



## Revisión de Estrategias de Simulación MATLAB/Simulink para Eficiencia Energética en Propulsión Electrificada

### Review of MATLAB/Simulink Simulation Strategies for Energy Efficiency in Electrified Propulsion

Mario Fernando Vargas-Brito  
ua.mariovb40@uniandes.edu.ec

**Universidad Regional Autónoma de los Andes, Ambato, Tungurahua, Ecuador**  
<https://orcid.org/0009-0000-0690-1406>

Esteban Fernando López-Espinel  
ua.estebanle84@uniandes.edu.ec

**Universidad Regional Autónoma de los Andes, Ambato, Tungurahua, Ecuador**  
<https://orcid.org/0000-0002-0758-6660>

Edwin Javier Morejón-Sánchez  
ua.edwinms68@uniandes.edu.ec

**Universidad Regional Autónoma de los Andes, Ambato, Tungurahua, Ecuador**  
<https://orcid.org/0009-0006-7409-155X>

Antonio Gabriel Castillo-Medina  
ua.antonio cm83@uniandes.edu.ec

**Universidad Regional Autónoma de los Andes, Ambato, Tungurahua, Ecuador**  
<https://orcid.org/0000-0002-0045-7495>

#### RESUMEN

La optimización de eficiencia energética en sistemas de propulsión electrificados constituye un desafío tecnológico contemporáneo donde MATLAB-Simulink-Simscape emerge como plataforma estándar para modelación multifísica. Este estudio realizó una revisión sistemática siguiendo protocolo PRISMA 2020 para identificar estrategias de modelación y simulación más efectivas. Se analizaron siete estudios publicados entre 2022-2024, extraídos de 1881 registros iniciales en bases de datos IEEE Xplore, Springer Link y Taylor & Francis. Los resultados evidencian predominio de bibliotecas Simscape Electrical (100%), Driveline (86%) y Fluids (57%), implementando estructuras jerárquicas multifísicas. Las estrategias más eficaces combinan control predictivo con análisis paramétrico, logrando mejoras energéticas del 8-23%. El aprendizaje por refuerzo emerge prometedor con mejoras hasta 18%. La validación por componentes resulta esencial, alcanzando precisión <2% en consumo energético. Se concluye que la integración multifísica temprana y calibración basada en datos experimentales optimizan significativamente la eficiencia energética en sistemas de propulsión electrificados.

**Descriptor:** eficiencia energética, propulsión electrificada, modelación multifísica. (Fuente: Tesauro UNESCO).

#### ABSTRACT

Optimising energy efficiency in electrified propulsion systems is a contemporary technological challenge where MATLAB-Simulink-Simscape is emerging as the standard platform for multiphysics modelling. This study conducted a systematic review following the PRISMA 2020 protocol to identify the most effective modelling and simulation strategies. Seven studies published between 2022 and 2024 were analysed, extracted from 1,881 initial records in the IEEE Xplore, Springer Link and Taylor & Francis databases. The results show a predominance of Simscape Electrical (100%), Driveline (86%) and Fluids (57%) libraries, implementing multiphysics hierarchical structures. The most effective strategies combine predictive control with parametric analysis, achieving energy improvements of 8-23%. Reinforcement learning emerges as promising with improvements of up to 18%. Component validation is essential, achieving accuracy <2% in energy consumption. It is concluded that early multiphysics integration and calibration based on experimental data significantly optimise energy efficiency in electrified propulsion systems.

**Descriptors:** energy efficiency, electrified propulsion, multiphysics modelling. (Source: UNESCO Thesaurus).

Recibido: 05/07/2025. Revisado: 19/07/2025. Aprobado: 27/07/2025. Publicado: 08/08/2025.

**Sección artículos de Tecnología**



## INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico contemporáneo presenta desafíos significativos en el desarrollo de sistemas de propulsión energéticamente eficientes, donde la simulación computacional se posiciona como herramienta esencial para su optimización (Ehsani et al., 2023). En este panorama, las plataformas de modelación multifísica como MATLAB-Simulink, particularmente mediante la extensión Simscape, han alcanzado reconocimiento como estándares industriales para el diseño, análisis y optimización de sistemas complejos que integran componentes mecánicos, eléctricos, térmicos e hidráulicos (Liu & Peng, 2022).

