

Effect on the Driving Range of an Electric Vehicle When Photovoltaic Systems are Integrated into Its Bodywork

Wilson J. Silva-Bolivar , Edgar Torres-Barahona , and Edwin F. Cárdenas 

Abstract— Maintaining a sufficient driving range in electric vehicles (EVs) typically requires large battery capacities, which increases weight, cost, and reduces efficiency. This study evaluates the impact of integrating photovoltaic (PV) systems into the vehicle body through a comprehensive approach that jointly considers energy generation, thermal effects due to forced convection, aerodynamic losses, and annual energy performance. A mixed quasi-experimental methodology was implemented, combining experimental I–V characterization under real operating conditions with simulations based on a 3D vehicle model. Results show that the PV system can generate between 2.52 and 4.43 kWh/day, leading to a driving range increase between 3.61% and 7.81% (up to 23.42 km/day). Additionally, annual energy generation ranges from 1021 to 1616 kWh, with potential savings of up to 2044 USD/year. These results demonstrate that PV integration can enhance energy efficiency and reduce reliance on grid charging under real operating conditions.

Link to graphical and video abstracts, and to code: <https://latam.ieceer9.org/index.php/transactions/article/view/10327>

Index Terms— Electric vehicle, driving range, electric energy, photovoltaic system.

I. INTRODUCCIÓN

La autonomía en un Vehículo Eléctrico (VE) es uno de los aspectos más importantes y críticos, ya que, como indica [1], es la distancia máxima en kilómetros (km) que se recorre con una sola recarga de batería. Este parámetro es relevante a la hora de adquirir cualquier tipo de vehículo híbrido o eléctrico. Sin embargo, la autonomía normalmente se ve afectada por diferentes factores, entre ellos las características del recorrido, así como las especificaciones físicas y técnicas del VE, lo cual lleva a la necesidad de desarrollar sistemas que permitan recargar las baterías cuando éste se encuentre en movimiento o detenido, de tal manera que no se recurra frecuentemente a puntos de recarga durante el trayecto [2].

A juicio de [3, 4], las nuevas tecnologías han permitido

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Ricardo Arias (Corresponding author: *Wilson Silva*).

Wilson Silva, E. Torres-Barahona, and E. F. Cárdenas are with the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Duitama, Boyacá, Colombia (e-mail: wilson.silva01@uptc.edu.co, edgar.torres@uptc.edu.co, and edwin.cardenas01@uptc.edu.co).

desarrollar vehículos eléctricos de altas prestaciones, con un aumento significativo en el rango de autonomía debido a las nuevas tipologías de baterías. El rango de autonomía es considerado un parámetro fundamental al momento de adquirir un VE, pues normalmente la recarga de las baterías se lleva a cabo en los garajes de las viviendas o en el estacionamiento del trabajo. No obstante, uno de los factores limitantes se presenta cuando los conductores deciden ir más allá del rango de autonomía de sus vehículos, ya que, como lo hace notar [5], deben tener en cuenta los puntos de recarga existentes a lo largo del recorrido.

Por otro lado, los estudios de [6, 7] demostraron las ventajas que se derivan de la incorporación de sistemas de generación de energía eléctrica en vehículos eléctricos, una de ellas es precisamente un aumento en el rango de autonomía. Los investigadores también demostraron que los avances tecnológicos en los materiales empleados para la fabricación de módulos solares fotovoltaicos (FV) en este tipo de aplicaciones resultan técnicamente viables para asegurar el incremento de la autonomía de estos tipos de sistemas.

No obstante, la generación de energía eléctrica por medio de esta tecnología se puede ver afectada por el espacio limitado en la carrocería del vehículo, y por la disposición de los módulos FVs alrededor de la misma causando captación no uniforme de la radiación solar, debido a la orientación e inclinación a la que se encuentra expuesta cada grupo de celdas en un momento dado [8, 9].

En la misma línea [10-12], mencionan que la temperatura de funcionamiento de una celda FV no depende tan solo de la temperatura ambiente, sino también de factores como la irradiancia solar incidente y la velocidad del viento. Estos factores influyen en el balance térmico del módulo FV, ya que una irradiancia elevada incrementa la absorción de energía solar y, en consecuencia, la temperatura de la celda, mientras que el viento se comporta como un medio refrigerante natural que favorece la disipación del calor. Lo anterior sugiere que a medida que el VE aumenta su velocidad, la generación de energía eléctrica también incrementa y, en consecuencia, se aumenta la autonomía del vehículo.

Desde esta perspectiva, este estudio tiene por propósito determinar el aumento de la autonomía de un VE y el efecto de la temperatura, cuando se incorporan módulos FVs sobre

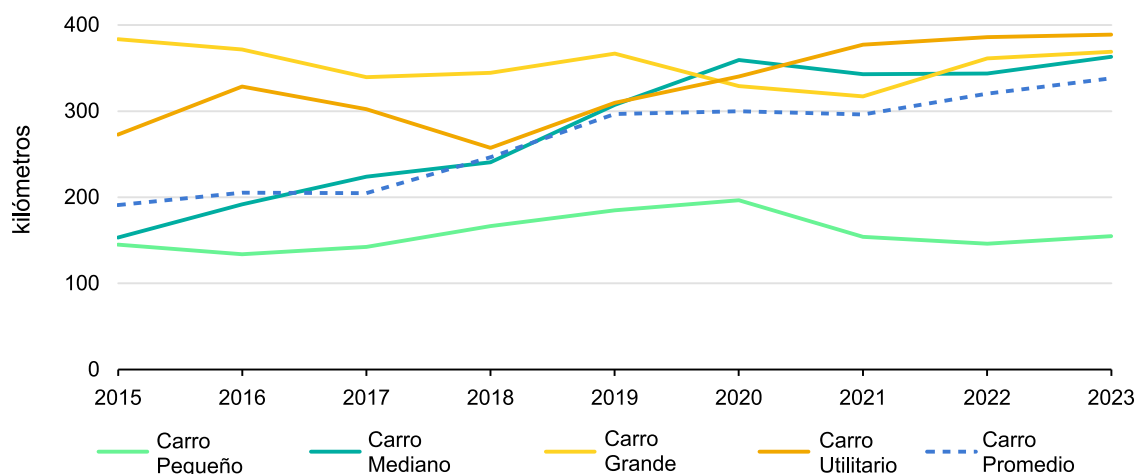


Fig. 1. Autonomía promedio en kilómetros de los modelos de vehículos eléctricos más comercializados entre los años 2015 y 2023. Fuente: I. Energy Agency (2024).

su carrocería.

Estudios mostrados por [1] establecen que para 2023 la autonomía media ponderada de un coche eléctrico con batería nueva estaba cerca de 380 km, frente a los 200 km de 2015, como se muestra en la Fig. 1, esto debido al desarrollo de tecnologías de baterías que han permitido almacenar mayor cantidad de energía manteniendo las mismas dimensiones.

Autores como [13] revelan que el rendimiento de VEs ampliamente comercializados en la actualidad como el Nissan Leaf y Renault Kangoo se sitúa en un rango aproximado de 4.3 a 5.29 km por kilovatio-hora (km/kWh). Esta relación constituye un parámetro esencial para estimar la autonomía de cualquier VE, en función de la capacidad útil de su sistema de almacenamiento.

Por otra parte, los estudios desarrollados por [14, 15] evidencian las limitaciones de un VE al cargar sus baterías con módulos FVs debido a la disponibilidad de superficie en el automóvil, indicando que no aporta una fuente de energía adicional efectiva para aumentar en gran medida la autonomía. Además, la incorporación de módulos rígidos puede afectar la aerodinámica del vehículo debido a las irregularidades sobre la superficie que se derivan como consecuencia del grosor y forma de los mismos. Esto puede alterar el flujo de aire alrededor del vehículo y, en consecuencia, incrementar el coeficiente de arrastre aerodinámico, lo que podría influir en el consumo de energía [16].

Sin embargo, autores [17-19] afirman que la incursión de nuevas tecnologías de módulos FVs, como la pintura solar, módulos thin-film y módulos FVs transparentes (estos últimos utilizados para el parabrisas y ventanas), prometen mejorar algunos aspectos como la eficiencia en la disipación de calor y el aprovechamiento total de la superficie del VE, permitiendo generar mayor cantidad de energía eléctrica.

Otros autores [19, 20] indican que los módulos de película delgada (thin-film), como silicio amorfo, CdTe o CIGS, presentan eficiencias típicas superiores al 20%. Este tipo de

tecnología ofrece ventajas importantes como menor peso, mayor flexibilidad y mejor adaptación a superficies curvas, lo cual los hace ideal para este tipo de aplicaciones. Adicionalmente, estos sistemas presentan una vida útil estimada entre 20 y 25 años al igual que los módulos rígidos, con tasas de degradación anual relativamente bajas, lo que garantiza un desempeño energético sostenido en el tiempo. Como punto de partida, en la etapa experimental del presente estudio se utilizaron módulos monocristalinos rígidos para validar que se obtiene mejoras en la autonomía del vehículo aún sin el uso de tecnología de punta. Bajo estas condiciones, el análisis experimental se realizó considerando un escenario conservador de eficiencia y un aporte de energía del sistema incluso en condiciones menos favorables.

