera, izquierda y derecha del vehículo) apenas se ven afectadas por las sombras de los edificios e infraestructuras a lo largo de la carretera, pero otras superficies no recibirán ninguna irradiación solar directa y la irradiación será baja.
- La superficie en la que la irradiación es alta cambiará a medida que la dirección en la que viaja el vehículo cambia.
- Aunque el valor medio de la irradiancia en las distintas direcciones es inferior al del techo del vehículo, la irradiancia de la superficie orientada al sol puede superar la irradiancia del techo del vehículo cuando la elevación solar es baja.

Urban sections	- Shadows of buildings and trees occur intermittently, so that solar irradiation fluctuates. - Solar irradiation may exceed irradiation at the reference point, and it is thought that this could be due to an increase in solar irradiation caused by reflections from buildings.
High-rise sections	- Large fall in solar irradiation due to shadows from buildings and trees. - Solar irradiation may exceed irradiation at the reference point, and it is thought that this could be due to an increase in solar irradiation caused by reflections from buildings.
Underpass sections	- These sections are underground, so there is no solar irradiation.
Open-air sections	- Surrounding buildings have little effect compared to urban and high-rise sections. However, short-cycle fluctuations (falls) in solar irradiation still occur due to buildings, trees, and power poles along the road.

Fig. 35 Resultados de las mediciones de la irradiancia en el techo solar en Sapporo. Características acordes a la ruta. (Araki, et al., 2021)

4.3 ESTANDARIZACIÓN DEL DISEÑO DE LOS MÓDULOS

La fotovoltaica integrada en el vehículo es uno de los componentes de los vehículos. El producto se someterá a prueba y se clasificará según ambas normas, como se ha visto anteriormente.

5.1.1 Caracterización

La serie de normas internacionales convencionales IEC 60904 para la caracterización eléctrica de la energía fotovoltaica, centrada en un panel plano bidimensional, deberá ampliarse a los módulos fotovoltaicos tridimensionales. El techo del vehículo es tridimensionalmente curvo, y su curvatura puede inducir una pérdida de potencia por el aumento de la pérdida de coseno y la pérdida de auto-sombra. Todas las fórmulas y protocolos de medición del rendimiento del

módulo fotovoltaico se basan en la planitud de los módulos fotovoltaicos, y esto no ocurre en la VIPV.

La determinación de la potencia de salida y otros parámetros eléctricos como la corriente de cortocircuito y la tensión de circuito abierto de los módulos son esenciales para determinar la energía solar de entrada al producto de la irradiancia y el área de apertura. Por otra parte, la definición del área de apertura para el FV curvo no es idéntica a la superficie del módulo.

Los módulos fotovoltaicos “normales” se instalan evitando las zonas con sombras. Sin embargo, en el techo de cualquier vehículo no sucede lo mismo al no está orientado para el aprovechamiento de la energía solar. La orientación relativa del sistema fotovoltaico en el vehículo con respecto a la posición del sol no es fija, sino que cambia con frecuencia durante la conducción. El sistema fotovoltaico en la carrocería del vehículo y en el techo del vehículo está curvada creando a veces autosombreados como se puede ver en la siguiente figura.



Fig. 36 Autosombreado del panel fotovoltaico curvo. (Araki, et al., 2021)

La posición y la altura de los objetos que producen sombra es difícilmente predecible. Para estimar la energía solar producida por un vehículo (de forma anual o mensual) en una zona específica, se debe considerar la influencia del sombreado utilizando indicadores aproximados de la rugosidad del terreno. A su vez se deberá conocer la irradiación solar anual o mensual en una zona específica para predecir el rendimiento de la conducción de los vehículos que incorporan VIPV.

Y para finalizar es necesario tener en cuenta las principales características de la VIPV:

- Mayor posibilidad de sombreado por objetos alrededor del vehículo (árboles y edificios).
- Superficie curvada.
- El ángulo de orientación varía aleatoriamente.
- Pérdida de correspondencia por sombreado parcial.

Rating test	Standard solar irradiation for standard testing condition solar resource around the vehicle is different from a typical PV installation	Definition of the standard solar irradiation Spectrum Value of irradiance – 1 kW/m ² ?
		Solar simulation onto the vehicle's roof Orientation/declination of the artificial light Representation of various levels of the sun height The standard (diffused) / (direct) of the sunlight Simulation of partial shading
	Testing facility	Light Source and the Testing Room Is the collimated light source necessary? Color and reflectance of the testing room
		Fixture supporting the PV (deflection by gravity)
	Curved surface	Repeatability of the tested result onto the curved surface
		Requirements of the solar simulator
		Testing protocols for repeatable measurement results
		Curve-correction factor: Definition, calculation protocol standard angular condition of the sunlight.
	Robustness to partial shading	Testing method for the sensitivity of partial shading (mismatching loss)
	Robustness to dynamic shading	Testing method for the sensitivity of partial shading (dynamic mismatching loss)
Design qualification	Misc.	How about the door and engine hood? Same conditions to the vehicle's roof?
		The temperature of the standard testing condition: Is it 25 °C, 60 °C or other temperature?
	Standardisation body	Is the flexible PV tested before mounting or after mounting?
		IEC, ISO, or other standardisation bodies?
		Environmental test
	Environmental test	List of the testing items and their conditions. Preferably with pass/fail criteria. Note the typical environmental chamber test for the vehicle-components is more intensive than PV products,

	Requirements for qualification	Vehicle test, and its test.
		Definition of the minimum requirement and its background.
		Label, specification sheet, and its required item list;
		Retest guideline, namely when the vehicle's roof PV undergoes a minor design change to fit a new or customized vehicle design, what kind of retest items need to be required to keep qualification recognition?
	Misc.	Range of resembles as the criteria for the necessity of retests;
		List and definition of terms;
		Specification of the vehicle-interface like cables and connectors.

Power Modeling	Is this the issue of standardisation?	
	Simplified parameters	Curve-correction factor
		Curve-shape representation (90% edge angle for example)
		Representative curve (or group of the curved surfaces)
		Representative distribution of the shading objects
		Representative solar irradiance for modeling calculation
		Representative distribution of the surface temperature
		Unit element vs. Shape calculation
	Modeling by rigorous calculation	3D curve issue
		mismatching issue
		stress issue
		dynamic shading issue
	Interaction to the string orientation	Current mismatching loss by non-uniform illumination
		Voltage mismatching loss by non-uniform temperature
	Outdoor measurement validation	Mode of outdoor operation
		Validation criteria
	Parameter measurement for modeling	3D AOI (Angle of incidence) measurement
		PV color (automobile painting)
	Solar modeling for vehicle	Three-Dimensional solar modeling
		Climate correction of the power modeling
Energy Prediction (km/kWh issue)	Difference between GHI and vehicle-roof irradiance (GHI: global horizontal irradiance)	The standard way of conversion
		Necessary parameters for the conversion
	Energy Nowcasting	High-speed calculation algorithm
		Link to the drive recorder image (dynamic shading)
		Map integration
		The requirement of the dataset
	Standard Smart Administration	Standard data format
		Standard procedure using a satellite or camera in the vehicle?

Fig. 37 Puntos en discusión entre científicos e ingenieros. (Araki, et al., 2021)

Corrección de la curvatura

Como se ha mencionado anteriormente todavía no existe normalización ni normativa internacional publicada aplicable. Sin embargo, en estos años se han producido notables avances en la caracterización y ensayos en la integración fotovoltaica en el techo de los vehículos. Se debe considerar que para la corrección de la curvatura todavía no hay un estándar acordado, de modo que lo que se presenta en este punto es un resumen de varios trabajos científicos (Ota, et al., 2022), (Araki, et al., 2021)

Antes de hablar de la corrección de la curva, actualmente el método de medición estándar tiene un problema, puesto que la eficiencia de los módulos curvos suele estar sobreestimada en las mediciones correspondientes. Esto se debe a que la energía de entrada suele subestimarse durante la medición por parte del simulador solar.

Para explicar esto se aplica la definición de la medición de la eficiencia de las células y módulos solares.

Ecuación 2 Cálculo de la eficiencia de un módulo.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

donde η es la eficiencia medida de la célula o módulo solar mediante el simulador solar. P_{in} es la potencia lumínica de entrada a la célula solar o al módulo (W). P_{out} es la potencia eléctrica de salida de la célula solar o del módulo (W). La medición de P_{out} del módulo curvo es la misma que la de los módulos fotovoltaicos planos estándar, y es una medición eléctrica sencilla. Sin embargo, la medición difícil es la de P_{in} .

En la medición estándar de la célula y el módulo solar, P_{in} se calcula mediante la ecuación.

Ecuación 3 Cálculo de la potencia de entrada en un módulo o célula.

$$P_{in} = A \cdot Irr$$

donde A es el área proyectada (m^2). Irr es la irradiancia en el área proyectada (W/m^2). En la medición del simulador solar, Irr se ajusta como $1 \text{ kW}/m^2$ y es uniforme en toda la zona del área proyectada A . Para el módulo fotovoltaico plano estándar, el área proyectada A es la misma que el área activa del módulo. Sin embargo, esta definición no se aplica al módulo fotovoltaico curvo porque el área proyectada se define como la ventana del plano, y no la superficie curva.

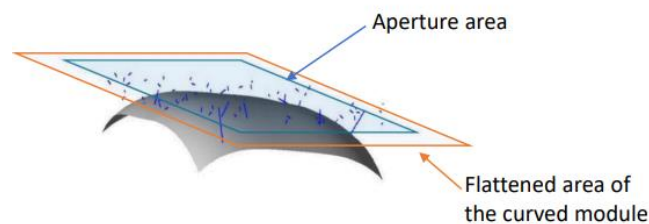
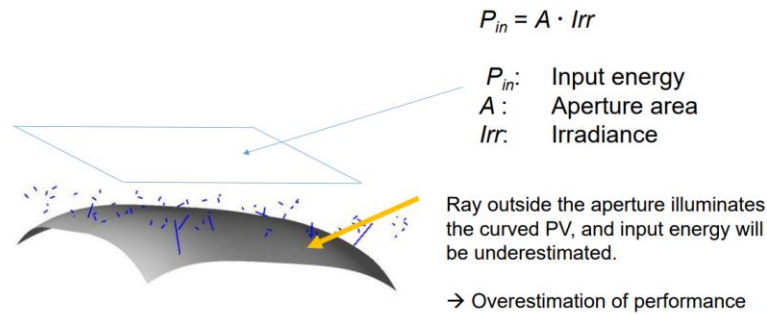


Fig. 38 Se observa la diferencia de tamaño entre el área proyectada y el área curva del módulo aplanado. (Ota, et al., 2022)

Curved PV is illuminated in testing out of the aperture area



The virtual position of the aperture may be the geometrical gravity of the curve profile.

Fig. 39 Infravaloración de la energía aportada para la medición del módulo fotovoltaico curvado. (New Energy and Industrial Technology Development Organization, 2019)

La primera causa de la sobreestimación es que el módulo fotovoltaico curvo suele recoger más luz de la que incidiría sobre el área proyectada. Dado que la zona de iluminación del simulador solar es siempre más extensa que el módulo fotovoltaico, debido a que la zona de iluminación del simulador solar es mayor que la del módulo curvo, el módulo curvo recibe más luz procedente de la región externa del simulador, generando más potencia de la esperada.

La segunda causa es el área proyectada; es decir, el área activa del módulo curvo no está definida claramente y puede tener múltiples definiciones. Siendo esto una causa de error en la estimación de la eficiencia del módulo.

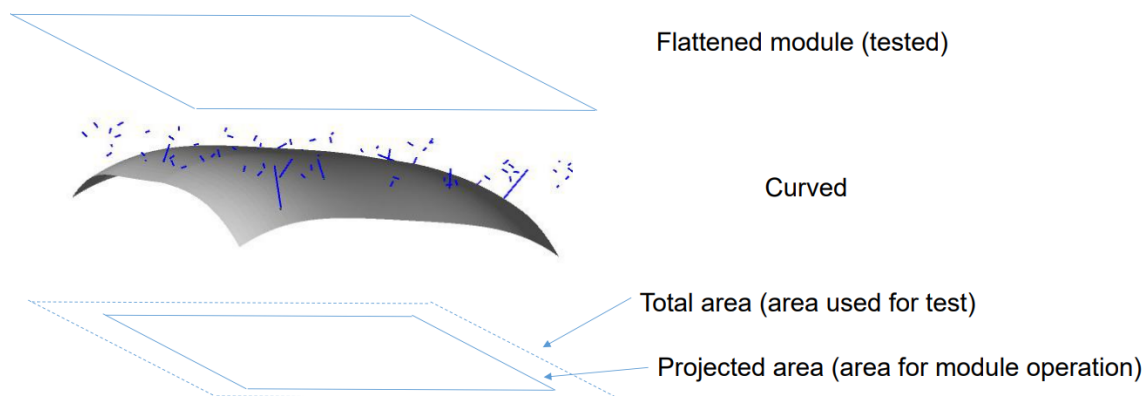


Fig. 40. Inconsistencia entre las diferentes áreas, el área proyectada y el área total. (Araki, et al., 2020)

La tercera causa es la diferencia en la distribución angular en la medición en interiores (simulador solar típico) y el funcionamiento en exteriores. La superficie curva genera más pérdidas en la iluminación por tener un mayor ángulo de incidencia. A diferencia del caso del módulo fotovoltaico plano, no se puede comparar la eficiencia del módulo en interior con al funcionamiento en exterior. Se debe aplicar la corrección de la curvatura del módulo.

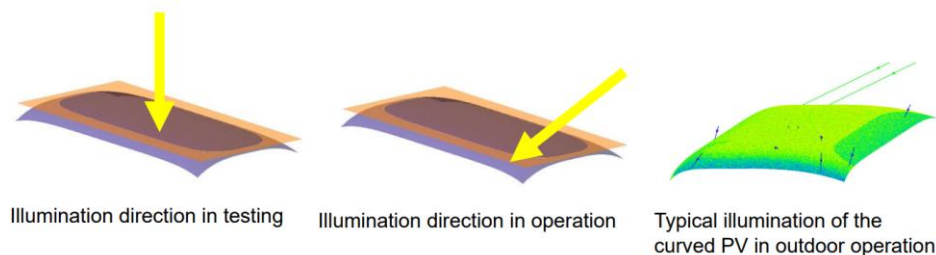


Fig. 41 Diferencias entre el ensayo en interiores y lo que ocurre en el exterior. Esto produce pérdidas por coseno y auto sombreados: por ello se debe realizar un ensayo de la eficiencia angular. (Araki, et al., 2020)

El factor de corrección de la curva puede calcularse mediante cálculo numérico, geométrico o simulación de trazado de rayos. Para el cálculo geométrico, es importante añadir dos condiciones para evitar la complejidad. En primer lugar, el módulo no absorbe la luz en la parte trasera. En segundo lugar, la superficie curva es convexa simple.

