

Generador eólico triboeléctrico optimizado para la generación de energía en Marte: estrategias de implementación

Optimized triboelectric wind generator for energy generation on Mars: implementation strategies

Juan Diego Mendoza Huilca ^{1,a} , Katherine Ellie Koo Saenz ^{2,a} ,
Diego Alberto Reategui Rodriguez ^{1,a} , Rivaldo Carlos Duran-Aquino ^{1,b} 

Filiación institucional

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

² Fundación Espacial Intinauta, Lima, Perú.

Grado académico

^a Estudiante de Ingeniería Mecánica de Fluidos.

^b Egresado de Ingeniería Mecánica de Fluidos.

Recibido: 25-11-24

Aprobado: 30-01-25

Publicado: 05-02-25

RESUMEN

La exploración y posible colonización de Marte presenta el desafío de desarrollar soluciones energéticas que se adapten al entorno único del planeta. En este contexto, los generadores triboeléctricos (TEG) destacan como una opción innovadora al aprovechar las brisas marcianas suaves pero constantes y operar sin partes móviles complejas para producir electricidad en condiciones atmosféricas de baja presión, con un riesgo mínimo de fallas y un mantenimiento reducido. El objetivo de esta investigación fue avanzar en el desarrollo tecnológico de los TEG para su aplicación en entornos extremos. Este estudio identifica áreas adecuadas para la instalación, investiga materiales alternativos que podrían mejorar su rendimiento, propone nuevos accesorios para optimizar su capacidad de producción energética y explora su uso como complemento de fuentes de energía renovable en Marte. La implementación de estos generadores podría tener aplicaciones inmediatas en futuras misiones a Marte y sentar así las bases para el desarrollo de tecnologías energéticas adaptativas en entornos extraterrestres.

Palabras clave: generadores triboeléctricos; Marte; ambiente marciano; energías renovables; integración de tecnologías.

ABSTRACT

The exploration and possible colonization of Mars presents the challenge of developing energy solutions that are adapted to the planet's unique environment. In this context, triboelectric generators (TEGs) stand out as an innovative option by harnessing the soft martian breezes and operating without complex moving parts to produce electricity in low-pressure atmospheric conditions, with minimal risk of failure and reduced maintenance. The objective of this research was to advance the technological development of TEGs for application in extreme environments. This study identifies suitable areas for installation, investigates alternative materials that could improve their performance, proposes new accessories to optimize their energy production capacity, and explores their use as a complement to renewable energy sources on Mars. The implementation of these generators could have immediate applications in future Mars missions and thus lay the groundwork for the development of adaptive energy technologies in extraterrestrial environments.

Keywords: triboelectric generators; Mars; Martian environment; renewable energy; technology integration.

Citar como: Mendoza Huilca, J. D., Koo Saenz K. E., Reategui Rodriguez D. A., y Duran-Aquino R. C. (2025). Generador eólico triboeléctrico optimizado para la generación de energía en Marte: estrategias de implementación. *Revista Peruana de Ingeniería, Arquitectura y Medio Ambiente*, 2(1), 37-48. <https://doi.org/10.37711/repiama.2025.2.1.4>



Introducción

La exploración y colonización de Marte presentan desafíos energéticos sin precedentes, que requieren soluciones innovadoras (Hiremath et al., 2023; Malaya Kumar Biswal & Annavarapu, 2021; Malaya Kumar Biswal & Ramesh Kumar, 2021). Las tecnologías convencionales de producción de energía utilizadas en Marte, como la solar, electromagnética y eólica, enfrentan limitaciones significativas en el entorno marciano debido a una combinación de factores (Seol et al., 2017; Shumaker et al., 2013; Wang & Balog, 2024). Los altos costos de transporte y mantenimiento de los equipos, junto con las condiciones atmosféricas únicas del planeta, representan barreras importantes (Bertels, 2006; Bramanti et al., 2007; Landis et al., 2004). Por ejemplo, las frecuentes tormentas de polvo cubren los paneles solares, reduciendo su eficiencia. Al mismo tiempo, la baja densidad, presión y temperatura de la atmósfera marciana disminuyen drásticamente la capacidad de los generadores electromagnéticos y eólicos para producir suficiente energía (Amo, 2007; Haberle, 2015; Ouroumova et al., 2021; Sharma et al., 2021), sin mencionar que podrían causar fallas en sus sistemas, comprometiendo así el suministro para futuros vehículos de exploración y módulos espaciales.

En este contexto, los generadores triboeléctricos (TEG) destacan como una alternativa prometedora, pues aprovechan los vientos suaves (análogamente a los aerogeneradores de eje vertical), el abundante dióxido de carbono y las bajas presiones (Li et al., 2023; Pozo et al., s. f.), propios de la atmósfera marciana. Además, al considerar factores críticos como los costos de implementación y el tamaño del dispositivo, los TEG ofrecen una solución más viable y eficiente para futuras misiones (Pozo, et al., 2023, mayo). Simulaciones recientes de TEG y nano generadores triboeléctricos (TENG) han demostrado una mejora significativa en la producción de energía bajo condiciones marcianas, con un aumento del 27 % en la diferencia de potencial generado en entornos adaptados a las características atmosféricas de Marte (Kim et al., 2019; Pozo et al., s. f.).

Esta tecnología podría redefinir el panorama energético para la futura exploración y colonización del planeta rojo. Por lo tanto, dada la simplicidad de los diseños de TEG y sus características flexibles, las cuales reducen los requisitos de mantenimiento y mejoran la producción de energía, este proyecto tuvo como objetivo ahondar en el desarrollo tecnológico de los TEG para su aplicación en entornos marcianos al identificar las áreas más adecuadas para su instalación. Además, investigar en materiales alternativos que mejoren su rendimiento y proponer accesorios que optimicen su capacidad de producción energética, para sugerir su uso como complemento de fuentes de energía renovable y contribuir a un suministro energético más eficiente para futuras misiones.