El peso adicional de los módulos fotovoltaicos instalados sobre vehículos eléctricos puede afectar el consumo energético del sistema. Estudios como [21], indican que el impacto del sistema FV incorporado sobre un vehículo, depende en gran medida de su peso y configuración estructural, asociados principalmente al peso adicional del sistema fotovoltaico y equipos complementarios, entre ellos los seguidores del punto de máxima potencia (MPPT), los convertidores DC-DC, el cableado, entre otros. Dependiendo de la tecnología utilizada, el peso específico de los módulos puede variar entre 0.25 kg/m² para tecnologías de película delgada, hasta 10 kg/m² para módulos monocristalinos rígidos.

Un módulo FV está compuesto por un determinado número de celdas solares que absorben la mayor parte de irradiancia emitida por el sol y la convierten en energía eléctrica. Sin embargo, una cantidad significativa de energía solar se transforma en calor, lo que da lugar a ineficiencia y deterioro de las celdas [22, 23].

La refrigeración por convección forzada de módulos fotovoltaicos integrados en vehículos está directamente relacionada con la velocidad de desplazamiento. Estudios previos han mostrado que el coeficiente de transferencia de calor convectivo (h_c) aumenta con la velocidad del aire incidente, debido principalmente a la mayor turbulencia del

flujo [24, 25].

Dado que es difícil determinar factores de pérdida, en concreto para sistemas fotovoltaicos incorporados a superficies de VEs y solo se han publicado pocos datos de medición [21], este estudio analizó diferentes factores como el coeficiente de arrastre, el peso del sistema y consumo de equipos auxiliares, a partir de simulación computacional y ensayos experimentales. Además, se evaluó el efecto de la refrigeración por convección forzada en la temperatura, por la interacción entre la velocidad del aire y el módulo solar incorporado al vehículo.

En contraste con las investigaciones reportadas en la literatura actual centradas principalmente en el potencial de generación energética de los sistemas fotovoltaicos integrados en vehículos (VIPV) [26-28], en la caracterización térmica de módulos en movimiento [29], en el análisis aislado de las pérdidas aerodinámicas [29, 30] o en simulaciones energéticas sin validación experimental [31-33], el presente estudio no se limita a cuantificar el incremento de autonomía. Por el contrario, analiza de forma integrada los efectos térmicos, aerodinámicos y de sombreado en condiciones reales de operación, lo que permite una evaluación más completa y detallada del desempeño del sistema.

El artículo se estructura de la siguiente manera: la sección I presenta el marco teórico sobre la integración de sistemas fotovoltaicos en vehículos eléctricos y los factores que afectan su desempeño; la sección II describe los materiales y métodos, la configuración experimental y los parámetros de simulación; la sección III muestra y analiza los resultados experimentales y de simulación; y la sección IV expone las conclusiones y aportes del estudio.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de esta investigación, se ha integrado una metodología mixta, combinando enfoques cuantitativos y cualitativos. De acuerdo con [34], esta combinación de enfoques permite obtener un análisis global del impacto y la eficiencia que tiene el uso de sistemas fotovoltaicos acoplados a la carrocería de vehículos eléctricos.

De igual forma, este estudio se enmarca dentro de un enfoque descriptivo, complementado con trabajo experimental. Según [35], las investigaciones de carácter descriptivo se enfocan en especificar las propiedades, características y perfiles de individuos, grupos, procesos o cualquier fenómeno sujeto a análisis. En este sentido, se evalúa y caracteriza el comportamiento de los sistemas FVs integrados en la carrocería del VE y con el propósito de medir variables críticas de generación de energía eléctrica, temperatura y eficiencia, bajo condiciones controladas y realistas.

Desde el enfoque cuantitativo, el estudio se centra en la recolección y análisis de datos experimentales para evaluar el impacto en el rango de autonomía en km al incorporar sistemas FVs en la carrocería del VE. Autores como [36], mencionan que medir y analizar variables como temperatura

de la celda FV, temperatura ambiente, radiación y potencia, son esenciales para determinar la eficiencia de un módulo solar FV. Lo anterior sugiere que es posible determinar el rendimiento y generación de energía eléctrica por parte de los módulos FVs incorporados sobre la carrocería cuando este se desplaza a diferentes velocidades. De igual manera, estos datos son validados y contrastados con los resultados teóricos obtenidos a partir de modelos matemáticos y resultados de simulación computacional.

Por otro lado, con el enfoque cualitativo, se analizan aspectos físicos de diseño del VE, identificando a partir de los resultados experimentales, las áreas del vehículo con mayor potencial de generación. El análisis demostrado por [37] subraya que, con base en los resultados experimentales, se plantean rediseños de carrocería o redistribución de los módulos FVs, de tal forma que se permita maximizar la captación de radiación incidente sobre el vehículo.

A fin de estructurar el desarrollo de este estudio de forma ordenada y sistemática, se establecieron cinco etapas metodológicas principales que posibilitaron la recopilación, análisis y validación de los datos relacionados al comportamiento del sistema FV integrado en la carrocería del vehículo. Cada etapa comprende una fase específica de la investigación, partiendo de la experimentación práctica en condiciones controladas, para pasar por el análisis teórico mediante modelos matemáticos, posteriormente un análisis aerodinámico, hasta llegar a la simulación computacional y la conversión de energía eléctrica en unidades de autonomía.

A. Primera Etapa. Pruebas Experimentales en Vehículo

Las variables de interés que permiten establecer el efecto en el rango de autonomía del vehículo son la potencia generada por un módulo FV, temperatura de la celda, velocidad del vehículo e irradiancia del lugar de las pruebas. A continuación, se describen de manera resumida las etapas usadas para la obtención de los datos experimentales:

1) Instrumentación y Equipos: Los módulos fotovoltaicos utilizados en este estudio corresponden a tecnología de silicio monocristalino marca Restasolar, con una eficiencia nominal de 13.99 % y una potencia pico de 60 vatios (W), según las especificaciones del fabricante. Para la adquisición y análisis de los datos se emplearon un trazador de curvas modelo IVT2203, un computador, un sensor de irradiancia modelo METREL A1378 y un vehículo sedán convencional de combustión utilizado como plataforma experimental. El módulo FV se ubica en diferentes áreas de interés del vehículo, incluyendo el techo, el capó, el baúl y los laterales.

2) Ubicación y Configuración del Módulo FV: El rendimiento del módulo FV fue evaluado en cuatro ubicaciones representativas de la carrocería del vehículo: techo, capó, baúl y laterales. Esta configuración permitió analizar las variaciones en la generación de energía eléctrica asociadas con la orientación y ubicación del módulo sobre la superficie del vehículo. Asimismo, se estudió la influencia

de la velocidad de desplazamiento sobre el desempeño eléctrico y térmico del sistema fotovoltaico en cada una de las zonas consideradas.

3) Condiciones Controladas: Para garantizar fiabilidad en la obtención de datos, se realizaron pruebas en condiciones ambientales constantes, priorizando que la irradiancia solar y la temperatura ambiente se mantuvieran estables. Para ello, se recopilan datos de interés únicamente cuando las mediciones de irradiancia presentaban valores consistentes para cada zona del vehículo y la temperatura ambiente se mantuviera estable para todos los escenarios, para este caso 26.05 grados Celsius (°C).

4) Pruebas a Diferentes Velocidades: Se consideraron cuatro escenarios de velocidad con el propósito de evaluar el efecto de la convección forzada sobre el comportamiento del módulo FV. Inicialmente, el vehículo permaneció estacionado (0 km/h) durante un periodo de 5 minutos para permitir la estabilización térmica de las celdas antes de realizar las mediciones eléctricas correspondientes. Posteriormente, se efectuaron pruebas a velocidades constantes de 30, 50 y 100 km/h, manteniendo cada condición durante 5 minutos con el fin de estabilizar las condiciones térmicas y aerodinámicas del módulo FV antes de registrar las curvas corriente-voltaje (I-V) y potencia-voltaje (P-V).

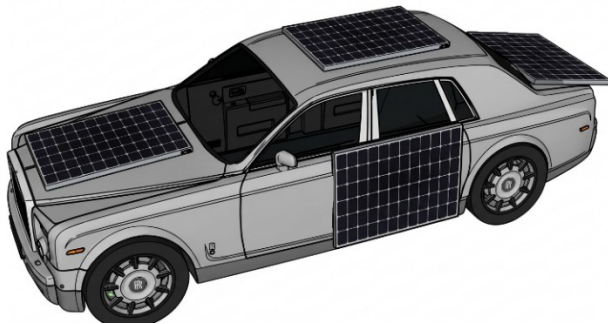


Fig. 2. Fijación de módulos FV sobre el vehículo en zonas de interés.

El proceso de instalación del módulo solar FV se realizó sobre un vehículo convencional de combustión interna, como se ejemplariza en la Fig. 2.

B. Segunda Etapa. Análisis Teórico

Para calcular la potencia real de un módulo FV en distintas condiciones de operación normal tal como indican los autores [9][38], se tiene la expresión (1).

$$P = P_{STC} \cdot \left(\frac{G}{1000} \right) \cdot [1 + \gamma(T_{celda} - 25)] \quad (1)$$

Donde, P es la potencia real del módulo fotovoltaico, P_{STC} es la potencia nominal del módulo especificada por el fabricante, medida bajo condiciones estándar de ensayo (STC), G es la irradiancia solar real en el sitio de prueba (W/m^2), T_{celda} es la temperatura de la celda fotovoltaica en grados Celsius (°C) y γ es el coeficiente de temperatura de la potencia máxima (%/°C).

Este coeficiente de temperatura γ indica cuánto disminuye

la potencia del módulo por cada grado Celsius que sube la temperatura de la celda por encima de 25 °C. Su valor es negativo debido a que la potencia disminuye a medida que aumenta la temperatura de la celda FV, en este caso su valor es de $-0.39 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$, tal como indica el fabricante.

