

Comparación de las curvas de funcionamiento del motor generador del Toyota Highlander.**Comparison of operating curves of the Motor Generator of the Toyota Highlander.***John Morales, Jimmy Gallegos, Fernando Pusda & Hugo Salazar.***PUNTO CIENCIA.****julio - diciembre, V°6 - N°2; 2025****Recibido:** 26-08-2025**Aceptado:** 27-08-2025**Publicado:** 30-12-2025**PAIS**

- Ecuador, Sangolquí
- Ecuador, Sangolquí
- Ecuador, Sangolquí
- Ecuador, Sangolquí

INSTITUCION

- Universidad de las Fuerzas Armadas
- Universidad de las Fuerzas Armadas
- Universidad de las Fuerzas Armadas
- Universidad de las Fuerzas Armadas

CORREO:

- ✉ jsmorales3@espe.edu.ec
- ✉ jwgallegos@espe.edu.ec
- ✉ frpusda@espe.edu.ec
- ✉ hdsalazar1@espe.edu.ec

ORCID:

- 🌐 <https://orcid.org/0009-0005-1381-8201>
- 🌐 <https://orcid.org/0000-0003-3792-0620>
- 🌐 <https://orcid.org/0009-0009-4163-2745>
- 🌐 <https://orcid.org/0009-0005-7246-7018>

FORMATO DE CITA APA.

Morales, J., Gallegos, J., Pusda, F. & Salazar, H. (2025). Comparación de las curvas de funcionamiento del motor generador del Toyota Highlander. *Revista G-ner@ndo*, V°6 (N°2). Pág. 1122 – 1145.

Resumen

El presente trabajo analiza las curvas de funcionamiento del motor-generador del vehículo híbrido Toyota Highlander, con el propósito de caracterizar su desempeño bajo distintas condiciones de operación. Se empleó un variador de frecuencia CFW300 para controlar los parámetros eléctricos y mecánicos de los generadores MG1 y MG2, programados en modos escalar (V/f) y vectorial (VVW). Se registraron datos experimentales de frecuencia, revoluciones por minuto (rpm), voltaje y corriente, tanto en funcionamiento individual como en acoplamiento de los motores, así como en la etapa de regeneración. Los resultados muestran que la relación frecuencia-rpm es lineal y directamente proporcional en ambos generadores, ajustándose a ecuaciones de tendencia de alta precisión. En el caso de la curva frecuencia-voltaje, MG1 y MG2 presentan incrementos proporcionales a partir de 20 Hz, alcanzando valores máximos de 102 V y 80 V, respectivamente, a 60 Hz. Respecto a la corriente, se evidencia que MG2 experimenta picos significativos en el rango de 35–45 Hz, mientras que MG1 muestra un crecimiento sostenido hasta estabilizarse en torno a 15 A. En la etapa de regeneración, la corriente se mantiene entre 1 y 2 A, con variaciones que limitan la extrapolación de un modelo matemático estable. Estos hallazgos confirman que el motor-generador brushless del Toyota Highlander depende de la modulación de voltaje y frecuencia para optimizar su rendimiento. El estudio aporta referencias experimentales útiles para la validación de modelos de simulación y para el diseño de estrategias de control aplicables en sistemas de propulsión híbridos.

Palabras clave: Motores-generadores, Variador de frecuencia, Curvas de funcionamiento, Propulsión eléctrica.

Abstract

The objective of this research was to design innovative didactic strategies using the Minecraft Education Edition platform to strengthen the teaching-learning process in the area of Social Studies for eighth-grade students of Basic Education. The study was conducted at Unidad Educativa Invesciencias, located in Guayaquil, Ecuador, under a mixed methodological approach with a predominance of quantitative analysis. Diagnostic surveys, participant observation, and pretest and posttest evaluations were used to assess the impact of the intervention. The proposal consisted of integrating curricular content into virtual environments designed by the students themselves, who represented historical and social phenomena through the construction of interactive scenarios. The results showed a significant improvement in content comprehension, increased student motivation and participation, and the development of skills such as critical thinking, creativity, and collaboration. It is concluded that Minecraft Education is an effective and motivating educational tool that can be integrated into the school curriculum to enhance the teaching of Social Studies, promoting meaningful, inclusive, and contextualized learning.

Keywords: Minecraft; gamification; social studies; didactic strategies; educational innovation.

Introducción

La movilidad sostenible se ha convertido en una prioridad global, dado que el transporte es uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero. En este contexto, los vehículos híbridos eléctricos (HEV) representan una solución de transición eficaz entre los sistemas tradicionales de combustión interna y la electromovilidad total, aportando mejoras en eficiencia energética, reducción de emisiones contaminantes y versatilidad operativa (Chen, Li, Wang et al, 2025). Dentro de estas arquitecturas, los motores-generadores (MGU)—específicamente MG1 y MG2 en el sistema Hybrid Synergy Drive (HSD)—desempeñan un rol crítico, operando tanto como unidades de generación eléctrica como de propulsión mecánica. A pesar de su importancia, la caracterización detallada y experimental de su desempeño bajo diferentes condiciones operativas es aún limitada en la literatura (Singh & Wazeed, 2023; Gómez-Barroso, Makazaga & Zulueta, 2024).

El Toyota Highlander Hybrid 2010 utiliza un sistema HSD conformado por dos máquinas síncronas de imanes permanentes (PMSM), emparejadas con una transmisión epicicloidal que distribuye potencia entre el motor térmico y los MGUs sin requerir una caja de cambios tradicional (Chen X., Jiang, Zheng, Tang & Chen, 2020). Si bien estudios como el de Staunton (2004) proporcionan perspectivas sobre el diseño óptimo de motores eléctricos para aplicaciones híbridas, y trabajos como el de Liu y Peng (2005) abordan la estrategia de control de energía en sistemas híbridos, la evidencia experimental específica de MG1 y MG2 bajo control de frecuencia y modos de regeneración sigue siendo escasa.

