



**Universidad de Cantabria**

FACULTAD DE CIENCIAS, GRADO EN FÍSICAS

**Estimación de la energía generada en  
instalaciones eólicas en el planeta  
Marte**

**Estimation of the energy generated in wind  
power installations on the planet Mars.**

*Trabajo de Fin de Grado*

Autor: Fernando Marañón Badía

Tutor: Antonio Rodríguez Yunta

Fecha: 5 de septiembre de 2023



## Resumen

Se han estudiado 4 diferentes modelos de producción de energía eólica variando la construcción o el tipo de generador en una misión tripulada a Marte buscando la mayor eficiencia energía-masa, obteniendo diferentes resultados para cada modelo. Los modelos seleccionados fueron una torre de celosía y un globo-cilindro hueco basado en los BAT (Buoyant Air Turbine) [1] en los que se implementó tanto un generador común de inducción magnética como un generador triboeléctrico. Dentro de estos modelos, se han diferenciado diversas posibilidades, en las que se ha tratado de conseguir replicar casos similares a los que se dan en la Tierra, casos con ciertos valores fijos de manera arbitraria y casos en los que se busca la máxima eficiencia posible.

Se ha buscado cubrir una potencia eléctrica de unos 40 kW [2] y se ha obtenido para el caso de un globo-cilindro hueco con un generador triboeléctrico, siendo este el modelo más óptimo un valor de  $\beta = 4.7510e^{-3}$  kWh/kg, pero con una producción eléctrica en un día de 0.519 kWh, siendo este un resultado insuficiente.

**Palabras Clave:** Energía eólica, Marte, Generador triboeléctrico, Eficiencia energética

## Abstract

Four different wind power production models have been studied by varying the construction or type of generator in a manned mission to Mars, aiming to achieve the highest energy-to-mass efficiency. Different outcomes were obtained for each model. The selected models included a lattice tower and a hollow cylinder balloon based on Buoyant Air Turbines (BAT), with both a conventional electromagnetic induction generator and a triboelectric generator implemented. Within these models, various scenarios have been distinguished, aiming to replicate cases similar to those on Earth, cases with certain fixed values arbitrarily set, and cases focusing on maximum efficiency.

An electrical power of approximately 40 kW was targeted, and for the hollow cylinder balloon model with a triboelectric generator, the most optimal value achieved was  $\beta = 4.7510e^{-3}$  kWh/kg. However, the electric production in a day was only 0.519 kWh, being this result insufficient.

**Keywords:** Wind energy, Mars, Triboelectric generator, Energy efficiency

# Índice

|          |                                                                             |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introducción</b>                                                         | <b>4</b>  |
| 1.1      | Contexto histórico de la energía eólica . . . . .                           | 4         |
| 1.2      | Producción de energía eólica . . . . .                                      | 4         |
| 1.3      | Viajes a Marte . . . . .                                                    | 9         |
| 1.4      | Condiciones de la atmósfera marciana . . . . .                              | 9         |
| 1.5      | Necesidades de una misión en Marte . . . . .                                | 10        |
| <b>2</b> | <b>Simulación de la Energía Eólica generada en Marte</b>                    | <b>12</b> |
| 2.1      | Introducción a la simulación . . . . .                                      | 12        |
| 2.2      | Optimización . . . . .                                                      | 13        |
| 2.3      | Torre con aerogenerador . . . . .                                           | 16        |
| 2.4      | Globo-cilindro hueco . . . . .                                              | 17        |
| 2.5      | Generadores triboeléctricos . . . . .                                       | 21        |
| <b>3</b> | <b>Resultados y análisis</b>                                                | <b>22</b> |
| 3.1      | Distribución de Weibull . . . . .                                           | 22        |
| 3.2      | Torre con alternador de inducción electromagnética . . . . .                | 22        |
| 3.2.1    | Torre con hélices de 10 m de diámetro . . . . .                             | 23        |
| 3.2.2    | Torre con una altura de 80 m . . . . .                                      | 24        |
| 3.2.3    | Torre con el valor máximo de $\beta$ . . . . .                              | 25        |
| 3.3      | Globo-cilindro hueco con alternador de inducción electromagnética . . . . . | 26        |
| 3.3.1    | Globo-cilindro con hélices de 10 m de diámetro . . . . .                    | 27        |
| 3.3.2    | Globo-cilindro con el valor máximo de $\beta$ . . . . .                     | 28        |
| 3.4      | Torre con alternador triboeléctrico . . . . .                               | 29        |
| 3.4.1    | Torre con hélices de 10 m de diámetro . . . . .                             | 30        |
| 3.4.2    | Torre con una altura de 80 m . . . . .                                      | 31        |
| 3.4.3    | Torre con el valor máximo de $\beta$ . . . . .                              | 32        |
| 3.5      | Globo-cilindro hueco con alternador triboeléctrico . . . . .                | 33        |
| 3.5.1    | Globo-cilindro con hélices de 10 m de diámetro . . . . .                    | 34        |
| 3.5.2    | Globo-cilindro con el valor máximo de $\beta$ . . . . .                     | 35        |
| <b>4</b> | <b>Conclusión y discusión</b>                                               | <b>37</b> |

# 1 Introducción

## 1.1 Contexto histórico de la energía eólica

La energía eólica, como es bien conocido, es un tipo de energía renovable que emplea el movimiento de las masas de aire como trabajo mecánico para conseguir obtener energía. Este tipo de energía ha sido ampliamente empleado a lo largo de la historia, y de hecho hasta antes de la invención de la máquina de vapor en el siglo XIX, era junto a la energía proveniente del agua, la única energía de origen no animal utilizada para la realización de trabajo mecánico. [3].