C. Tercera Etapa. Análisis Aerodinámico

Con el fin de evaluar los efectos térmicos y aerodinámicos asociados con la integración de módulos FV sobre la carrocería del vehículo, se analizan dos procedimientos: estimación del coeficiente de transferencia de calor por convección y simulación aerodinámica mediante dinámica de fluidos computacional (CFD).

1) Análisis del Efecto Convectivo: Para evaluar el efecto de la velocidad del vehículo sobre la refrigeración de los módulos FV, se estimó el coeficiente de transferencia de calor por convección (h_c) a partir de un modelo de balance de energía térmica del módulo FV. Este coeficiente se calculó utilizando los valores experimentales de irradiancia solar, potencia eléctrica generada, temperatura del módulo y temperatura ambiente, de acuerdo con la ecuación de conservación de energía presentada en la ecuación (2).

$$GA = P_e + h_c A(T_m - T_a) \quad (2)$$

Siendo G la irradiancia en W/m^2 , A el área del módulo en m^2 , P_e la potencia práctica en W , h_c el coeficiente convectivo $W/(m^2 \text{ } K)$, T_m la temperatura del módulo, y T_a la temperatura ambiente.

El coeficiente tiene un incremento constante con la velocidad, con un comportamiento que se puede establecer como lineal para velocidades inferiores a 7 m/s y luego un comportamiento acelerado de manera similar a una función exponencial para mayores velocidades [39].

2) Análisis del Efecto Aerodinámico: Para evaluar el impacto aerodinámico al incorporar módulos FV rígidos sobre la carrocería del vehículo, se realizaron simulaciones mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) utilizando la plataforma para elementos finitos SimScale.

Se empleó un modelo geométrico de vehículo tipo sedán, analizando dos configuraciones: vehículo sin módulos FV y vehículo con módulos FV integrados sobre la superficie de la carrocería. Las simulaciones se realizaron a velocidades de 30 km/h y 100 km/h, con el fin de determinar y comparar el coeficiente de arrastre aerodinámico (C_d) para cada escenario. A partir de estos valores se calculó la fuerza de arrastre aerodinámica y la potencia requerida para vencer dicha resistencia, lo que permitió estimar las pérdidas energéticas asociadas a la incorporación de los módulos FV.

D. Cuarta Etapa. Simulación en PV*SOL

La simulación del sistema fotovoltaico se realizó utilizando el software PV*SOL premium, el cual permite estimar la producción energética del sistema teniendo como consideraciones los datos meteorológicos del lugar donde se realizaron las pruebas experimentales, pérdidas de energía debido al consumo de equipos complementarios, orientación

de los módulos y parámetros eléctricos del sistema. Aunque este tipo de software se orienta principalmente a la estimación de la producción de energía, más que a la determinación de los efectos de sombreado dinámico asociados al desplazamiento del vehículo, sí permite evaluar las condiciones energéticas del sistema y proporciona un parámetro de referencia para la estimación de la autonomía del vehículo.

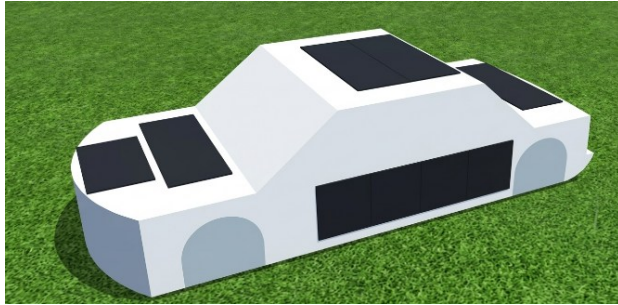


Fig. 3. Modelo 3D del vehículo con superficies geométricas simplificadas, usado en el software PV*SOL.

La simulación inicia especificando geográficamente el lugar de estudio. Para este caso, se seleccionó el municipio de Pesca, Boyacá (Colombia), como ubicación de referencia donde se realizaron las pruebas experimentales.

Inicialmente, mediante la interfaz de modelado 3D del software, se importó un modelo de vehículo tipo sedán que permitió representar la geometría general simplificada de la carrocería (Fig. 3). A continuación, sobre las áreas de interés de la superficie del vehículo se distribuyeron los módulos FV, cuyas características técnicas y eléctricas corresponden a las de los módulos utilizados en la etapa experimental. Posteriormente se realiza la configuración de equipos adicionales como controladores DC-DC, MPPTs, cableado y accesorios compatibles con el diseño del sistema, además de considerar las pérdidas generadas por estos equipos y el mismo peso adicional del sistema. Finalmente, a partir de esta configuración se ejecutó la simulación del sistema, permitiendo estimar la producción anual de energía eléctrica.

Durante la simulación se consideraron diferentes escenarios de operación. Inicialmente, se evaluó un escenario favorable con pérdidas energéticas designadas del 5 %, representando una configuración con módulos de tecnología de película delgada, los cuales presentan menor peso y mayor adaptabilidad a superficies irregulares. Asimismo, se analizó un escenario desfavorable con pérdidas energéticas del 40 %, asociado al uso de módulos rígidos con las mismas características técnicas y eléctricas de los módulos utilizados en la etapa experimental. En ambos escenarios se asumió la misma eficiencia nominal del módulo FV (13.99 %), con el fin de garantizar condiciones equitativas en la comparación de los resultados, de modo que las diferencias observadas se atribuyan únicamente a las pérdidas asociadas a la integración del sistema y al peso adicional de los módulos y equipos, tal como lo menciona [21]. Adicionalmente, para ambos casos se evaluó la generación de energía considerando las cuatro orientaciones cardinales (norte, sur, este y oeste). Este análisis permitió

comparar los diferentes escenarios de integración y determinar la configuración más favorable en términos de generación anual de energía del sistema FV en condiciones de operación en estado estacionario.

También, en la configuración del modelo simulado se contemplaron pérdidas adicionales por sombreado asociadas al horizonte, considerando las condiciones del sitio donde se realizaron las pruebas experimentales. De igual manera, se incluyó una pérdida de energía del 2 % durante el primer año de operación, correspondiente a la degradación de los módulos fotovoltaicos, esto de acuerdo con las especificaciones técnicas dadas por el fabricante.

E. Quinta Etapa. Análisis y Conversión de Energía a Autonomía

En la cuarta etapa, se definió como referencia una autonomía base de 300 km, característica de VEs similares al modelo de estudio. A partir de los resultados de generación de energía diaria obtenidos en la etapa de simulación, se procedió a realizar la respectiva conversión a kilómetros equivalentes. De esta manera, se logró estimar el aporte máximo en autonomía que el sistema FV puede proporcionar bajo las condiciones planteadas en el análisis.

III. RESULTADOS

A. Primera Etapa. Pruebas Experimentales en Vehículo

Una vez asegurado el módulo FV a cada una de las áreas de interés del vehículo, se procedió a realizar las mediciones de irradiancia, con el objetivo de establecer cuál es la potencia por metro cuadrado disponible para esa inclinación y orientación que puede ser aprovechada por el módulo FV.

En la Fig. 4 se presentan los resultados de las pruebas prácticas realizadas con el módulo FV instalado en cada una de las áreas de interés, mostrando, irradiancia, temperatura de celda y potencia obtenida a las distintas velocidades del vehículo. Las líneas continuas representan las curvas características de corrientes-voltajes (I-V) del módulo FV, donde se observa cómo la corriente mantiene un comportamiento constante para un amplio rango de tensiones y disminuye considerablemente cuando el voltaje se aproxima al valor de circuito abierto, mientras que las líneas punteadas corresponden a las curvas potencias-voltajes (P-V), obtenidas a partir del producto entre la corriente y la tensión del módulo. Esta curva permite identificar el punto de máxima potencia (MPP), donde el sistema alcanza su mayor generación.

Los resultados prácticos obtenidos mostraron como la potencia generada por el módulo FV (con irradiancia constante en cada caso) aumenta a medida que la velocidad del vehículo incrementa tal como se observa en la Figura 4. En este sentido, la refrigeración forzada por el flujo de aire hacia los módulos FVs favorece la disipación de calor en las celdas, logrando así incrementos significativos desde los 4.54 W en los laterales, hasta los 8.47 W en el techo del

vehículo.

La tensión en circuito abierto disminuye a mayor temperatura (hasta en un 1.15%), lo que confirma la influencia térmica sobre la eficiencia del módulo. Mientras que la corriente de cortocircuito se mantiene relativamente constante con pequeños cambios, es decir, a mayor temperatura, las curvas IV tienden a desplazarse hacia menores voltajes, lo que reduce la eficiencia del módulo.

Las líneas punteadas representan las curvas de potencia-

voltaje (P-V), donde se observa que la potencia máxima generada es mayor a bajas temperaturas, lo cual ocurre a 100 km/h para todos los cuatro casos.

Estos resultados demuestran que el flujo de aire generado por el movimiento del vehículo disminuye la temperatura de las celdas FVs, lo que permite una mayor generación de energía eléctrica. A mayor velocidad, la temperatura de la celda disminuye significativamente, lo que mantiene el módulo FV operando en un rango de mayor eficiencia.