El objetivo de este estudio es caracterizar experimentalmente las curvas de rendimiento de los motores-generadores MG1 y MG2 del vehículo híbrido Toyota Highlander 2010, mediante la aplicación controlada de modulación de frecuencia y voltaje usando un variador de frecuencia CFW300 configurado en modos escalar (V/f) y vectorial (VFW). Se registraron datos de frecuencia, revoluciones por minuto (rpm), voltaje y corriente en operaciones individuales,

acopladas y regenerativas. Esta metodología permitió identificar relaciones lineales entre frecuencia y rpm, incrementos proporcionales de voltaje (hasta 102 V en MG1 y 80 V en MG2), picos de corriente en MG2 entre 35–45 Hz, y un comportamiento irregular de corriente en regeneración (1–2 A), lo que impide el desarrollo de un modelo matemático robusto. Estos resultados resaltan la dependencia del rendimiento del MGU en la modulación precisa de voltaje y frecuencia, así como la necesidad de estrategias de control avanzadas para evitar picos de corriente perjudiciales en el sistema (Lee, Kim & Jung, 2021).

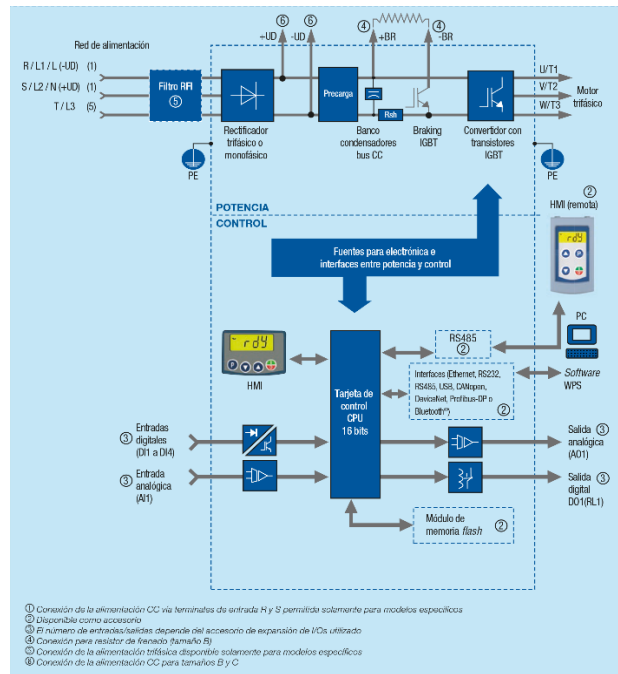
La contribución principal de este trabajo consiste en proveer referencias experimentales verificadas sobre el comportamiento real de MG1 y MG2, lo que fortalece la base para validar modelos de simulación y desarrollar algoritmos de control más eficientes en sistemas híbridos. Además, este análisis facilita la comprensión del impacto del control escalar y vectorial en la estabilidad operativa de los MGUs.

Métodos y Materiales

Para el control de los motores MG1 y MG2 se utilizó un convertidor de frecuencia CFW300, dispositivo de alto rendimiento diseñado para la regulación de velocidad y torque en motores de inducción trifásicos. Este equipo permite trabajar en dos modos de operación: vectorial (VFW), que optimiza el desempeño dinámico mediante un control avanzado de velocidad, y escalar (V/f), que ajusta la relación voltaje–frecuencia y resulta más adecuado para aplicaciones de menor complejidad o de tipo multimotor. En el presente estudio, la programación de los parámetros se realizó priorizando la estabilidad de la señal y la reducción de pérdidas energéticas, aprovechando la capacidad del modo escalar de aproximar la curva V/f a una relación cuadrática ajustada a las condiciones de carga (Weg, 2025). Esta configuración permitió caracterizar con precisión la respuesta del sistema moto–generador en diferentes frecuencias de operación, asegurando la obtención de datos representativos para el análisis comparativo.

Figura 1.

Diagrama de bloques del convertidor de frecuencia CFW300. Adaptado de WEG (2025).



El variador de frecuencia CFW300 dispone de múltiples parámetros de configuración que permiten adaptar su desempeño a diferentes aplicaciones industriales. No obstante, para el presente estudio se seleccionaron únicamente aquellos parámetros más relevantes para garantizar el correcto funcionamiento de los moto–generadores MG1 y MG2. Estos ajustes incluyeron la programación de tensiones de salida máxima e intermedia, con el fin de establecer condiciones de operación estables y representativas en el análisis experimental.

En la programación del variador de frecuencia CFW300 se consideraron los parámetros P0142 (tensión de salida máxima) y P0143 (tensión de salida intermedia) debido a que son determinantes en la configuración del perfil de tensión aplicado a los motores MG1 y MG2. Estos parámetros permiten establecer el rango operativo de voltaje en función de la frecuencia, lo que resulta esencial para garantizar un suministro eléctrico estable y representativo en condiciones de laboratorio.

El ajuste de P0142 definió el límite superior de tensión que el convertidor entrega al moto–generador, evitando sobrecargas que pudieran comprometer la integridad de los devanados o el desempeño del sistema. Por su parte, P0143 permitió establecer un valor intermedio de referencia, asegurando que la curva V/f se adaptara a una relación cuadrática adecuada para la aplicación experimental.

La elección de estos parámetros responde a dos objetivos principales:

1. Seguridad y protección del sistema: limitar la tensión máxima dentro de valores seguros de operación.
2. Representatividad experimental: obtener curvas de frecuencia, voltaje y corriente que reflejen de manera precisa el comportamiento real del moto–generador en el Toyota Highlander, facilitando su análisis y posterior modelado.

Tabla 1.

Programación de los parámetros principales del módulo de control para MG1, MG2 y el sistema moto–generador completo

Parámetro	Descripción	MG1	MG2	MG1 + MG2
P0142	Tensión de salida máxima (%)	52 %	68 %	68,5 %
P0143	Tensión de salida intermedia (%)	28 %	37 %	36,5 %

Nota. Adaptado de WEG (2022).

La Tabla 1 resume la programación de los parámetros principales del módulo de control empleados en la experimentación. Se consideran dos parámetros fundamentales: P0142, correspondiente a la tensión de salida máxima, y P0143, asociado a la tensión de salida intermedia. En el caso de MG1, la tensión máxima se fijó en 52 %, mientras que para MG2 se estableció en 68 %. Cuando ambos generadores se configuraron de manera conjunta, el valor resultante fue de 68,5 %. De manera similar, la tensión intermedia presentó valores de 28 % en MG1, 37 % en MG2 y 36,5 % en el sistema acoplado.