Aún así, a lo largo del tiempo, la forma de emplear esta energía y la tecnología involucrada han variado, desde los molinos holandeses utilizados desde 1430 para desecar los polders y los literarios molinos castellanos utilizados para la molienda, pasando por el molino multipala tipo americano hasta los masivos parques eólicos que se construyen en la actualidad con aerogeneradores que producen potencias eléctricas de hasta 16 MW . Sin embargo, no es hasta los años 90, cuando comienza el actual desarrollo de la energía eólica, que la convierte en una pieza clave dentro del conglomerado energético [4].

Este tipo de energía, como cualquier renovable, tiene las grandes ventajas comunes a estas, depende de un recurso ilimitado como es el viento y no produce elementos contaminantes, o gases que contribuyan al cambio climático, como son el  $\text{CO}_2$ , el  $\text{NO}_2$  y el  $\text{SO}_2$ . Sin embargo, en su utilización en la Tierra, también tiene una serie de desventajas, ya que para su empleo, es necesario desarrollar zonas como parques eólicos, que suponen contaminación acústica, de menor relevancia de la que la población general pueda percibir, impacto visual y erosión del suelo, de forma que el patrimonio natural se puede ver altamente afectado. Este problema, sin embargo, en Marte, al ser un territorio en el que cualquier preocupación por fauna o flora es evidentemente inexistente, no es real.

## 1.2 Producción de energía eólica

Las máquinas eólicas o aerogeneradores son dispositivos capaces de producir energía mecánica a partir de la energía cinética del viento. A pesar de que existen máquinas de eje vertical y de eje horizontal el funcionamiento es básicamente el mismo. Estas están compuestas por unas palas, que son los dispositivos que captan la energía eólica y están unidas al eje mediante un elemento llamado buje. Este conjunto se denomina rotor. Además, existe la góndola, que es el chasis principal del aerogenerador, se sitúa en la parte superior de la torre y en su interior se encuentran los elementos eléctricos y mecánicos necesarios para convertir el giro del rotor en energía eléctrica. El principio aerodinámico que permite el movimiento de las palas es similar al que permite que los aviones vuelen. El aire que fluye por las partes superior e inferior de un perfil inclinado genera una diferencia de presiones entre ambas partes, de forma que se genera una fuerza, que a su vez según su dirección se puede descomponer en dos, la fuerza de sustentación, en dirección perpendicular al viento y la fuerza de arrastre, en dirección paralela al mismo (ver figura 1). En la mayoría de aerogeneradores, salvo en los tipo Savonius o en las panémonas (ejemplos de aerogeneradores de eje vertical), la fuerza que es priorizada es la fuerza de sustentación, tratando de obtener el mayor valor fuerza de sustentación/fuerza de arrastre. Esto se debe a que permite obtener con menor peso y menor coste, mayor potencia por unidad de área del rotor. De esta manera, se sabe que estos aerogeneradores no son útiles en el caso de necesitar

grandes cantidades de energía. Además de esto, es importante saber que para optimizar el comportamiento de las palas, estas deberían de contar con un pequeño alabeo, que cambie el ángulo de al ir hacia la punta, ya que el viento aparente que recibe la pala depende de la composición del viento que reciben con el movimiento de las palas [5].

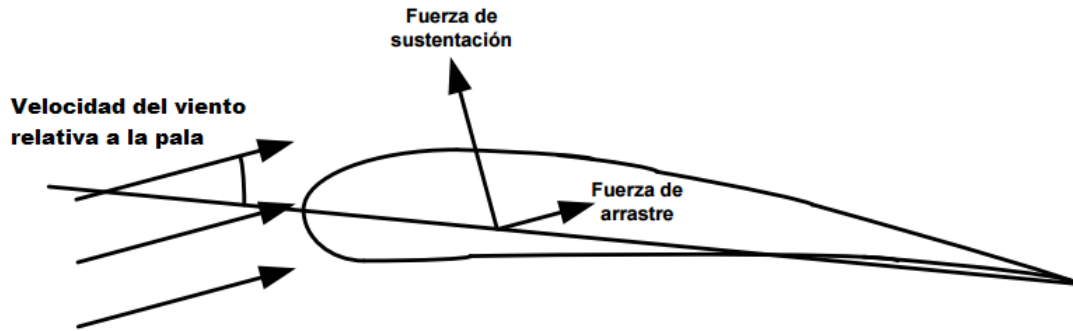


Figura 1: Descomposición de la fuerza generada por la diferencia de presiones sobre los perfiles de la pala. Fuente [6]

Aparte de la clasificación del aerogenerador según el tipo de eje, existe la clasificación por el número de palas, pudiendo ser una única pala, dos palas, tres o múltiples, siendo las máquinas eólicas con tres palas las más extendidas en la actualidad. Esto se debe al principio que estipula como el menor número de palas genera los giros más rápidos del rotor. Asimismo, este tipo de máquinas eólicas tripala, generan un menor esfuerzo a la estructura, producen un giro más suave y uniforme y a pesar de girar a menor velocidad que los aerogeneradores monopala o bipala, se reducen los esfuerzos de la fuerza centrífuga, el nivel de vibraciones y la producción de ruido. También cabe destacar que el hecho de contar con un número de hélices par sería perjudicial porque se producirían cargas cíclicas, formaciones de fuerzas máximas y mínimas, que suponen junto a las turbulencias un acortamiento en la vida útil de las turbinas.

Otra clasificación adicional que se puede realizar es en función del propio generador de la turbina, ya que existen numerosas tecnologías diferentes utilizadas para convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica. En la actualidad, la mayoría de los generadores eléctricos utilizan como principal concepto las máquinas de corriente alterna multifase. De todos estos, en 2013, alrededor del 80% de los generadores utilizaban la tecnología DFIG (generador eléctrico de inducción doblemente alimentado) que es similar a la clásica tecnología de los generadores eléctricos de CA, pero que cuentan con unas características adicionales que les permiten utilizar velocidades ligeramente superiores o inferiores a la velocidad síncrona natural, lo cual permite evitar cierto deterioro a las máquinas. Este tipo de generador, sin embargo, no es empleado en este tipo de misiones, ya que no es necesaria la corriente alterna, ya que en Marte se puede utilizar directamente la corriente continua.