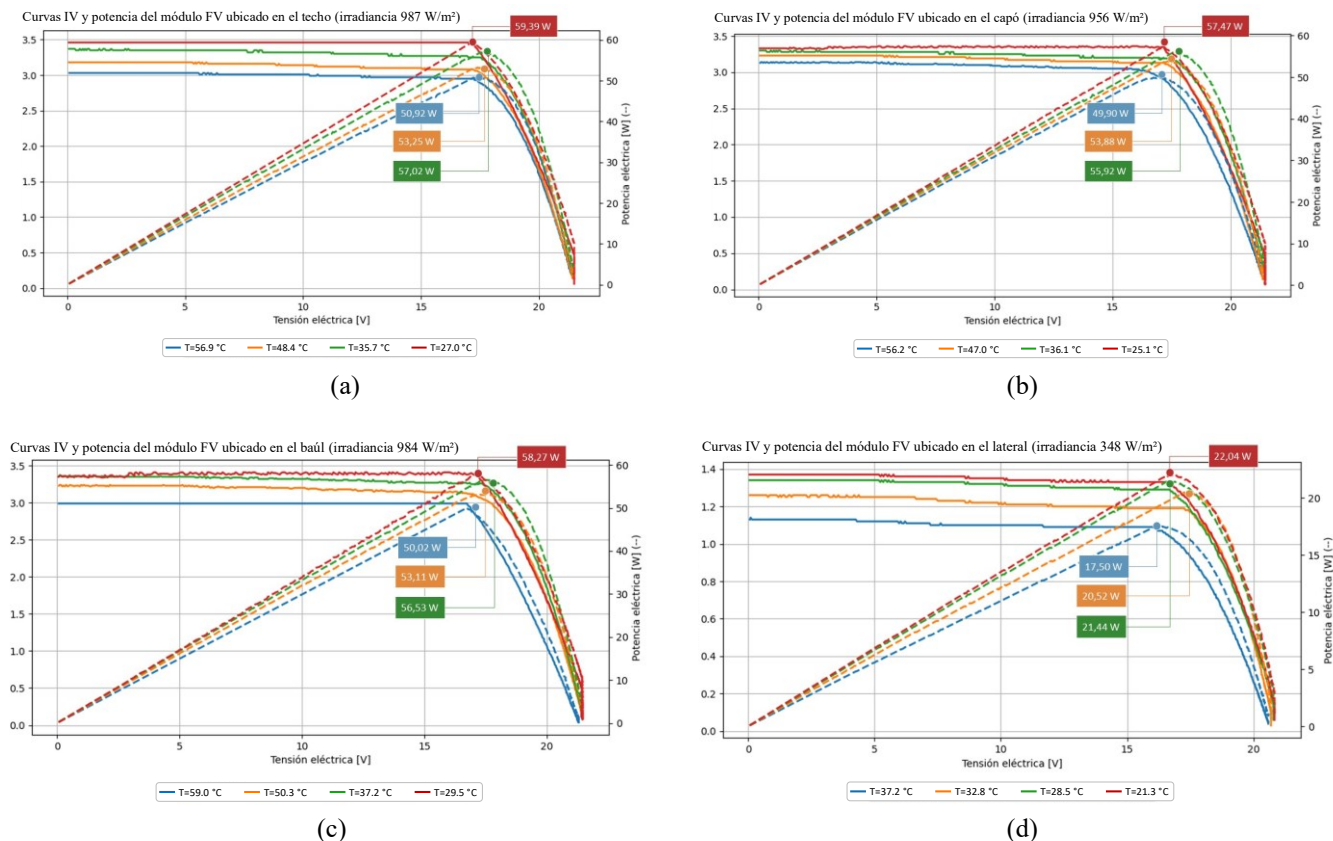


Fig. 4. Curvas corriente-voltaje (IV) y potencia-voltaje (P-V) del módulo FV ubicado en cada una de las áreas del vehículo para diferentes temperaturas de la celda: (a) módulos en techo, (b) módulos en capó, (c) módulos en baúl y (d) módulos en laterales.

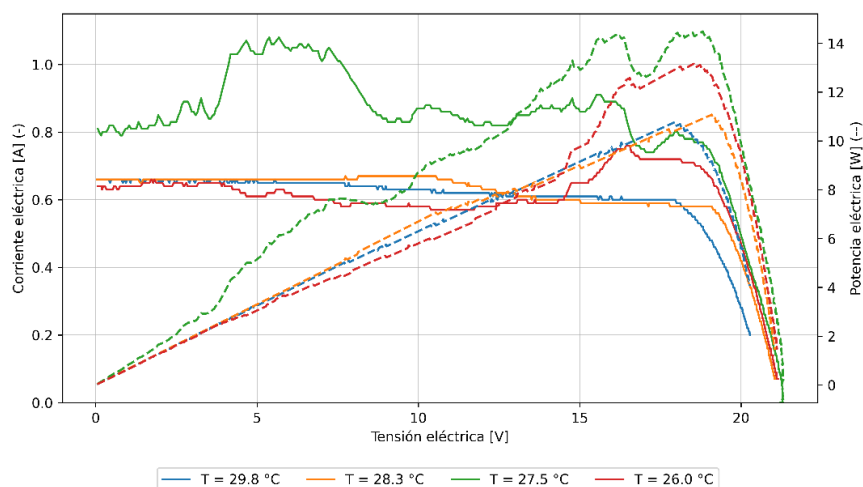


Fig. 5. Curvas corriente-voltaje (IV) y potencia-voltaje (P-V) del módulo FV ubicado en techo del vehículo en condiciones reales de sombreado.

Con el fin de complementar el análisis experimental y de simulación se evaluó el comportamiento del sistema en condiciones reales de operación con sombras, se realizaron mediciones experimentales de curvas I-V del sistema fotovoltaico cuando el vehículo transitaba por zonas con presencia de vegetación arbórea. Estas mediciones muestran el efecto del sombreado parcial dinámico, fenómeno que no puede ser representado directamente en la simulación.

La Figura 5 muestra las curvas I-V obtenidas cuando el vehículo atraviesa zonas parcialmente sombreadas. Los resultados evidencian una reducción en la corriente de cortocircuito y en la potencia máxima del sistema, así como deformaciones en la curva característica de potencia.

TABLA I

RESULTADOS PRÁCTICOS DE POTENCIA GENERADA POR EL MÓDULO FV EN TECHO EN CONDICIONES DE SOMBREADO A DISTINTAS VELOCIDADES DEL VEHÍCULO

Velocidad [km/h]	Temperatura de celda [°C]	Potencia práctica [W]
0	29.8	10.77
30	28.3	11.07
50	27.5	14.44
100	26.0	13.11

La Tabla I sintetiza los resultados de potencia generada por el módulo con sombreado a diferentes velocidades del vehículo. En particular, cuando éste atraviesa zonas arborizadas o permanece detenido bajo la sombra proyectada por los árboles, se observa una reducción de la potencia máxima generada entre el 75.93 % y el 82.05 % con respecto a las condiciones de irradiancia sin sombra.

B. Segunda Etapa. Análisis Teórico

Considerando los datos de temperatura de la celda obtenidos en las pruebas experimentales, se procede a estimar la potencia teórica generada por el módulo haciendo uso de la ecuación (1), estos resultados se sintetizan en la tabla II junto con los resultados prácticos.

Este aumento progresivo de velocidad en el vehículo confirma el efecto positivo de la refrigeración forzada por el viento sobre la carrocería, que reduce la temperatura de las celdas entre los 15.9°C hasta los 31.1°C, permitiendo obtener aumentos en la potencia desde un 15,17% en zonas como el capó hasta el 25.94% en la zona lateral del vehículo.

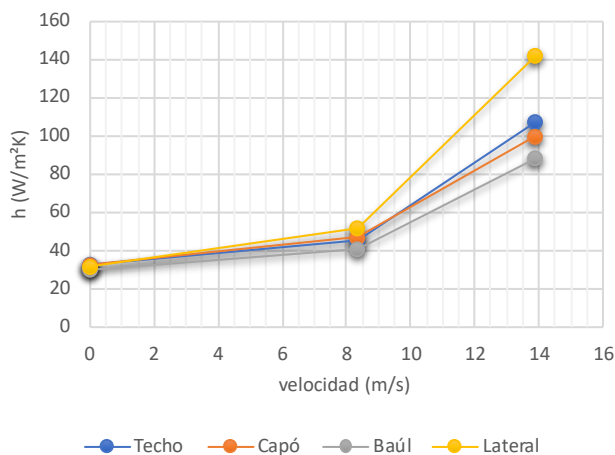
TABLA II

RESULTADOS PRÁCTICOS Y TEÓRICOS DE POTENCIA GENERADA POR EL MÓDULO FV EN TECHO, CAPÓ, BAÚL Y LATERALES A DISTINTAS VELOCIDADES DEL VEHÍCULO

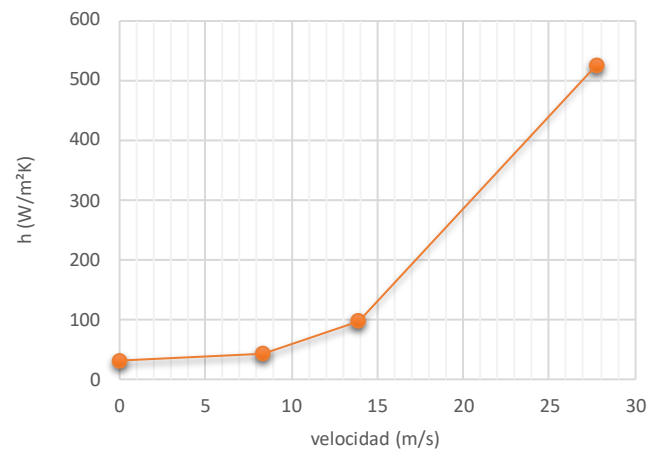
	Velocidad [km/h]	Temperatura de celda [°C]	Potencia práctica [W]	Potencia teórica [W]
Techo	0	56.9	50.92	51.85
(Irradiancia de 987 W/m²)	30	48.4	53.25	53.82
	50	35.7	57.02	56.75
	100	27	59.39	58.76
Capó	0	56.2	49.9	50.38
(Irradiancia de 956 W/m²)	30	47	53.88	52.44
	50	36.1	55.92	54.88
	100	25.1	57.47	57.34
Baúl	0	59	50.02	51.21
(Irradiancia de 984 W/m²)	30	50.3	53.11	53.21
	50	37.2	56.53	56.23
	100	29.5	58.27	58
Laterales	0	37.2	17.5	19.89
(Irradiancia de 348 W/m²)	30	32.8	20.52	20.24
	50	28.5	21.44	20.59
	100	21.3	22.04	21.18

C. Tercera Etapa. Análisis Convectivo y Aerodinámico

1) Análisis del Efecto Convectivo: La Figura 6 presenta la relación de correlación entre la velocidad del aire y el coeficiente de transferencia de calor por convección (h_c), determinado conforme al modelo de conservación de la energía descrito por la ecuación (2), a partir de la cual se obtiene dicho coeficiente.