Estos ajustes garantizan condiciones de operación estables para los moto–generadores y constituyen la base para la obtención de las curvas de frecuencia, voltaje, corriente y revoluciones por minuto analizadas posteriormente.

Análisis de Resultados

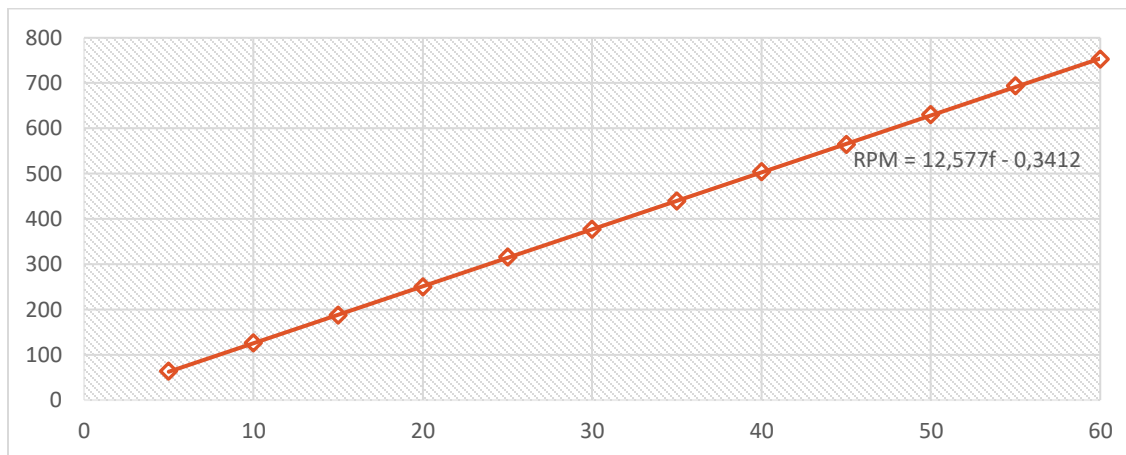
Tabla 2.

Datos de frecuencia vs. voltaje en MG2

Frecuencia (Hz)	RPM MG2
5	63,7
10	125,8
15	187,6
20	249,6
25	315,5
30	377,3
35	438,9
40	503
45	563,8
50	630,6
55	693,5
60	753,0

Nota. Datos experimentales obtenidos para el moto–generador 2 (MG2).

La Tabla 2 muestra la relación entre la frecuencia de operación y las revoluciones por minuto (RPM) obtenidas en el moto–generador 2 (MG2). A medida que la frecuencia aumenta de 5 a 60 Hz, las RPM se incrementan de manera proporcional, pasando de 63,7 rpm a 753 rpm. Este comportamiento evidencia una relación directa entre ambas variables, que se refleja en la tendencia representada en la Figura 2.

Figura 2.
Tendencia de frecuencia vs RPM de MG2.


La curva frecuencia–RPM se ajusta a la ecuación lineal $RPM = 12,577f - 0,3412$, en la que el término constante puede considerarse despreciable, simplificándose la expresión a $RPM = 12,577f$. Este resultado confirma que la frecuencia es el parámetro fundamental para el control de la velocidad del generador, en concordancia con la teoría de funcionamiento de máquinas síncronas de imanes permanentes.

Tabla 3
Datos de frecuencia vs. voltaje en MG2

Frecuencia (Hz)	Voltaje MG2 (V)
5	22,2
10	22,4
15	24,3
20	29,0
25	37,7
30	47,0
35	56,6
40	63,5

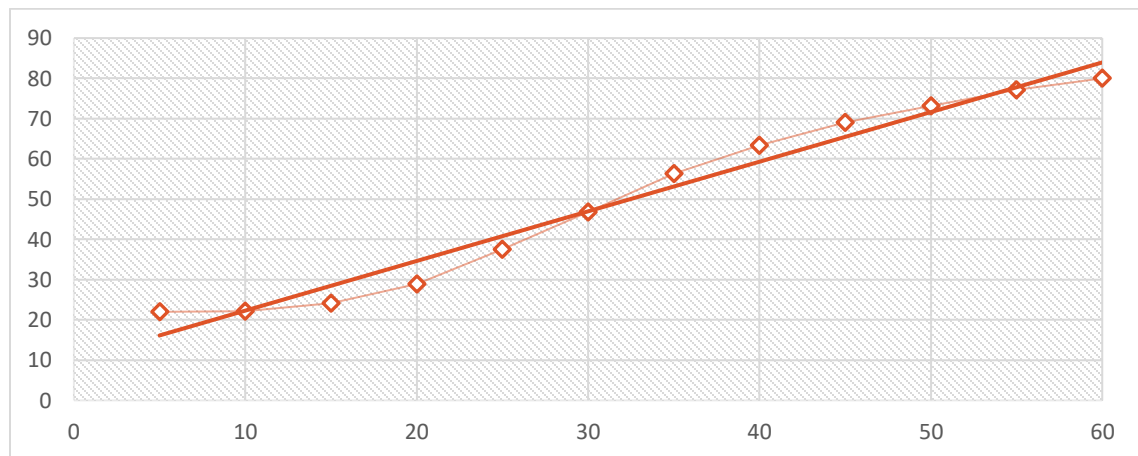
Frecuencia (Hz)	Voltaje MG2 (V)
45	68,9
50	73,3
55	77,3
60	80,0

Nota. Datos experimentales obtenidos para el moto–generador 2 (MG2).

La Tabla 3 y la Figura 3 muestran la relación entre la frecuencia de operación y el voltaje en el moto–generador 2 (MG2). Se observa que el sistema requiere un valor mínimo de aproximadamente 20 V para garantizar su funcionamiento en frecuencias bajas, particularmente hasta los 15 Hz. A partir de este punto, el voltaje experimenta un crecimiento sostenido, alcanzando 37,7 V a 25 Hz y 63,5 V a 40 Hz.

Figura 3.

Tendencia de frecuencia vs voltaje de MG2.



El comportamiento se mantiene casi lineal entre los 15 y 50 Hz, con una tendencia directamente proporcional entre ambas variables. No obstante, a partir de los 50 Hz, la pendiente de la curva disminuye, lo que indica una tendencia a la saturación, hasta alcanzar un valor máximo de 80 V a 60 Hz.