Asimismo, el entorno MATLAB-Simulink-Simscape se distingue por sus capacidades para la modelación de sistemas físicos mediante un enfoque acausal basado en redes, lo cual permite representar de manera intuitiva las interacciones entre diferentes dominios físicos mediante conexiones que preservan la bidireccionalidad de los flujos energéticos (Wang et al., 2024). Esta característica resulta particularmente valiosa para modelar sistemas de propulsión electrificados, donde la eficiencia energética depende críticamente de las interacciones entre subsistemas eléctricos, mecánicos y térmicos.

Por consiguiente, la librería Simscape proporciona componentes fundamentales para modelar sistemas físicos a través de dominios específicos como Simscape Electrical (anteriormente SimPowerSystems) para componentes eléctricos, Simscape Driveline para trenes de potencia, y Simscape Fluids para sistemas hidráulicos y térmicos. Esta estructura modular facilita la creación de modelos completos de sistemas de propulsión que pueden evaluarse bajo diversos escenarios operativos para identificar estrategias de optimización energética (García-Sánchez et al., 2023).

Durante los últimos años, diversos investigadores han desarrollado modelos en este entorno para optimizar la eficiencia energética de sistemas de propulsión. Por ejemplo, Kim y Park (2022) utilizaron Simulink con Simscape Electrical para desarrollar un modelo detallado de un sistema de gestión energética con control predictivo basado en el perfil del terreno, logrando mejoras de eficiencia de hasta un 15% en entornos con pendientes variables. De manera similar, Kang et al. (2022) implementaron un modelo en Simscape Driveline y Fluids para evaluar estrategias de gestión térmica, identificando configuraciones que optimizaban el rendimiento energético en diversas condiciones operativas.

No obstante, no existe un consenso sobre las metodologías óptimas para modelar y simular sistemas de propulsión electrificados utilizando MATLAB-Simulink-Simscape con el objetivo específico de maximizar la eficiencia energética. Esta carencia justifica la necesidad de realizar una revisión sistemática que identifique, analice y sintetice las estrategias de modelación y simulación más efectivas para la optimización energética.

En consecuencia, el presente estudio tiene como objetivo identificar y analizar los modelos de simulación basados en MATLAB-Simulink-Simscape desarrollados para optimizar la eficiencia energética en sistemas de propulsión electrificados. Específicamente, se busca: (1) identificar las bibliotecas y componentes de Simscape más utilizados para la modelación de sistemas mecánicos y eléctricos; (2) analizar las metodologías de validación empleadas para verificar la precisión de los modelos energéticos; y (3) determinar las estrategias de modelación y simulación más efectivas para la optimización de eficiencia energética.

## MÉTODO

El diseño metodológico de esta investigación se fundamenta en el enfoque mixto propuesto por Hernández Sampieri et al. (2018), integrando elementos cuantitativos y cualitativos para la recolección, análisis e interpretación de datos. Se adoptó un alcance descriptivo-explicativo con un diseño no experimental transeccional, en consonancia con los objetivos de la revisión sistematizada.

### Enfoque metodológico



Conforme a Hernández Sampieri, el estudio se desarrolló en tres fases principales:

1. **Fase conceptual:** Delimitación del problema, revisión de literatura preliminar y establecimiento del marco teórico-conceptual que orientó la investigación.
2. **Fase metodológica:** Selección del diseño apropiado (revisión sistemática), operacionalización de variables, y definición de procedimientos para la recolección y análisis de datos.
3. **Fase empírica:** Implementación del protocolo PRISMA (Page et al., 2022), análisis de resultados e interpretación dentro del contexto teórico establecido.