El factor de corrección de la curva f se define a través de la ecuación:

Ecuación 4 Definición del factor de curva

$$P_{out} = A_p I f \eta$$

donde A_p es el área plana del panel —no el área proyectada— (m^2), I es la irradiancia sobre la cubierta curva (W/m^2), f es el factor de corrección de la curva, y η es la eficiencia del módulo medida en la condición plana por el simulador solar convencional, como se definió en la Ec. (2).

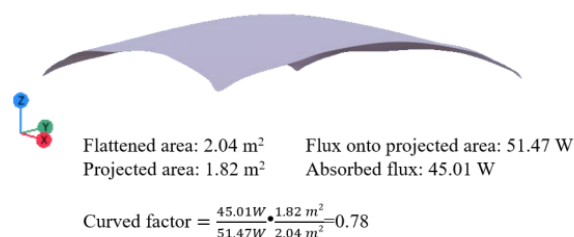


Fig. 42 Ejemplo de área y curvatura de un módulo curvo situado en el techo.

El factor de corrección de la curva f es un valor único que depende de la forma de la curva 3D del panel si se da la distribución angular de la irradiación solar. Se calcula mediante cálculo numérico.

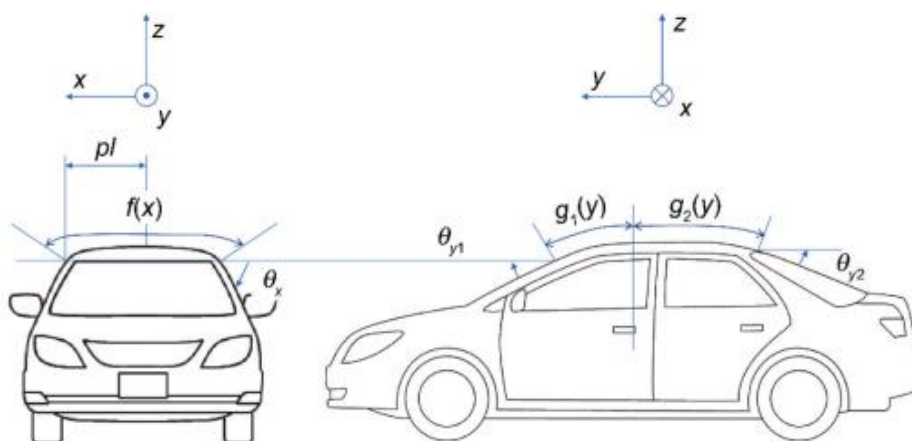


Fig. 43 Extracción de los parámetros de curva mediante CAD. (Ota, et al., 2022)

El factor de corrección de la curva f puede expresarse como el producto de dos parámetros:

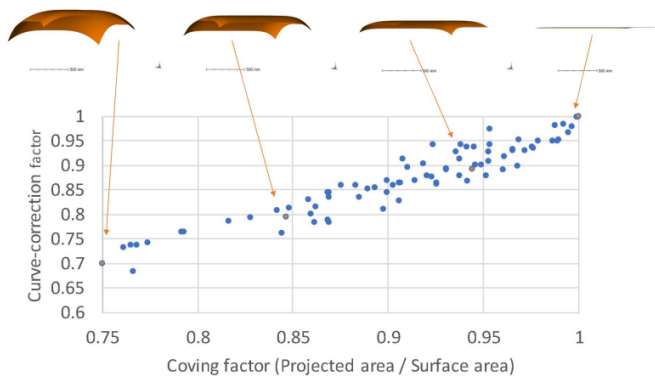
Ecuación 5 Factor de corrección de curva.

$$f = f_1 f_2$$

donde, f_1 es el factor de *coving*, o de otra manera, factor de corrección de la curva geométrica correspondiente a la relación del área proyectada por el área de la superficie, f_2 es la relación de irradiación debida a la pérdida local del coseno y la pérdida de auto-sombra, en otras palabras, el factor de corrección de la curva óptica. El parámetro f_1 puede representar la forma general de la superficie curva. En alguna literatura como se ve en la Figura 44 se puede encontrar un tercer factor denominado f_3 el cual es la corrección de la expansión desigual del módulo.

Curve correction factor

$$f = f_1 f_2 f_3$$



f_1 is the coving factor, or in another way, geometrical curve correction factor corresponding to the ratio of the projected area by surface area),

f_2 is the irradiance ratio due to the local cosine loss and self-shading loss, in other words, optical curve correction factor.

f_3 is the correction of uneven expansion of the curved module.

Fig. 44 Factores de corrección de curva. (New Energy and Industrial Technology Development Organization, 2019)

Los factores de corrección de la curva de las distintas formas del techo del vehículo se han calculado y representado en la Figura 44 y 45.

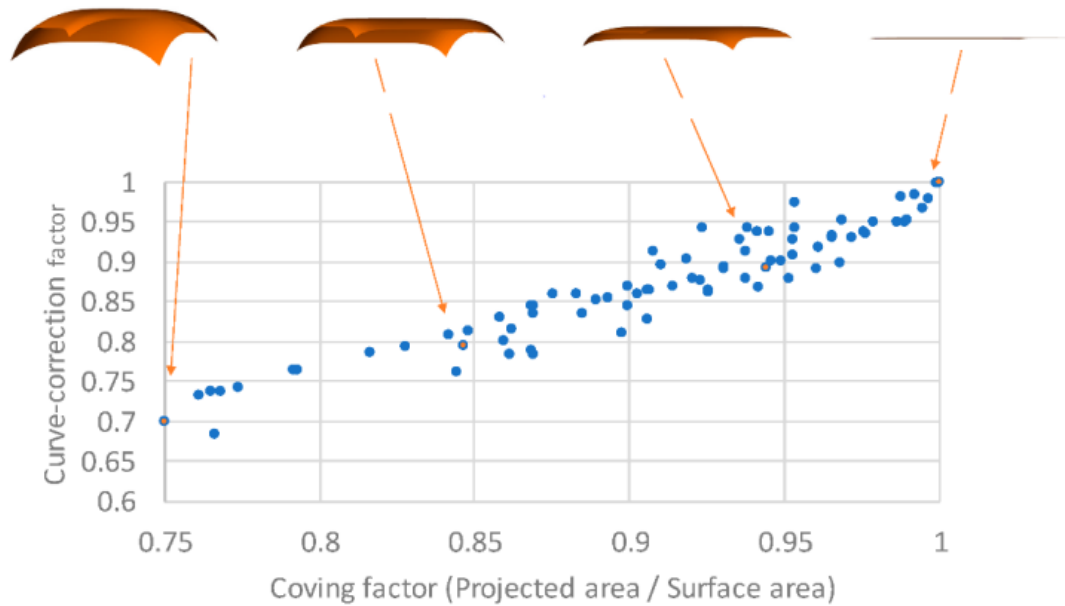


Fig. 45 Factores de corrección de la curva y el parámetro representativo de la forma de la curva. (Araki, et al., 2021)

El factor de corrección de la curva disminuye con el aumento de la curvatura de la superficie, que corresponde a la relación de la superficie proyectada por la superficie (Figura 45).

El factor de corrección de la curva también se ve afectado por la distribución angular de la irradiación solar (f_2). A grandes rasgos, la distribución angular de la luz solar en la superficie horizontal se desplaza hacia el ángulo de incidencia más alto cuando la altura del sol es baja.

Los factores de corrección de las curvas, f_1 y f_2 , varían significativamente según las condiciones del lugar, incluyendo la latitud, el patrón climático y el entorno de sombreado (zona urbana o zona rural). Esto se debe a la diferencia en la distribución del ángulo de incidencia sobre la superficie curva.

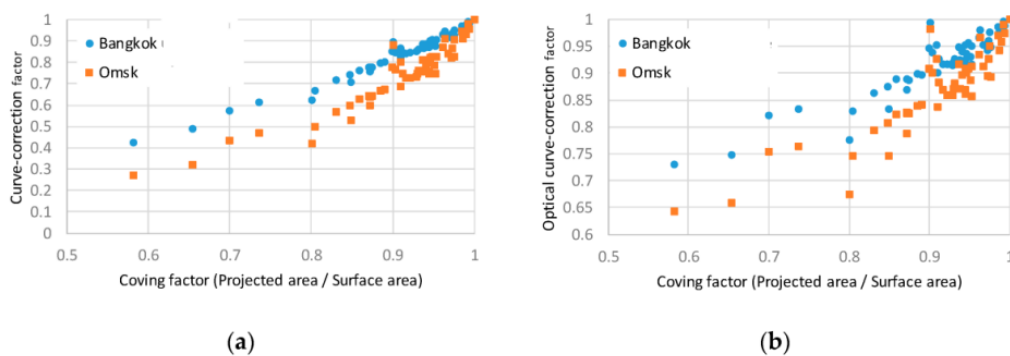


Fig. 46 Factores de corrección f_1 y f_2 (izquierda y derecha) y parámetro representativo de la forma de la curva "coving factor" en dos casos extremos, Bangkok y Omsk. (Araki, et al., 2020)

La idea básica del factor de corrección de la curva es ver la relación entre el flujo absorbido de luz y de la fuente de luz en relación con la superficie del área proyectada del panel fotovoltaico curvo que se coloca, viéndose en la siguiente figura. Los segmentos de línea cortos corresponden al rayo que no llega a la superficie curva. Los segmentos de línea más largos corresponden a los incidentes en el panel (superficie gris opaca curvada). Se observa que algunos rayos situados justo por encima del panel curvo no llegan al módulo debido a su curvatura.

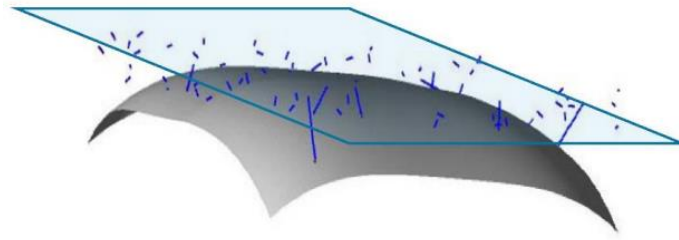


Fig. 47 Relación geométrica entre la curva del panel fotovoltaico y la fuente de luz. (Araki, et al., 2020)

Para finalizar este apartado es importante tener en cuenta que los paneles curvos y planos son completamente diferentes en relación al cálculo de la irradiancia captada, a causa de la curvatura del módulo. Para relacionar la irradiancia captada entre estos dos tipos de módulos se utiliza un factor de corrección. Se espera que en el futuro se desarrolle la normativa de medición de la irradiancia por los módulos curvos (International Electrotechnical Commission, 2022) pudiéndose basar en los anteriormente expuesto (New Energy and Industrial Technology Development Organization, 2019)

4.4 ANÁLISIS MEDIOAMBIENTAL

Los vehículos con energía fotovoltaica integrada podrán contribuir a la reducción de CO₂ en comparación con los vehículos eléctricos convencionales, aunque el grado de reducción de CO₂ dependerá de la conducción por parte del conductor y la intensidad de carbono de la red local. Sin embargo, hay que tener en cuenta que si la intensidad de carbono de la energía fotovoltaica (kg-CO₂/kWh) es mayor que la de la electricidad de la red, un vehículo fotovoltaico no conseguirá reducir las emisiones de CO₂ en comparación con un vehículo eléctrico convencional.

En la mayoría de los casos, las emisiones de CO₂ se reducen durante el funcionamiento del vehículo gracias a la integración fotovoltaica. Sin embargo, en algunos casos, por ejemplo, en países con energía de red muy limpia, el CO₂ debido a la fabricación de los módulos fotovoltaicos podría dar lugar a emisiones ligeramente superiores durante la vida útil de estos. Para aumentar la reducción de CO₂, es necesario módulos fotovoltaicos integrados fabricados con menores emisiones, mayor eficiencia y una mayor vida útil.



Fig. 48 Comparación de emisiones CO₂ para distintas localizaciones con vehículos con o sin PV. Se ha utilizado un sistema de 800 Wp y en un recorrido diario de 15 km. (Araki, et al., 2021)

El porcentaje de utilización de la energía fotovoltaica en el que las emisiones de CO₂ de la electricidad generada son iguales a las emisiones de CO₂ de la red corresponde a un punto de cruce en el que el vehículo fotovoltaico pasa de producir un aumento de las emisiones de CO₂

a proporcionar una disminución. Este punto es igual a la relación de "emisión de CO₂ de la electricidad fotovoltaica con un índice de utilización del 100%" a la "emisión de CO₂ de la red"

Este cruce, o ratio mínimo de utilización fotovoltaica, se ha calculado para cada una de las ubicaciones de los países de (véase la Figura 50. ¿número?). El coeficiente de utilización mínimo requerido varía según las ubicaciones. Cuanto mayor sea la intensidad de carbono de la red y la electricidad generada por la energía fotovoltaica, menor es el coeficiente de utilización requerido. En la mayoría de los lugares, la ratio mínima de utilización fotovoltaica es inferior al 30%. Cuando la intensidad de carbono de la red es muy baja, como en París, el coeficiente mínimo de utilización es superior al 100%. Esto indica que las emisiones de CO₂ correspondientes a la fabricación y funcionamiento de los módulos fotovoltaicos son más elevadas que las de la red eléctrica del país, lo que supone un aumento de las emisiones de CO₂ con la energía fotovoltaica a bordo con la tecnología actual.

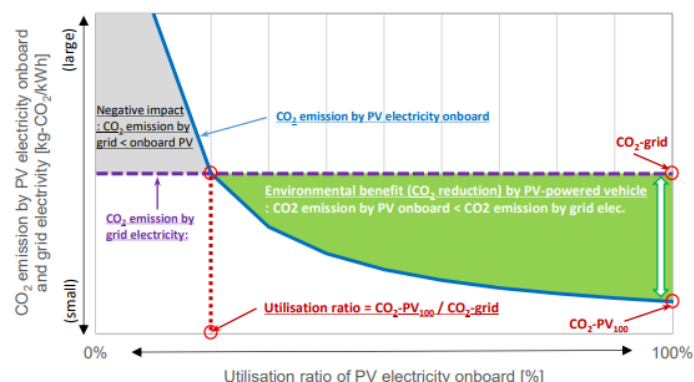


Fig. 49 Relación entre las emisiones de CO₂ de la red eléctrica, el porcentaje de uso de energía fotovoltaica y la reducción de CO₂ estimada para VIPV. (Araki, et al., 2021)

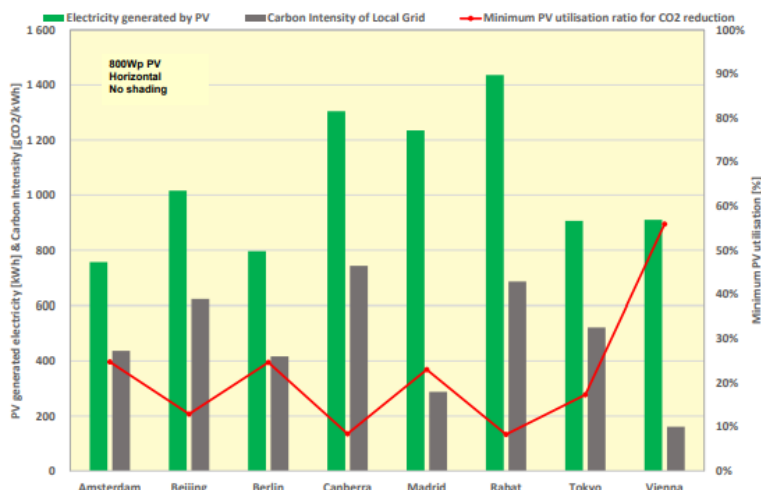


Fig. 50 Energía eléctrica generada mediante fotovoltaica y la cantidad de CO₂ de la red eléctrica y el porcentaje mínimo de utilización de energía fotovoltaica para conseguir una reducción del CO₂. (Araki, et al., 2021)

Como se ha visto anteriormente los patrones de conducción y la irradiancia varían según la región, el país y el conductor. Por ello, para aumentar el nivel de utilización de la energía fotovoltaica, es necesario optimizar el diseño de los vehículos fotovoltaicos teniendo en cuenta

la irradiación solar efectiva, la eficiencia del vehículo, la capacidad y la eficiencia de la batería y las condiciones de funcionamiento.