Métodos

Tipo y área de estudio

El presente estudio se realizó con un enfoque cuantitativo de tipo propositivo analítico en un entorno simulado que replica las condiciones de la atmósfera de Marte, específicamente, parámetros de presión atmosférica, velocidad de viento, temperatura y abundancia de CO₂, recogidas de las investigaciones más relevantes en torno a los generadores triboeléctricos y sus aplicaciones energéticas. Todo esto, con el fin de apoyarse en ellas para determinar su viabilidad tecnológica y proponer así el diseño conceptual de un generador triboeléctrico.

La investigación se desarrolló en las instalaciones de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, en Lima (Perú), durante el período de agosto a noviembre de 2024.

Variable e instrumentos de recolección de datos

Para analizar la viabilidad tecnológica de los TEG y sus aplicaciones energéticas en Marte se toma en consideración una serie de variables principales, como la naturaleza del principio de triboelectricidad, la estructura de los TEG, la atmósfera y topografía marciana (presentadas a través de mapas de contorno) y la producción de energía de los TEG, como la variable más relevante (medida a través de voltímetros instalados en los prototipos sometidos a estudio por túneles de viento). Por lo tanto, se presenta:

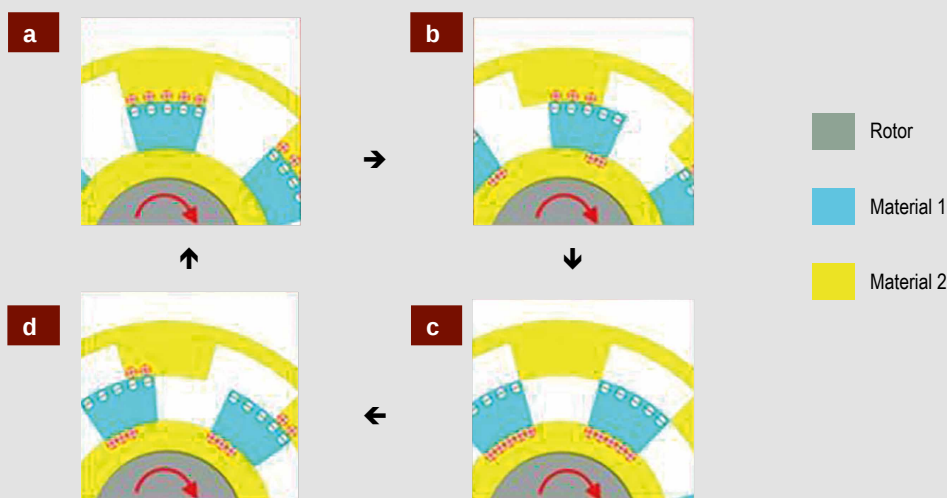
Funcionamiento del Generador Triboeléctrico

El funcionamiento del TEG consta de 3 procedimientos (ver Figura 1):

- Dos materiales con afinidades de cargas eléctricas opuestas entran en contacto o se frotan intercambiando cargas entre sí.
- Al separarse se forma una diferencia de potencial, debido a la acumulación de cargas opuestas, generando un campo eléctrico.
- Este fenómeno se aprovecha para generar energía, ya que las cargas inducidas pueden ser captadas por electrodos, produciendo así una corriente eléctrica.

Figura 1

Principio de funcionamiento del TEG



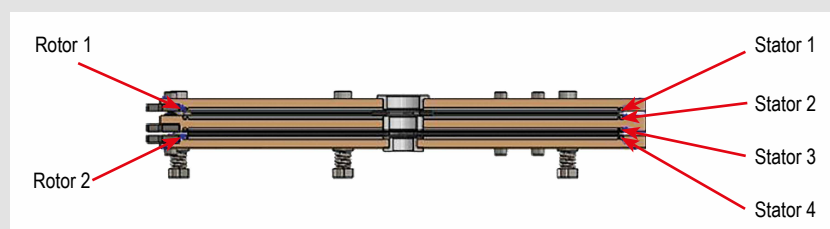
Fuente: Bai et al., (2013).

Estructura del generador triboeléctrico

Para la estructura del TEG se considera el diseño de 4 capas que incluyen la separación de los cuatro estatores y dos rotores. Los álabes del estator, que generan las cargas positivas y negativas, están montados en el soporte. Finalmente, cada generador se conecta a cables a través del punto de salida, para medir la potencia generada por la turbina, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Estructura base del TEG



Fuente: Pozo et al., s. f.

Atmósfera y topografía marciana

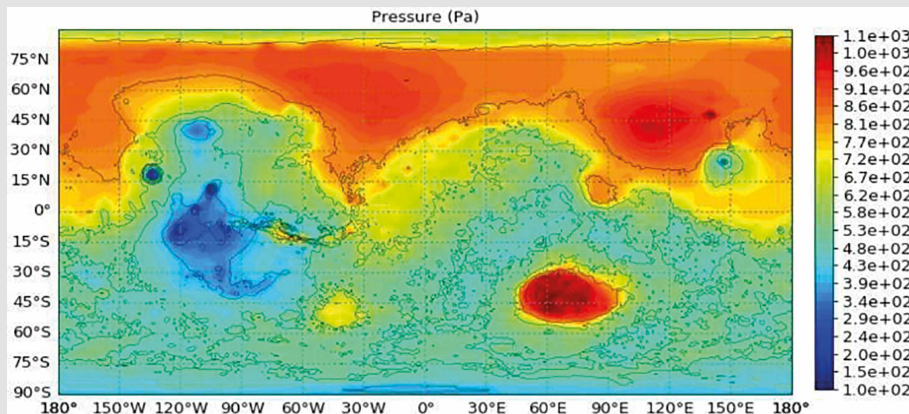
El análisis de las condiciones atmosféricas en Marte es crucial para el desarrollo de tecnologías como los generadores triboeléctricos (TEG), pues la atmósfera de Marte difiere significativamente de la de la Tierra, en términos de densidad, temperatura y presión.