Sin embargo, existen alternativas que utilizan diferentes mecanismos aún más punteros. De todos estos cabe destacar los PMSG (generador síncrono con imán permanente) donde el rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético inducido, de ahí lo de síncrono y es generado por un imán, no por una bobina y los HTS SG (generador síncrono de superconductores a altas temperaturas), que utilizan como cables superconductores a altas

temperaturas de hasta por encima de los 30 K y son capaces de reducir la masa de los DFIG hasta en 4 veces, eliminando elementos como la caja de engranajes [7].

Otro tipo de tecnología es la de los generadores triboeléctricos, que pueden conseguir pesar hasta más de 10 veces menos que los PMSG, ya que las capas de material pueden ser de micras de espesor, mientras que en los magnéticos los núcleos y bobinados deben tener un cierto volumen. El funcionamiento de los mismos se puede observar en la figura 2 y la figura 3. Tiene una parte que gira (rotor) que iría conectada a la hélice, con un metal y una parte fija (estator) con una capa por ejemplo de etileno propileno fluorado (teflón FEP) con unos electrodos por debajo. Las cargas que aparecen por rozamiento (efecto triboeléctrico) en el metal y el teflón, inducen a su vez cargas en los electrodos que se emplean para generar una corriente.

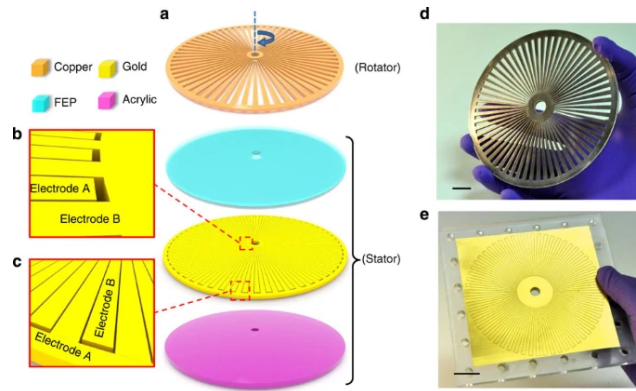


Figura 2: a) Ilustraciones esquemáticas del generador triboeléctrico, que tiene dos partes, el rotor y el estator. Las imágenes ampliadas en el extremo interno b) y en el extremo externo c) revelan como los electrodos tienen patrones complementarios y están separados por pequeños surcos entre ellos. d) Fotografía de un rotor y e) fotografía de un estator. Fuente: [8]

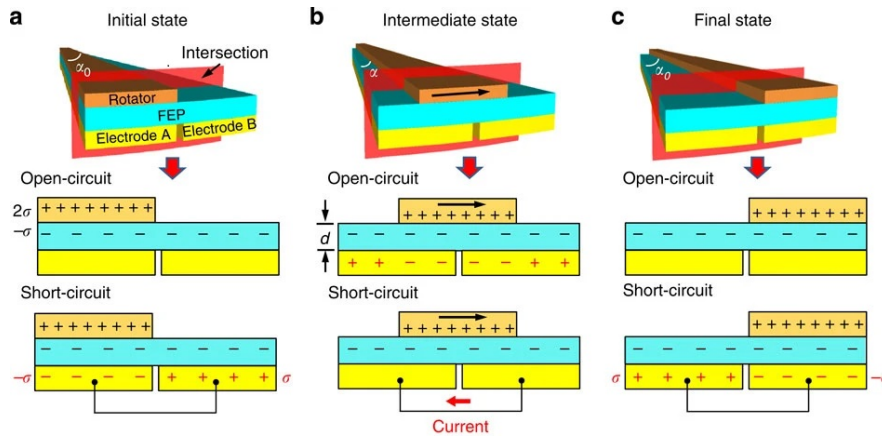


Figura 3: Estado inicial en el que el rotor está alineado con el electrodo A. Las tres secciones de arriba a abajo ilustran el esquema tridimensional, la distribución de carga en condición de circuito abierto y la distribución de carga en condición de cortocircuito, respectivamente. (b) Estado intermedio en el que el rotor está girando alejándose de la posición inicial en un ángulo de  $\alpha$ . (c) Estado final en el que el rotor está alineado con el electrodo B. El rotor se ha rotado  $\alpha_0$  lejos de la posición inicial. Fuente:[8]

Como se ha explicado previamente, el rotor es el que transforma la energía eólica en energía mecánica y posteriormente, el generador esa energía eléctrica que posteriormente es empleada directamente. Sin embargo, existen diversos factores que afectan a la producción de la misma.

La producción de energía eléctrica por las hélices de un aerogenerador depende directamente de tres variables diferentes,  $A$ , que es el área barrido por las aspas de las propias hélices,  $\rho$ , que es la densidad del aire en ese punto y  $v$ , que es la velocidad del viento. Además de todo ello, no existe un modelo de aerogenerador perfecto, sino que éste tiene una eficiencia  $\eta$ , que está limitada por el límite de Betz, donde  $\eta \leq 0.59$ .