(a)



(b)

Fig. 6. Correlación entre la velocidad del aire y el coeficiente de transferencia de calor por convección. (a) comportamiento acorde a localización del módulo, (b) comportamiento promedio.

La Fig. 6 (a) presenta los valores de h_c como función de la velocidad para valores inferiores a 50 km/h (13.89 m/s), con el propósito de observar que sin importar la localización del módulo fotovoltaico se presenta comportamientos similares. Para caracterizar el comportamiento global del sistema, la Fig. 6 (b) presenta la tendencia en la variación de h_c mediante promedio de los datos obtenidos para cada localización del módulo. Sin embargo, para velocidades cercanas a 100 km/h, el sistema alcanza una condición de equilibrio térmico, dado que la temperatura del módulo se aproxima a la temperatura ambiente. Esto reduce significativamente el gradiente térmico entre el módulo y el entorno, disminuyendo así la tasa de transferencia de calor. En consecuencia, el panel no puede continuar enfriándose y no se obtiene una mejora adicional en la eficiencia del módulo.

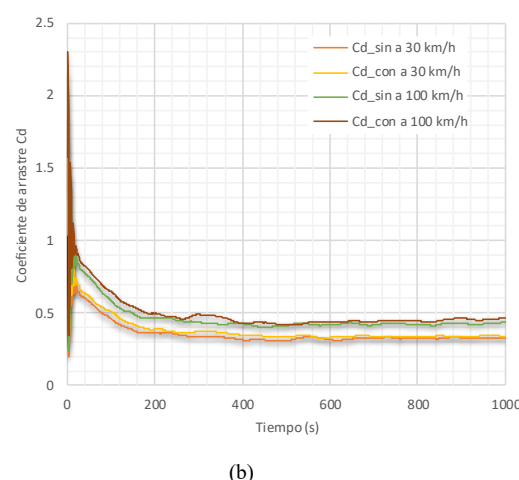
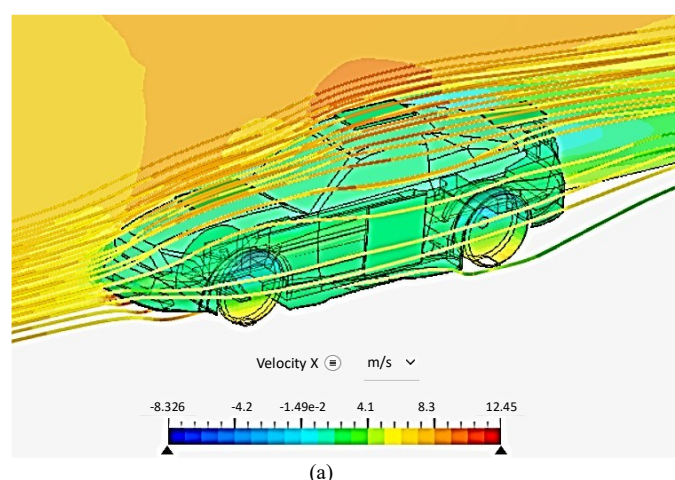


Fig. 7. Resultados de simulación para obtención de coeficientes de arrastre para diferentes velocidades. (a) muestra de resultado de postproceso en el vehículo. (b) Resultados de coeficientes de arrastre, vehículo sin módulos (Cd_sin) y vehículo con módulos (Cd_con).

TABLA III

RESULTADOS DE COEFICIENTES DE ARRASTRE PROMEDIO EN RÉGIMEN PERMANENTE

Velocidad	Cd sin paneles	Cd con paneles	Incremento
30 km/h	0.3235	0.3390	+4.79 %
100 km/h	0.4219	0.4422	+4.81 %

El incremento del coeficiente de arrastre se atribuye a que los módulos FV se modelaron como superficies adheridas a la carrocería, generando pequeñas discontinuidades geométricas que favorecen la separación de la capa límite y, en consecuencia, un aumento de la resistencia aerodinámica. Por tanto, la integración de los módulos presenta una leve penalización aerodinámica, cuantificada en un 4.8%. Se infiere además que, si se emplearan módulos solares de tecnología de película delgada, la diferencia en el efecto aerodinámico sería

2) Análisis del Efecto Aerodinámico: Con el propósito de evaluar el efecto aerodinámico de incorporar módulos solares rígidos sobre la carrocería del vehículo, se realizaron simulaciones por SIMSCALE CFD usando un modelo de vehículo sedan convencional para determinar la diferencia en el coeficiente de arrastre para las dos configuraciones (coeficiente de arrastre sin módulos – Cd_sin, coeficiente de arrastre con módulos – Cd_con) a velocidades de 30 km/h y 100 km/h. Observe Fig. 7 (a).

La Fig. 7 (b) muestra la evolución temporal del coeficiente de arrastre para el vehículo con y sin módulos FV, a 30 km/h y 100 km/h. En todos los casos se observa una fase transitoria inicial asociada a la convergencia numérica de la simulación CFD, seguida de un régimen estacionario donde el coeficiente de arrastre se estabiliza luego de 400 segundos. Los valores promedio obtenidos en régimen permanente se observan en la Tabla III.

despreciable, dado que este tipo de módulo se comporta de manera similar a una “piel” del vehículo, minimizando las discontinuidades en la superficie expuesta al flujo.

TABLA IV

RESULTADOS DE CÁLCULO DE POTENCIAS CON PÉRDIDAS AERODINÁMICAS

Velocidad (km/h)	Potencia sin módulos (W)	Potencia con módulos (W)	Pérdida aerodinámica (W)
30	123.34	129.24	5.91
100	5959.56	6246.30	286.75

Cabe señalar que la variación en el valor del coeficiente de arrastre se mantiene aproximadamente constante para las distintas velocidades a las que se desplaza el vehículo y que los valores calculados de los coeficientes son consistentes con los valores típicos reportados en la literatura especializada [40].

Para determinar las pérdidas en potencia por efecto de incorporación de módulos FV, se tiene en cuenta la fuerza de arrastre aerodinámica que se calcula por la expresión (3).

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d A V^2 \quad (3)$$

y la potencia necesaria para vencer dicha resistencia mediante $P_d = F_d V$ donde ρ es la densidad del aire, A el área frontal del vehículo, V la velocidad y C_d el coeficiente de arrastre obtenido.

Las pérdidas energéticas asociadas con la integración del sistema FV en el vehículo están influenciadas por diversos factores, entre los cuales se destacan el tipo de tecnología empleada, la cantidad de módulos instalados, su correspondiente distribución sobre la superficie de la carrocería y la velocidad del vehículo.

Los resultados obtenidos y presentados en la Tabla IV, evidencian que la incorporación de módulos FV rígidos sobre la carrocería del vehículo introduce una penalización aerodinámica asociada al incremento del coeficiente de arrastre. En particular, para una velocidad de 100 km/h se determinó una pérdida de potencia del orden de 286.75 W. No obstante, en un vehículo eléctrico típico, el consumo total a 100 km/h suele situarse en el rango de 15–25 kWh/100 km [41], lo que equivale aproximadamente a una potencia media de 4–7 kW. De esta demanda energética, una fracción significativa de alrededor de 3–6 kW corresponde a las pérdidas por arrastre aerodinámico en vehículos convencionales con coeficientes de arrastre en el rango de 0.3–0.4 [42]. En este contexto, una penalización de aproximadamente 287 W representa únicamente entre un 4 % y un 9 % adicional en la componente aerodinámica, y no en el consumo total del vehículo. Por lo tanto, aunque la pérdida aerodinámica es apreciable, su impacto relativo sobre el balance energético global resulta moderado.

Ha de destacarse que la condición de operación a 100 km/h constituye un escenario de alta exigencia aerodinámica que no representa el régimen predominante de uso en entornos urbanos. A velocidades más bajas, como 30 km/h, las pérdidas aerodinámicas asociadas a la incorporación de los módulos es baja (5.91 W), mientras que la generación fotovoltaica se mantiene en valores superiores, conducente a un balance energético positivo.

En este sentido, la contribución de los módulos FV debe analizarse no solo desde una perspectiva instantánea de potencia, sino también en términos de energía acumulada a lo largo del tiempo de operación y durante condiciones estacionarias. La integración de sistemas FV en vehículos eléctricos resulta especialmente ventajosa en escenarios de conducción urbana, tráfico intermitente o estacionamiento prolongado, donde la generación energética puede compensar las pérdidas inducidas por una modificación aerodinámica.