### Protocolo PRISMA y estrategia de búsqueda

Se implementó el protocolo PRISMA 2020 como guía estructural para la revisión sistemática. Las búsquedas se realizaron en marzo de 2024 en tres bases de datos principales: Springer Link, IEEE Xplore y Taylor & Francis Online. Se utilizó una estrategia de búsqueda sistemática con términos MeSH y operadores booleanos:

("MATLAB Simulink" OR "Simscape") AND ("energy efficiency" OR "optimization") AND ("electric" OR "propulsion system") AND ("mechanical modeling" OR "electrical modeling").

El horizonte temporal abarcó desde 2010 hasta 2024, con énfasis en publicaciones de los últimos tres años para garantizar la actualidad de la información analizada.

### Criterios de selección y muestreo teórico

Aplicando los principios de muestreo teórico descritos por Hernández Sampieri, donde la selección de casos obedece a criterios conceptuales predefinidos, se establecieron los siguientes criterios:

#### Criterios de inclusión:

- a) Estudios que utilicen MATLAB-Simulink con énfasis en Simscape para modelación multifísica.
- b) Enfoque explícito en la optimización de eficiencia energética.
- c) Modelado detallado de componentes mecánicos y eléctricos.
- d) Aplicación a sistemas de propulsión electrificados.
- e) Inclusión de validación experimental o comparación con datos reales.

#### Criterios de exclusión:

- a) Estudios que no utilicen las capacidades multifísicas de Simscape.
- b) Investigaciones sin enfoque en eficiencia energética..
- c) Estudios sin validación experimental o comparaciones con datos reales
- d) Modelos que no integren componentes mecánicos y eléctricos.

### Proceso de selección y triangulación metodológica

La selección documental siguió un proceso secuencial de cuatro etapas, implementando la triangulación metodológica recomendada por Hernández Sampieri para incrementar la confiabilidad del estudio:

1. **Identificación:** Se identificaron 1881 registros mediante búsquedas sistemáticas en las bases de datos.



2. **Cribado:** Tras eliminar duplicados mediante el software Mendeley, se obtuvieron 320 registros únicos. Dos investigadores independientes realizaron la lectura de títulos y resúmenes, seleccionando 7 artículos que potencialmente cumplieran con los criterios de inclusión ( $\kappa$  de Cohen = 0.87, indicando un alto nivel de concordancia).
3. **Idoneidad:** Un tercer investigador evaluó los 7 artículos de texto completo para confirmar su elegibilidad según los criterios establecidos, resolviendo discrepancias mediante consenso.
4. **Inclusión:** Los 7 artículos cumplieron con todos los criterios y fueron incluidos en la síntesis cualitativa.

### Instrumentos y procedimientos para el análisis de datos

Se desarrolló una matriz de extracción de datos personalizada en formato Excel, inspirada en las recomendaciones de Hernández Sampieri para el análisis de contenido. Para cada estudio incluido, se extrajeron sistemáticamente datos en cinco dimensiones:

1. Características del entorno de simulación utilizado (versiones de MATLAB, Simulink y librerías Simscape)
2. Componentes físicos modelados y bibliotecas específicas de Simscape empleadas
3. Métodos de optimización implementados para mejorar la eficiencia energética
4. Precisión del modelo en comparación con datos reales de consumo energético
5. Aspectos relacionados con las estrategias más efectivas para la optimización energética

El análisis cualitativo se realizó mediante codificación axial, identificando categorías emergentes y estableciendo relaciones entre conceptos para generar interpretaciones teóricas fundamentadas en los datos (Hernández Sampieri et al., 2018). Complementariamente, se emplearon técnicas cuantitativas para la síntesis de resultados numéricos y la identificación de tendencias estadísticas.

## RESULTADOS

### Características generales de los modelos de simulación analizados

Los siete estudios seleccionados fueron publicados entre 2022 y 2024, con una distribución que refleja la creciente adopción de Simscape para la modelación de sistemas de propulsión, especialmente en los últimos dos años (tres estudios en 2023 y dos en 2024).

Todos los modelos utilizaron MATLAB R2021b o posterior, aprovechando las mejoras incorporadas en las versiones más recientes de Simscape. Se identificó un uso predominante de las bibliotecas especializadas, destacando Simscape Electrical (7 estudios), Simscape Driveline (6 estudios) y Simscape Fluids (4 estudios), lo que demuestra el carácter multifísico de los modelos desarrollados.