Esta función, de todas formas, debe ser definida a trozos, ya que el funcionamiento del aerogenerador no es monótono, sino que en función de cuál sería el intervalo concreto de la velocidad tiene un comportamiento u otro. Estos intervalos están definidos según la velocidad límite de inicio, a partir de la cual el aerogenerador comienza a funcionar, la velocidad nominal, es decir, la velocidad máxima a la que el aerogenerador es capaz de producir una potencia máxima y finalmente la de corte, que es la velocidad a la que el aerogenerador deja de funcionar porque el rotor puede verse deteriorado.

$$P_{el} = \begin{cases} 0 & v < v_I \\ \eta \frac{1}{2} \rho A v^3 & v_I \leq v \leq v_N \\ \eta \frac{1}{2} \rho A v_N^3 = P_N & v_n \leq v \leq v_C \\ 0 & v > v_C \end{cases} \quad (1)$$

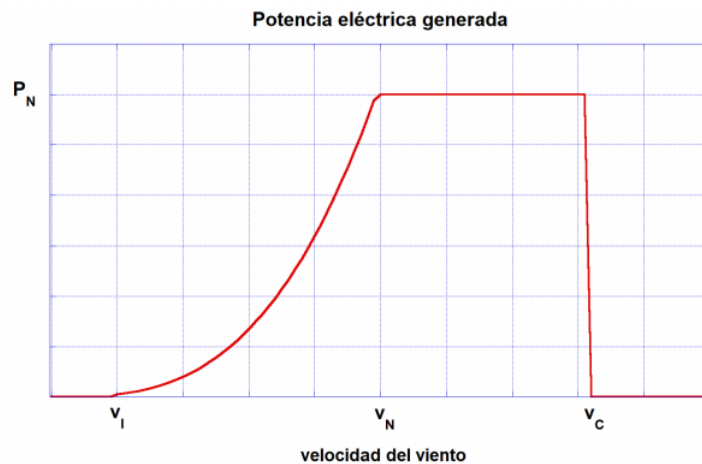


Figura 4: Variación de la potencia eléctrica generada en los diferentes intervalos de velocidad.

El área que es barrida por las aspas es un factor que depende simplemente de la construcción del aerogenerador, por lo que si se quiere una mayor potencia, se debe construir un aerogenerador que abarque más superficie.

La densidad y la velocidad, sin embargo, son aspectos variables, que son aleatorios, varían en el tiempo y es necesario una modelización del comportamiento de los mismos.

A la velocidad se la estudia con una función de distribución temporal característica, que normalmente se trata de la función de distribución de Weibull, que depende de dos parámetros, un parámetro de escala,  $c$  y un parámetro de forma,  $k$ . La distribución de Weibull sigue la siguiente ecuación:

$$f_w(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp \left[ - \left(\frac{v}{c}\right)^k \right] \quad (2)$$

a partir de la cual se puede obtener la velocidad media del viento utilizando la función gamma tal que:

$$v_m = \int_0^{\infty} v f_w(v) dv = c \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \quad (3)$$

En cuanto a la otra variable, la densidad, existen algunos modelos para la atmósfera marciana en los que se puede estimar la presión atmosférica y la temperatura según la altura a la superficie y por consiguiente, la densidad atmosférica también. Dada la altitud en km, la presión y la temperatura son:

$$P(\text{Pa}) = 653.26 \cdot \exp(-0.0868 \cdot h) \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} h < 0.1\text{km} & T(\text{K}) = 239.46 - 95.801 \cdot h + 410.12 \cdot h^2 \\ 0.1\text{km} < h < 1\text{km} & T(\text{K}) = 235.352 - 14.1064 \cdot h + 3.9522 \cdot h^2 \\ 1\text{km} < h < 10\text{km} & T(\text{K}) = 215.752 + 13.155 \cdot h - 4.1291 \cdot h^2 + 0.43629 \cdot h^3 - 0.016653 \cdot h^4 \end{array} \right. \quad (5)$$

Por último la densidad es:

$$\rho_M(\text{g/m}^3) = 5.22184 \frac{P(\text{Pa})}{T(\text{K})} \quad (6)$$

De esta manera, con las siguientes funciones, se puede definir a trozos la variación de la densidad con la altura:

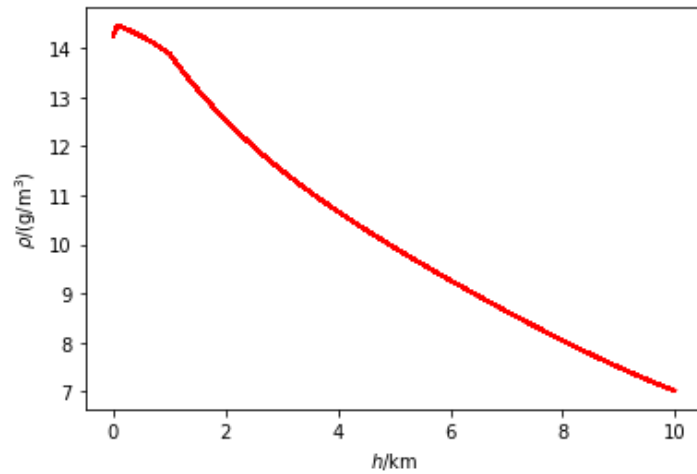


Figura 5: Variación de la densidad marciana con la altura definida en tres tramos diferentes, cuando la altura es menor a 0.1 km, cuando la altura está entre 0.1 km y 1 km y, finalmente cuando la altura está entre 1 y 10 km.

Como se observa, se debe tener en cuenta la localización a la hora de colocar una máquina eólica, ya que dependiendo de la velocidad a la que sople el viento o si es un lugar con una densidad atmosférica mayor o menor puede hacer que el proyecto sea viable o no, por lo que sería necesario conocer estas características en el lugar que se quiera implantar este proyecto.