6.1.1 Emisiones en la electricidad producida por energía fotovoltaica

En general, la emisión de CO₂ debida a la electricidad fotovoltaica se muestra en la siguiente figura dividiendo las emisiones de CO₂ del ciclo de vida del sistema fotovoltaico por la electricidad generada durante la vida útil de la fotovoltaica.

$$\boxed{\text{CO}_2 \text{ emissions due to PV electricity [kg-CO}_2\text{/kWh]}} = \boxed{\text{Life cycle CO}_2 \text{ emissions of PV system [kg-CO}_2\text{]}} \div \boxed{\text{Electricity generation during lifetime [kWh]}}$$

Fig. 51 Emisión de CO₂ en la electricidad generada mediante fotovoltaica. (Araki, et al., 2021)

Las emisiones de CO₂ del ciclo de vida son debido por el proceso de fabricación, dependiendo este factor del lugar de fabricación. La fabricación de un módulo fotovoltaico es una actividad muy demandante energéticamente puesto que se realiza la purificación y el refinado de los materiales semiconductores.

La electricidad generada por la energía fotovoltaica durante su vida útil dependerá de la irradiación solar, el índice de rendimiento y la vida útil, de modo que aumentando estos valores se reducirán las emisiones netas de CO₂.

En el caso de en la VIPV la irradiancia solar esperada puede ser pequeña debido al sombreado, la ratio de rendimiento es pequeña debido a la pérdida de carga/descarga de la batería, y la vida útil esperada puede ser más corta en comparación con la fotovoltaica convencional por la menor vida útil de un vehículo. Es esperable que la generación de electricidad de un sistema fotovoltaico integrado en un vehículo sea menor y que sus emisiones de CO₂ netas sean mayores que las de un sistema fotovoltaico estacionario convencional.

Las emisiones de CO₂ de un sistema fotovoltaico a bordo por kWh se calculan como se muestra en la siguiente figura. En lugar de la generación de electricidad prevista durante la vida útil que se muestra en la figura anterior se debe tener en cuenta la electricidad fotovoltaica utilizada realmente por un vehículo dotado de VIPV durante su vida útil. La electricidad fotovoltaica utilizada por el vehículo se calcula teniendo en cuenta la generación de electricidad fotovoltaica a bordo prevista durante la vida útil y el índice de utilización de la referida electricidad fotovoltaica por parte del vehículo.

$$\boxed{\text{CO}_2 \text{ emissions due to onboard PV electricity [kg-CO}_2\text{/kWh]}} = \boxed{\text{Life cycle CO}_2 \text{ emissions of onboard PV system [kg-CO}_2\text{]}} \div \boxed{\text{PV Electricity used for vehicle during lifetime [kWh]}}$$



Expected electricity generation during lifetime [kWh]

×

Utilisation ratio of PV electricity [%]

Fig. 52 Emisión de CO₂ en un sistema fotovoltaico integrado en un vehículo. (Araki, et al., 2021)

5 HISTORIA DE LA FOTOVOLTAICA INTEGRADA EN LOS VEHÍCULOS

Los vehículos solares no son una novedad, los comienzos de su desarrollo se pueden remontar a la década de los 50 del pasado siglo, con el *concept car* GM's Sunmobile. Más de tres décadas después, el diseño aerodinámico de los coches de carreras con energía solar causó sensación en el Tour de Sol en Suiza y en Estados Unidos, revitalizando unas ambiciones casi olvidadas respecto a la movilidad solar. No obstante, el desarrollo de estos comienza realmente en el siglo XXI debido a la mejora de la tecnología fotovoltaica.



1955: Baker Solar Electric car



1977: Blue Jay Solar Car



1980: the Citicar



1981: The Quiet Achiever



1986: The Sunraycer

SONO MOTORS

Fig. 53 Vehículos históricos con distintos niveles de integración fotovoltaica. (Sono Motors, 2021)

Máster en Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos

Tabla 1 Listado de vehículos VIPV. Listado no exhaustivo. (Araki, et al., 2021)

Manufacturer	Model/Project	Type	Stage	Year	Vehicle weight (t)	PV surface (m ²)	PV Power (kWc)	Cell technology	Cell efficiency	Module efficiency	PV use
Eco Ship		Boat	Development	2020		12 000	750				Aux.
Planet Solar	Tûranor	Boat	Prototype	2010	89	516,0	93,5	Standard		18,1 %	Prop. + Aux.
Energy Observer	Energy Observer	Boat	Prototype	2017	28	130,0	21	Si		16,2 %	Prop. + Aux.
SoelCat	Catamaran 12	Boat	Prototype	2017	6		8,6				Prop. + Aux.
Fast Concept Vehicle	Starter	Bus	Prototype			20,5	3,4	Si mono IBC	21,8 %	16,6 %	Aux.
Dethleffs	E.home	Camper Van	Prototype	2017	5,6	31,0	3	Si mono		9,7 %	Prop. + Aux.
Hyundai	Sonata Hybrid	Passenger vehicle	Commercial	2020		1,3	0,204	Si mono	22,8 %	15,7 %	Prop. + Aux.
Skoda	Superb	Passenger vehicle	Commercial	2000				4*7 cells			Aux.
Gaia	Wiseman	Passenger vehicle	Commercial		0,8		0,23	Sunpower			
Audi	A8, A6, A4	Passenger vehicle	Commercial	1994			0,04				Aux.
Volkswagen	Touareg, Phaeton, Passat	Passenger vehicle	Commercial	1994			0,04				Aux.
Mercedes	E class, Maybach	Passenger vehicle	Commercial	1994			0,04				Aux.
Nissan	Leaf - SL model	Passenger vehicle	Commercial	2014							Aux.
Toyota	Toyota - Prius IV	Passenger vehicle	Commercial	2017	1,5	0,9	0,18	HIT		20,0 %	Prop.
Karma	Karma - Revero	Passenger vehicle	Commercial	2017	2,5		0,2				Prop.
Karma	Fisker	Passenger vehicle	Commercial	2011			0,12	80 cells - Si mono			
Hyundai/Kia		Passenger vehicle	Development	2018							
Tesla	CyberTruck	Passenger vehicle	Development	2019							Prop.
Fiat	Phylla	Passenger vehicle	Development	2008	0,75		0,34				Prop.
Toyota	Prius Prime	Passenger vehicle	Prototype	2019			0,86	Triple junction cells	34,0 %		Prop.
Gazelle Tech	Gazelle	Passenger vehicle	Prototype	2020	0,68	4,0		9 ASCA modules			Prop.
SonoMotors	Sono Motors - Sion	Passenger vehicle	Prototype	2018	1,4	7,5	1,2	Si mono IBC	24,0 %	16,0 %	Prop.
Hanergy	Hanergy - Solar R, O, L and A	Passenger vehicle	Prototype	2019	2	3,5 – 7,5	1 - 2	GaAs, III-V flexible	29,0 %		Prop.
Ford	C-Max	Passenger vehicle	Prototype	2014		1,5	0,3	3*(7*4) SunPower cells		20,0 %	Prop.
Bochum Univ.	Solar racers	Passenger vehicle	Prototype	2004-2017	0,25-0,36		1,2	Sunpower cells			Prop.
UNSW	Sunswift solar racers	Passenger vehicle	Prototype	1994-2017	0,17 - 0,43	4,0 – 7,9	0,8 – 1,8	Si mono IBC	18 – 23 %		Prop.
Audi	e-tron quattro	Passenger vehicle	Prototype	2015		2,5	0,4				
Venturi	Eclectic	Passenger vehicle	Prototype	2006	0,35	2,5					Prop.
Lightyear	One	Passenger vehicle	Prototype	2019	2	5,0					Prop.
Volkswagen	Tiguan GTE	Passenger vehicle	Prototype	2015		2,1	0,11				
ISRO		Passenger vehicle	Prototype	2017							Prop.
Peugeot	BB1	Passenger vehicle	Prototype	2009					16,0 %		Aux.
Atlantik Solar		Drone	Prototype	2017				Si mono IBC	23,0 %	21,0 %	Prop.
NASA	Helios	Drone	Prototype	2001-2003	0,8	180,0	35			19,4 %	Prop. + Aux.
Airbus DS	Zephyr	Drone	Prototype	2008	0,05			Si bifacial			Prop. + Aux.
Solar Stratos	Solar Stratos	Plane	Prototype	2014	0,45	22,0			22,0 %		Prop. + Aux.
Océan Vital	Eraole	Plane	Prototype	2015	0,75		5,5	Si mono IBC	24,0 %		Prop. + Aux.
	Solar Ship	Plane	Prototype	2014							Prop.
Solar Impulse	Solar Impulse	Plane	Prototype	2004	2,3	270,0		Si mono IBC	22,6 %		Prop. + Aux.
Stratobus	Stratobus	Spatial	Prototype	2018				Si mono IBC	24,0 %		Prop. + Aux.
FlixBus		Bus	Prototype	2020				CIGS		17 %	
India		Train	Prototype	2017				Si			Aux.
SNCF	TER	Train	Prototype	2010		23,0	3,1	Si mono IBC	21,0 %	13,5 %	Aux.
JETTY TRAIN		Train	Prototype	2017							
Byron Bay		Train	Prototype				6,5	Si			Prop.
TSSC	TSSC	Truck	Commercial			6,4	1,2	Si			Aux.
IM Efficiency	SolarOnTop	Truck	Prototype	2019							
Volvo	SuperTruck Cab	Truck	Prototype	2014			0,27				Aux.
Renault Truck	Optifuel Lab 2	Truck	Prototype	2014		31,1	4,6	Si mono IBC	22,0 %		Aux.
Renault Volvo Truck		Truck	Development					CIGS			Aux.
Navistar	Catalyst	Truck	Prototype	2017		22,4	3,64	Si poly		16,3 %	Aux.
Daimler FreightLiner	SuperTurck	Truck	Prototype	2015							Aux.
Mitsubishi and Nippon	i Cool Solar	Truck	Prototype	2010			0,9	Organic	4,0 %		Aux.

5.1 LOS COMIENZOS: DÉCADA DE LOS 50

EL GM's Sunmobile era un prototipo futurista desarrollado por General Motors y presentado en el Powerama de Chicago de 1955. Según datos de la propia GM si las células solares tuvieran una eficiencia del 100% este vehículo podía desarrollar una potencia de 12 caballos, potencia insuficiente para un vehículo de la época.

El Sunmobile tenía 12 células solares de selenio localizadas en el techo del vehículo, las cuales movían un pequeño motor eléctrico, el cual rotaba a 2000 r.p.m con un voltaje de 1,5 voltios. Esta energía era transferida a la transmisión que a su vez transmitían la energía al eje trasera mediante una polea a las ruedas del coche.

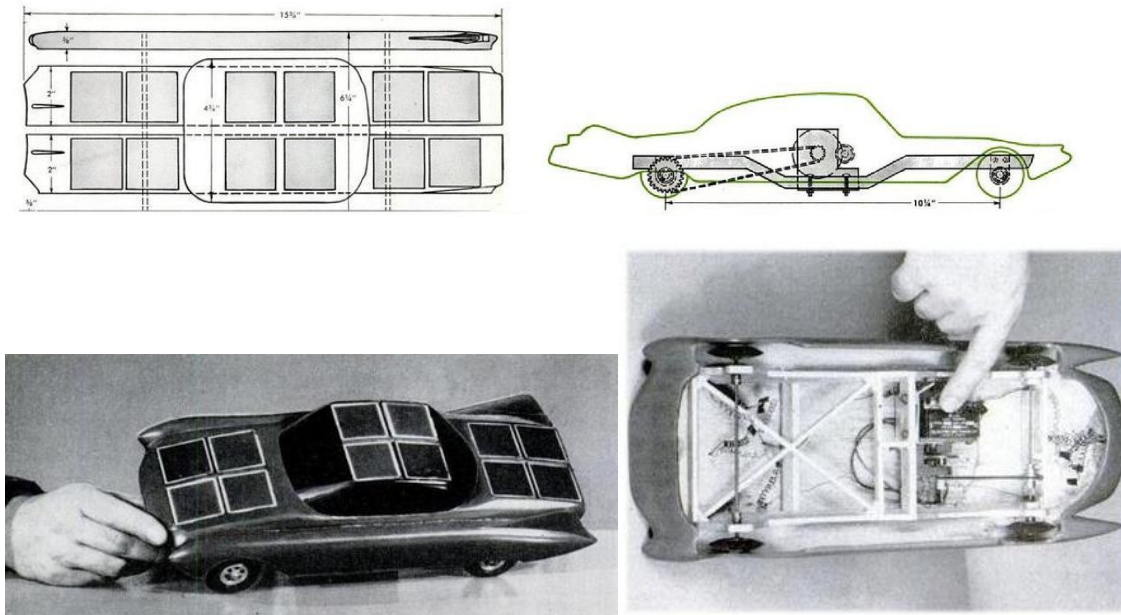


Fig. 54 Imágenes del Sunmobile. (Wikipedia, 2022)

5.2 CAMINO POR EL DESIERTO

Las ideas de los años cincuenta quedaron en eso, en ideas. Con el aumento de la producción de petróleo y la bonanza económica mundial se abandonó la inclusión de la energía solar en los vehículos, y no se recuperó hasta cuarenta años después.

Es cierto que durante la crisis del petróleo de los 70 hubo un cambio en el paradigma de los principales fabricantes, pero no se buscaba un cambio en la fuente de energía sino una mayor eficiencia de los motores de combustión.

La aplicación de la energía solar se encontraba todavía en sus inicios y no estaba madura para ser utilizada a gran escala, -su aplicación era principalmente para el sector aeroespacial-. lo que llevo a un periplo por el desierto hasta los años 90, aun así, hubo *concept cars* como el Blue Jay Solar Car, el Citicar, The Quiet Achiever o el The Sunrayer.