- La atmósfera marciana es significativamente menor en comparación a la de la Tierra, con valores de 0,020 kg m⁻³ en Marte frente a 1,217 kg m⁻³ de la Tierra (Pozo et al., s. f.)
- Dadas las bajas temperaturas de hasta 147 K es imperativo que se tome una correcta selección de materiales que soporten las condiciones extremas a las que estarán expuestos.
- La abundancia de CO₂ por metro cuadrado (95 % de presencia en la atmósfera) tiene influencia en la diferencia de potencial producida por los generadores triboeléctricos, pues, de acuerdo con la ley de Parchen, si bien el voltaje de ruptura incrementa dada la baja densidad, la presencia del CO₂ permite que las cargas triboeléctricas difícilmente puedan disiparse mediante descargas y, en consecuencia, puedan almacenarse para su posterior uso.

Se muestran los niveles de presión, temperatura y abundancia de CO₂ en las siguientes figuras.

Figura 3

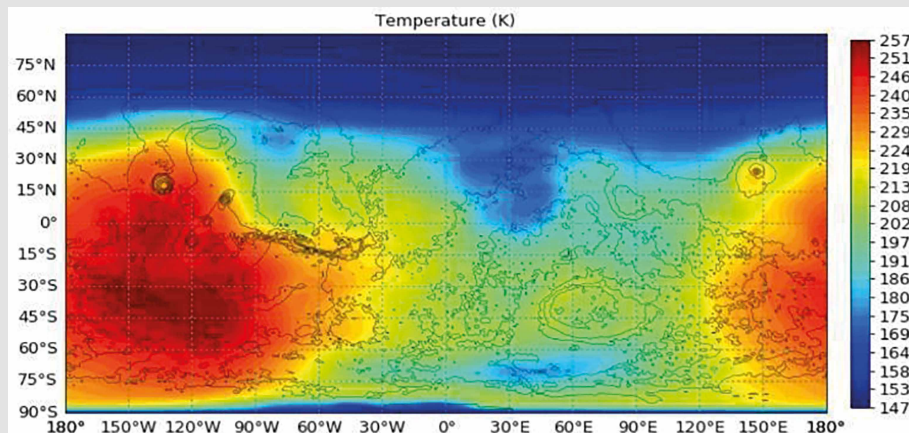
Medida de presión (en pascales) en la superficie de Marte



Fuente: Mars Climate Database: The Web Interface (s. f.).

Figura 4

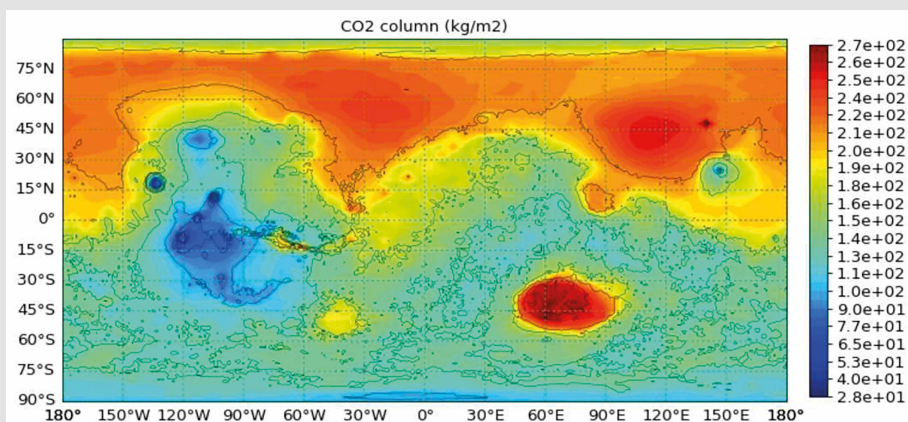
Medida de temperatura (en grados Kelvin) en la superficie de Marte



Fuente: Mars Climate Database: The Web Interface (s. f.).

Figura 5

Medida de abundancia de CO₂ (en kg/m²) en la superficie de Marte

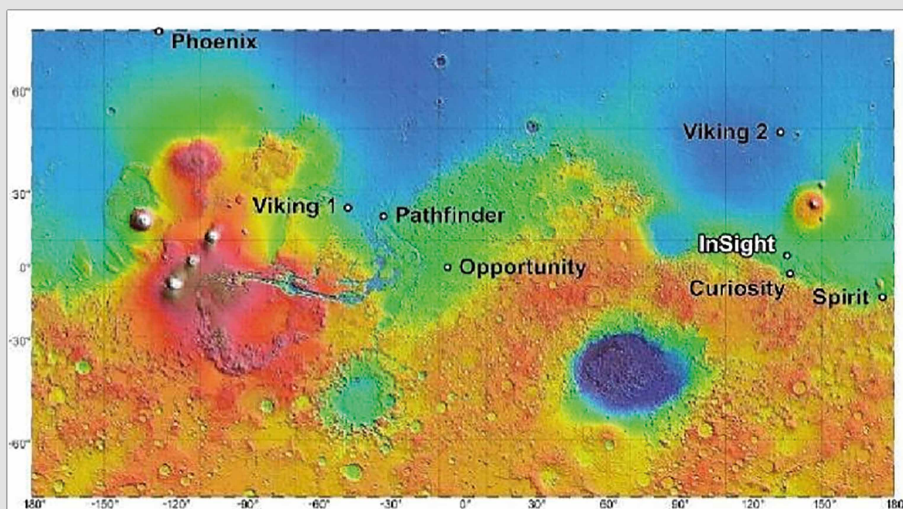


Fuente: Mars Climate Database: The Web Interface (s. f.).