### 1.3 Viajes a Marte

A mediados del siglo XX, en la década del 60, en el contexto de la Guerra Fría, sucedió la carrera espacial entre la potencia estadounidense y la potencia soviética, donde dentro de los objetivos que existían, estaba el conocer más sobre el planeta rojo. De esta forma, con el programa Mars (ruso) y el programa Mariner (estadounidense), se comenzó a tratar de enviar sondas capaces de hacer fotos y recabar información sobre la superficie del planeta. A lo largo de la siguiente década, se desarrolló el programa Viking, que fue el primero en llegar a la superficie marciana y consiguió mapear el 97 % de la superficie marciana. Durante las dos décadas siguientes, sólo se produjeron éxitos parciales o intentos fallidos, hasta el lanzamiento del Mars Global Surveyor, que ha permitido conocer mucha información sobre la repetición de los patrones atmosféricos del planeta. Una vez entrado el siglo XXI, ya no solo EEUU y Rusia son los únicos países involucrados en la investigación del planeta, sino que entidades como la ESA (European Space Agency) o países como China, Japón e India son también partícipes. En esta época más reciente, existen misiones conocidas, como son los Mars Exploration Rovers, el Curiosity Rover o el más reciente, el Perseverance Rover, que aportan información muy valiosa sobre la composición química y mineralógica del suelo. Otra misión, MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution), es la que ha servido para conocer más sobre la evolución histórica de la atmósfera marciana y sobre sus condiciones actuales.

La energía necesaria para el traslado entre orbitas planetarias o  $\Delta v$ , es mínima a ciertos intervalos dependiendo del período sinódico. En el caso de viajes a Marte, este período ocurre cada 26 meses, así que se ha tratado de que las misiones previamente mencionadas ocurriesen en el momento en el que esa energía necesaria fuese mínima, acontecimiento, que debido a la excentricidad de Marte ocurre cada 15 años [9]. En el futuro, el siguiente período de lanzamientos que requieran menor energía se dará en 2033.

### 1.4 Condiciones de la atmósfera marciana

Como se ha mencionado anteriormente, han existido numerosas misiones a Marte en la historia actual, destacando que recientemente se ha lanzado la nave MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution), concretamente en el año 2013, a partir de la cual se recabará información sobre como funciona esta y está enfocada en el funcionamiento de la parte superior de la atmósfera, su interacción con el Sol y los vientos solares y finalmente sobre la emisión de gases de la misma a la atmósfera. De esta manera, se conocerán datos más detallados de la atmósfera marciana. Sin embargo, sí que se cuentan con ciertos datos recabados en otras misiones previas, como por ejemplo el rover Mars Perseverance 2020, que aporta datos de velocidad en el cráter Jezero o la planicie de Elysium [10] o la misión Pathfinder, que aporta datos sobre la densidad, observando como la densidad atmosférica en la superficie es similar a la terrestre a unos 30 km del suelo [11].

Además, con datos provenientes del Viking Lander, se conoce como cerca de la superficie la velocidad del viento oscila entre 2 y 7 m/s. Estos vientos tienen una fuerte variación dependiendo de la hora del día y de la estación del año, tanto en dirección como en magnitud. Aún así, a partir de una capa situada a decenas de metros del suelo, la velocidad del viento llega e incluso puede superar los 50 m/s. Otro fenómeno conocido en la atmósfera en Marte y uno de los motivos por los que la energía eólica puede funcionar como alternativa a la solar son las tormentas de polvo. Estas pueden durar hasta varios meses, generando gran opacidad y ocurren cuando Marte está cerca del perihelio, cuando la intensidad solar es máxima. Este hecho es el principal motivo que puede hacer que utilizar exclusivamente energía solar sea inviable, ya que el polvo se puede depositar sobre los paneles solares. Existen estudios sobre cuánto puede degradar el polvo el rendimiento de los paneles solares, obteniéndose que para una misión de 30 días, el rendimiento puede disminuir de entre un 1 a un 50 %, mientras que para una misión de 2 años, el rendimiento puede bajar entre un 22 y un 89 %. El polvo suspendido en la atmósfera no es la única fuente que sirve para depositar polvo, si no que se puede producir saltación, que significa que la acción del viento deposita el polvo del suelo en los paneles [12]. Además de ello, cabe la posibilidad de que no solamente impida la absorción de la luz solar, sino que deteriore a los paneles. Ciertamente es que este polvo es de un tamaño pequeño, con un radio de entre 1 y 10  $\mu\text{m}$  [13], algo inferior a por ejemplo el radio de algunas partículas de polvo medidas en las tormentas de arena del Sáhara. En cuanto a los aerogeneradores, se estima que la acumulación de polvo en misiones tan cortas no estropee en gran medida al mismo. No se conoce a ciencia cierta, pero se cree que la mayor intensidad solar junto a variaciones en la topología del planeta es lo que desencadena las tormentas. Otro fenómeno común son los remolinos de arena, que son cambios en la presión en la superficie, velocidad del viento y temperatura del aire de corta duración que oscila entre decenas de segundos hasta minutos.

Aparte de los fenómenos atmosféricos, es importante conocer su composición. La atmósfera superior está principalmente formada por  $\text{CO}_2$ , cerca de un 95 %, conteniendo ciertas trazas de  $\text{N}_2$ , Ar, O,  $\text{O}_2$  y CO [14]. Esta mayoritaria composición de la atmósfera en átomos de  $\text{CO}_2$  a pesar de lo que podría esperarse no supone un gran efecto invernadero, ya que el vapor de agua presente es de alrededor de un 0.03 %, que junto al hecho de que la presión atmosférica sea baja hace que el efecto sea relativamente bajo (supone unos  $5^\circ\text{C}$ ). Añadir que aunque haya gran cantidad de  $\text{CO}_2$ , en tan solo 3500 años, si no existiese una forma de producción química del mismo, este desaparecería debido a la presencia de radiación UV proveniente del Sol, que supondría la fotólisis de la molécula. Esta fotólisis es la que mayoritariamente genera el  $\text{O}_2$  atmosférico. En 2019, científicos de la NASA que formaban parte de la misión del rover Curiosity, que ha estado tomando medidas del gas, descubrieron que la cantidad de oxígeno crecía sobre un 30 % durante las estaciones de primavera y verano [15]. Con respecto al vapor de agua, se cree que este es mayormente originado por la sublimación del hielo durante el verano presente en las regiones polares nórdicas. Finalmente, añadir que se han encontrado trazas de otros gases como metano o dióxido de azufre que son de bastante interés ya que podrían ser vestigios de actividad volcánica.