5.3 RESURGIMIENTO: DÉCADA DE LOS 90 Y 2000

La integración de la energía fotovoltaica en los automóviles se propuso originalmente en los años 80 y principios de los 90. En aquella época el uso se limitaba a la climatización interior y a la carga de equipos eléctricos. (Ibañez, 2017)

En la década de los 90 algunos de los principales fabricantes de coches OEMs (*Original Equipment Manufacturer*) como son Mercedes, Audi o Volkswagen empezaron el desarrollo de los techos solares con el fin de alimentar los elementos de los servicios auxiliares más demandantes energéticamente por ejemplo para el ventilador del habitáculo). Es decir, se incluyó tecnología solar para mejorar el confort en el habitáculo. Este añadido solamente se encontraba en sus modelos más avanzados y exclusivos. (Valdivielso, 2022)



Fig. 55 Sistema fotovoltaico cuyo uso es de climatización interior. (Ibañez, 2017)

Esta solución aporta dos ventajas:

- El alternador no tenía que funcionar tanto tiempo para generar la electricidad necesaria, no sobrecargando al motor y disminuyendo el consumo
- Se podía consumir energía eléctrica sin encender el motor de combustión interna, y sin peligro de descargar en exceso la batería de servicio.

Hay que puntualizar que estos techos solares con paneles solares no se deben confundir con lo que comúnmente se conoce como techo solar, una abertura en el techo que cuenta con un cristal que permite el paso de la luz solar. Este error es posible debido a la traducción de “sun roof” y de “solar roof” siendo ambas techo solar en castellano.

Lo que hacían los fabricantes era sustituir este cristal por un panel con células fotovoltaicas. La producción de energía iba destinada tanto a impulsar un ventilador para reducir la temperatura del habitáculo cuando el vehículo se estacionaba al sol sin necesidad que estuviese arrancado como a alimentar a los elementos auxiliares de la red eléctrica interna. La inclusión de un panel solar producía un aumento de peso, así como pérdida de luminosidad.

Entre los vehículos que destacaron con esta tecnología se encontraban:

- Mazda 929, de comienzos de 1990.

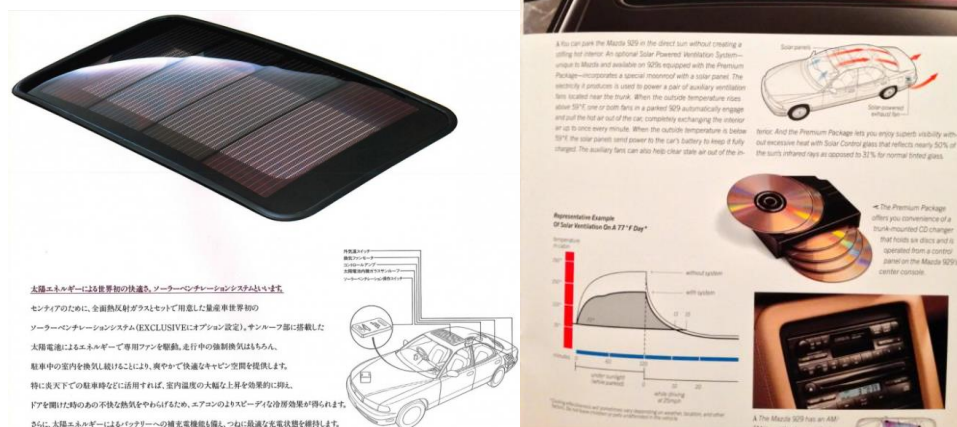


Fig. 56 Sistema fotovoltaico en el techo solar del Mazda 929. (Yuan, 2017)

- Audi A8 D3, cuya producción se inició en el 2003.



Fig. 57 Audi A8 D3 que contaba con un techo solar. (Valdivielso, 2022)

- Volkswagen Passat (B5.5) de principios de los 2000.



Fig. 58 Volkswagen Passat con techo solar. (Valdivielso, 2022)

- Mercedes Clase E (W211) del 2002.



Fig. 59 Mercedes Clase E (W211). (Valdivielso, 2022)

5.4 COMIENZO DE LA DÉCADA DE LOS 10

Ya en la década de los 2010 es cuando la tecnología solar empezó a formar parte de la mayoría de los vehículos fabricados, ya fuese por Toyota, Nissan, Audi, Volkswagen o General Motors.

Con el aumento de la eficiencia de las células, el aumento de la producción solar, la integración de estas pasó a un mayor nivel, llegándose a encontrar en techos y otras partes de los vehículos como son los *spoilers*. Y con el aumento de la eficiencia de las células, la energía que podía suministrar era mayor, permitiendo proporcionar electricidad a la red de 12 voltios con la que proveer de corriente a los diferentes elementos de confort del vehículo.

Entre los vehículos que destacaron en esta década con integración fotovoltaica se encuentran:

- Nissan Leaf (ZE0) de 2010 que contaba con un *spoiler* con un pequeño módulo.



Fig. 60 Spoiler del Nissan Leaf. (Valdivielso, 2022)

- Caben ser mencionados otros vehículos experimentales como pueden ser:
 - El Ford C-MAX Solar Energiy Concept, era un monovolumen compacto híbrido enchufable, el cual contaba con un techo solar, así como una cubierta en la que se incluían unas lentes de Fresnel que servían como concentradoras de la radiación solar hacia las células fotovoltaicas del techo del coche, maximizando la cantidad de luz solar, y por tanto consiguiendo generar la mayor cantidad posible de energía. Permitiendo una incidencia de la radiación solar sobre las células fotovoltaicas ocho veces lo que sería normal. Recargando así los 8 kWh de la batería del coche, unos 43 km bajo el ciclo NEDC.



Fig. 61 El Ford C-MAX Solar Energi Concept y explicación del funcionamiento de su cubierta. (Ibañez, 2017)

5.5 PRESENTE Y FUTURO

Con la expansión y popularización de la energía solar en la segunda parte de la década de los 10 y a comienzos de la del 20, así como una mayor electrificación de los automóviles ha supuesto una mayor integración de la fotovoltaica. Esto ha supuesto el surgimiento de nuevas empresas -startups- como son Aptera, LightYear y Sono Motor, las cuales su enfoque es producir un vehículo solar de cero, no integrar la tecnología solar ¿en modelos de vehículos? existentes. También se han sumado a esto fabricantes tradicionales como Toyota, Hyundai, Mercedes.

En los siguientes apartados se verá una breve descripción de estos vehículos, los cuales todavía no se han comercializado, pero se hará a lo largo de esta primera mitad de década.

7.1.1 Aptera

El vehículo desarrollado por Aptera es un vehículo que es extraño si observamos lo que actualmente existe en el mercado.



Fig. 62 Vehículo Aptera. (Aptera, 2022)

El desarrollo de Aptera comenzó en los 2000 con la búsqueda de un coche con el menor coeficiente aerodinámico posible, es por ello su forma de gota de agua, y con ello el menor gasto de combustible, porque el Aptera en sus inicios era un vehículo de gasolina al que a lo largo del desarrollo de este se cambió el motor de combustión por uno eléctrico e integrando la fotovoltaica.

Se espera su salida en el 2022-2024 con un precio estimado entre los 25900 - 46900 dólares

Entre sus características se encuentra:

- Vehículo biplaza.

- Diseño aerodinámico. Con un coeficiente aerodinámico de 0,13 (C_x).

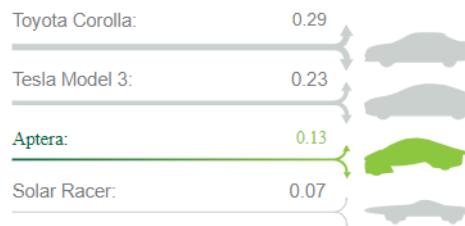


Fig. 63 Comparacion del coeficiente aerodinamico (C_x) del Aptera con otros vehículos. (Aptera, 2022)

- Alta eficiencia en el tren motriz, conseguido gracias a la electrificación y las ruedas motor "in-wheel motors".



Fig. 64 Fotografías de los motores electricos "in-wheel". (Aptera, 2022)

- Utilización de materiales ligeros en su mayoría composites.

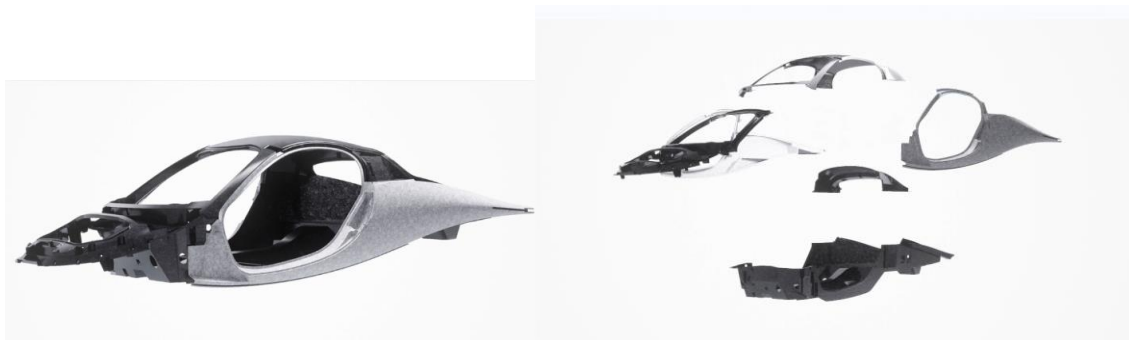


Fig. 65 Imagenes de las partes que componen el Aptera, por separado y juntas. (Aptera, 2022)

- Recarga mediante energía solar, su principal baza.



Fig. 66 Aptera donde se puede apreciar las células del capo y de la parte trasera. (Aptera, 2022)

- En cuanto a sus baterías actualmente únicamente se sabe que permitirán una autonomía máxima de 1000 km y serán de ion litio. (Aptera, 2022)
- Sus dimensiones son:
 - Una longitud de 177 pulgadas.
 - Un ancho de 88 pulgadas.
 - Altura de 57 pulgadas.

El Aptera estará equipado con 700 Watios de potencia pico, lo que permitirá aumentar en unas 40 millas sus 1000 millas de autonomía.

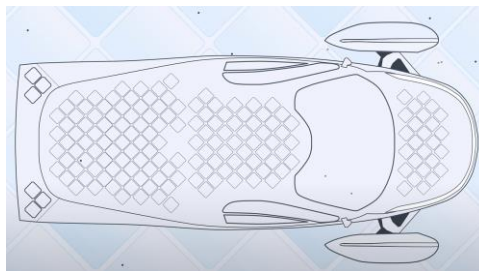


Fig. 67 Esquema del Aptera donde se puede ver las células fotovoltaicas. (Aptera, 2022)

La integración fotovoltaica ha sido llevada a cabo utilizando unas células IBC desarrolladas por Maxeon -modelo Maxeon Gen 3- las cuales cuentan con una alta eficiencia, durabilidad y ligereza.

Estas células se caracterizan por:

- Resistencia a la corrosión: El sistema metálico de estaño-cobre de es más resistente a la corrosión en comparación con la pasta metálica porosa utilizada en Las células convencionales.
- Resistencia a las grietas: Son más finas y flexibles que las que las células convencionales. Cuando una célula de SunPower se agrieta, la base metálica de cobre de la parte posterior mantiene la célula intacta y sin pérdida de potencia.
- Respetuoso con el medio ambiente: las células se sueldan sin plomo cumpliendo con la normativa RoHS.
- Sin degradación inducida por la luz (LID, por las siglas del inglés *Light Induced Degradation*,): permitiendo obtener un 2/3% más de energía a lo largo de su vida útil en comparación con otras células del mercado.
- Mejor funcionamiento ante condiciones de baja luminosidad y amplia respuesta espectral: hasta un 1% más de energía con cielos nublados y baja luminosidad

- Bajo coeficiente de temperatura en valor absoluto, lo que permite un mejor comportamiento térmico.

La respuesta espectral y características eléctricas se pueden encontrar en las siguientes figuras:

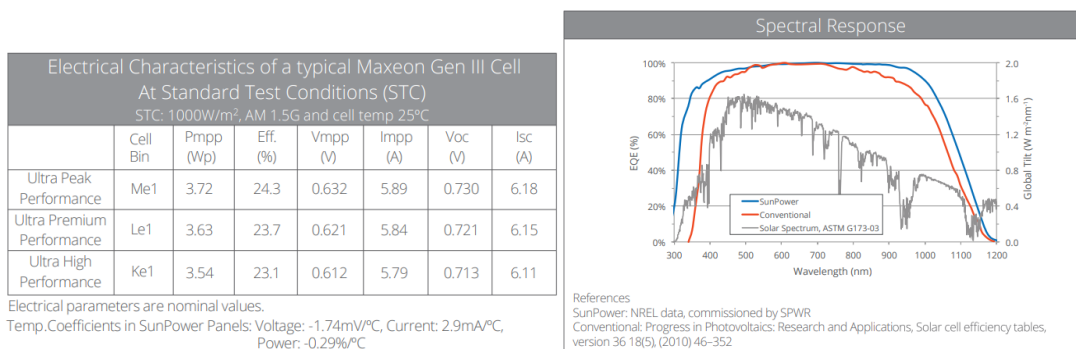


Fig. 68 características espectrales y eléctricas de las células Maxeon Gen III. (Sunpower, 2017)

Las dimensiones de la célula se muestran en la Figura 69.

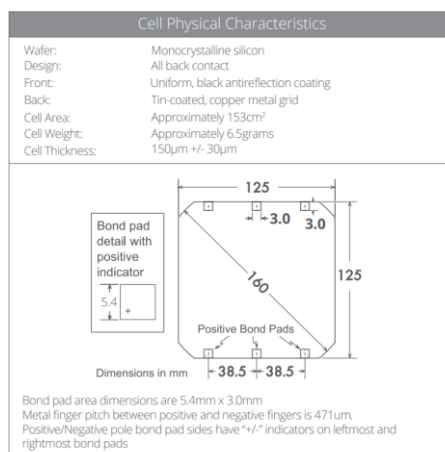


Fig. 69 Dimensiones de la célula Maxeon Gen 3. (Sunpower, 2017)

8.1.1 Lightyear

El vehículo de la marca neerlandesa Lightyear parte de un concepto diferente al Aptera pero con el mismo fin: ser un vehículo lo más eficiente posible el cual su energía motriz proceda de la energía capturada por las células solares integradas.

Esta empresa se fundó en 2016 y desde entonces han estado desarrollando su primer vehículo, el Lightyear 0.



Fig. 70 Lightyear 0 (Lightyear, 2022)

Este vehículo tiene una autonomía de funcionamiento de hasta 1000 km, con una batería que permitirá una autonomía de hasta 625 km bajo ciclo WLTP, la autonomía solar añadida diariamente es de hasta 70 km, la capacidad de la batería es de 60 kWh y cuenta con una velocidad máxima de 160 km/h. Su precio ronda los 250000 €.