Cabe señalar que el impacto aerodinámico podría mitigarse mediante el uso de tecnologías fotovoltaicas más integrables, como módulos de película delgada o soluciones embebidas en la superficie del vehículo, lo que permitiría reducir las discontinuidades geométricas responsables del incremento en el coeficiente de arrastre y, en consecuencia, mejorar el desempeño energético global del sistema.

D. Cuarta Etapa. Simulación en PV*SOL

El área superficial de vehículo es aproximadamente de 9.43 m², correspondiente a las superficies potencialmente disponibles sobre la carrocería para la integración de módulos fotovoltaicos. Para el sistema experimental se utilizaron módulos fotovoltaicos rígidos de 60 W de potencia nominal, cada uno con un área de 0.4288 m². Teniendo en cuenta esta relación, se estimó el número máximo teórico de módulos que podrían ser instalados sobre la superficie del vehículo, dando como resultado 21.99 módulos equivalentes. En consecuencia, la potencia fotovoltaica máxima instalable sobre la carrocería del vehículo es de 1.32 kilovatios pico (kWp).

Es de señalar que dicha estimación no representa únicamente un valor teórico. Aunque el uso de módulos rígidos limita parcialmente la cobertura debido a las curvaturas de la carrocería, dicha área podría ser aprovechada de manera más eficiente por medio de tecnologías fotovoltaicas thin-film, las cuales presentan mayor flexibilidad mecánica y adaptabilidad sobre superficies curvas, al igual que una alta eficiencia. En este contexto, la capacidad de 1.32 kWp puede interpretarse como una estimación real del potencial máximo de generación fotovoltaica del vehículo empleando tecnologías fotovoltaicas de película delgada.

Una vez configurado el sistema para cada uno de los escenarios, se genera el correspondiente informe de simulación. Uno de ellos, destaca la estimación de la generación anual de energía del sistema fotovoltaico.

La tabla V sintetiza los resultados para cada caso, estos se obtienen en condiciones de operación en estado estacionario. A sí mismo, para calcular la energía diaria generada por el sistema se tiene $E_{Diaria} = \frac{E_{Anual}}{365}$

TABLA V
RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE ESTIMACIÓN DE
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEL VEHÍCULO A
DIFERENTES ORIENTACIONES

Tecnología	Película delgada con 5% de pérdidas		Módulos rígidos con 40% de pérdidas	
	Generación (kWh/año)	Generación (kWh/día)	Generación (kWh/año)	Generación (kWh/día)
Norte	1616	4.43	1021	2.80
Occidente	1456	3.99	920	2.52
Oriente	1459	4.00	921	2.52
Sur	1616	4.43	1021	2.80

La tabla V muestra los resultados obtenidos de generación anual y diaria para los diferentes escenarios. Se observa que las configuraciones orientadas hacia norte y sur presentan la mayor producción de energía en el escenario favorable del 5 % de pérdidas. Por otra parte, al considerar el escenario desfavorable asociado a módulos rígidos y pérdidas del 40 %, se registran que las orientaciones oriente y occidente son las configuraciones de menor producción de energía. Estos resultados evidencian la influencia de la orientación del sistema en el desempeño energético del vehículo.

E. Quinta Etapa. Análisis y Conversión de Energía a Autonomía

En concordancia y con lo expuesto en el marco teórico, tal como indica [13] los VEs, como el Nissan Leaf, Renault Kangoo entre otros, presentan una eficiencia energética que oscila entre 4.3 y 5.29 km/kWh, dependiendo de factores como el tipo de conducción, topografía y uso de sistemas auxiliares. Este índice de consumo constituye un indicador clave para estimar el rango de autonomía de cualquier vehículo eléctrico en función de su consumo energético.

A partir de los rangos de eficiencia energética considerados y aplicando estos valores a la generación diaria estimada del sistema fotovoltaico en simulación, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla VI.

TABLA VI
ESTIMACIÓN DEL APORTE DE AUTONOMÍA DIARIA POR
PARTE DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Tecnología	Película delgada con 5% de pérdidas		Módulos rígidos con 40% de pérdidas	
	Generación (kWh/día)	Autonomía (km/día)	Generación (kWh/día)	Autonomía (km/día)
Norte	4.43	19.04 – 23.42	2.80	12.03 – 14.80
Occidente	3.99	17.15 – 21.10	2.52	10.84 – 13.34
Oriente	4.00	17.19 – 21.15	2.52	10.85 – 13.35
Sur	4.43	19.04 – 23.42	2.80	12.03 – 14.80

La Tabla VI muestra los resultados obtenidos para los diferentes escenarios, estos indican que la orientación del sistema FV influye en la generación de energía y, por ende, en la autonomía adicional del vehículo. Las configuraciones orientadas hacia norte y sur presentan la mayor producción de energía diaria (4.43 kWh/día en el escenario de 5 % de pérdidas), lo que se traduce en una autonomía diaria adicional estimada entre 19.04 y 23.42 km considerando eficiencias del vehículo entre 4.3 y 5.29 km/kWh (Nissan Leaf, Renault Kangoo) [13]. En contraste, las orientaciones oriente y occidente presentan una ligera reducción en la generación energética, con autonomías diarias que oscilan aproximadamente entre 17.15 y 21.15 km en el mismo escenario de pérdidas del 5%. Por otra parte, al considerar el escenario más conservador asociado a módulos rígidos y con pérdidas del 40 %, la autonomía diaria se reduce a valores entre 10.84 y 14.80 km, dependiendo de la orientación.

Estos resultados evidencian que, incluso bajo condiciones desfavorables de integración, el sistema FV puede aportar una fracción significativa del requerimiento energético diario del vehículo, lo que respalda la viabilidad de la integración de generación fotovoltaica en vehículos eléctricos para complementar su autonomía.

La Tabla VII presenta una comparación entre los escenarios desfavorable y favorable evaluados en este estudio, incluyendo la autonomía diaria que aporta el sistema FV, la autonomía de referencia del VE y la relación porcentual entre ambas.

Los resultados obtenidos evidencian que la autonomía diaria adicional del VE varía significativamente en función del tipo de tecnología de módulos incorporados sobre la carrocería. En el escenario desfavorable, correspondiente al uso de módulos fotovoltaicos rígidos y considerando pérdidas asociadas al peso

adicional y al consumo de equipos complementarios, se obtiene un incremento de autonomía de aproximadamente 10.84 km/día, lo que representa un aumento del 3.61 % respecto a la autonomía base del vehículo de referencia (300 km).

TABLA VII
ESTIMACIÓN DE RANGOS PORCENTUALES DE AUTONOMÍA
DIARIA CON BASE A VEHÍCULO DE REFERENCIA

Variable	Escenario desfavorable	Escenario favorable
Autonomía adicional estimada	10.84 km/día	23.42 km/día
Autonomía base del vehículo (Referencia)	300 km	300 km
Aumento porcentual de autonomía	3.61 %	7.81 %

Por otro lado, en el escenario favorable, asociado al uso de tecnología de película delgada, se alcanza un incremento de hasta 23.42 km/día, equivalente a un 7.81 % de la autonomía total del vehículo. Cabe destacar que, en este escenario, también se contemplan pérdidas relacionadas con el peso de los módulos y el consumo de los equipos complementarios.

Estos resultados confirman que la integración de sistemas fotovoltaicos en la carrocería de vehículos eléctricos tiene un potencial real para extender la autonomía operativa, reduciendo la dependencia de la infraestructura de recarga. En consecuencia, se disminuye la frecuencia con la que el vehículo requiere conectarse a la red eléctrica, lo que contribuye a una mayor eficiencia en los desplazamientos de media y larga distancia.

Por otra parte, la tabla VIII presenta una comparación cuantitativa entre los resultados de este estudio y las investigaciones representativas reportadas en la literatura. Del análisis de dicha tabla se desprenden las siguientes consideraciones. En relación con la extensión de la autonomía, los valores reportados varían desde 1.16% en condiciones invernales adversas hasta 15% en vehículos livianos con perfiles de conducción moderada. Los resultados obtenidos en este trabajo, comprendidos entre 3.61% y 7.81%, se encuentran dentro del rango encontrado para configuraciones con tecnologías comparables [26-28], lo que respalda la consistencia de las estimaciones realizadas.

Adicionalmente, se evidencia que la totalidad de los estudios previos revisados abordan el sistema VIPV desde una perspectiva unidimensional o, en el mejor de los casos, bidimensional, algunos analizando el comportamiento térmico y aerodinámico sin vinculación con el desempeño eléctrico, mientras que estudios como [26-28] se concentran en la caracterización energética sin considerar las interacciones térmicas y aerodinámicas del sistema integrado en la carrocería.

En particular, la literatura reciente evidencia enfoques tradicionales abreviados para modelar el comportamiento de sistemas fotovoltaicos integrados en vehículos, especialmente bajo condiciones de operación dinámica. En este sentido, el presente estudio aborda un enfoque integral que combina validación experimental, modelado teórico y simulación numérica, incorporando explícitamente el efecto del sombreado

dinámico y las condiciones reales de operación; este enfoque permite no solo contrastar resultados teóricos y experimentales, sino también ofrecer una representación más cercana al desempeño energético del sistema fotovoltaico integrado en el vehículo.