## 1.5 Necesidades de una misión en Marte

Una vez identificado cuál es la situación de la atmósfera y las posibilidades para la vida, se debe saber cuáles son las demandas energéticas o instrumentos necesarios para poder

mandar una misión tripulada al planeta.

Según ciertos estudios [2], para una misión de 6 tripulantes de una duración de 500 días sería necesaria una potencia eléctrica de unos 40 kW. Esta misión se desarrollaría en dos fases. Una primera fase no tripulada, que aterrice en el planeta y en la cual se implemente un sistema capaz de usar los recursos que hay en el planeta para poder producir oxígeno y llenar los tanques de combustible de un vehículo, el MAV (Mars Ascent Vehicle), que sirva como transporte de la tripulación desde la nave en la que se encuentren hasta la superficie de nuevo. El llenado de estos tanques dependerá de cuáles son las necesidades en ese momento, pero las estimaciones prevén que se deberá de llenar hasta 23533 kg de combustible para la variante del MAV que sea más demandante de energía, el caso con 6 tripulantes que tenga que recorrer la órbita de un sol. La segunda fase sería ya aquella en la que la tripulación se establezca y se requeriría energía tanto para la habitabilidad del planeta como para investigar lo que se requiera en un laboratorio de muestras, que contaría con un robot teleoperado desde donde habiten los astronautas. La primera fase requiere una demanda de energía de 34 kW y la segunda de 33.6 kW, sin embargo, estas estimaciones han sido realizadas con un margen del 30 % y extrapolando ciertas condiciones de misiones en la Luna que tal vez en Marte no sea posible trasladar, como por ejemplo, una estimación del alojamiento en la superficie de Marte que asume circuitos parcialmente cerrados de aire y agua regenerativos y en caso de no poder ser así, la energía requerida sería notablemente mayor.

Además de esto, destacar que en el estudio para esta misión se pretende utilizar como fuente de energía, energía nuclear. La planta que genere esta energía se debe de situar a una distancia de mínimo 1 km del alojamiento de los astronautas para preservar su salud y se estima que tenga una masa de alrededor de los 7000 kg.

Existe otro artículo reciente [16], que integra datos relevantes de clima del Mars Climate Database [17] en un modelo de transferencia radiativa, libRadtran, para predecir el flujo solar sobre la superficie de Marte. En este artículo se busca comparar el modelo de utilizar energía nuclear en forma de pequeños reactores nucleares con otros modelos que utilicen energía solar. Los tres nuevos modelos eran 1), generar energía fotovoltaica junto a un almacenamiento de energía en baterías, 2) generar energía fotovoltaica junto a un almacenamiento de energía en forma de  $H_2$  comprimido vía electrólisis y 3), generar  $H_2$  mediante electrólisis fotoelectroquímica y almacenar la energía en forma de  $H_2$  comprimido. La conclusión obtenida fue que únicamente el segundo modelo supera en alrededor del 50 % de la superficie del planeta el valor de Energía/Masa, que a la hora de una misión en Marte es lo que se requiere.

A pesar de mostrar estudios de misiones a Marte que utilizan como fuentes de energía, la nuclear [18] y la solar, también se ha estudiado la posibilidad de utilizar otra opción como es la eólica, que podría evitar posibles peligros cerca del alojamiento humano en la superficie (causado por la nuclear) o suplir la falta de regularidad debido al cambio de las condiciones día-noche o estacionales (que ocurren con la solar). Se ha evidenciado que la implementación de este sistema depende mucho del lugar, ya que ciertas zonas quedan automáticamente descartadas por el bajo potencial eólico que tienen. Sin embargo, existen otras en las que sí que tienen gran potencial y pueden complementar a la energía solar en zonas de latitudes medias con interés científico durante períodos de tormentas de polvo. En este estudio [19], se obtiene que durante el 60-90 % del tiempo, la producción de energía sobrepasaría las necesidades de energía para una misión.

## 2 Simulación de la Energía Eólica generada en Marte

### 2.1 Introducción a la simulación

El procedimiento a seguir es buscar diferentes modelos de generación de energía eólica que sean capaces de producir la máxima energía requiriendo el valor mínimo de masa para producirla. El lugar elegido para implementar estos posibles proyectos eólicos es la planicie de Elysium, lugar escogido por ser el sitio donde aterrizó el Perseverance Rover en 2020 y que cuenta con datos de viento medidos. Para ello, se han empleado dos métodos diferentes, el empleo de un aerogenerador sujeto a una torre y el empleo de un globo-cilindro hueco con el aerogenerador en su interior. Además, en estos dos modelos se han implementado aerogeneradores que utilicen tanto alternadores de inducción magnética como alternadores triboeléctricos. Para obtener la energía máxima hay que tener en cuenta que a una mayor altura con respecto a la superficie el valor de la velocidad del viento es considerablemente mayor, de forma que la energía producida también lo será, sin embargo, el valor de la masa requerida para construir una estructura que sea capaz de llegar a esa altura también aumentará y el valor de la densidad disminuirá. Como se ha explicado en la introducción, la velocidad es un parámetro aleatorio que puede ser modelizado mediante la función de Weibull y que además en Marte varía sustancialmente entre noche y día, de forma que se utilizarán valores de velocidad medios en siete tramos horarios de diferente duración, que dependerán de los siguientes parámetros de Weibull:

| Tramo        | Horas marcianas | $c_{ref}(m/s)$ | $k$  |
|--------------|-----------------|----------------|------|
| 1-mañana     | 07:00-10:00     | 9.74           | 3.73 |
| 2-mediodía   | 10:00-15:00     | 10.28          | 3.60 |
| 3-tarde      | 15:00-18:00     | 6.86           | 1.90 |
| 4-anocheecer | 18:00-21:00     | 2.18           | 2.62 |
| 5-medianoche | 21:00-00:00     | 2.94           | 3.60 |
| 6-noche      | 00:00-03:00     | 3.48           | 4.04 |
| 7-amanecer   | 03:00-07:00     | 4.12           | 2.66 |