625 km Range WLTP*	<0.19 C _d -value	1,575 kg Weight	Solar	Plug Charging
70 km Solar charge per day max.	640 L Trunk space (seats up)	10.5 kWh /100 km Energy use	10 km/h* Solar charging (1.05 kW)	32 km/h* Home charging (regular household plug)
11,000 km** Solar yield per year max.	12 L Center console	*Pending final verification tests **Solar yield will vary depending on location. Estimate based on Southern Spain.		200 km/h* Public charging
				520 km/h* Fast charging
				*Maximum range in 1 hour charging. Peak charging power may vary throughout the charging cycle.

Fig. 71 Características del Lightyear 0 (Lightyear, 2022)

Este vehículo cuenta con 4 motores independientes situados en las ruedas -“In-Wheel motors”- lo cual permite eliminar componentes como la caja de cambios y la transmisión reduciendo el número de componentes giratorios, mejorando la eficiencia y reduciendo el mantenimiento.



Fig. 72 Motor In-Wheel del Lightyear. (Lightyear, 2022)

Es un vehículo muy aerodinámico al tener un coeficiente de arrastre (Cd) de 0,175.



Fig. 73 Ensayo aerodinámico (Lightyear, 2022)

El sistema de baterías es de alta densidad energética con una alta eficiencia. Aparte de la carga solar también cuenta con frenado regenerativo.



Fig. 74 Sistema de baterías. (Lightyear, 2022)

El sistema de gestión térmico evalúa la generación de calor mediante distintos dispositivos y software, que la redirigen a otros componentes del vehículo. El sistema utiliza su entorno, la batería, los motores, los inversores y el cargador de a bordo como fuentes de calor, distribuyendo este calor a la batería y al habitáculo en caso de necesitarlo. Es decir, utiliza el calor residual de los distintos elementos.



Fig. 75 Sistema de gestión térmico del Lightyear 0 (Lightyear, 2022)

La refrigeración de la batería y de la transmisión están equipadas con un sistema de refrigeración líquida que funciona con un sistema de bomba de calor manteniendo estos componentes dentro del rango óptimo de temperatura.

El chasis y la carrocería del vehículo es lo más ligero posible utilizando materiales como aluminio y fibra de carbono reciclado lo cual a pesar de los 5 metros de largo solamente pesa unos 1575 kg

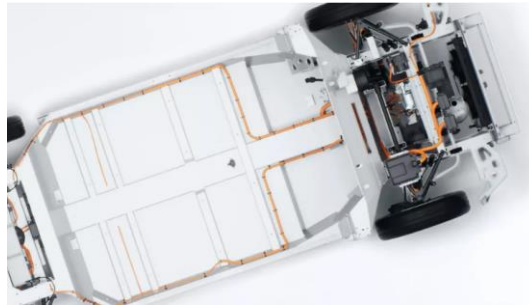


Fig. 76 Chasis del Lightyear 0 (Lightyear, 2022)

En cuanto al conjunto solar que monta es de 5 m² doblemente curvado integrado totalmente en la carrocería, techo y capó, reduciendo la necesidad de conectarlo a la red.



Fig. 77 Células sobre el capó (Lightyear, 2022)

Con una potencia pico de 1,05 kW puede proporcionar hasta 70 km de autonomía por día. Para llegar a esta potencia el vehículo cuenta con 782 células solares de silicio monocristalino IBC. La compañía estima una producción solar anual de hasta 11000 km, esta producción solar anual corresponde a la energía fotovoltaica que es proporciona al vehículo para su movimiento, esto supone para el usuario ahorrar la recarga de energía necesaria para mover el vehículo 11000 km.

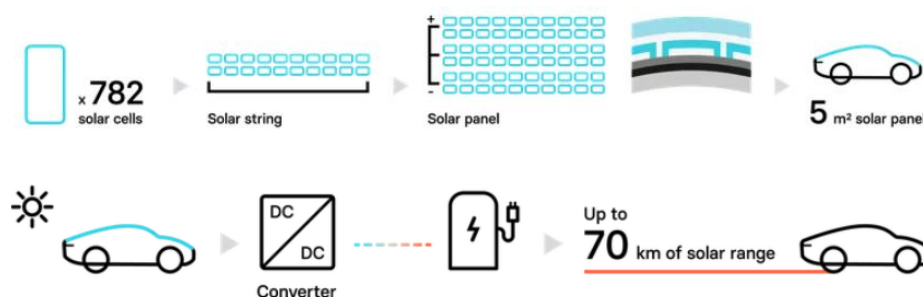


Fig. 78 Sistema fotovoltaico del Lightyear 0 así como explicación del funcionamiento y autonomía (Lightyear, 2022)

Hay que puntualizar que todos los datos referentes a la autonomía extra y la producción solar anual ha sido calculada basándose en la localización del vehículo en el sur de España

9.1.1 Sono Motors

La historia de Sono Motors es parecida a las compañías anteriores. Fue fundada en 2014 en Munich, Alemania. Su misión es conseguir un vehículo solar de cuatro plazas a un precio contenido, el Sono Sion.



Fig. 79 Sion, primer vehículo de Sono Motors (Sono Motors, 2022)

A diferencia de los vehículos anteriores, en este las células solares no solamente se han dispuesto en el capó y techo, sino que también se encuentran en los guardabarros, los laterales y el maletero integrándolas visual y físicamente con la carrocería del vehículo.

El total de células son 456 “half cells” IBC (por las siglas del inglés *Interdigitated Back Contact*) monocristalinas de silicio del proveedor Valoe que pueden generar una potencia de 1,2 kWp. Estas se encuentran protegido por un polímero robusto y resistente a los arañazos.

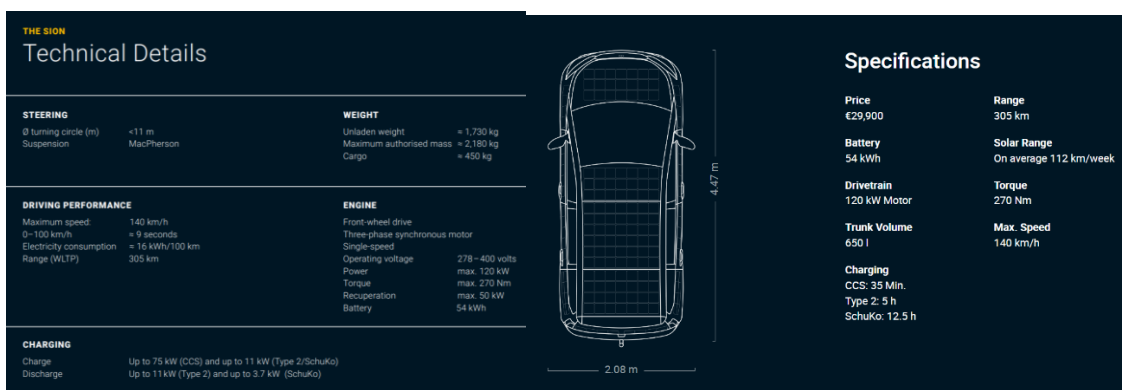


Fig. 80 Especificaciones técnicas del Sion. (Sono Motors, 2022)

La tecnología IBC basada en la tecnología Zebra permite una mayor potencia y durabilidad. La parte delantera de la célula convierte más del 23% de la potencia lumínica incidente en potencia eléctrica. Esta célula es una célula bifacial. (Valoe, 2022). Esto permite la recarga de la batería; bajo condiciones ideales 112 km de media (hasta 245 km máx.) de autonomía adicional por semana.

El motor que se ha incluido es un motor eléctrico síncrono trifásico. Proporciona una potencia máxima de 120 kW y un par de 270 Nm.

La batería que dispone el Sion es de litio-ferrofosfato (LFP) con una capacidad de 54 kWh, con hasta 3000 ciclos de carga, con una capacidad de carga de hasta 75 kW y un peso de 360 kg.



Fig. 81 Bateria del Sion (Sono Motors, 2022)

La química celular de esta batería no contiene cobalto, níquel ni manganeso, así como al no ser inflamables y con una vida útil larga incluso después de un uso prolongado e intensivo, sólo presentan bajas pérdidas de energía, lo que les confiere una vida útil especialmente larga. Con una capacidad de 54 kWh se estima que confiera al vehículo una autonomía de hasta 305 km.

En cuanto al sistema de refrigeración es líquido lo cual permite una refrigeración activa permitiendo que cada célula de la batería trabaje en su rango óptimo de temperatura 15-35°C.



Fig. 82 Sistema de refrigeración del Sion. (Sono Motors, 2022)

También se cuenta con un sistema de recuperación de calor lo cual permite el uso del calor residual de la batería y motor para calentar el habitáculo.

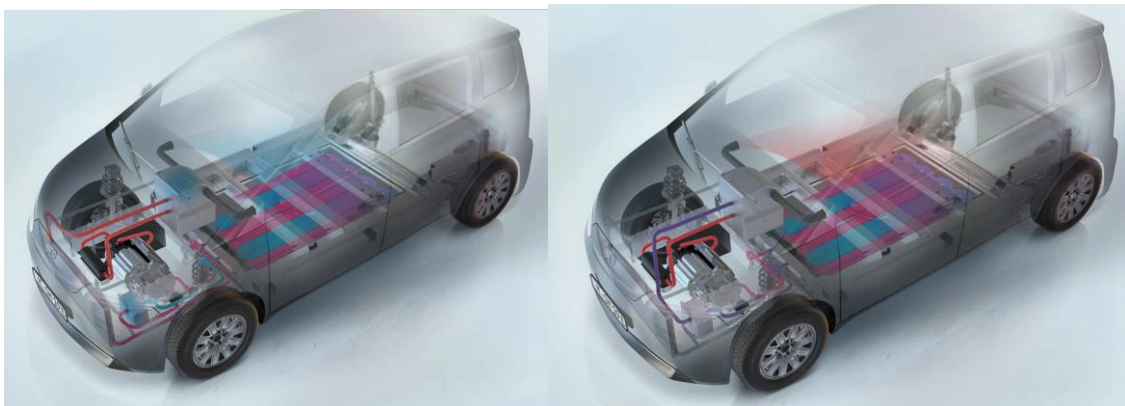


Fig. 83 Sistema de recuperación de calor del Sion. (Sono Motors, 2022)

Sus dimensiones son más comedidas que el Lightyear 0, tienen una longitud total de 4470 mm, con una anchura de 1830 mm y con una altura de 1660 mm y un peso de 1730 kg.

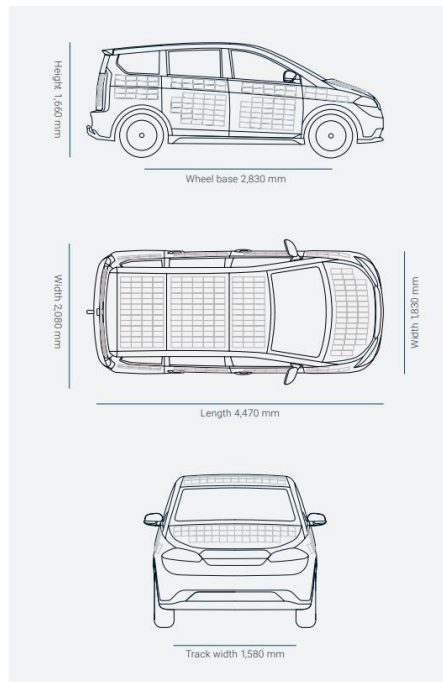


Fig. 84 Dimensiones del Sion. (Sono Motors, 2022)

10.1.1 Fabricantes tradicionales

Entre los fabricantes de corte más tradicional como puede ser Mercedes, VW, Toyota, Hyundai, también están incorporando la energía solar fotovoltaica en sus coches, colocando techos solares. Esta integración no llega a los niveles de las compañías anteriores, puesto que no está incluida de serie en el coche sino como un extra.

Un ejemplo que se puede ver ya en las carreteras sería el Toyota Prius PHEV en su versión Solar y Luxury, donde integran paneles solares en su techo proporcionando unos 5 km diarios de autonomía eléctrica, aunque si el vehículo está en marcha, la energía generada sirve para recargar la batería de 12V. (Toyota Motor Corporation, 2021)

El vehículo cuenta con tres baterías de almacenamiento. La principal de 8,8 kWh es la que alimentamos al enchufar el coche a un punto de recarga. Sirve para propulsar los dos motores eléctricos del Toyota Prius PHEV ofreciendo una autonomía de 45 km.

Además, cuenta con dos baterías auxiliares que se cargan con la energía obtenida a través de los paneles fotovoltaicos. La primera es específica para ellos y alimenta los motores eléctricos, ofreciendo una autonomía adicional de 6,1 km. La segunda es auxiliar para los sistemas electrónicos (instrumentación, radio, elevalunas...), por lo que mitiga en parte el consumo energético de estos aparatos.

El funcionamiento del sistema varía en función del estado del coche. Por un lado, cuando está parado, recarga la batería auxiliar de los motores eléctricos. Por otro, cuando está circulando, recarga la batería auxiliar que usan los sistemas electrónicos que pudieran estarse utilizando en ese momento. La potencia pico del sistema fotovoltaico es de 180 Wp.

Los paneles fotovoltaicos están fabricados por Panasonic. Utilizan la tecnología HJT ofreciendo una eficiencia de conversión del 22,5 % en CEM y una degradación prácticamente nula. (Toyota Motor Corporation, 2021)



Fig. 85 Techo Solar equipado en el Toyota Prius Plug in Hybrid. (Toyota Motor Corporation, 2021)

Este Toyota Prius Plug-in Hybrid no es el primer vehículo de Toyota que incluye la integración fotovoltaica, pero sí el primero de venta. En 2019 Toyota presentó un prototipo de coche solar, el Toyota Prius PHV, que usaba paneles fabricados por Sharp.

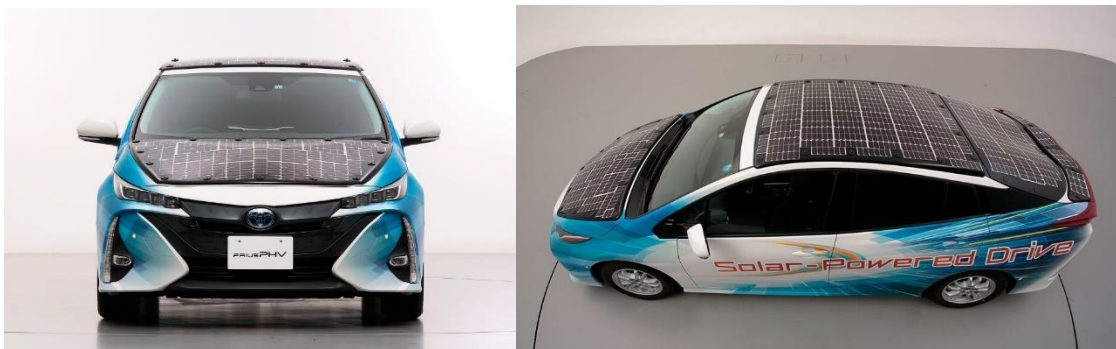


Fig. 86 Prototipo Toyota Prius PHV. (New Energy and Industrial Technology Development Organization; Sharp Corporation; Toyota Motor Corporation, 2019)

La tecnología de Sharp (células multiunion III-V) es, más eficiente, ofreciendo una tasa de conversión del 34 % frente al 22,5% del Toyota Prius Plug-in Hybrid Solar. Con esto y con la mayor superficie de captación de luz, el Toyota Prius PHV tiene una potencia de 860 Wp.