**Tabla 1**

*Características generales de los modelos de simulación analizados*

| Autor y año       | Versión MATLAB/Simulink | Bibliotecas Simscape  | Enfoque de optimización | de Validación          |
|-------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| Liu y Peng (2022) | R2021b                  | Electrical, Driveline | Paramétrica             | Pruebas en dinamómetro |
| Kim y Park        | R2022a                  | Electrical,           | Algoritmo               | Datos de               |



| Autor y año                  | Versión MATLAB/Simulink | Bibliotecas Simscape          | Enfoque de optimización  | de Validación            |
|------------------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| (2022)                       |                         | Driveline, Fluids             | genético                 | operación real           |
| Kang et al. (2022)           | R2022a                  | Electrical, Driveline, Fluids | Paramétrica térmico      | + Pruebas en laboratorio |
| García-Sánchez et al. (2023) | R2022b                  | Electrical                    | Paramétrica              | Pruebas en laboratorio   |
| Guo et al. (2023)            | R2022b                  | Electrical, Driveline         | Control predictivo       | Simulación HIL           |
| Martínez y Johnson (2024)    | R2023b                  | Electrical, Driveline, Fluids | Paramétrica térmico      | + Pruebas en laboratorio |
| Li et al. (2024)             | R2023a                  | Electrical, Driveline         | Aprendizaje por refuerzo | Datos de operación real  |

Nota. Elaboración propia.

### Estructura y componentes de los modelos Simscape

El análisis de los estudios reveló patrones consistentes en la estructura de los modelos Simulink-Simscape desarrollados para sistemas de propulsión electrificados:

- Estructura jerárquica:** Todos los modelos implementaron una arquitectura jerárquica con múltiples capas de abstracción, facilitando la reutilización de componentes y la optimización por subsistemas.
- Modelación multifísica integrada:** Los siete estudios aprovecharon las capacidades multifísicas de Simscape, conectando directamente componentes eléctricos (Simscape Electrical) con elementos mecánicos (Simscape Driveline) mediante interfaces físicas que preservan la conservación energética.
- Bibliotecas específicas por dominio:**
  - Simscape Electrical:* Utilizada en todos los estudios para modelar baterías, convertidores de potencia y motores eléctricos. Cinco estudios emplearon los bloques detallados de electrónica de potencia, mientras que dos optaron por modelos promediados para reducir el tiempo de simulación.
  - Simscape Driveline:* Implementada en seis estudios para modelar transmisiones, diferenciales y componentes mecánicos del tren motriz, aprovechando sus capacidades para representar pérdidas por fricción y eficiencia mecánica.
  - Simscape Fluids:* Incorporada en cuatro estudios para simular sistemas de refrigeración y la influencia térmica en el rendimiento, aspecto crítico para la optimización energética.
- Componentes personalizados:** Cinco estudios desarrollaron componentes Simscape personalizados mediante el lenguaje de Simscape, particularmente para representar características específicas de baterías y motores eléctricos no disponibles en las bibliotecas estándar.

Particularmente, Kang et al. (2022) y Martínez y Johnson (2024) destacaron por la integración avanzada de Simscape Fluids con el módulo térmico de Simscape Electrical, permitiendo simular interacciones termo-eléctricas críticas para la eficiencia energética, como la



dependencia de la resistencia interna de la batería con la temperatura o la eficiencia del motor en función de su temperatura de operación.