Este resultado evidencia que, si bien MG2 responde de forma proporcional al incremento de frecuencia, su capacidad de generación de tensión presenta un límite operativo. Este patrón es consistente con el diseño de máquinas síncronas de imanes permanentes, en las cuales la eficiencia de conversión disminuye en rangos superiores de frecuencia.

Tabla 4.

Datos de frecuencia vs. voltaje en MG1

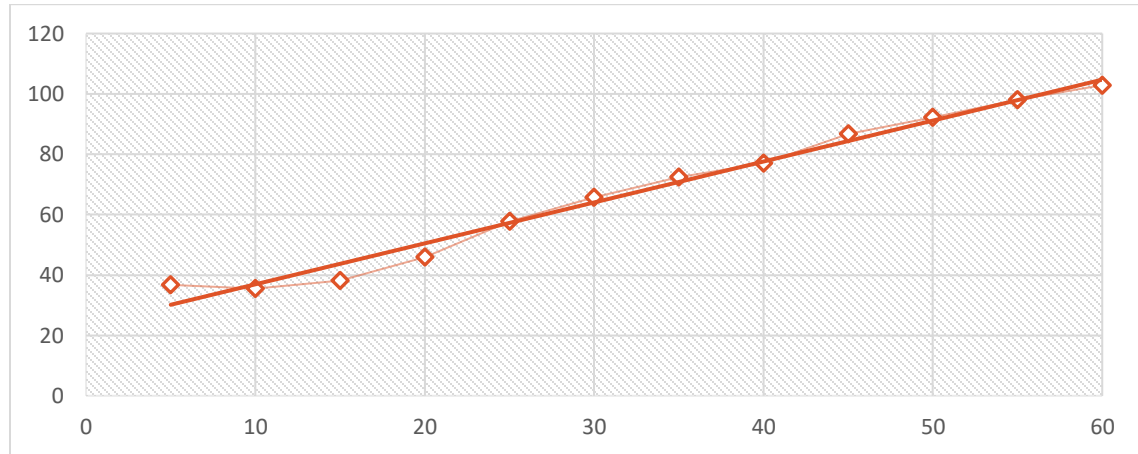
Frecuencia (Hz)	Voltaje MG1 (V)
5	36,9
10	35,7
15	38,3
20	46,0
25	58,0
30	66,0
35	72,6
40	77,2
45	86,9
50	92,1
55	98,0
60	103,0

Nota. Datos experimentales obtenidos para el moto–generador 1 (MG1).

La *Tabla 4* y la *Figura 4* muestran la relación entre la frecuencia aplicada y el voltaje medido en el moto–generador 1 (MG1). A diferencia de MG2, este generador requiere un voltaje mínimo inicial más elevado, de 36,7 V a 5 Hz, lo que refleja su mayor demanda energética en condiciones de arranque.

Figura 4.

Tendencia de frecuencia vs voltaje de MG1.



En el intervalo de 5 a 15 Hz, los valores permanecen en un rango reducido, alrededor de los 35–38 V, asegurando la excitación inicial. A partir de los 20 Hz, se observa un incremento progresivo del voltaje, alcanzando 46 V y posteriormente 57,8 V a 25 Hz. Entre los 25 y 60 Hz, la relación se mantiene prácticamente lineal, llegando a un valor máximo de 102,9 V.

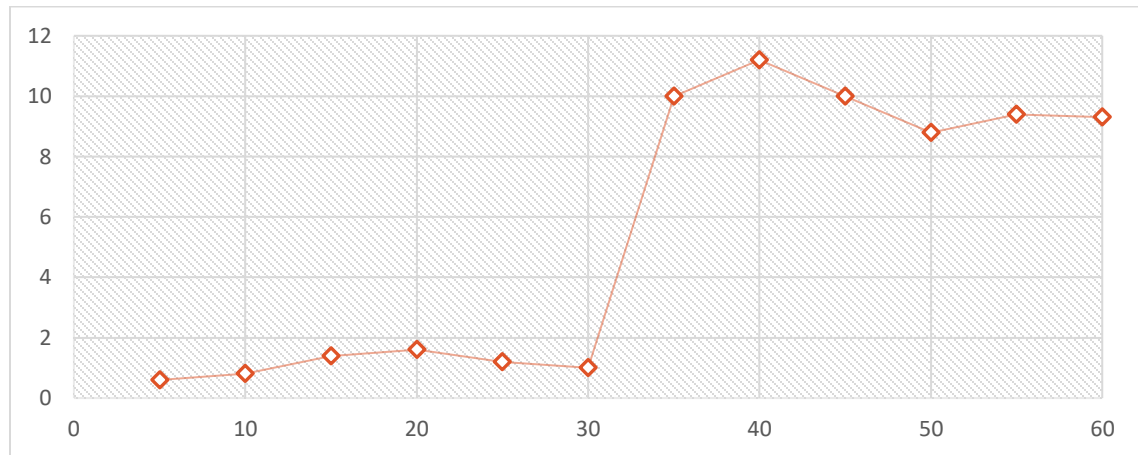
Este comportamiento indica que MG1 posee una capacidad de generación de tensión superior a la de MG2, lo cual lo convierte en un componente esencial para el sistema híbrido, ya que asegura mayor robustez en la conversión energética. El carácter lineal de la curva en el rango medio-alto de frecuencias refuerza la predictibilidad del sistema, lo que resulta fundamental para la programación de estrategias de control en vehículos híbridos.

Tabla 5.*Datos de frecuencia vs. corriente en MG2*

Frecuencia (Hz)	Corriente MG2 (A)
5	0,7
10	0,9
15	1,5
20	1,8
25	1,3
30	1,0
35	10,0
40	11,1
45	10,0
50	8,7
55	9,5
60	9,4

Nota. Datos experimentales obtenidos para el moto–generador 2 (MG2).

La *Tabla 5* y la *Figura 5* muestran la variación de corriente en el moto–generador 2 (MG2) en función de la frecuencia. En la etapa inicial, correspondiente al rango de 5 a 30 Hz, las corrientes de arranque se mantienen en niveles bajos, con valores máximos de apenas 1,8 A, lo que indica un comportamiento eficiente y controlado en bajas frecuencias.