De igual modo, los paneles alimentarán la batería auxiliar, esté el coche o no rodando. Con todo, el sistema fotovoltaico permitirá recuperar hasta 44,5 km en estacionamiento y 56,3 km en circulación. De esta manera, el vehículo tenía una autonomía en modo eléctrico de 68,2 km homologados según el ciclo NEDC.

La gran peculiaridad de esta tecnología es que permitía modularizar los paneles fotovoltaicos. Asimismo, como un grosor ínfimo de las células hasta los 0,03 mm, pudiendo adoptar cualquier tipo de forma o curvatura, así como conferir un bajo peso. Con ello, se ha logrado cubrir no solo el techo del vehículo, sino también el capó, el portón trasero y otras partes menores de la carrocería.



Structure	Triple-junction compound solar cell module ^{*7}
Conversion efficiency	34%-plus (solar battery cell unit)
Panel locations	Roof, hood, rear hatch door, rear hatch door garnish

Fig. 87 Características de las células del Toyota Prius PVH así como una imagen de su colocación sobre el capó. (New Energy and Industrial Technology Development Organization; Sharp Corporation; Toyota Motor Corporation, 2019)

Hyundai ha incluido el techo solar en su vehículo Ioniq 5. Esta tecnología es compartida con Kia. El sistema de carga solar no está pensado como fuente de energía principal, sino como auxiliar. Funciona para recargar las baterías de los coches con motor o para apoyar la energía generada por el motor de combustión. La evolución tecnología ocurrirá en tres generaciones, una primera con techo con células solares colocadas sobre el techo, para pasar en una segunda fase en la cual se utilizar un techo solar traslucido -parecido a la integración de las células solares en vidrios- esta segunda fase estará diseñada para vehículos con motor de combustión y por último aumentando la superficie de captación solar obteniendo así una mayor potencia.

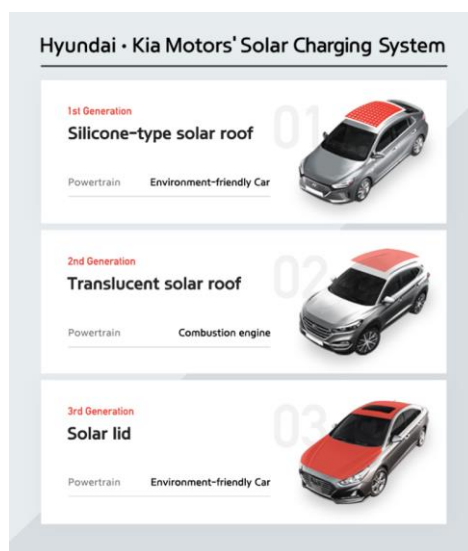


Fig. 88 Hoja de ruta de Hyundai y Kia para la inclusión de fotovoltaica en sus vehículos. (Hyundai, 2019)

Al igual que en Toyota el aumento de autonomía proporcionada por el techo solar estimada por Hyundai es de alrededor de 5-6 km por día.

Esto también fue incluido en el Sonata Hybrid, el cual fue el segundo vehículo de Hyundai con un sistema de carga solar en el techo con solamente un peso de 66 kg, con una potencia de 204 Wp. Este sistema desempeña solamente un papel de apoyo aumentando la autonomía.

El techo se divide en dos paneles solares reales -de 38,9 pulgadas por 25,9 pulgadas cada uno- mientras que un convertidor solar de continua a continua convierte el voltaje al nivel adecuado (12 voltios para la batería de accesorios o 310 voltios para la batería híbrida) y carga una batería a la vez hasta que ambas están llenas.



Fig. 89 Paneles en el techo del Sonata Hybrid (Hyundai Motor Group, 2019)

Hyundai ha instalado en los paneles del techo solar células de alto rendimiento con una gran eficiencia. Las células de los paneles del Sonata tienen una eficiencia en CEM de 22,8%.

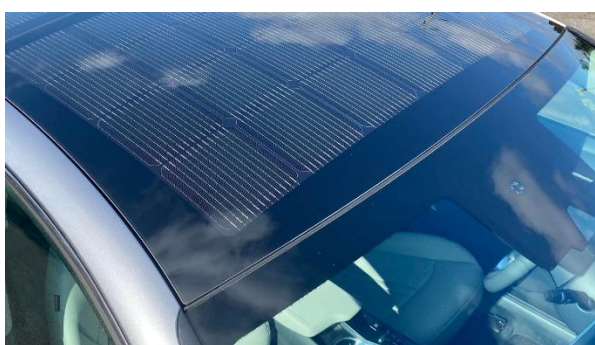


Fig. 90 Células del Hyundai Sonata (Young, 2022)

Como los casos anteriores también Mercedes ha mostrado la integración de la energía solar en su *concept car* Vision EQS.



Fig. 91 Prototipo Mercedes Vision Eqxx.

En este vehículo el techo solar está compuesto por 117 células que carga los sistemas auxiliares del coche y permite una mayor autonomía. El techo solar se ha desarrollado en

colaboración con el Instituto Fraunhofer de Sistemas de Energía Solar ISE. Según Mercedes, en un día con condiciones ideales, el techo solar puede añadir hasta 15 millas (25 km) de autonomía. Esta tecnología será añadida en los coches de Mercedes-Benz a partir de 2024.

Comparativo entre Hyundai y Toyota

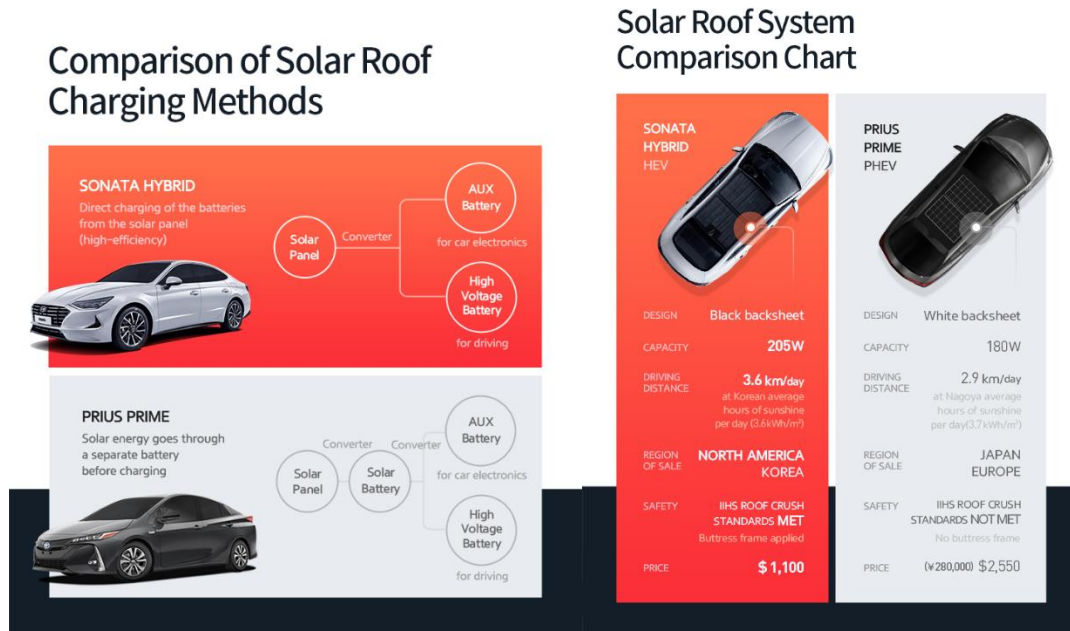


Fig. 92 Comparativo entre el Sonata Hybrid y el Toyota Prime (Hyundai Motor Group, 2020)

6 REVISIÓN DE LA TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA, CÉLULAS Y MÓDULOS

La generación de energía solar fotovoltaica encontró su primera aplicación comercial en la alimentación de naves espaciales en 1958, suponiendo la primera aplicación práctica de las células solares. Desde entonces, ha surgido una amplia gama de tecnologías de células solares para la generación de energía terrestre. En la actualidad, el mercado de la fotovoltaica terrestre empuja al del espacio, con una capacidad de generación de 115 GWp instalada en todo el mundo en 2019. El tamaño del mercado de la energía fotovoltaica espacial no se ha registrado con exactitud, pero según los lanzamientos registrados en 2019, se estima que es de alrededor de 500 kWp al año. Estos dos mercados establecidos para la tecnología de células solares fotovoltaicas establecen los límites para la integración fotovoltaica que pueda incorporarse a los vehículos.

La fuerte disparidad entre coste y eficiencia en estos dos mercados se ilustra en la siguiente figura; los módulos fotovoltaicos terrestres ocupan el cuadrante de bajo coste y baja eficiencia y los módulos fotovoltaicos espaciales en el cuadrante de alta eficiencia y alto coste. Los precios más bajos de los módulos solares son de alrededor de unos 0,2 USD/Wp para los módulos terrestres con eficiencias del 18%. Esto es debido al proceso de fabricación a gran escala y de una intensa competencia en el mercado. En cambio, las células solares de alta eficiencia que se utilizan en las naves espaciales se venden al por menor a precios considerablemente más altos.

Los fabricantes aeroespaciales toleran un precio mayor por la eficiencia fotovoltaica, ya que valoran más la fiabilidad y el peso de los paneles solares que su precio.

Esta fuerte polarización en la tecnología fotovoltaica ha dejado un terreno intermedio desocupado que se muestra en la siguiente figura, donde la eficiencia no es adecuada (por insuficiente) para los componentes espaciales y los precios de las células de muy alta eficiencia (triple unión) son demasiado altos para los módulos fotovoltaicos terrestres. Es en esta es donde existe la oportunidad de desarrollar tecnologías fotovoltaicas para vehículos, con una eficiencia mayor que la de los módulos fotovoltaicos convencionales de bajo coste y un coste mayor que estos, pero significativamente menor que los utilizados en las naves espaciales. El objetivo de los vehículos solares se ilustra con la figura del coche en la siguiente gráfica. Por otro lado, el tamaño de este mercado se estima en 50 GWp para 2040.

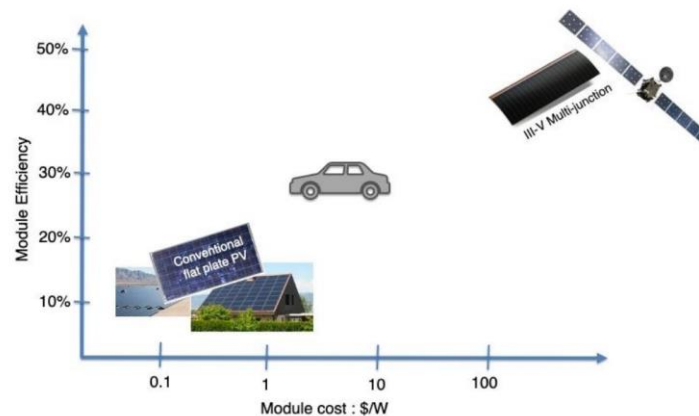


Fig. 93 Eficiencia de distintas tecnologías fotovoltaicas según su uso y su coste. (Araki, et al., 2020)

La superficie del vehículo supone un límite para la máxima potencia que se puede instalar, por ello es necesario emplear tecnologías de células de alta eficiencia. La figura siguiente muestra la relación entre la superficie disponible y rendimiento del módulo para una potencia eléctrica determinada en CEM. Se considera que 500 W es el mínimo práctico, ya que con una irradiancia de 3 kWh/m²/día y en un vehículo con un consumo de 10 kWh/km, esto proporcionaría 15 km/día de autonomía solar. Si se consiguen 1 200 W, esta autonomía aumenta a 36 km/día. Utilizando sólo la superficie del techo-suponiendo esta igual a 2 m²-, se requerirían rendimientos de los módulos superiores al 25% para poder instalar una potencia de 500 W en el área del techo. Si se utiliza también el capó del motor, la superficie aumentaría hasta unos 2,5 m², con lo que la eficiencia mínima se podría reducir al 20%.

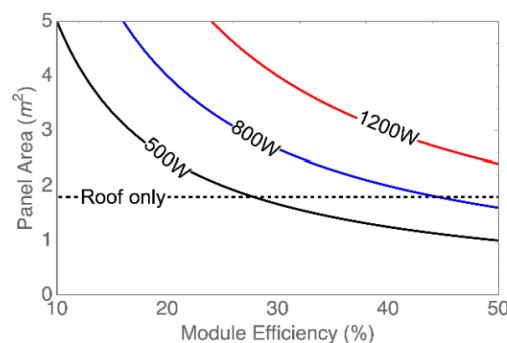


Fig. 94 Relación entre la eficiencia del módulo y su área de colocación. (Araki, et al., 2020)

6.1 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Los módulos convencionales utilizados para la generación eléctrica requieren modificaciones para su integración en los vehículos eléctricos. No obstante, existen módulos fotovoltaicos con distintas formas, diferentes tecnologías de células y métodos de encapsulación que pueden permitir cubrir superficies curvas con células fotovoltaicas.

Las tecnologías fotovoltaicas curvas de lámina de vidrio o de vidrio tienen una estructura similar a la de los módulos planos convencionales con una lámina frontal de vidrio de 2-3 mm. Esta tecnología utiliza vidrio curvado en 3D.

Los módulos fotovoltaicos flexibles pueden utilizar varias tecnologías diferentes, desde células basadas en c-Si hasta las tecnologías de capa fina, como son las células solares orgánicas o CIGS.

También existen módulos fotovoltaicos que no son flexibles, sino ligeros y rígidos pudiéndose utilizar para sustituir componentes o partes de la carrocería de un vehículo. También tienen el potencial de ser curvados en 3D.