Desde el punto de vista económico, la energía generada por el sistema fotovoltaico permite reducir el consumo de electricidad desde de la red. Tomando como referencia una tarifa de energía de \$0.24 USD/kWh, el ahorro diario estimado se encuentra entre \$2.60 y \$5.60 USD/día, esto dependiendo del escenario de generación. Este ahorro representa un beneficio directo para el usuario y refuerza la viabilidad de este tipo de soluciones en aplicaciones de movilidad eléctrica.

Adicionalmente, desde el enfoque ambiental, la generación de energía eléctrica de sistemas FVs integrados sobre la carrocería, permitiría contribuir de manera significativa a la reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Para el caso colombiano, tal como lo menciona [43], el factor de emisión oficial del sistema interconectado nacional para inventarios de gases de efecto invernadero es de 177 g de CO₂ por cada kWh generado a partir de fuentes renovables. En este contexto, considerando un rango de generación diaria entre 2.52 y 4.43 kWh, se obtiene una reducción estimada de emisiones entre 446.04 y 784.11 g de CO₂ por día para el vehículo de estudio. En términos anuales, esto equivale a una mitigación de aproximadamente 162.8 a 286.2 kg de CO₂.

V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en simulación y pruebas experimentales permiten concluir que la integración de sistemas FVs sobre la carrocería de vehículos eléctricos representa una importante alternativa que permite mejorar el rendimiento en su autonomía. Con base en la generación de energía eléctrica obtenida en los diferentes escenarios de simulación y considerando los rangos promedio de eficiencia energética de vehículos eléctricos comerciales, se determinó que el sistema FV podría aportar en el escenario más favorable hasta 23.42 kilómetros adicionales en promedio por día, lo cual se traduce en un incremento porcentual del 7.81 % sobre una autonomía base de 300 km. En este sentido se pueden lograr ahorros económicos de hasta \$ 2.044 USD anuales en costos de energía eléctrica.

Considerando tecnologías actuales y sistemas con mayor grado de integración, el costo del sistema puede alcanzar valores cercanos a \$ 3.500 USD/kWp. No obstante, a partir de los ahorros energéticos estimados por año, el tiempo de recuperación de la inversión se sitúa aproximadamente a partir de 1.7 años, dependiendo de las condiciones de operación del sistema y del aprovechamiento energético diario.

Es conveniente destacar que estos resultados corresponden al escenario de velocidad cero, es decir, cuando el vehículo se encuentra estacionado. Sin embargo, los resultados de las pruebas experimentales demostraron que la eficiencia del módulo FV mejora considerablemente cuando el vehículo se encuentra en movimiento a velocidades de 50 y 100 km/h, debido a la reducción de la temperatura de los módulos por efecto de la refrigeración forzada generada por el flujo de aire. Esto favorece el rendimiento y eficiencia de las celdas FV,

permitiendo incrementar la potencia del sistema hasta en un 20.6% que en condiciones estáticas del vehículo.

TABLA VIII
COMPARACIÓN DE ESTUDIOS RECIENTES SOBRE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS (VIPV)

Estudio (Año)	Autonomía Adicional (km/día)	Mejora Porcentual	Consideraciones
Este manuscrito	10.84 - 23.42	3.61% - 7.81%	Evaluación experimental, con validación de sombras, efecto térmico, aerodinámico y simulación.
Estudio 1 [26]	4.7 - 8.9 (por cada 100 km)	4.7% - 8.9%	Simulación de un bus eléctrico con módulos PV en techo y laterales. Evalúa la extensión de autonomía y el impacto en la vida útil de la batería
Estudio 2 [27]	2.32 - 12.64	1.16% - 6.32%	Estudio experimental con paneles flexibles monocristalinos en el techo de un vehículo a combustión. Cuantifica la energía generada y la extensión de autonomía en diferentes meses.
Estudio 3 [28]	11	9.47%	Medición experimental en tiempo real de irradiancia sobre un vehículo en condiciones urbanas reales. Cuantifica pérdidas por sombreado urbano (hasta 50% de reducción) y estima una energía generada de 1.03 kWh en 6 horas de conducción
Estudio 4 [31]	1444 km/año (3.96 km/día)	2% - 12%	Simulación con pérdidas por sombra (30-49%). Se basa en supuestos e hipótesis.
Estudio 5 [29]	No Aplica	No Aplica	Medición experimental del coeficiente de transferencia de calor por convección (h). Reducción de la temperatura del módulo de 16.5°C cuando el VE cambia de estado estacionario a velocidad media.
Estudio 6 [30]	≤5	No aplica	Medición experimental sin cubrir la totalidad de la carrocería con módulos FV. Contempla escenarios con sombras.
Estudio 7 [32]	No Aplica	5-15%	Simulación de 5 tipos de vehículos con batería y pila de combustible. Evalúa la extensión de autonomía para microcoches, autos híbridos.
Estudio 8 [33]	Extensión semanal hasta 245 km (Sono Sion)	7.8% - 12.21%	Revisión bibliográfica y limitaciones de sistemas fotovoltaicos incorporados sobre vehículos eléctricos.

En consecuencia, resulta lógico proyectar que, en condiciones reales de operación dinámica, el sistema FV podría llegar a generar mayor cantidad energía respecto al estimado en el escenario estacionario, sin embargo, esto puede ser contrastado por las posibles pérdidas por sombras que afecten el sistema durante su recorrido.

Por otra parte, la integración de módulos fotovoltaicos en la carrocería de vehículos eléctricos permite cargar la batería de forma pasiva y autónoma durante largos periodos de estacionamiento, que suelen representar la mayor parte del tiempo de uso de un automóvil particular.

Los resultados obtenidos podrían considerarse para el análisis en sistemas de transporte público que generalmente operan a velocidades moderadas o inferiores a 80 km/h. En este rango de operación, dichos sistemas podrían beneficiarse de una refrigeración forzada por convección y por un bajo coeficiente de arrastre debido a efectos aerodinámicos, que incrementan la captación de energía solar, así como por la ampliación del área disponible para la instalación de los módulos fotovoltaicos.

Finalmente, la metodología empleada para la simulación, análisis teórico y validación experimental permitió identificar no solo el impacto energético del sistema, sino también las potenciales mejoras de diseño para el uso de áreas útiles, la integración de tecnologías fotovoltaicas avanzadas y el desarrollo de sistemas eficientes en la gestión de energía.

REFERENCES

- [1] IEA, "Global EV Outlook 2024," IEA, Paris, Apr. 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>.
- [2] G. García and Espona García, "La transición al vehículo eléctrico: Evolución y problemas," *Boletín Económico de ICE*, no. 3172, Jul. 2024. doi: 10.32796/bice.2024.3172.7813.
- [3] D. Duque Sarmiento and J. Rocano, "Determinación de la autonomía del vehículo eléctrico mediante ciclos controlados," Undergraduate thesis, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, Jan. 2018. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15067/1/UPS-CT007435.pdf>.
- [4] IEA, "Global EV Outlook 2021," IEA, Paris, Apr. 2021. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>.
- [5] Z. Rezvani, J. Jansson, and J. Bodin, "Advances in consumer electric vehicle adoption research: A review and research agenda," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 34, pp. 122–136, 2015, doi: 10.1016/j.trd.2014.10.010.
- [6] G. Rizzo and M. Sorrentino, "Introducing Sunshine Forecast to improve On-Board energy management of hybrid solar vehicles," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 43, no. 7, pp. 276–281, Jul. 2010, doi: 10.3182/20100712-3-DE-2013.00082.
- [7] M. K. Yoong et al., "Studies of regenerative braking in electric vehicle," 2010 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology, Kuala Lumpur, Malaysia, 2010, pp. 40–45, doi: 10.1109/STUDENT.2010.5686984.
- [8] K. Araki, Y. Ota, and M. Yamaguchi, "Measurement and Modeling of 3D Solar Irradiance for Vehicle-Integrated Photovoltaic," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 3, p. 872, Jan. 2020. doi: 10.3390/app10030872.
- [9] J. A. Duffie and W. A. Beckman, "Solar Engineering of Thermal Processes", 4th ed., Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2013, pp.3-42. doi: 10.1002/9781118671603.
- [10] M. R. Battioni, G. A. Risso, M. Cutrera, and J. A. Schmidt, "Evaluación de distintos métodos para estimar la temperatura de operación de módulos fotovoltaicos y estimación de las pérdidas de energía por efecto de la temperatura," *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 4, no. 1, Nov. 2016. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11336/30135>.
- [11] S. Dubey, J. N. Sarvaiya, B. Seshadri, and T. D. Photovoltaic, "(PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review," *Energy Procedia*, vol. 33, pp. 311–321, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.05.072.
- [12] A. Goetzberger and V. U. Hoffmann, "Photovoltaic Solar Energy Generation", Springer, 2005.
- [13] O. Izquierdo, A. Velasco, M. Lafuente, P. Peña, and Á. Hernández, "Performance and energy consumption of electric vehicles used in microgrid management: Analysis of the real impact of ambient temperature", *Journal of Power Sources*, vol. 635, p. 236511, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.jpowsour.2025.236511.
- [14] F. A. Tiano, G. Rizzo, M. Marino, and A. Monetti, "Evaluation of the potential of solar photovoltaic panels installed on vehicle body including temperature effect on efficiency," *eTransportation*, vol. 5, p. 100067, Jun. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100088>.
- [15] D. P. Birnie, "Analysis of energy capture by vehicle solar roofs in conjunction with workplace plug-in charging," *Solar Energy*, vol. 125, pp. 219–226, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2015.12.014.
- [16] M. A. Rahmawijaya, M. A. Zidan, M. A. Yaqin, M. Z. Aprilyansyah, R. R. Alif Wianto, and S. D. Prasetyo, "Optimizing Aerodynamics in Solar Car Design: A Comprehensive CFD Study", *Pena Jour. of Flow. Dyn.*, vol. 2, no. 1, pp. 13–23, Sep. 2025, <https://doi.org/10.37934/pjfd.2.1.1323>.
- [17] R. Kanmani, M. K. Kamalinee, S. M. Thoufic, R. Suganya and S. Muthulakshmi, "Development and Proposal System for the Formulation of Solar paint," 2021 7th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), Coimbatore, India, 2021, pp. 623–627, doi: 10.1109/ICACCS51430.2021.9442003.
- [18] A. Padgaonkar, "The Potential of Solar Paint to Harvest Solar Energy," *J. High School Sci.*, vol. 7, no. 1, Mar. 2023. [Online]. Available: <https://jhss.scholasticahq.com/article/73368-the-potential-of-solar-paint-to-harvest-solar-energy>.
- [19] Patel, N., Bittkau, K., Ding, K., van Sark, W., & Reinders, A. H. M. E. (2024). Vehicle Integrated Photovoltaics. 491–506, <https://doi.org/10.1002/9781119578826.ch30>.
- [20] J. Pastuszak and P. Węgierek, "Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 16, p. 5542, Aug. 2022, doi:10.3390/ma15165542.
- [21] Patel, N., Bittkau, K., Pieters, B. E., Sovetkin, E., Ding, K., & Reinders, A. (2024). Impact of Additional PV Weight on the Energy Consumption of Electric Vehicles With Onboard PV. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 14(2), 319329. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2024.3359446>.
- [22] A. D. Jones and C. P. Underwood, "A thermal model for photovoltaic systems," *Solar Energy*, vol. 70, no. 4, pp. 349–359, Jan. 2001, doi: 10.1016/S0038-092X(00)00149-3.
- [23] W. Li, Y. Shi, K. Chen, L. Zhu, and S. Fan, "A comprehensive photonic approach for solar cell cooling," *ACS Photonics*, vol. 4, no. 4, pp. 774–782, Mar. 2017, doi: 10.1021/acsphotonics.7b00089.
- [24] S. Kumar and S. Mullick, "Wind heat transfer coefficient in solar collectors in outdoor conditions," *Sol. Energy*, vol. 84, no. 6, pp. 956–963, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.03.003>.