Figura 5.*Tendencia de frecuencia vs corriente de MG2*

No obstante, a partir de los 35 Hz se evidencia un incremento abrupto, alcanzando un máximo de 11,1 A a 40 Hz, lo que representa un aumento cercano al 600 % en comparación con las condiciones iniciales. Posteriormente, la corriente experimenta una ligera disminución hasta 8,7 A a 50 Hz, estabilizándose alrededor de 9,3 A en los valores más altos de frecuencia (55–60 Hz).

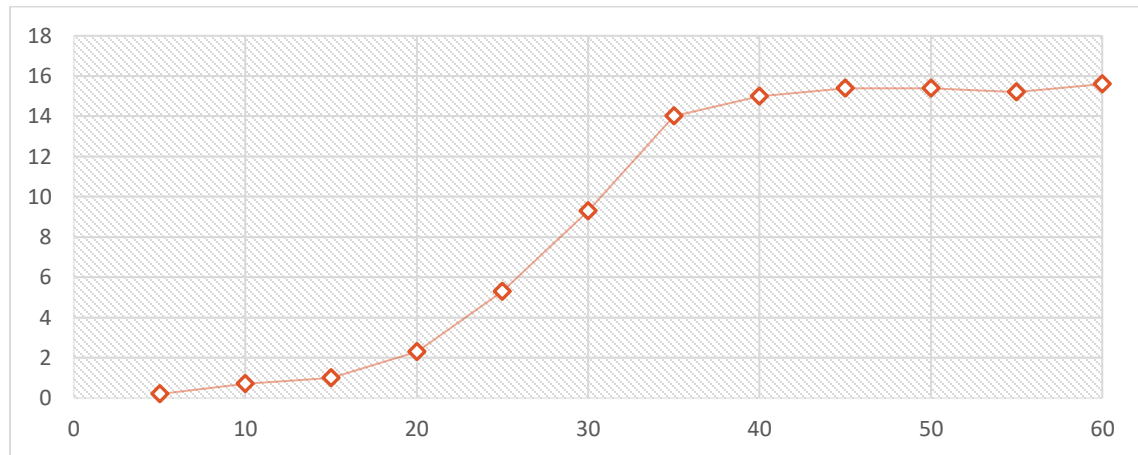
Este comportamiento no lineal refleja una zona crítica de consumo energético entre 35 y 45 Hz, lo que podría representar un desafío en términos de eficiencia y durabilidad del sistema. Dicho patrón sugiere la necesidad de implementar estrategias de control que limiten los picos de corriente, con el fin de proteger los componentes electrónicos y optimizar el rendimiento del generador en aplicaciones híbridas.

Tabla 6.*Datos de frecuencia vs. corriente en MG1*

Frecuencia (Hz)	Corriente MG1 (A)
5	0,2
10	0,7
15	1,0
20	2,3
25	5,3
30	9,3
35	14,0
40	15,0
45	15,4
50	15,4
55	15,2
60	15,6

La *Tabla 6* y la *Figura 6* muestran la relación entre la frecuencia de operación y la corriente eléctrica en el moto–generador 1 (MG1). En el rango inicial, de 5 a 20 Hz, se observa un incremento gradual de la corriente, pasando de 0,2 A a 2,3 A, lo cual refleja un comportamiento estable en condiciones de arranque.

A partir de los 25 Hz, la corriente comienza a aumentar de manera más acelerada, alcanzando 5,3 A, y posteriormente llega a 9,3 A a 30 Hz. Entre los 35 y 45 Hz, la corriente crece proporcionalmente hasta alcanzar un máximo de 15,4 A, manteniéndose prácticamente constante en frecuencias superiores.

Figura 6.*Tendencia de frecuencia vs corriente de MG1*

Este comportamiento indica que MG1 presenta una demanda de corriente progresiva y predecible, en contraste con MG2, que mostró picos abruptos. La estabilización en torno a 15 A a partir de los 45 Hz sugiere que MG1 está diseñado para trabajar en rangos de corriente más elevados de manera sostenida, garantizando robustez y confiabilidad en el sistema híbrido.

Tabla 7.*Datos de frecuencia vs. RPM de funcionamiento*

Frecuencia (Hz)	Corriente MG1 (A)
5	0,2
10	0,7
15	1,0
20	2,3
25	5,3
30	9,3
35	14,0
40	15,0
45	15,4
50	15,4

Frecuencia (Hz)	Corriente MG1 (A)
55	15,2
60	15,6

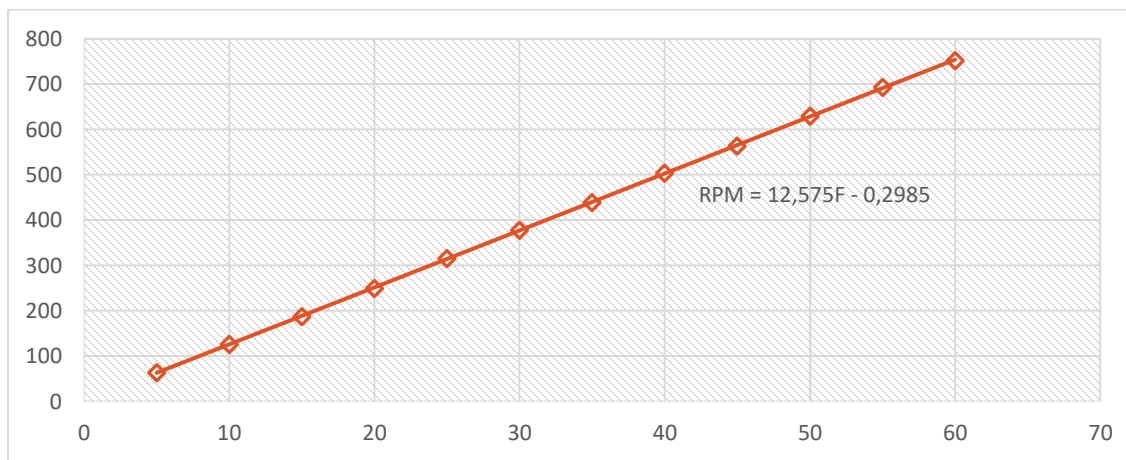
Nota. Datos experimentales obtenidos para el moto–generador 1 (MG1).