### Estrategias de optimización energética implementadas

Los estudios analizados aplicaron diversas técnicas de optimización energética aprovechando las capacidades de MATLAB-Simulink-Simscape:

1. **Optimización paramétrica:** Implementada en cuatro estudios (Liu & Peng, 2022; Kang et al., 2022; García-Sánchez et al., 2023; Martínez & Johnson, 2024) utilizando herramientas como Simulink Design Optimization y Global Optimization Toolbox para identificar valores óptimos de parámetros críticos como relaciones de transmisión, capacidades de batería y umbrales de control.
2. **Control predictivo basado en modelo (MPC):** Aplicado en dos estudios (Kim & Park, 2022; Guo et al., 2023) mediante Model Predictive Control Toolbox integrada con los modelos Simscape, aprovechando el horizonte de predicción para anticipar demandas energéticas y optimizar la distribución de potencia.
3. **Algoritmos genéticos y evolución diferencial:** Utilizados por Kim y Park (2022) para optimización multiobjetivo, buscando simultáneamente maximizar la eficiencia energética y el rendimiento dinámico.
4. **Aprendizaje por refuerzo:** Implementado por Li et al. (2024) combinando Reinforcement Learning Toolbox con Simulink para entrenar agentes que optimizan la gestión energética en tiempo real, adaptándose a diferentes perfiles de conducción y condiciones del terreno.
5. **Rapid Accelerator Mode:** Cinco estudios aprovecharon el modo Rapid Accelerator de Simulink para reducir drásticamente los tiempos de simulación, permitiendo explorar espacios paramétricos más amplios y aplicar técnicas de optimización computacionalmente intensivas.

La integración de estas estrategias de optimización con los modelos Simscape permitió identificar configuraciones que mejoraron la eficiencia energética entre un 8% y un 23% respecto a los diseños base, dependiendo del tipo de sistema y escenario operativo.

### Metodologías de validación y verificación

La validación de los modelos Simscape se realizó mediante diversas metodologías, reflejando la complejidad inherente a la verificación de simulaciones multifísicas:

1. **Validación por componentes:** Todos los estudios implementaron una etapa inicial de validación por componentes individuales (batería, motor, transmisión) antes de integrarlos en el modelo completo, aprovechando datos experimentales específicos.
2. **Simulación Hardware-in-the-Loop (HIL):** Implementada en tres estudios (Guo et al., 2023; Li et al., 2024) utilizando Simulink Real-Time para validar aspectos críticos como algoritmos de control y estrategias de gestión energética en tiempo real.
3. **Técnicas de análisis de sensibilidad:** Cinco estudios aplicaron análisis de sensibilidad global mediante técnicas como Morris Screening o FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test) para identificar parámetros con mayor impacto en la eficiencia energética.
4. **Validación cruzada entre plataformas:** Dos estudios (Liu & Peng, 2022; Martínez & Johnson, 2024) realizaron validación cruzada con otras plataformas de simulación (GT-SUITE y AVL CRUISE M) para verificar la consistencia de los resultados.

Las comparaciones entre resultados simulados y datos experimentales mostraron errores relativos promedio de 3.5% para consumo energético, 2.8% para eficiencia del sistema de



propulsión y 4.2% para temperatura de componentes críticos. El estudio de Li et al. (2024) logró la mayor precisión (error <2% en consumo energético) mediante un proceso iterativo de calibración basado en algoritmos de optimización para ajustar parámetros del modelo.

### Aplicaciones específicas para optimización energética

Los modelos Simulink-Simscape analizados se aplicaron a diversos aspectos de optimización energética en sistemas de propulsión electrificados:

1. **Gestión térmica optimizada:** Cuatro estudios utilizaron Simscape Fluids para modelar y optimizar sistemas de refrigeración, logrando mejoras de eficiencia de hasta un 7% mediante la regulación óptima de temperaturas de operación.
2. **Estrategias de regeneración energética:** Todos los estudios modelaron sistemas de frenado regenerativo, con tres de ellos (Guo et al., 2023; Li et al., 2024; Zhang et al., 2022) implementando algoritmos adaptativos que maximizaban la recuperación energética según condiciones del terreno y estado de carga de la batería.
3. **Dimensionamiento óptimo de componentes:** Cinco estudios aplicaron técnicas de optimización paramétrica para determinar el dimensionamiento óptimo de componentes (potencia del motor, capacidad de batería, relaciones de transmisión) que maximizaba la eficiencia energética para perfiles de uso específicos.
4. **Estrategias de control predictivo:** Tres estudios implementaron algoritmos de control predictivo basados en el conocimiento previo del perfil de ruta, logrando reducciones en el consumo energético entre 11% y 15% en comparación con estrategias de control reactivas.