Tabla 1: División del día marciano en 7 tramos diferentes con sus respectivos parámetros de Weibull. Fuente:[10]

Estos parámetros han sido medidos a una altura de 1.6 m, de forma que el viento a otra altura es diferente. El parámetro que varía es el parámetro de escala y para estimarlo se utiliza la siguiente ecuación:

$$c(h) = c_{ref} \frac{\ln(h/z_r)}{\ln(h_{ref}/z_r)} \quad (7)$$

donde  $z_r = 0.03$  m es la rugosidad del suelo marciano. Con estos datos, ahora es posible obtener la velocidad media a cualquier altura utilizando la ecuación (3).

El siguiente paso una vez obtenidas las velocidades es estimar la energía producida, que una vez conocida cuál es la potencia eléctrica para cada intervalo de tiempo y la duración

del mismo se puede calcular de la siguiente forma:

$$E_{el} = \int_{dia} P_{el} dt = \frac{1}{2} \rho A \eta \sum_{i=1}^7 \left( T_i \int_{v_I}^{v_N} v^3 f_{Wi}(v) dv + T_i v_N^3 \int_{v_N}^{v_C} f_{Wi}(v) dv \right) \quad (8)$$

Esta integral puede ser calculada utilizando las funciones gamma de Euler para las integrales de la función de Weibull tal que:

$$E_{el} = \frac{1}{2} \rho A \eta \sum_{i=1}^7 \left( T_i c_i^3 \left( \gamma \left[ \left( \frac{v_N}{c_i} \right)^{k_i} ; 1 + \frac{3}{k_i} \right] - \gamma \left[ \left( \frac{v_N}{c_i} \right)^{k_i} ; 1 + \frac{3}{k_i} \right] \right) + .. \right. \\ \left. .. + T_i v_N^3 \left( \exp \left[ - \left( \frac{v_N}{c_i} \right)^{k_i} \right] - \exp \left[ - \left( \frac{v_C}{c_i} \right)^{k_i} \right] \right) \right) \quad (9)$$

## 2.2 Optimización

En el caso que nos ocupa, se van a realizar una serie de consideraciones arbitrarias, como por ejemplo la elección de las velocidades iniciales y de las velocidades de corte. En la Tierra, valores comunes son para la velocidad mínima de inicio,  $v_I = 2$  m/s y para la velocidad de corte,  $v_C = 25$  m/s. Estos valores se deben de trasladar a la situación en Marte, donde la fuerza aerodinámica debe de ser equivalente por lo que se obtendrán los siguientes valores:

$$F_{aerod} = C_A A \frac{1}{2} \rho v^2 \Rightarrow \rho_T v_{IT}^2 = \rho_M v_{IM}^2 \Rightarrow v_{IM} = v_{IT} \sqrt{\frac{\rho_T}{\rho_M}} = 2 \sqrt{\frac{1.225}{0.018}} \simeq 16 \text{ m/s} \\ \Rightarrow \rho_T v_{CT}^2 = \rho_M v_{CM}^2 \Rightarrow v_{CM} = v_{CT} \sqrt{\frac{\rho_T}{\rho_M}} = 25 \sqrt{\frac{1.225}{0.018}} \simeq 206 \text{ m/s}$$

sin embargo, al ser la velocidad de corte tan grande, se deben de considerar hélices menos robustas que las que se emplean actualmente en la Tierra para así conseguir que los aerogeneradores comiencen a generar energía a velocidades de viento menores y estas hélices puedan pesar menos. De esta manera, se han elegido arbitrariamente reducir estas velocidades obtenidas a un cuarto de su valor, ya que se pueden utilizar palas más ligeras y menos resistentes, resultando en que  $v_I = 4$  m/s y  $v_C = 50$  m/s.

Para el rendimiento, se ha de tener en cuenta el rendimiento aerodinámico de las hélices y la eficiencia del generador eléctrico. El valor utilizado para el rendimiento aerodinámico de las hélices elegido es de 0.5, mientras que el del alternador sigue una ley empírica dependiente de la potencia nominal. Este rendimiento se debe a cierta potencia perdida por rozamientos, efecto Joule por la resistencia de bobinados, corrientes inducidas e histéresis en el núcleo, etc. La obtención de la ley empírica se ha obtenido representando los datos de eficiencia frente a potencia nominal aportados por el catálogo de alternadores de la empresa Atlantis Wind [20] como se muestra en la figura 6.