Por otro lado, el estudio de la topografía de Marte permite identificar un espacio óptimo para la instalación del TEG, considerando la velocidad del viento debido a su geografía, como áreas con relieve elevado, tales como crestas y valles, donde los vientos pueden ser más fuertes, debido a la canalización a través del terreno (ver Figura 7). Esta mayor velocidad del viento puede aumentar la eficiencia del TEG, ya que contribuye a un mayor número de revoluciones que producen, asimismo, más diferencia de potencial por un tiempo, tentativamente más prolongado.

Figura 6

Mapa topográfico de las áreas exploradas por los rovers en la superficie de Marte

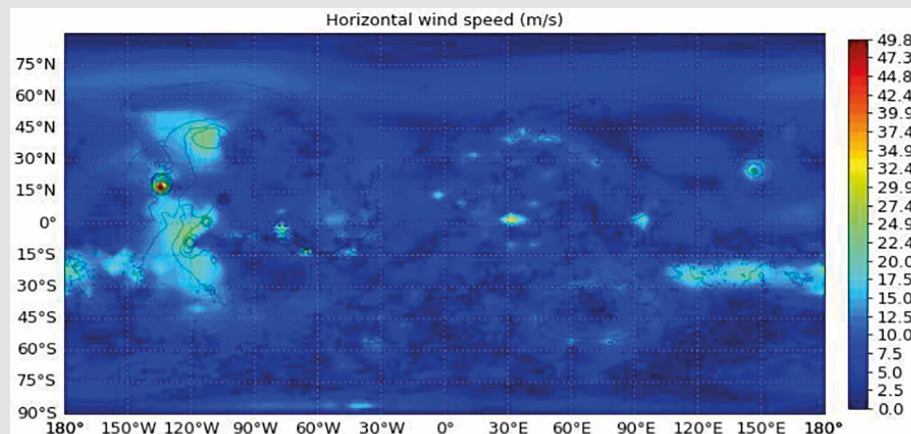


Fuente: Mars Climate Database: The Web Interface (s. f.).

Las elevaciones más bajas se muestran en azul oscuro; las más altas, en blanco. La diferencia entre el verde y el naranja en el código de colores es de aproximadamente 4 kilómetros (2,5 millas) en vertical (National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2013).

Figura 7

Medida de la velocidad horizontal del viento (en m/s) en la superficie de Marte



Fuente: Mars Climate Database: The Web Interface (s. f.).

Cabe señalar que para la construcción de las variables y la presentación de estas se emplearon datos del Mars Climate Database, una fuente reconocida basada en modelos validados con información de misiones espaciales. Ahora, si bien presenta limitaciones locales y de temporalidad, dada la variabilidad de las condiciones atmosféricas, la literatura la complementa con simulaciones en túneles de viento que replican las condiciones marcianas, lo que permitirá contrastar los resultados y fortalecer las conclusiones sobre el desempeño del TEG en contexto.

Técnicas y procedimientos de la recolección de datos

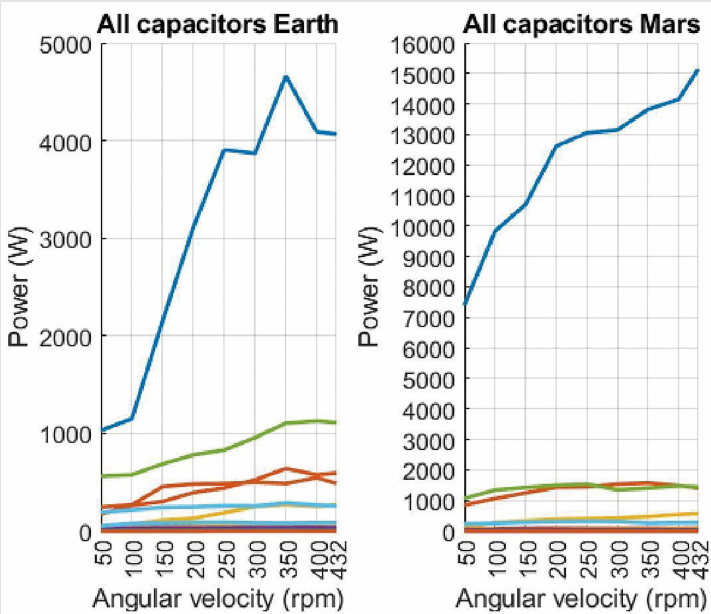
En base a las simulaciones de investigaciones anteriores e información relevante en internet sobre el comportamiento atmosférico de Marte en diferentes niveles, el presente trabajo pretende extrapolar sus resultados para dar cabida a nuevas conclusiones, específicamente en áreas adecuadas para su futura instalación, materiales que mejoren su rendimiento y mejoras sobre los TEG (accesorios), considerando la información presentada en los mapas de contorno y el aprovechamiento de los TEG sobre los mismos. Además de las zonas ya exploradas por los vehículos de exploración.

Análisis de datos

Al someterse a un túnel de viento en el que se presuriza el entorno para simular condiciones de presión marcianas, se obtiene la relación revoluciones por minuto – potencia producida de los generadores triboeléctricos en dos contextos: El primero en las mismas condiciones de la Tierra y el segundo en las condiciones de Marte. Esta comparación nos permite visualizar el potencial del TEG en Marte, donde, debido a la baja densidad atmosférica y la constante presencia de polvo, el TEG puede lograr niveles de generación de energía más altos bajo condiciones que serían menos favorables en la Tierra. Este tratamiento de comparación sostiene que el TEG es viable como fuente de energía renovable, al aprovecharse de las características únicas del entorno marciano

Para la determinación de la zona óptima y selección de materiales en torno a la instalación y diseño del TEG en Marte, respectivamente, se empleó un análisis exploratorio y descriptivo, basado en la identificación cualitativa de factores ambientales claves relacionados con el rendimiento energético y resistencia. A partir de la ley de Parchen, en la que la presión atmosférica es inversamente proporcional a la energía producida por el TEG (diferencia de potencial acumulado), fueron seleccionadas regiones con baja presión, complementadas por condiciones favorables de viento y tormentas de polvo, que potencian el funcionamiento de sistemas, considerando también las temperaturas mínimas para una mayor durabilidad del TEG.