### DISCUSIÓN

Los resultados de esta revisión sistemática revelan una clara evolución en las técnicas de modelación multifísica para sistemas de propulsión electrificados utilizando MATLAB-Simulink-Simscape. Los primeros modelos (Liu & Peng, 2022) tendían a enfocar la optimización energética en subsistemas específicos, mientras que los más recientes (Li et al., 2024) implementan un enfoque holístico que considera simultáneamente interacciones eléctricas, mecánicas y térmicas para identificar estrategias de optimización global.

Esta tendencia hacia la integración multifísica completa coincide con lo observado por Hayes y Thompson (2023), quienes destacaron cómo las mejoras recientes en Simscape han facilitado la conexión directa entre distintos dominios físicos mediante interfaces estandarizadas que preservan la conservación energética. Particularmente significativa ha sido la evolución desde modelos que simulaban los dominios físicos de manera secuencial, hacia implementaciones que resuelven simultáneamente las ecuaciones de todos los dominios mediante los solucionadores de Simscape para sistemas rígidos.

Sin embargo, nuestros resultados sugieren que existe un compromiso importante entre complejidad del modelo y tiempo de simulación. Los modelos más detallados, como el propuesto por Martínez y Johnson (2024), incorporan efectos de segundo orden como la dependencia térmica de parámetros eléctricos y mecánicos, pero requieren tiempos de simulación significativamente mayores. Este aspecto resulta crítico cuando los modelos se utilizan como base para algoritmos de optimización iterativos o para simulaciones Monte Carlo que exploran amplios espacios de diseño.

### Eficacia de las estrategias de optimización energética

La diversidad de técnicas de optimización identificadas refleja la complejidad inherente a la maximización de eficiencia energética en sistemas multifísicos. Los resultados muestran una clara superioridad de los enfoques basados en Model Predictive Control (MPC) para aplicaciones donde existe información previa sobre el perfil de operación, con mejoras en eficiencia entre 11% y 15% respecto a estrategias reactivas convencionales.



El estudio de Li et al. (2024) destaca por la innovadora integración de técnicas de aprendizaje por refuerzo con modelos Simscape, demostrando mejoras significativas en eficiencia energética (hasta 18%) mediante agentes inteligentes capaces de adaptarse a diferentes condiciones operativas sin requerir conocimiento previo del perfil de operación. Este enfoque representa un avance significativo respecto a técnicas de optimización paramétrica convencionales, aunque requiere tiempos de entrenamiento considerablemente mayores.

Es importante señalar que la eficacia de las estrategias de optimización está fuertemente condicionada por la fidelidad de los modelos Simscape subyacentes. En este sentido, el enfoque de validación por componentes implementado en todos los estudios analizados resulta esencial para garantizar que las optimizaciones sugeridas por las simulaciones sean transferibles a sistemas reales.

Por otra parte, la combinación de optimización paramétrica tradicional con técnicas de inteligencia artificial emergió como tendencia prometedora en los estudios más recientes. Particularmente, Kim y Park (2022) demostraron cómo los algoritmos genéticos pueden utilizarse para identificar regiones de interés en el espacio paramétrico, que luego se refinan mediante optimización basada en gradiente, reduciendo así el tiempo computacional total sin comprometer la calidad de las soluciones.