La *Tabla 7* muestra la relación entre la frecuencia de operación y la corriente eléctrica en el moto–generador 1 (MG1). En el rango inicial, de 5 a 20 Hz, se observa un incremento gradual de la corriente, pasando de 0,2 A a 2,3 A, lo cual refleja un comportamiento estable en condiciones de arranque.

A partir de los 25 Hz, la corriente comienza a aumentar de manera más acelerada, alcanzando 5,3 A, y posteriormente llega a 9,3 A a 30 Hz. Entre los 35 y 45 Hz, la corriente crece proporcionalmente hasta alcanzar un máximo de 15,4 A, manteniéndose prácticamente constante en frecuencias superiores.

Figura 7.

Tendencia de frecuencia vs RPM de funcionamiento.



Este comportamiento indica que MG1 presenta una demanda de corriente progresiva y predecible, en contraste con MG2, que mostró picos abruptos. La estabilización en torno a 15 A a partir de los 45 Hz sugiere que MG1 está diseñado para trabajar en rangos de corriente más elevados de manera sostenida, garantizando robustez y confiabilidad en el sistema híbrido.

Tabla 8.*Datos de frecuencia vs. voltaje de funcionamiento fase–fase*

Frecuencia (Hz)	Voltaje de funcionamiento fase–fase (V)
5	10,8
10	12,7
15	16,3
20	20,3
25	24,2
30	30,2
35	35,9
40	39,6
45	42,4
50	45,5
55	48,7
60	51,6

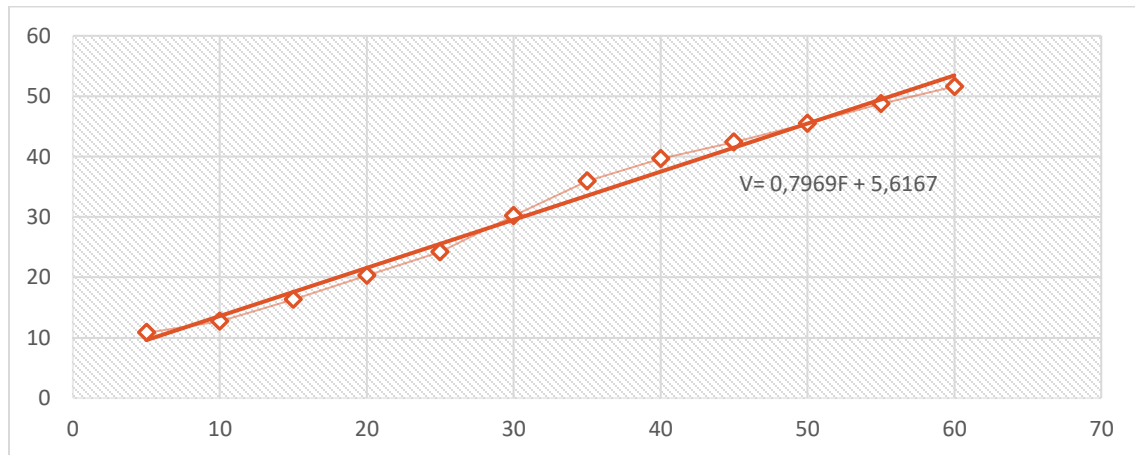
Nota. Datos experimentales de voltaje fase–fase en el sistema moto–generador.

La *Tabla 8* y la *Figura 8* presentan la relación entre la frecuencia aplicada y el voltaje de funcionamiento fase–fase en el sistema moto–generador. Se observa una tendencia directamente proporcional, en la que el voltaje aumenta gradualmente conforme se incrementa la frecuencia.

En condiciones de baja frecuencia (5 Hz), el voltaje inicial registrado es de 10,8 V, suficiente para iniciar el funcionamiento del sistema. A medida que la frecuencia aumenta, se produce un crecimiento progresivo del voltaje, alcanzando 30,2 V a 30 Hz y llegando a un máximo de 51,6 V a 60 Hz.

Figura 8.

Tendencia de frecuencia vs voltaje de funcionamiento fase-fase.



El ajuste matemático de la curva arroja la ecuación $V = 0,7969F + 5,6167$, lo que confirma una relación lineal con pendiente positiva. Este resultado indica que el voltaje generado se encuentra directamente ligado a la modulación de frecuencia, validando la capacidad del convertidor de frecuencia para regular de forma precisa la tensión entregada al motor.

En consecuencia, el análisis sugiere que la operación del sistema moto–generador se rige por una proporcionalidad estable entre voltaje y frecuencia, lo cual resulta fundamental para garantizar la eficiencia y confiabilidad en aplicaciones de propulsión híbrida.

Tabla 9.*Datos de frecuencia vs. RPM de regeneración*

Frecuencia (Hz)	RPM de regeneración
5	19
10	37
15	55
20	74
25	94
30	115
35	134
40	154
45	176
50	195
55	214
60	235

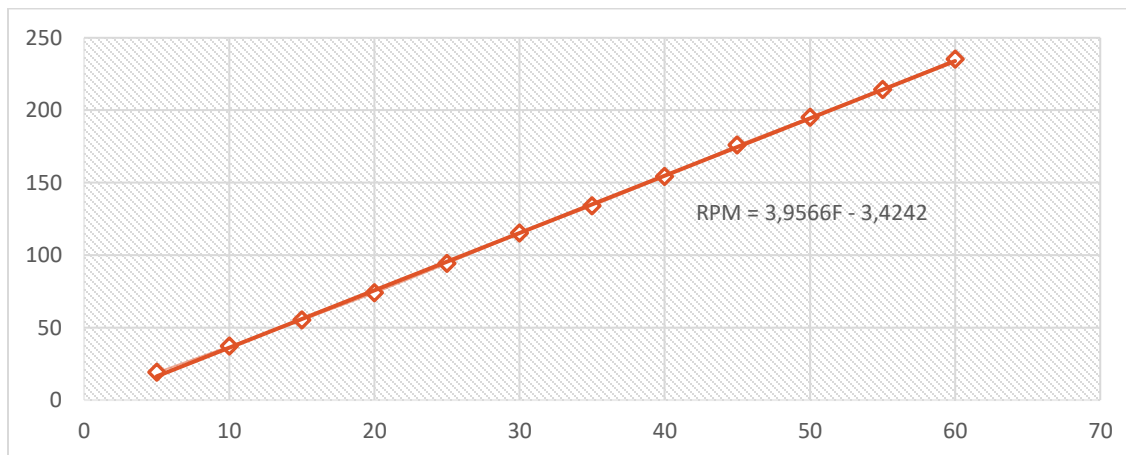
Nota. Datos experimentales de la etapa de regeneración en el moto–generador 2 (MG2).