Figura 8
Producción de energía de generador triboeléctrico bajo condiciones terrestres y marcianas



Fuente: First Steps to Develop a Triboelectric Wind Turbine for Mars Exploration (Pozo et al., s. f.).

La elección de zonas estudiadas por las misiones de vehículos de exploración aportó validez empírica al análisis, al apoyarse en datos históricos confiables; Por lo tanto, el tratamiento de datos consistió en comparar estas condiciones entre distintas regiones del planeta, priorizando aquellas donde convergen los factores que maximizan la eficiencia triboeléctrica. Aunque el enfoque no recurre explícitamente a modelamientos matemáticos complejos, se fundamentan en una lógica de razonamiento cualitativo orientada a la optimización de aprovechamiento energético en función del entorno marciano.

Resultados

Materiales seleccionados

En entornos extremos como Marte, la selección de materiales es crítica, debido a las temperaturas extremas, la corrosividad de la atmósfera y la exposición a la radiación ultravioleta (UV). Para garantizar un rendimiento óptimo en estas condiciones, se utilizan materiales específicos en diversos componentes clave. A continuación, se detalla la selección de estos materiales.

Tabla 1
Materiales y propiedades para componentes del TEG en el entorno marciano

Componente	Material	Propiedades principales
Estator	Politetrafluoroetileno (PTFE)	Estabilidad térmica (hasta 220 °C) Resistencia a la radiación UV
Rotor	Aluminio	Ligereza (densidad de aleación de aluminio: 4,0 g/cm³), resistencia a la corrosión
Estructura general	PTFE, polietileno de alta densidad (HDPE)	Resistencia a la radiación UV, operación estable
Partes estructurales	Aluminio, aleación de titanio	Durabilidad en entorno corrosivo, resistencia a la corrosión (Densidad de aleación de titanio: 4,506 g/cm³)

En Marte las temperaturas extremas requieren el uso de materiales como el politetrafluoroetileno (PTFE) en el estator, por su estabilidad térmica, y el aluminio en el rotor, por su ligereza y resistencia a la corrosión. La atmósfera marciana, baja en humedad, pero corrosiva, hace que el aluminio y aleaciones como el titanio sean esenciales por su durabilidad. Además, el PTFE y el polietileno de alta densidad (HDPE) en las partes estructurales, aseguran resistencia a la radiación UV y operación estable en este entorno extremo.

Área óptima para la instalación

Considerando que la presión atmosférica en Marte es directamente proporcional a la energía producida por el TEG (ver Figura 9), y teniendo en cuenta que una mayor presión aumenta la eficiencia energética, así como el hecho de que la velocidad del viento y las tormentas de polvo pueden mejorar aún más la producción de energía del TEG, se identificó una ubicación óptima en Marte para su instalación (ver Figura 9). La selección de esta área se basa en:

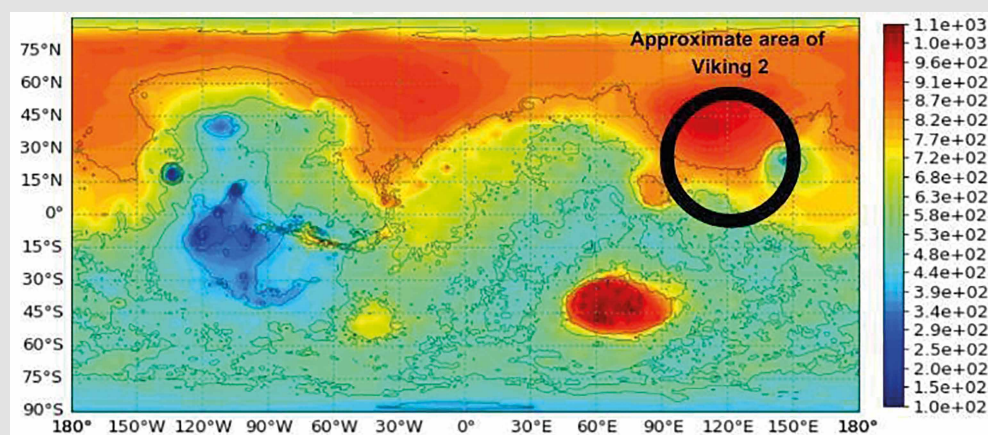
- La combinación de alta presión atmosférica.
- Condiciones favorables de viento y tormentas de polvo.
- Entornos ya estudiados por Viking 2.

Y cómo estos contribuyen a:

- Maximización de la eficiencia y rendimiento del TEG.
- Utilización óptima de factores ambientales.
- Optimización de la generación de energía en el entorno marciano.

Figura 9

Mapa de presión (Pa) de la superficie marciana. El mapa indica el área adecuada para la instalación de los primeros TEG



Nota. El área seleccionada tiene niveles de presión de 870 Pa a 1100 Pa.
Fuente: Adaptado de Mars Climate Database: The Web Interface (s. f.).

La energía producida por el TEG dependerá del área en la que este se instale. Considerando las pruebas simuladas realizadas con un prototipo del generador, su eficiencia y mantenimiento podrían mejorar significativamente de acuerdo con las condiciones geográficas del sitio.