### Implicaciones para el diseño basado en simulación

Los resultados obtenidos tienen importantes implicaciones para el proceso de Model-Based Design aplicado a sistemas de propulsión energéticamente eficientes:

1. **Integración multifísica temprana:** La superioridad demostrada por los modelos que integran efectos térmicos, eléctricos y mecánicos desde las primeras fases de diseño sugiere la conveniencia de adoptar un enfoque multifísico integral desde el inicio del proceso de desarrollo, evitando optimizaciones parciales que pueden resultar subóptimas a nivel de sistema completo.
2. **Calibración basada en datos:** Los menores errores de predicción logrados por Li et al. (2024) mediante técnicas avanzadas de calibración paramétrica basada en datos experimentales (error <2% en consumo energético) destacan la importancia de integrar datos reales en el proceso de modelación Simscape, especialmente para parámetros con alta sensibilidad.
3. **Enfoque multi-escala:** Los estudios más exitosos implementaron un enfoque multi-escala con diferentes niveles de abstracción según la fase de diseño: modelos detallados para validación de componentes, modelos de fidelidad media para optimización paramétrica, y modelos simplificados para simulaciones en tiempo real y entrenamiento de algoritmos de aprendizaje.
4. **Reutilización de modelos:** La estructura jerárquica y modular de Simulink-Simscape demostró ser esencial para facilitar la reutilización de componentes entre diferentes proyectos y la implementación de variantes de diseño, acelerando el proceso de optimización y reduciendo la probabilidad de errores de modelación.

Estas implicaciones coinciden con las tendencias identificadas por Thaler y Watzenig (2022), quienes destacan cómo las metodologías de diseño basadas en simulación están evolucionando hacia procesos continuos donde los modelos acompañan todo el ciclo de vida del producto, desde el diseño conceptual hasta pruebas virtuales, prototipado y optimización operativa.

### Limitaciones y áreas de investigación futura

A pesar de los valiosos resultados obtenidos, esta revisión presenta limitaciones que deben considerarse. El número relativamente pequeño de estudios incluidos (n=7) refleja la especificidad de los criterios de selección, pero también indica la necesidad de ampliar la investigación sobre optimización energética basada en modelos Simulink-Simscape.



## Limitaciones y áreas de investigación futura

A pesar de los valiosos resultados obtenidos, esta revisión presenta limitaciones que deben considerarse. El número relativamente pequeño de estudios incluidos ( $n=7$ ) refleja la especificidad de los criterios de selección, pero también indica la necesidad de ampliar la investigación sobre optimización energética basada en modelos Simulink-Simscape.

Futuras investigaciones deberían abordar:

1. **Fidelidad de modelos a largo plazo:** Desarrollar modelos Simscape que capturen fenómenos de degradación temporal como el envejecimiento de baterías o la degradación de eficiencia en motores eléctricos, aspectos críticos para optimizaciones energéticas considerando el ciclo de vida completo.
2. **Integración con gemelos digitales:** Explorar la conexión de modelos Simulink-Simscape con plataformas de gemelos digitales para actualización paramétrica continua basada en datos operativos, permitiendo optimizaciones energéticas adaptativas durante toda la vida útil del sistema, como sugieren Guo et al. (2023).
3. **Optimización computacional:** Investigar técnicas para reducir la carga computacional de modelos multifísicos detallados, especialmente para aplicaciones que requieren ejecución en tiempo real como simulación HIL o implementación de algoritmos MPC.
4. **Modelos estocásticos:** Incorporar incertidumbre paramétrica y variabilidad operativa en los modelos Simscape mediante técnicas como análisis Monte Carlo o simulación basada en escenarios, para desarrollar estrategias de optimización energética robustas ante condiciones variables.

## CONCLUSIONES

La presente revisión sistemática ha permitido identificar y analizar modelos de simulación basados en MATLAB-Simulink-Simscape desarrollados para optimizar la eficiencia energética en sistemas de propulsión electrificados.

Los resultados muestran una clara tendencia hacia modelos multifísicos que integran simultáneamente componentes eléctricos, mecánicos y térmicos mediante las bibliotecas especializadas de Simscape, permitiendo capturar interacciones entre dominios físicos que resultan críticas para la optimización energética global.

Se ha constatado que las estrategias de optimización más efectivas combinan técnicas de control predictivo con análisis paramétrico sistemático, aprovechando la estructura jerárquica de Simulink y las capacidades multifísicas de Simscape para identificar configuraciones óptimas. Los enfoques basados en aprendizaje por refuerzo emergen como prometedores para aplicaciones donde no se dispone de información previa sobre los perfiles operativos.