La *Tabla* y la *Figura 9* muestran la relación entre la frecuencia aplicada y las revoluciones por minuto (RPM) durante la etapa de regeneración del moto–generador 2 (MG2). Los resultados evidencian una relación directamente proporcional, con un incremento progresivo de la velocidad a medida que se eleva la frecuencia: desde 19 rpm a 5 Hz hasta 235 rpm a 60 Hz.

El ajuste de tendencia corresponde a la ecuación $RPM = 3,9566F - 3,4242$, la cual refleja un comportamiento lineal, aunque con una pendiente mucho menor respecto a la observada en la etapa de funcionamiento normal de MG2. Esta diferencia indica una desmultiplicación significativa en el régimen de regeneración, lo que se traduce en menores velocidades para una misma frecuencia aplicada.

Figura 9.

Tendencia de frecuencia vs RPM de regeneración.



Este comportamiento es consistente con el principio de la regeneración en sistemas híbridos, donde parte de la energía cinética se convierte en energía eléctrica, limitando las RPM como consecuencia del proceso de conversión. Los resultados confirman que, aunque la relación frecuencia–RPM se mantiene proporcional, la eficiencia en el modo regenerativo es considerablemente inferior a la del modo de tracción.

Tabla 10.

Datos de frecuencia vs. corriente de regeneración

Frecuencia (Hz)	Corriente de regeneración (A)
5	1,0
10	1,3
15	1,3
20	1,9
25	1,8
30	1,9
35	1,8

Frecuencia (Hz)	Corriente de regeneración (A)
40	1,2
45	1,3
50	1,8
55	1,5
60	1,9

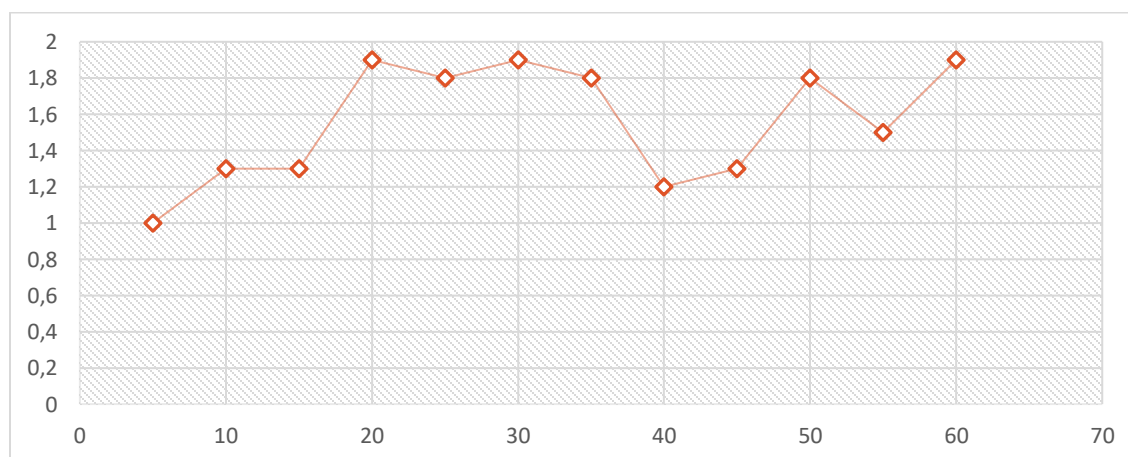
Nota. Datos experimentales de la etapa de regeneración en el moto–generador 2 (MG2).

La *Tabla* y la *Figura 10* presentan la variación de la corriente de regeneración en el moto–generador 2 (MG2) en función de la frecuencia aplicada. Se observa que los valores de corriente se mantienen en un rango reducido, entre 1 y 2 A, a lo largo de todo el intervalo analizado (5–60 Hz).

Aunque existen ligeras fluctuaciones —por ejemplo, 1,9 A a 20 Hz y 1,2 A a 40 Hz—, no se identifica una tendencia lineal ni un comportamiento claramente definido que permita extrapolar un modelo matemático estable. Esta irregularidad indica que el proceso de regeneración, en este caso, presenta un rendimiento limitado y variable, lo cual puede deberse a pérdidas energéticas asociadas a la conversión de energía mecánica a eléctrica.

Figura 10.

Tendencia de frecuencia vs corriente de regeneración.



En consecuencia, los resultados sugieren que, aunque el sistema es capaz de generar corriente en el modo regenerativo, la magnitud y estabilidad de dicha corriente no resultan suficientes para caracterizar un patrón robusto de recuperación de energía. Esto plantea la necesidad de explorar configuraciones de control o estrategias de optimización que mejoren la eficiencia en la etapa de regeneración.

Discusión.

Los hallazgos de los generadores de motor MG1 y MG2 del Toyota Highlander demuestran que la frecuencia aplicada tiene una relación lineal y directamente proporcional con las revoluciones por minuto (RPM), con una pendiente aproximada de 12,57. Este descubrimiento se alinea con lo que (Baek & Lee, 2020) reportaron. Ellos hallaron una correlación lineal precisa entre la velocidad de rotación y la frecuencia de excitación de máquinas síncronas de imanes permanentes (PMSG) en vehículos híbridos. Este comportamiento confirma la capacidad de predecir el sistema en condiciones controladas y respalda el empleo de modelos matemáticos simplificados con fines caracterizadores.

En lo que respecta a la relación de voltaje y frecuencia, MG1 llegó a 102.9 V en 60 Hz, mientras que MG2 tuvo un registro de 80 V. Se notó un aumento casi lineal hasta los 50 Hz, y después una tendencia hacia la saturación en frecuencias más altas. Este patrón concuerda con lo que (Singh & Wazeed, 2023) indicaron, señalando que el voltaje útil tiende a estabilizarse en generadores brushless usados en propulsión híbrida debido al impacto de la saturación magnética en el estator. Este resultado confirma que, a pesar de que la modulación de frecuencia eleva el voltaje, hay restricciones inherentes en la máquina que limitan su eficiencia cuando se trabaja con rangos altos.