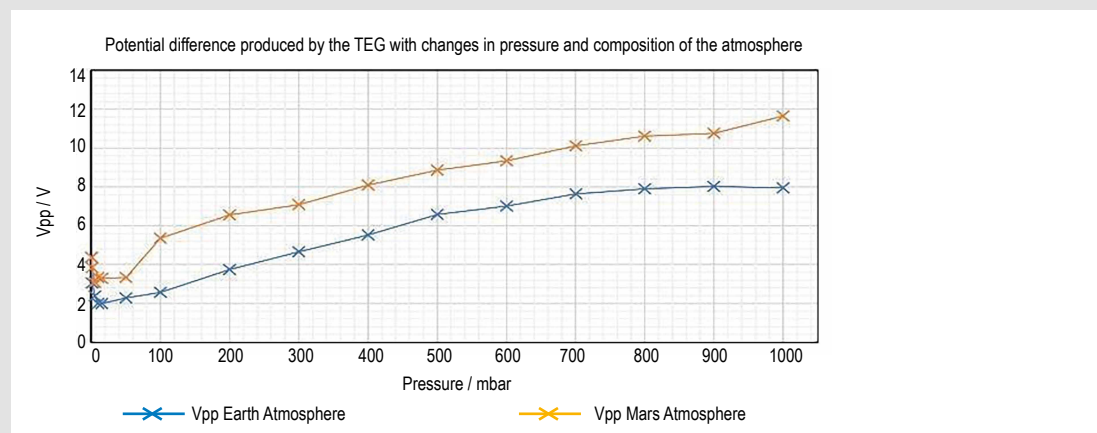
Accesorios adicionales

Para la implementación de un sistema de monitoreo eficientes se propone:

- Motores paso a paso para cambiar la orientación de los paneles o estructuras generadoras, alineándolos mejor con la dirección predominante del viento.

Figura 10

Comparación de la energía producida por condiciones atmosféricas variables entre Marte y La Tierra



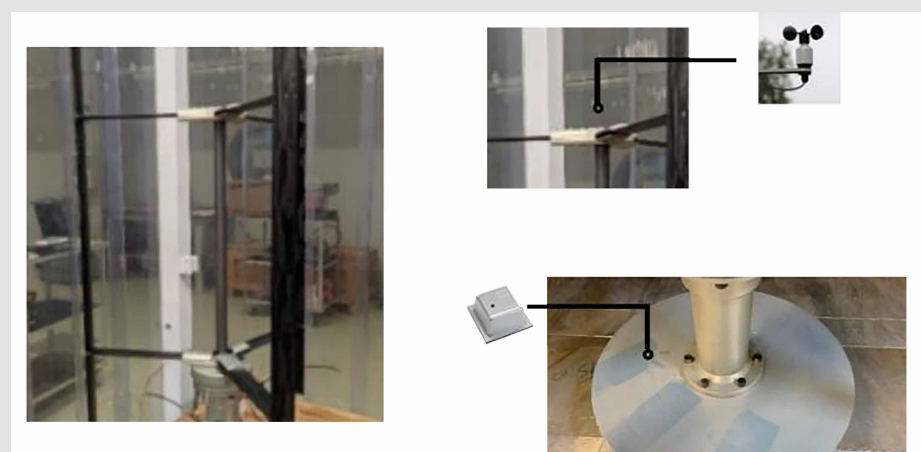
Fuente: Adaptado de Triboelectric nanogenerator for Mars environment. Nano Energy (Seol et al., 2017).

- b) Superficies ajustables: paneles o estructuras móviles que pueden cambiar de ángulo o forma, como aletas flexibles que se despliegan o retraen para capturar mejor el viento en diferentes velocidades.
- c) Sensores de velocidad del viento: anemómetros miniaturizados y livianos que proporcionarán datos cruciales para ajustar en tiempo real las estructuras generadoras, asegurando que estén correctamente orientadas para capturar el viento y generar la máxima cantidad de energía.
- d) Sensores de temperatura y presión: sensores digitales, como el BMP388, capaces de operar en condiciones extremas y registrar variaciones atmosféricas precisas, ya que detectar caídas repentinas de temperatura podría ayudar a ajustar el sistema y aprovechar mejor los gradientes térmicos naturales.

La implementación de estos sistemas de monitoreo y ajuste en el TEG da como resultado un diseño optimizado que responde eficazmente a las duras y variables condiciones de Marte. Los sensores de viento, temperatura y presión aseguran que el sistema opere en su punto más eficiente, mientras que las superficies ajustables y los motores paso a paso garantizan un rendimiento máximo del sistema.

Figura 11

Prototipo base del TEG optimizado



Fuente: Adaptado de First Steps to Develop a Triboelectric Wind Turbine for Mars Exploration (Pozo et al., s. f.).

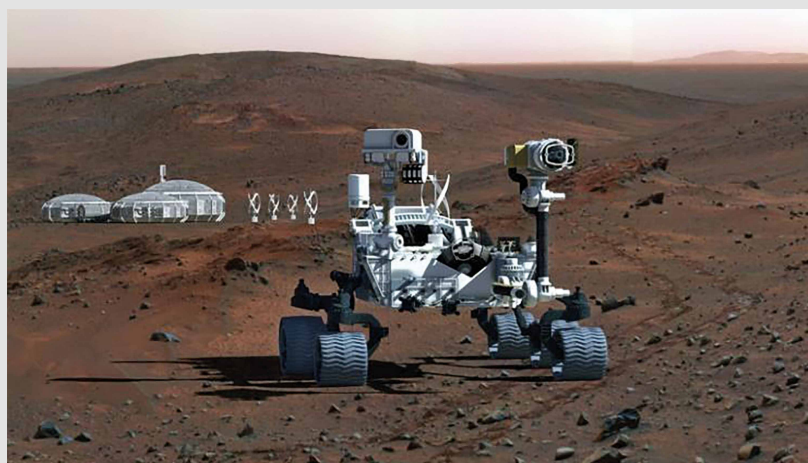
La implementación de estos sistemas de monitoreo y ajuste en el TEG resulta en un diseño optimizado que responde efectivamente a las condiciones duras y variables en Marte. Los sensores de viento, temperatura y presión aseguran que el sistema opere en su punto más eficiente, mientras que las superficies ajustables y los motores paso a paso garantizan una alineación óptima con las condiciones ambientales cambiantes. Este enfoque maximiza la captación de energía y la durabilidad del sistema, haciendo del TEG una opción viable para generar energía en futuras misiones a Marte, aunque la longevidad y el mantenimiento aún deben ser considerados en fases de diseño posteriores.