En la siguiente tabla, se muestra un estudio no exhaustivo de los módulos comerciales ligeros y/o flexibles. La tabla presenta información como el fabricante, el modelo, la tecnología de las células, el peso o el rendimiento del módulo. Entre los módulos fotovoltaicos enumerados en la tabla, el 50% se clasifican como fotovoltaicos flexibles, seguidos por los fotovoltaicos curvos y los fotovoltaicos ligeros

Tabla 2 Módulos ligeros y/o flexibles. (Araki, et al., 2020)

Manufacturer	Model/Project	Type	Stage	Year	Cell technology	Cell efficiency	Module efficiency	P_surf Wc/m ²	P_mass Wc/kg	Weight kg/m ²	Thickness (mm)
Panasonic		Curved	Commercial	2017	c-Si HIT						
A2Solar		Curved	Commercial	2013	c-Si						
Fuyao		Curved	Commercial								
Sunpower		Curved	Commercial		c-Si mono IBC						
LG	Neon 2 CELLO cells (6x9)	Curved	Prototype	2018	c-Si LG cell 12BB	23,0 %		167			
LG	Neon R IBC cells (6x9)	Curved	Prototype	2018	c-Si LG cell BC	25,0 %		193			
Fraunhofer		Curved	Prototype	2019	366 c-Si mono shingle cells						
Gochermann		Flexible PV	Commercial	2014	c-Si mono IBC		22,9 %	229	327	0,70	
SinoSola	SASF	Flexible PV	Commercial		c-Si mono IBC	22,0 %	18,7 %	187	56	3,36	3,00
Solbian	Flex SP	Flexible PV	Commercial		c-Si mono IBC	23,0 %	17,7 %	177	76	2,34	2,00
Sacred Solar		Flexible PV	Commercial		c-Si mono IBC	23,0 %	17,4 %	174	51	3,45	3,00
DAS Energy	Universal Module	Flexible PV	Commercial	2020	c-Si mono 5 BB		17,4 %	174	53	3,30	2,00
HighFlex	HF315	Flexible PV	Commercial		c-Si mono 3 BB	19,2 %	16,5 %	165	88	1,89	1,50
Armor	ASCA	Flexible PV	Commercial		Organic						
Heliatek	HeliaSol	Flexible PV	Commercial		Organic						
Opvius		Flexible PV	Commercial		Organic						
Hanergy Miasolé	02WS	Flexible PV	Commercial	2018	CIGS	17,0 %	15,1 %	151	56	2,69	2,50
Sunware	20 series	Flexible PV	Commercial	2017	c-Si mono		14,3 %	143	21	6,74	5,00
Nanosolar	UltraLight	Flexible PV	Commercial		CIGS	11,7 %	11,2 %	112	43	2,56	4,00
Flisom	eFlex 3.1	Flexible PV	Commercial		CIGS		9,4 %	94	36	2,59	2,20
Couleenergy		Flexible PV	Commercial		c-Si mono shingle	22,4 %	17,7 %	177	70	2,53	
Energy Mobile		Flexible PV	Commercial		c-Si mono IBC		18,3 %	183	43	4,31	3,00
Go Power	Solar Flex	Flexible PV	Commercial								
Ocean Vital		Flexible PV	Commercial							1,60	0,8 - 1,5
Lumeta	Lynx 60 Comp	Light PV	Commercial	2018	Si mono 4 BB		18,3%	183	21	8,87	4,00
BenQ Solar		Light PV	Commercial		Si mono		16,5 %	165	27	6,00	
Sunman	eArche 325	Light PV	Commercial	2017	Si mono 4 BB		16,1 %	161	42	3,82	5 60
SBM Solar		Light PV	Commercial					160	19	8,30	
Fujipream	Nozomi	Light PV	Commercial							6,50	
Tulipps Solar		Light PV	Commercial							8,50	

6.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Las células basadas en silicio cristalino son la tecnología más común para la integración fotovoltaica en vehículos. Los módulos con células de silicio muestran el mejor compromiso entre prestaciones y precio con un nivel aceptable de fiabilidad. El punto débil es su falta de flexibilidad. Las células solares multiunión III-V también se han aplicado a los vehículos alimentados por energía fotovoltaica debido a su mayor eficiencia de conversión de energía. Las desventajas son el precio más elevado y el desacople espectral en comparación con las células solares de silicio cristalino. Para reducir estas desventajas, se ha desarrollado células solares de cuatro terminales III-V sobre células solares de Si. Otras células solares de capa fina, como las de silicio amorfo y el calcogenuro, se comparan desfavorablemente en eficiencia con otras tecnologías fotovoltaicas. Sin embargo, son los materiales de capa fina más eficientes que pueden depositarse sobre vidrio o láminas metálicas, lo que permite fabricar directamente y quizás de forma más barata las partes activas curvas de los vehículos. Las células de perovskita tienen el potencial de combinar alta eficiencia, bajo coste y flexibilidad, pero esta tecnología no se fabrica actualmente a gran escala debido a la falta de fiabilidad/durabilidad y a una eficiencia menor que las células basadas en c-Si. Las células de CdTe no se encuentran en desarrollo debido a la problemática ambiental que acarrearán al incluir ciertos compuestos como

el cadmio que no es muy favorable ambientalmente, pudiendo existir la futura problemática del cumplimiento de la RoHS *Restriction of Hazardous Substances*, normativa europea que se aplica a aquellas sustancias peligrosas que se encuentran en aparatos eléctricos y electrónicos.

Los actuales récords mundiales de eficiencia de los módulos fotovoltaicos se muestran en la Tabla 3. La distinción entre la eficiencia del módulo y la eficiencia de la célula, más comúnmente citada, es importante, ya que se pueden alcanzar eficiencias de células solares notablemente altas utilizando dispositivos de tamaño muy pequeño, pero estos no se pueden ampliar a superficies mayores.

Tabla 3 Eficiencias de módulos terrestres medidas en condiciones CEM. (Araki, et al., 2021)

Module format	Cell type	Module Type	Efficiency	Module Area / m ²	Description
Wafer based	III-V thin-film	InGaP/GaAs/InGaAs thin-film	31,2%	0,97	Sharp
		GaAs thin-film	25,1%	0,87	Alta Devices
	Silicon	Silicon Mono-crystalline	24,4%	1,32	Kaneka 2016, HJT IBC cell
		Silicon Multi-crystalline	20,4%	1,48	Hanwa Q cells
		a-Si/nc-Si tandem	12,3%	1,43	TEL solar
Large format substrate	Chalcogenide thin-film	CIGS thin film	19,2%	0,84	Solar Frontier
		CdTe thin film	19,0%	2,36	First Solar
		Perovskite	17,9%	0,80	Panasonic
		Organic	8,7%	0,80	Toshiba

La tabla divide los módulos en dos tipos: de módulos diferentes:

- Los módulos basados en obleas son aquellos en los que un mosaico de células se ensambla en un módulo mayor, normalmente como una cadena “string” conectada en serie.
- Los módulos de sustrato de gran formato son aquellos en los que el material semiconductor puede depositarse directamente sobre la superficie metálica o de vidrio, es una tecnología prometedora para la fotovoltaica integrada en vehículos. En principio, debería ser posible revestir partes de la carrocería del vehículo con estos materiales fotovoltaicos y lograr la generación de energía a partir de toda la carrocería.

La vida útil de un VE típico es de 10 años, siendo el factor limitante la vida útil de la batería. Esto es menos de la mitad de la garantía estándar de los módulos solares, pero no significa que se puedan tolerar altas degradaciones en un módulo VIPV. Al degradarse la batería, el buen funcionamiento de la fotovoltaica integrada en el vehículo cobra una mayor importancia, al hacer que la pérdida de degradación de la batería no sea tan notable para el usuario.. La pérdida tanto de potencia fotovoltaica junto con la de capacidad de batería agravaría la insatisfacción del conductor con un producto VIPV.

11.1.1 Módulos de silicio cristalino

Los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino (c-Si) son la tecnología dominante, con una cuota de mercado del 94% en 2019. Las células se forman a partir de obleas cortadas de un lingote monocristalino o de un bloque fundido multicristalino, lo que da lugar a dos tipos de células:

- Células solares de silicio monocristalino
- Células solares de silicio multicristalino.

Históricamente, las células multicristalinas han tenido una mayor cuota de mercado debido a los menores costes de fabricación, pero una menor eficiencia. Recientemente, la capacidad de fabricar arquitecturas de células solares de silicio monocristalino de mayor eficiencia ha supuesto que esta tecnología sea la de mayor fabricación actualmente. Las células de silicio de contacto posterior de alta eficiencia (IBC) (>21,5%) se utilizan en los VE VIPV como el Lightyear One o el Aptera. Los módulos de silicio convencionales suelen emplear un grueso cristal frontal que hace que el módulo sea rígido. Recientemente se han desarrollado módulos encapsulados en polímeros que pueden laminarse en superficies curvas. Ambos tipos de tecnología, rígida y flexible, se han integrado con éxito en los vehículos. La degradación anual de los módulos de silicio cristalino es del 0,5% de su potencia nominal cada año, lo que supone la tasa más baja de cualquier tecnología fotovoltaica.

12.1.1 Células multiunión III-V de capa fina

Las células solares de capa fina III-V representan la tecnología fotovoltaica de mayor eficiencia, pero también la de mayor coste. Las células se forman depositando el semiconductor sobre un sustrato cristalino (normalmente GaAs o Ge) en un proceso epitaxial que permite fabricar dispositivos multiunión muy eficientes. Estas células solares se fabrican principalmente para su uso en naves espaciales o sistemas de concentración solar, donde la eficiencia es de suma importancia. Los costes actuales de dicha tecnología son inaceptablemente altos para el VIPV, pero es posible una reducción de los costes de capacidad por debajo de 1 USD/Wp si se utilizan sustratos de silicio baratos o se reutilizan las obleas. No hay suficientes datos sobre la fiabilidad de los módulos terrestres de la tecnología en cuestión para hacer una comparación cuantitativa pero el objetivo debería ser igualar la fiabilidad del silicio cristalino. Se considera que las células solares multiunión III-V pueden ser integradas en los vehículos de propulsión fotovoltaica debido a su mayor eficiencia de conversión de energía (normalmente más del 30% de eficiencia).

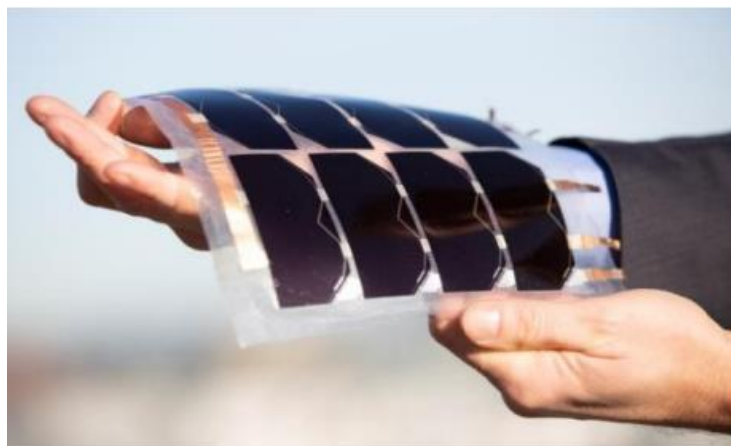


Fig. 95 Módulo de células multiunión III-V de capa fina. (Heinrich, et al., 2020)

Independientemente de las desventajas mencionadas, la posibilidad de tener un sistema fotovoltaico con una potencia suficiente para su uso en vehículos de pasajeros resulta atractiva para los fabricantes de automóviles. Dos de los principales fabricantes de automóviles de Japón, Toyota Motor Corporation y Nissan Motor Corporation, han diseñado prototipos de vehículos con energía fotovoltaica que utilizan células solares multiunión III-V, con el apoyo

de *New Energy and Industrial Technology Development Organization* (NEDO), organización pública japonesa. En las siguientes figuras se muestran las imágenes de los prototipos de estos vehículos que integran energía fotovoltaica. Las especificaciones de los vehículos, de la energía fotovoltaica y de la batería se resumen en la siguiente tabla. Es importante señalar que ambos vehículos son vehículos comerciales de pasajeros, lo que implica que las células solares multiunión III-V se pueden montar en vehículos de pasajeros normales sin realizar cambios en la carrocería.



Fig. 96 Prototipos de VIPV usando células solares multiunión III-V en el Nissan e-NV200

Tabla 4 Resumen de las características de los vehículos desarrollados con estas células.

	Toyota Prius	Nissan e-NV200
PV capacity*	860 W	1 150 W
PV cell efficiency	> 34 %	
Battery capacity	8,8 kWh	40 kWh

* The solar cell's total amount of rated power (not tested in the curved conditions nor after module fabrication)

13.1.1 Módulos de silicio amorfo

Los módulos de silicio amorfo se componen de finas películas de silicio depositadas sobre vidrio. Fue una tecnología con cierta notoriedad en el mercado, pero en 2019 contaba solamente con el 0,2% de la cuota de mercado. Las eficiencias más altas se obtienen en una configuración en tándem en la que una célula de silicio amorfo se apila sobre una célula de silicio nanocrystalino, lo que da lugar a una eficiencia ligeramente superior al 12%. Esta tecnología tiene una eficiencia menor a otras tecnologías fotovoltaicas y suele degradarse más rápidamente que los módulos de silicio cristalino, en torno al 1% de la potencia por año, pero permiten la fabricación de ventanas activas fotovoltaicas parcialmente transparentes. Kaneka (JP) fabrica un producto fotovoltaico amorfo parcialmente transparente del 7% que tiene potencial para generar energía a partir de las ventanas de los vehículos.

14.1.1 Módulos de capa fina de calcogenuro

Los módulos de capa fina de calcogenuro representan el 6% de la fabricación fotovoltaica mundial y se componen de calcógenos (seleniuros, telururos) como parte del elemento semiconductor o de seleniuro de cobre, indio y galio/azufre (CIGS) depositados sobre una lámina de vidrio o metal. Aunque estos materiales de película fina no son tan eficientes como el silicio, son los más eficientes de los materiales de película fina que pueden depositarse sobre vidrio o lámina metálica, lo que ofrece la posibilidad de fabricar directamente partes activas curvas de vehículos fotovoltaicos. La degradación de los módulos fotovoltaicos de calcogenuros ha mejorado y se ha comprobado que es similar a la del silicio, sin embargo, se ha demostrado que el sombreado parcial momentáneo durante el funcionamiento perjudica el rendimiento de los módulos comerciales de calcogenuro.

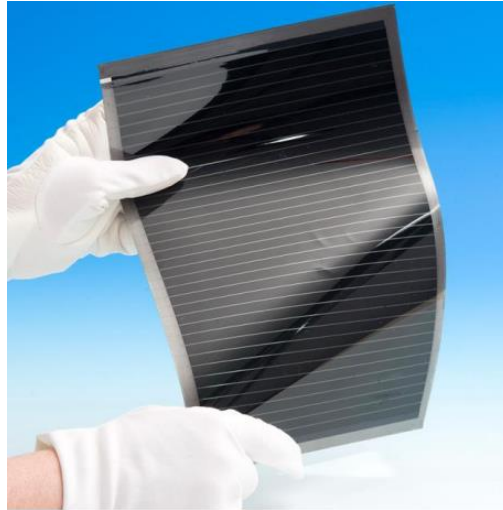


Fig. 97 Célula de CIGS flexible. (Heinrich, et al., 2020)

15.1.1 Módulos orgánicos y de perovskita

Los módulos fotovoltaicos orgánicos y de perovskita comparten la ventaja de las láminas finas de calcogenuro de permitir el recubrimiento conforme de una amplia gama de tipos de sustratos, con la ventaja añadida de que son procesables a baja temperatura. Ambas tecnologías son relativamente nuevas, ya que se han desarrollado en las dos últimas décadas y, por consiguiente, la estabilidad a largo plazo y la eficiencia de los módulos es inferior a la del silicio cristalino.