Las metodologías de validación más robustas implementan un enfoque progresivo que comienza con la verificación de componentes individuales antes de validar el sistema completo, combinando datos experimentales con técnicas de análisis de sensibilidad para identificar parámetros críticos que requieren calibración precisa.

A pesar de los avances significativos, persisten oportunidades para mejorar los modelos Simscape existentes mediante la incorporación de efectos a largo plazo, la integración con plataformas de gemelos digitales y la implementación de técnicas avanzadas para reducir la carga computacional sin comprometer la fidelidad física.



## FINANCIAMIENTO

No monetario

## CONFLICTO DE INTERÉS

No existe conflicto de interés con personas o instituciones ligadas a la investigación.

## AGRADECIMIENTOS

A UNIANDES.

## REFERENCIAS

- Ehsani, M., Gao, Y., & Emadi, A. (2023). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: Fundamentals, theory, and design*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003288197>
- García-Sánchez, J. A., Jażdżewska, J., & Meier, O. (2023). Electric vehicle battery models in simulation environments: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, 58, Article 106450. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106450>
- Guo, J., He, H., & Sun, C. (2023). Digital twin for electric vehicle powertrains: A review on modeling, simulation, and applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72(9), 9724–9739. <https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3271903>
- Hayes, J. G., & Thompson, K. (2023). Modeling and simulation of electrified powertrains: A comprehensive review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 9(1), 467–485. <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3185492>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Interamericana. <https://doi.org/10.17993/CcyLI.2018.15>
- Kang, D., Lim, O., & Jung, J. (2022). Simscape-based thermal management system modeling for battery electric vehicles: A comparison of cooling strategies. *Applied Thermal Engineering*, 210, Article 118359. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118359>
- Kim, J., & Park, S. (2022). Energy management strategy for parallel hybrid electric vehicles using predictive terrain information. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(5), 4731–4742. <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3143257>
- Kumar, P., Chakraborty, S., & Banerjee, S. (2023). Model-based design approach for electric vehicle controls: From simulation to prototype. *IEEE Access*, 11, 57890–57905. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3287574>
- Li, W., Xia, Y., & Zhou, K. (2024). Reinforcement learning for energy optimization in electrified vehicles: Simulation results and real-world validation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 32(1), 214–228. <https://doi.org/10.1109/TCST.2023.3245879>
- Liu, K., & Peng, H. (2022). *Optimal control of electrified vehicles: Theory and applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-86431-2>
- Liu, X., Wang, R., Zhang, Y., & Sun, Z. (2024). Adaptive energy management for series-parallel hybrid electric vehicles based on driving pattern recognition and terrain information. *Energy*, 275, Article 127368. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127368>
- Martínez, A., & Johnson, B. (2024). Thermal-electrical coupled modeling of battery electric vehicles under extreme conditions. *Journal of Power Sources*, 550, Article 232468. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.232468>
- Miller, J. M., & Johnson, V. H. (2024). Validation methodologies for electrified vehicle simulation models: Current practices and future directions. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 12(2), 213–237. <https://doi.org/10.4271/05-12-02-0012>



- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., & Hoffmann, T. C. (2022). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, Article n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Rajamani, R. (2023). *Vehicle dynamics and control* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90475-0>
- Rashid, M. I. M., Hassan, M. H., & Sulaiman, S. A. (2022). Multi-domain simulation and optimization of hybrid electric powertrains: A Simscape-based integrated approach. *Energy Conversion and Management*, 254, Article 115232. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115232>
- Thaler, S., & Watzenig, D. (2022). *Automotive systems and software engineering: State of the art and future trends*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-12157-0>
- Wang, J., Zhang, L., & Chen, F. (2024). Advanced modeling techniques for electric vehicle powertrains using Matlab/Simulink. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 120, Article 103793. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103793>
- Zhang, P., Yan, F., & Du, C. (2022). A unified framework for energy management in hybrid and electric vehicles using MATLAB/Simulink. *Applied Energy*, 328, Article 120090. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120090>

**Derechos de autor: 2025 Por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>