Complemento de la energía

Los generadores triboeléctricos podrían proporcionar un respaldo crucial en Marte, al integrarse sinérgicamente con la producción de energía solar. Las tormentas de polvo, que pueden durar semanas y cubrir grandes áreas, reducen drásticamente la efectividad de los paneles solares en potenciales campamentos marcianos o vehículos de exploración como los *rovers*. En contraste, los TEG continuarían generando electricidad en un entorno donde el polvo y el viento constante pueden ser aprovechados. Por otro lado, la energía nuclear, como la producida por los generadores termoeléctricos de radioisótopos de múltiples misiones (MMRTG) que alimentan a los *rovers*, puede experimentar anomalías en el sistema. En tales casos, los TEG, al igual que los paneles solares, proporcionarían un respaldo crucial. Manteniendo la continuidad en el suministro de energía. La Figura 12 muestra un posible escenario en el que se utilizan TEG en Marte.

Figura 12

TEG en Rovers y campamentos marcianos



Fuente: El centro de investigación vasco Tekniker llevará la energía eólica a Marte (Redacción09/12/2020, 2020).

Discusión

Los generadores triboeléctricos (TEG) han demostrado ser una alternativa viable para generar energía en Marte, especialmente por su capacidad de funcionar con vientos suaves y en condiciones de baja presión atmosférica. A diferencia de los paneles solares, que pierden eficiencia durante las tormentas de polvo, el TEG puede seguir operando y complementar el suministro energético.

Ventajas clave y comparación con otras tecnologías

El TEG destaca por su diseño simple, sin piezas móviles complejas, lo que reduce el riesgo de fallos y el mantenimiento necesario. Materiales como el PTFE y el aluminio han mostrado buena resistencia a las condiciones extremas de Marte, incluyendo la radiación UV y las bajas temperaturas. Además, en pruebas simuladas, estos generadores han logrado un aumento del 27 % en la producción de energía en comparación con diseños convencionales. Sin embargo, los TEG no están exentos de limitaciones. Su eficiencia disminuye en zonas con

vientos muy débiles (menos de 2 m/s), y la energía que producen actualmente (3-5 W/m²) es insuficiente para cubrir las necesidades de una base marciana. También queda por resolver cómo afectará el polvo marciano a la durabilidad de los materiales a largo plazo.

Próximos pasos y aplicaciones prácticas

Para que el TEG sean una solución real en Marte, es necesario:

- a) Mejorar los materiales para que resistan la erosión del polvo y funcionen durante años sin degradarse.
- b) Desarrollar diseños más grandes y eficientes que puedan generar mayor cantidad de energía.
- c) Realizar pruebas en entornos reales, como en misiones robóticas, para validar su rendimiento fuera de simulaciones.

Aunque no reemplazarán por completo a otras fuentes de energía como la solar o nuclear, los TEG podrían ser un complemento valioso, especialmente en situaciones críticas donde otras tecnologías fallen. Su simplicidad y adaptabilidad los convierten en una opción prometedora para futuras misiones.

Conclusiones

Los generadores triboeléctricos (TEG) presentan características únicas que los hacen especialmente adecuados para las condiciones marcianas. Su capacidad para operar con vientos suaves y en atmósferas de baja presión los diferencia claramente de otras tecnologías energéticas consideradas para Marte.

A continuación, se destacan algunos factores clave que refuerzan la viabilidad de los TEG en Marte:

- a) Materiales optimizados: el uso de PTFE y aluminio ha demostrado ser efectivo para resistir las condiciones extremas de temperatura (de -125 °C a 20 °C) y radiación UV en Marte. Estos materiales mantienen su estabilidad y eficiencia energética en el entorno marciano.
- b) Ubicación estratégica: se han identificado zonas con presiones entre 870 - 1100 Pa como óptimas para la instalación, donde los TEG pueden aprovechar al máximo las condiciones atmosféricas y los patrones de viento locales.
- c) Complementariedad energética: los TEG muestran especial utilidad como respaldo durante las tormentas de polvo que afectan a los paneles solares, manteniendo un suministro energético continuo cuando otras fuentes ven reducida su eficiencia.

Los resultados obtenidos indican que el TEG puede producir entre 3-5 W/m² en condiciones simuladas de Marte. Sin embargo, persisten algunos desafíos importantes:

- a) La eficiencia disminuye notablemente en zonas con vientos inferiores a 2 m/s.
- b) El efecto abrasivo del polvo marciano sobre los materiales a largo plazo requiere mayor estudio.
- c) La producción energética actual es insuficiente para aplicaciones a gran escala.

Para superar estas limitaciones, se recomienda:

- a) Desarrollar recubrimientos protectores contra la erosión por polvo.
- b) Optimizar los diseños para aumentar la producción energética.
- c) Realizar pruebas en entornos reales mediante misiones robóticas.

La importancia de este estudio radica en que el TEG podría convertirse en un componente clave de los sistemas energéticos para futuras misiones a Marte, especialmente como complemento a otras fuentes de energía. Su simplicidad, bajo mantenimiento y adaptabilidad a las condiciones marcianas los hacen una solución prometedora para apoyar la exploración y eventual colonización del planeta rojo.