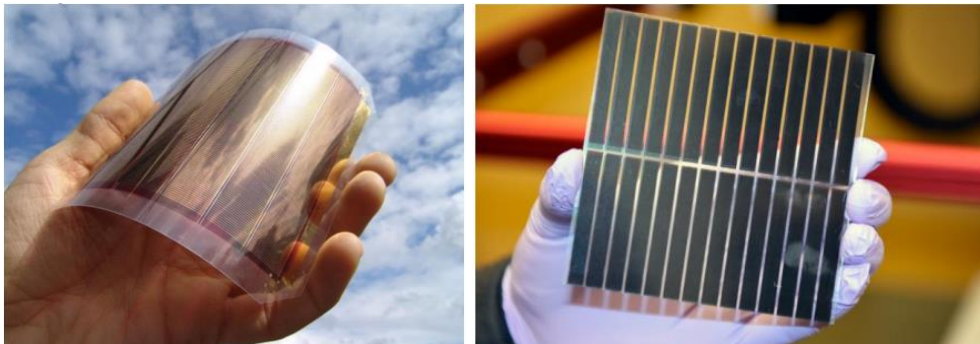


Fig. 98 A la izquierda un módulo de células flexibles orgánicas, a la derecha una célula de perovskita. (Heinrich, et al., 2020)

16.1.1 Problemática de las células/módulos para VIPV

El ensamblaje de los módulos utilizados para la integración fotovoltaica en vehículos conlleva una serie de costes adicionales con respecto a los módulos convencionales:

- La encapsulación se encarece en las partes curvas de la carrocería y debido al poco volumen de fabricación.
- El ahorro que supone la fabricación de módulos planos terrestres con un tamaño de módulo y una disposición de células estándar se perderá con el VIPV.
- Los módulos utilizados para VIPV deberán deformarse adecuadamente para mitigar los daños en caso de choque.
- Estarán sometidos a mayores vibraciones.
- Los módulos no sólo deben ser eficientes, sino también coloridos. Con revestimientos ópticos bien diseñados, es posible dar color con relativamente poca pérdida de eficiencia.

- Un mayor control normativo como se ha visto anteriormente en este trabajo.

Todos estos puntos hacen que el coste actual de estos módulos sea mayor.

7 CONCLUSIONES

Con el rápido crecimiento de la población, la producción y el consumo energético mundial; la demanda de transporte ha registrado un crecimiento significativo. Además, la conducción en el tráfico urbano induce a repetidos arranques y paradas que provocan un consumo adicional de combustible y, en consecuencia, una menor eficiencia. Además de evitar la emisión de gases, la VIPV se presenta como una solución que puede mitigar los problemas anteriores.

Actualmente los grandes fabricantes automovilísticos todavía se encuentran dubitativos por la incorporación de estos tipos de vehículos en sus producciones, puesto que se enfrentan a numerosos desafíos. Pero con el desarrollo de los paneles fotovoltaicos, los algoritmos de control y los dispositivos del sistema de almacenamiento, se espera que los VE dotados de VIPV crezcan rápidamente en los próximos años.

De cara al futuro, será necesario seguir investigando y normalizando para caracterizar el rendimiento de los módulos fotovoltaicos curvos y el impacto del VIPV en las cargas térmicas del vehículo. A los precios actuales, un vehículo que cuente con integración fotovoltaica no es económico para los usuarios finales. Aunque el despliegue a mayor escala del VIPV podría mejorar la viabilidad económica, habría que abordar otros aspectos del actual régimen sociotécnico del automóvil para que estos se conviertan en una propuesta viable para los usuarios finales.

La normalización y las herramientas de política de productos de consumo, como las etiquetas energéticas, pueden ser necesarias para garantizar la confianza en esta tecnología emergente.

A pesar de esto, con el gran crecimiento experimentado en fotovoltaica, con la tecnología que se dispone actualmente ya estudiada para otras aplicaciones -integración arquitectónica- supone la inclusión de la energía fotovoltaica en los vehículos, desde las aplicaciones actuales que aumentan ligeramente la autonomía hasta la posibilidad en esta década de tener sistemas fotovoltaicos que permitan que un coche eléctrico no sea necesario recargarlo.

BIBLIOGRAFÍA

Aptera, 2022. *Aptera*. [En línea]

Available at: <https://aptera.us>

[Último acceso: Noviembre 2022].

Aptera, 2022. *Aptera*. [En línea]

Available at: <https://aptera.us/aptera-announces-battery-cell-supplier-eve-energy-co-ltd/>

[Último acceso: Diciembre 2022].

Araki, K. y otros, 2021. *State-of-the-Art and Expected Benefits of PV-Powered Vehicles*.

s.l.:International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme.

Araki, K., Ota, Y. & Yamaguchi, M., 2020. *Performance Modeling of the Car-roof PV - Overview*,

s.l.: s.n.

Belinus, 2022. *Belinus*. [En línea]

Available at: <https://belinus.be/en/alles-wat-je-moet-weten-over-ibc-technologie/>

[Último acceso: Noviembre 2022].

Bellini, E., 2020. *PV Magazine*. [En línea]

Available at: <https://www.pv-magazine.com/2020/06/08/ibc-back-contact-solar-roof-for-electric-vehicles/>

[Último acceso: Noviembre 2022].

Bellini, E., 2021. *PV Magazine*. [En línea]

Available at: <https://www.pv-magazine.com/2021/02/24/vehicle-integrated-pv-reduces-ev-charging-time-in-sunny-regions-by-40/>

[Último acceso: Noviembre 2022].

Bellini, E., 2022. *PV Magazine*. [En línea]

Available at: <https://www.pv-magazine.com/2022/09/21/vehicle-integrated-solar-kit-may-reduce-frequency-of-recharging-by-14/>

[Último acceso: Noviembre 2022].

Bellini, E., 2022. *PV Magazine*. [En línea]

Available at: <https://www.pv-magazine.com/2022/01/05/mercedes-newest-electric-car-comes-with-thin-film-solar-cells-on-the-roof/>

[Último acceso: Noviembre 2022].

Ben Said-Romdhane, M. & Skander-Mustapha, S., 2021. A Review on Vehicle-Integrated

Photovoltaic Panels. En: *Advanced Technologies for Solar Photovoltaics Energy Systems*.

s.l.:Springer Cham, p. 370.

Brammer, T., 2022. *Linkedin*. [En línea]

Available at:

https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:6942739876672937985?updateEntityUrn=urn%3Ali%3Afs_feedUpdate%3A%28V%2Curn%3Ali%3Aactivity%3A6942739876672937985%29

[Último acceso: Noviembre 2022].

Cornagliotti, E. y otros, s.f. *Performance & Safety of Solar-Electric Vehicles* [Entrevista] s.f.

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2022. *Fraunhofer ISE*. [En línea]
Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/key-topics/integrated-photovoltaics.html>
[Último acceso: Noviembre 2022].

Halvorson, B., 2020. *Green Car Reports*. [En línea]
Available at: https://www.greencarreports.com/news/1127957_2020-hyundai-sonata-hybrid-what-to-expect-from-its-mpg-boosting-solar-roof
[Último acceso: Noviembre 2022].

Heinrich, M. y otros, 2020. A comparison of different solar cell technologies for integrated photovoltaics.

Hyundai Motor Group, 2019. *Hyundai Motor Group*. [En línea]
Available at: <https://tech.hyundaimotorgroup.com/article/what-does-a-solar-roof-do-my-car-roof-generates-energy/>
[Último acceso: Noviembre 2022].

Hyundai Motor Group, 2020. *Hyundai Motor Group*. [En línea]
Available at: <https://tech.hyundaimotorgroup.com/article/everything-about-the-sonata-hybrids-solar-roof/>
[Último acceso: Noviembre 2022].

Hyundai, 2019. *Hyundai*. [En línea]
Available at: <https://www.hyundai.news/eu/articles/press-releases/hyundai-launches-first-car-with-solar-roof-charging-system.html>
[Último acceso: Noviembre 2022].

Ibañez, 2017. *Xataka*. [En línea]
Available at: <https://www.xataka.com/automovil/el-reto-tecnico-de-conseguir-que-los-techos-solares-en-los-coches-sirvan-para-algo>
[Último acceso: Noviembre 2022].

International Electrotechnical Commission, 2022. *International Electrotechnical Commission*. [En línea]
Available at:
https://www.iec.ch/ords/f?p=103:14:715295763012847:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:27684,25
[Último acceso: Noviembre 2022].

International Energy Agency, 2022. *Global EV Outlook 2022. Securing supplies for an electric future*, s.l.: s.n.

International Energy Agency, 2022. *World Energy Outlook*, s.l.: s.n.

Julius, 2021. *Sono Motors*. [En línea]
Available at: <https://sonomotors.com/en/blog/solar-will-be-the-next-big-thing/>
[Último acceso: Noviembre 2022].

Kanz, O. & Lim, B., 2020. *Vehicle-integrated Photovoltaics (VIPV) as a core source for electricity in road transport*, s.l.: European Technology and Innovation Platform for Photovoltaics.

Kauf, L., 2021. *Moving Electric Vehicles*, s.l.: WVELABS Solar Metrology Systems GmbH.

Kogler, R., Brammer, T. & Cornagliotti, E., 2022. *PV on wheels: Solar electric vehicles are growing in number and sophistication* [Entrevista] (11 Julio 2022).

Lightyear, 2022. *Lightyear*. [En línea]

Available at: <https://lightyear.one/articles/solar-panels-on-any-car-the-versatility-of-lightyear-s-solar-technology>

[Último acceso: Noviembre 2022].

Lightyear, 2022. *Lightyear*. [En línea]

Available at: <https://lightyear.one/articles/the-road-to-production-from-validating-technology-to-customer-usage-in-final-steps-toward-manufacture>

[Último acceso: Noviembre 2022].

Lightyear, 2022. *Lightyear*. [En línea]

Available at: <https://lightyear.one/articles/lightyear-0-the-most-aerodynamic-production-car-in-the-world-as-wind-tunnel-tests-make-automotive-history>

[Último acceso: Noviembre 2022].

Lightyear, 2022. *Lightyear*. [En línea]

Available at: <https://lightyear.one/articles/a-powerful-shift-why-it-ll-take-more-than-conventional-electric-vehicles-to-scale-clean-mobility>

[Último acceso: Noviembre 2022].

M Wilson, G. y otros, 2020. The 2020 photovoltaic technologies roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics*.

Markert, J. y otros, 2021. Proposal for a Safety Qualification Program for Vehicle-Integrated PV Modules. *Solar Energy and Electric Mobility*.

Motors, A., 2022. *Linkedin*. [En línea]

Available at: https://www.linkedin.com/pulse/sun-our-superpower-brief-history-apteramotors?trk=public_post-content_share-article

[Último acceso: Noviembre 2022].

New Energy and Industrial Technology Development Organization; Sharp Corporation; Toyota Motor Corporation, 2019. *Toyota*. [En línea]

Available at: <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/28787347.html>

[Último acceso: Noviembre 2022].

New Energy and Industrial Technology Development Organization, 2019. *PV-Powered Vehicle Strategy Committee Interim Report (2) - Preliminary Study on Solar Irradiation of PV-Powered Vehicles* -, s.l.: New Energy and Industrial Technology Development Organization.

Newman, B., 2020. *Heres comes the sun*. s.l., UNSW SPREE Symposium.

Ota, Y., Arabi, K., Nagaoka, A. & Nishioka, K., 2022. Facilitating vehicle-integrated photovoltaics by considering the radius of curvature of the roof surface for solar cell coverage. *Cleaner Engineering and Technology*, Volumen 7.

Saur, B., 2014. *Curbside Classic*. [En línea]

Available at: <https://www.curbsideclassic.com/blog/cc-capsule/cohort-capsule-1992-mazda-929-the-ur-millenia/>

[Último acceso: Noviembre 2022].

Solar Magazine, 2022. *Solar Magazine*. [En línea]

Available at: <https://solarmagazine.com/solar-panels/ibc-solar-cells/>

[Último acceso: Noviembre 2022].

Sono Motors, 2021. *Sono Motors*. [En línea]

Available at: https://sonomotors.com/site/assets/files/1621/informationssheet_sion_1.pdf

[Último acceso: Noviembre 2022].

Sono Motors, 2022. *Sono Motors*. [En línea]

Available at: <https://sonomotors.com>

[Último acceso: Noviembre 2022].

Sunpower, 2017. *Sunpower*. [En línea]

Available at:

https://cdn.enfsolar.com/Product/pdf/Cell/5b91fcf3916df.pdf?_ga=2.129740875.699501378.1555670092-1288217596.1555670091

[Último acceso: Noviembre 2022].

Sunpower, 2022. *Sunpower*. [En línea]

Available at: <https://sunpower.maxeon.com/int/solar-panel-products/maxeon-solar-cell-technology>

[Último acceso: Noviembre 2022].

Thiel, C. y otros, 2022. Impact of climatic conditions on prospects for integrated photovoltaics in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Toyota Motor Corporation, 2021. *Motorpasion*. [En línea]

Available at: <https://www.motorpasion.com/espaciotoyota/asi-funciona-tecnologia-solar-que-incorpora-nuevo-toyota-prius-plug-in-hybrid>

[Último acceso: Noviembre 2022].

United States Securities and Exchange Commission, 2022. *SEC*. [En línea]

Available at:

<https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1786471/000119312522136559/d303883dpartii.htm>

[Último acceso: Noviembre 2022].

UNSW Sydney, 2017. *PV-Manufacturing*. [En línea]

Available at: <https://pv-manufacturing.org/all-back-contact-solar-cells/>

[Último acceso: Noviembre 2022].

Valdivielso, D., 2022. *DiarioMotor*. [En línea]

Available at: <https://www.diariomotor.com/noticia/4-coches-con-paneles-solares-que-puedes-encontrar-usados-y-uno-que-puedes-comprar-nuevo/>

[Último acceso: Noviembre 2022].

Valoe, 2022. *Valoe*. [En línea]

Available at: <https://valoe.com>

[Último acceso: Noviembre 2022].

Wavelabs Solar Metrology Systems GmbH, 2022. *Linkedin*. [En línea]

Available at: <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:6993501760052961280/>

[Último acceso: Noviembre 2022].

Wikipedia, 2022. *Wikipedia*. [En línea]
Available at: <https://www.wikiwand.com/en/Sunmobile>
[Último acceso: Noviembre 2022].

Wikipedia, 2022. *Wikipedia*. [En línea]
Available at: https://www.wikiwand.com/en/Solar_car
[Último acceso: Noviembre 2022].

Wikipedia, 2022. *Wikipedia*. [En línea]
Available at: https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_arrastre
[Último acceso: Diciembre 2022].

Young, C., 2022. *Interesting Engineering*. [En línea]
Available at: <https://interestingengineering.com/innovation/the-mercedes-benz-eqxx-is-a-620-mile-range-solar-roof-ev>
[Último acceso: Noviembre 2022].

Yuan, D., 2017. *Japanese Nostalgic Car*. [En línea]
Available at: <https://japanesenostalgiccar.com/back-roads-hd-mazda-929/>
[Último acceso: Noviembre 2022].