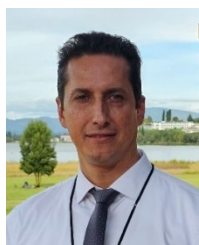
- [25] R. Hassanian, N. Yeganeh, and M. Riedel, "Wind Velocity and Forced Heat Transfer Model for Photovoltaic Module," *Fluids* (Basel), vol. 9, no. 1, p. 17, 2024. <https://doi.org/10.3390/fluids9010017>.
- [26] K. Mallon, F. Assadian, y B. Fu, "Analysis of On-Board Photovoltaics for a Battery Electric Bus and Their Impact on Battery Lifespan", *Energies*, vol. 10, no. 7, p. 943, Jul. 2017, doi: 10.3390/en10070943.
- [27] I. Diahovchenko, L. Petrichenko, I. Borzenkov, y M. Kolcun, "Application of photovoltaic panels in electric vehicles to enhance the range", *Heliyon*, vol. 8, no. 12, p. e12425, Dic. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12425.
- [28] N. R. Pochont, Y. R. Sekhar, M. C. Brito, and V. T. Rao, "Assessing the scope of vehicle integrated photovoltaics in urban driving conditions – Case study of a Tier-II city in southern India," *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 72, p. 104040, Nov. 2024., doi: 10.1016/j.seta.2024.104040.
- [29] Y. Hayakawa, D. Sato, y N. Yamada, "Measurement of the Convective Heat Transfer Coefficient and Temperature of Vehicle-Integrated Photovoltaic Modules", *Energies*, vol. 15, no. 13, p. 4818, Jun. 2022, doi: 10.3390/en15134818.
- [30] M. Jankovec, K. Brecl, M. Bokalič, M. Pirc, y M. Topič, «Monitoring solar irradiance and PV module performance in mobile applications», *Solar Energy Materials And Solar Cells*, vol. 277, p. 113101, ago. 2024, doi: 10.1016/j.solmat.2024.113101.
- [31] F. Karoui, B. Chambion, F. Claudon, y B. Commault, "Integrated Photovoltaics Potential for Passenger Cars: A Focus on the Sensitivity to Electrical Architecture Losses", *Applied Sciences*, vol. 13, no. 14, p. 8373, Jul. 2023, doi: 10.3390/app13148373.
- [32] S. Sagaria, G. Duarte, D. Neves, and P. Baptista, "Photovoltaic integrated electric vehicles: Assessment of synergies between solar energy, vehicle types and usage patterns," *J. Clean. Prod.*, vol. 348, p. 131402, Mar. 2022., doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131402.
- [33] P. Balakrishnan, T. Lakshmanan, R. Ravi, and M. Faqir, "Optimization of Solar Energy Utilization for Electric Vehicles (EVs)", en *Advances in computational intelligence and robotics book series*, 2025, pp. 343-374. doi: 10.4018/979-8-3373-1434-1.ch012.
- [34] J. Heeraman, R. Kalyani, and B. Amala, "Towards a sustainable future: Design and fabrication of a Solar-Powered Electric Vehicle," *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, vol. 1285, no. 1, p. 012035, Jan. 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1285/1/012035.
- [35] R. Hernández, C. Fernández, and P. Baptista, *Metodología de la investigación*, 6th ed., McGraw-Hill, 2014. [Online]. Available: https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_roberto_hernandez_sampieri.pdf.
- [36] B. Kretchmer, R. Monahan, A. Garcia, E. Garner, B. Sims, N. Njoku, M. Lahey, and N. Monteiro, "Solar powered electric vehicle," *Purdue University Northwest*, Int. Res. J. Mod. Eng. Technol. Sci., Apr. 2017. [Online]. Available: https://www.pnw.edu/wp-content/uploads/2020/03/Solar_Vehicle_ME439_Final_Paper_v2.pdf.
- [37] A. K. Tripathi, G. Sree Lakshmi, H. Mishra, S. Chapala, M. Alwetaishi, F. Atamurotov, N. E. Benti, S. Sura and C. Ahamed Saleel, "Integration of Solar PV Panels in Electric Vehicle Charging Infrastructure: Benefits, Challenges, and Environmental Implications," *Energy Science & Engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 2135-2152, Apr. 2025. doi: 10.1002/ese3.70014.
- [38] M. W. Davis, A. H. Fanney, and B. P. Dougherty, "Prediction of building integrated photovoltaic cell temperatures," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 123, no. 3, pp. 200–210, Mar. 2001, doi: 10.1115/1.1385825.
- [39] B. Amiot, H. Pabiau, R. L. Berre, and S. Giroux-Julien, "An innovative method for measuring the convective cooling of photovoltaic modules," *Sol. Energy*, vol. 274, p. 112531, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112531>.
- [40] R. Van Greunen and C. Oosthuizen, "Data Driven Methods for Finding Coefficients of Aerodynamic Drag and Rolling Resistance of Electric Vehicles," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 14, no. 6, p. 134, 2023b. <https://doi.org/10.3390/wevj14060134>.
- [41] M. Weiss, T. Winbush, A. Newman, and E. Helmers, "Energy Consumption of Electric Vehicles in Europe," *Sustainability* (Basel), vol. 16, no. 17, p. 7529, 2024., doi: 10.3390/su16177529.
- [42] K. S. Dasari, S. R. Mopidevi, and S. R. Basappa, "Research on factors influencing the performance of electric vehicles and its impacts," *Science And Technology For Energy Transition*, vol. 80, p. 38, 2025., doi: 10.2516/stet/2025018.
- [43] Resolución 000705 de 2024, por la cual se modifica la Resolución 000762 de 2023, mediante la cual se actualizó el factor de emisión del Sistema Interconectado Nacional, Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), Colombia, Aug. 2024. [Online]. Available: https://www1.upme.gov.co/Normatividad/705_2024.pdf.



Wilson J. Silva received his B.S. degree in Electronics Engineering from the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Sogamoso, Colombia, in 2021. He is currently pursuing the M.Sc. degree in Renewable Energies at UPTC, Duitama, Colombia. He has worked on projects related to photovoltaic energy systems and electric vehicles, focusing on the integration of solar technologies into mobility applications. His current research interests include renewable energy systems, vehicle-integrated photovoltaics, and sustainable electric mobility. Mr. Silva is a member of the academic research group on Renewable Energies at UPTC and collaborates in university projects on solar-powered electric transport and energy optimization.



Edgar Absalón Torres Barahona is working as an Associated Professor in Department of Electromechanical Engineering, Pedagogical and Technological University of Colombia (UPTC). He completed his Ph.D in Engineering and Materials Science at the Pedagogical and Technological University of Colombia (UPTC). He holds a Master's degree in Mechanical Engineering from the University of the Andes, Colombia. His research interests include in machine design, materials characterization, and renewable energy.



Edwin Francis Cárdenas Correa is currently working as a Professor in the Department of Electromechanical Engineering at Pedagogical and Technological University of Colombia (UPTC), Colombia. He completed his Ph.D in mechanical engineering from the Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), Brazil. He holds a master's degree from the National University of Colombia, Colombia. His research interests include science of materials, renewable energies, mechanical design, product design, and robotics.