Referencias

- Amo, I. P. (2007). Wind as alternative energy resource for future Mars exploration [conferencia]. En *Proceedings of the 58th International Astronautical Congress 2007* (p. 5603). International Astronautical Federation.
- Bai, P., Zhu, G., Liu, Y., Chen, J., Jing, Q., Yang, W., Ma, J., Zhang, G., & Wang, Z. L. (2013). Cylindrical rotating triboelectric nanogenerator. *ACS Nano*, 7(7), 6361–6366. <https://doi.org/10.1021/nn402491y>
- Bertels, C. (2006, junio). Crew maintenance lessons learned from ISS and considerations for future manned missions [conferencia]. En *Proceedings of the SpaceOps 2006 Conference – 9th International Conference on Space Operations*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Roma, Italia.
- Bramanti, C., Izzo, D., Walker, R., & Fearn, D. G. (2007). Mars cargo transportation systems enabled by the dual-stage 4-grid ion thruster concept [conferencia]. En *Proceedings of the 58th International Astronautical Congress 2007* (Vol. 11, pp. 7128-7129). International Astronautical Federation.
- Haberle, R. M. (2015). Solar system/Sun, atmospheres, evolution of atmospheres: Planetary atmospheres: Mars. En G. R. North, J. Pyle, & F. Zhang (Eds.), *Encyclopedia of atmospheric sciences* (2.^a ed.) (pp. 168-177). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00312-1>
- Hiremath, A. R., Mendonca, N., Salokhe, S. A., Prem, A., & Singh, S. (2023). Multifluid geothermal energy generation on Mars in the sedimentary regions utilizing indigenous resources of the planet [conferencia]. En *Proceedings of the 74th International Astronautical Congress, IAC 2023*. International Astronautical Federation.
- Kim, W., Bhatia, D., Jeong, S., & Choi, D. (2019). Mechanical energy conversion systems for triboelectric nanogenerators: Kinematic and vibrational designs. *Nano Energy*, 56, 307–321. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.11.056>
- Landis, G. A., Kerslake, T. W., Jenkins, P., & Scheiman, D. (2004). Mars solar power [conferencia]. En *Proceedings of the 2nd International Energy Conversion Engineering Conference* (Vol. 1) (pp. 376-385). American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2004-5555>
- Li, H., Wen, J., Ou, Z., Su, E., Xing, F., Yang, Y., Sun, Y., Wang, Z. L., & Chen, B. (2023). Leaf-like TENGs for harvesting gentle wind energy at an air velocity as low as 0.2 m s⁻¹. *Advanced Functional Materials*, 33(11), Article 2212207. <https://doi.org/10.1002/adfm.202212207>
- Biswal, M. M. K., & Annavarapu, R. N. (2021). Design of in-situ flywheel generator and energy storage system for enhanced power production on Mars. *AIAA Propulsion and Energy Forum*, 2021, Article AIAA 2021-3342. <https://doi.org/10.2514/6.2021-3342>
- Biswal, M. M. K., & Kumar, V. R. (2021). *Power options for human Mars mission* (AIAA 2021-3260). AIAA Propulsion and Energy Forum, 2021. <https://doi.org/10.2514/6.2021-3260>
- Mars Climate Database: *The Web Interface*. (s. f.). <https://goo.su/3gbJR>
- National Aeronautics and Space Administration. (2013, 29 de agosto). *NASA's Mars landing sites, including InSight*. NASA Science. <https://science.nasa.gov/resource/nasas-mars-landing-sites-including-insight/>
- Ouroumova, L., Witte, D., Klootwijk, B., Terwindt, E., van Marion, F., Mordasov, D., Corte Vargas, F., Heidweiller, S., Géczi, M., Kempers, M., & Schmehl, R. (2021). Combined airborne wind and photovoltaic energy system for Martian habitats. *Spool*, 8(2), 71-85. <https://doi.org/10.7480/spool.2021.2.6058>
- Pozo, B., Quintana, I., Ryszawa, E., Muñoz, I., Galliard, L., & de Gorostiza, E. F. (2022, mayo). *First steps to develop a triboelectric wind turbine for Mars exploration*. In *46th Aerospace Mechanisms Symposium* (p. 261).
- Pozo, B., Ryszawa, E., Quintana, I., Muñoz, I., Arizaga, I., & Galliard, L. (s. f.). *Triboelectric wind turbine for Mars exploration*. Tekniker / ESA-ESTEC.
- Redacción. (2020, 9 de diciembre). El centro de investigación vasco Tekniker llevará la energía eólica a Marte. *El Periódico de la Energía*. <https://elperiodicodelaenergia.com/el-centro-de-investigacion-vasco-tekniker-llevara-la-energia-eolica-a-marte/>
- Seol, M. L., Han, J. W., Moon, D. I., & Meyyappan, M. (2017). Triboelectric nanogenerator for Mars environment. *Nano Energy*, 39, 238–244. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.07.004>
- Sharma, G., Gautam, J., & Gurusideswar, S. (2021). Material selection and its characterization for Mars environment and a study on full field strain analysis [conferencia]. *AIP Conference Proceedings*, 2317, 020045. <https://doi.org/10.1063/5.0036265>
- Shumaker, B. D., McCulley, J. R., & Hashemian, H. M. (2013). Autonomous I&C health monitoring and diagnostics for fission power systems. *Nuclear and Emerging Technologies for Space, NETS 2013*, 541–550.
- Wang, L., & Balog, R. S. (2024). Martian energy system design considerations [conferencia]. En *2024 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC 2024)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/TPEC60005.2024.10472284>

Contribución de los autores

Los autores trabajaron la investigación en su totalidad

Fuentes de financiamiento

El estudio fue realizado con recursos propios.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Correspondencia:

Rivaldo Carlos Duran Aquino
E-mail: rivaldo.duran@unmsm.edu.pe