La conducta de la corriente reveló diferencias significativas entre MG1 y MG2. Se registraron picos bruscos de entre 35 y 45 Hz en MG2, alcanzando un máximo de 11,2 A. Por su

parte, MG1 mostró un aumento gradual hasta que se estabilizó cerca de los 15 A. Estos hallazgos son parcialmente compatibles con lo que (Gómez-Barroso et al., 2024) describieron: observaron picos de corriente en generadores de vehículos híbridos Toyota Prius cuando había cambios en la frecuencia, y atribuyeron estos fenómenos a las transiciones de carga que perjudican la eficiencia. Los autores proponen que el control vectorial avanzado tiene la capacidad de mitigar estas oscilaciones, lo cual representa una vía de progreso para futuras investigaciones sobre el Highlander.

En la fase de regeneración, los resultados revelaron una corriente variable entre 1 y 2 A, sin una tendencia definida que posibilite la creación de un modelo matemático sólido. Asimismo, la curva de frecuencia-RPM mostró una pendiente significativamente inferior a la del modo de tracción, lo cual indica una disminución en la eficiencia de conversión energética.

En términos generales, estos resultados subrayan la relevancia de perfeccionar los algoritmos de control y administración energética en vehículos híbridos. Esto es importante no solamente para mejorar el rendimiento de los moto-generadores bajo condiciones normales de funcionamiento, sino también para aumentar la eficiencia del periodo de regeneración, que en estos sistemas representa hoy en día uno de los mayores retos tecnológicos.

Conclusiones

La caracterización de la conducta mecánica y eléctrica de los moto-generadores MG1 y MG2 del Toyota Highlander en diversas condiciones operativas se logró a través del análisis experimental, teniendo en cuenta parámetros como el voltaje, la frecuencia, la corriente y el régimen de regeneración.

Los resultados confirmaron que la correlación entre frecuencia y RPM es lineal y directamente proporcional, no solo en el funcionamiento individual sino también en el sistema

acoplado. Esto verifica que los modelos matemáticos simplificados se pueden usar para calcular la velocidad a partir de la frecuencia de excitación. Respecto al voltaje, MG1 llegó a un valor máximo de 102,9 V y MG2 de 80 V; exhibió un comportamiento casi lineal hasta los 50 Hz y luego una tendencia a la saturación, lo cual coincide con investigaciones anteriores sobre máquinas síncronas de imanes permanentes.

En cuanto a la conducta de la corriente, MG1 mostró un incremento paulatino y una estabilización en torno a los 15 A. Por su parte, MG2 presentó picos repentinos entre 35 y 45 Hz, llegando hasta 11,2 A. Este descubrimiento subraya la importancia de poner en marcha estrategias de control para disminuir las oscilaciones de corriente con el fin de optimizar la eficacia y fiabilidad del sistema.

Durante el periodo de regeneración, las corrientes se mantuvieron dentro del intervalo de 1 a 2 A, sin una tendencia definida que posibilitara la creación de un modelo sólido. Este hallazgo muestra que la eficiencia del proceso de regeneración es variable y limitada, lo que representa un reto tecnológico para optimizar la recuperación de energía en sistemas híbridos.

Este estudio proporciona datos experimentales que ayudan a validar modelos de simulación y a crear algoritmos de control que se pueden usar en vehículos híbridos. Sin embargo, se admite como restricción que las pruebas se llevaron a cabo en un entorno de laboratorio, sin exponer el sistema a cargas dinámicas que fueran equivalentes a condiciones reales. Se aconseja, con miras al futuro, que se utilicen simulaciones avanzadas en Matlab/Simulink, que se contrasten los resultados con otros modelos híbridos de Toyota y que se indaguen métodos de inteligencia artificial para manejar la energía de manera inteligente.

Referencias bibliográficas

- Chen, Y., Li, C., Wang, W. et al. (2025). The landscape, trends, challenges, and opportunities of sustainable mobility and transport. *npj. Sustain. Mobil. Transp.* 2, 8.
<https://doi.org/10.1038/s44333-025-00026-8>
- Singh, N. K., & Wazeed, S. (2023). Hybrid energy generation system with brushless generators. *Journal of Energy Engineering and Thermodynamics*, 41, 30-38.
<https://doi.org/10.55529/jeet.41.30.38>
- Gómez-Barroso, Á., Makazaga, I. V., & Zulueta, E. (2024). Optimizing hybrid electric vehicle performance: a detailed overview of energy management strategies. *Energies*, 18(1), 10.
<https://doi.org/10.3390/en18010010>
- Chen, X.; Jiang, J.; Zheng, L.; Tang, H.; Chen, X. (2020). Study and Analysis of a Multi-Mode Power Split Hybrid Transmission. *World Electr. Veh. J.*, 11(2), 46,
<https://doi.org/10.3390/wevj11020046>.
- Staunton, R H (2004). PM Motor Parametric Design Analyses for a Hybrid Electric Vehicle Traction Drive Application. Oak Ridge National Laboratory.
<https://doi.org/10.2172/885773>
- Liu, J., Peng, H., & Filipi, Z.S. (2005). Modeling and Analysis of the Toyota Hybrid System.
- Lee, J.-H., Kim, W.-J., & Jung, S.-Y. (2021). Analysis and verification of traction motor iron loss for hybrid electric vehicles based on current source analysis considering inverter switching carrier frequency. *Electronics*, 10(21), 2714.
<https://doi.org/10.3390/electronics10212714>
- Baek, S.-W., & Lee, S. W. (2020). Design Optimization and Experimental Verification of Permanent Magnet Synchronous Motor Used in Electric Compressors in Electric Vehicles. *Applied Sciences*, 10(9), 3235. <https://doi.org/10.3390/app10093235>
- Singh, N. K., & Wazeed, S. (2023). Hybrid Energy Generation System with Brushless Generators. *Journal of Energy Engineering and Thermodynamics*, (41), 30–38.
<https://doi.org/10.55529/jeet.41.30.38>
- WEG, Convertidor de Frecuencia CFW300 – Especificaciones técnicas, WEG, 2025. (Extraído del sitio web oficial).
-