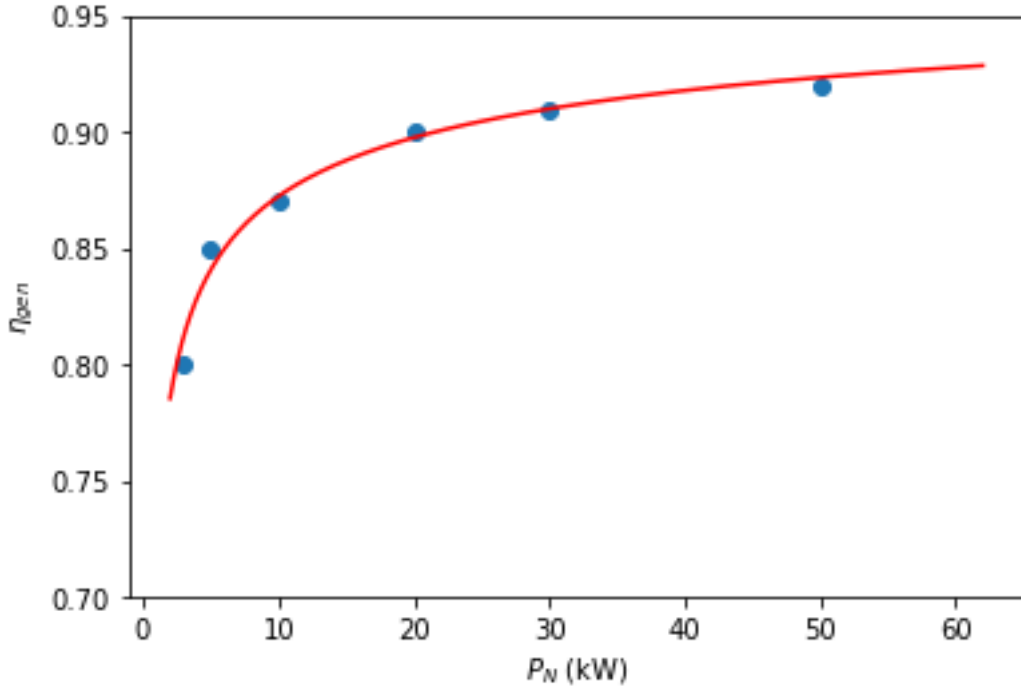


Figura 6: Representación gráfica de la eficiencia energética de diversos generadores frente a la potencia nominal de los mismos. En azul, los datos proporcionados y en rojo, la ley empírica aproximada.

De esta manera, con esta representación gráfica, se obtiene que  $\eta_{gen} = \frac{P_N}{P_N + 0.07 + 0.3P_N^{2/3}}$ , que multiplicándolo por el valor de la eficiencia aerodinámica de las hélices, hace que la eficiencia total sea con las potencias nominales en kW:

$$\eta = 0.5 \frac{P_N}{P_N + 0.07 + 0.3P_N^{2/3}} \quad (10)$$

Una vez conocida la dependencia de la eficiencia en función de la potencia nominal, es el momento de buscar las condiciones más óptimas. En el caso de la Tierra, el criterio es económico, hay que buscar el valor de potencia máximo por encima del cual el coste de fabricación deja de compensar la producción de electricidad, ya que la velocidad del viento no supera normalmente a la velocidad nominal y el tiempo durante el cual lo hace es muy pequeño. Sin embargo, en el caso que nos ocupa, en Marte, el precio deja de ser lo relevante y lo es el peso, ya que el llevar aerogeneradores muy pesados puede dificultar en demasía el traslado hasta allí. Para ello, se buscará maximizar el siguiente parámetro:

$$\beta = \frac{E_{el}}{m_T} \quad (11)$$

donde  $E_{el}$  es la energía eólica producida en un día marciano típico, que tiene como duración 24 h 39 min 35 s, y  $m_T$  la masa total de los modelos del aerogenerador que se quiera construir que ya han sido previamente mencionados.

Los diversos modelos tienen ciertas partes comunes, como son la góndola, las palas, el buje o el alternador. Para todas estas partes, existen modelos que relacionan su masa con otras variables como pueden ser el diámetro de las hélices o la potencia nominal característica del aerogenerador.

Comenzando con las palas, existen ciertos datos para palas de diámetro mayores a 40 m, de las cuales se conoce su masa y se establece una relación empírica mostrada en la figura 7:

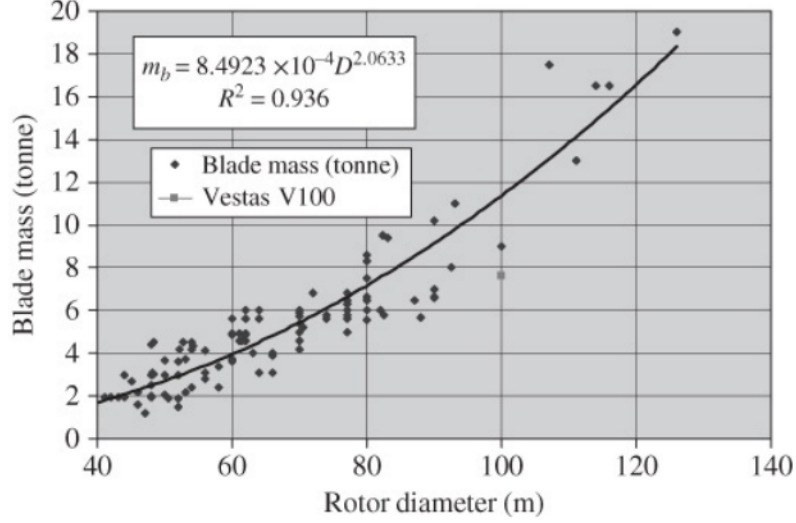


Figura 7: Ajuste de la masa de las palas frente al diámetro del rotor. Se obtiene una relación mostrada en la ecuación (12). Fuente: [21]

$$m_{\text{palas}}(\text{kg}) = 0.849 \cdot D(\text{m})^{2.063} \quad (12)$$

donde el exponente no se acerca a un exponente cúbico como cabría esperar debido a que tanto el impacto que tiene la masa de las hélices en el coste como en la fatiga que sufre el buje son grandes incentivos para tratar de disminuir la masa de las palas.

Otro elemento común a todos los aerogeneradores es el elemento buje-eje, cuya relación empírica se muestra a continuación:

$$m_{\text{buj-e-eje}} = 0.04022 D(\text{m})^{2.8} \quad (13)$$

Además, otro elemento es la góndola, cuyos datos obtenidos de diseños novedosos para palas de más de 80 m de diámetro son mostrados en la figura 8:

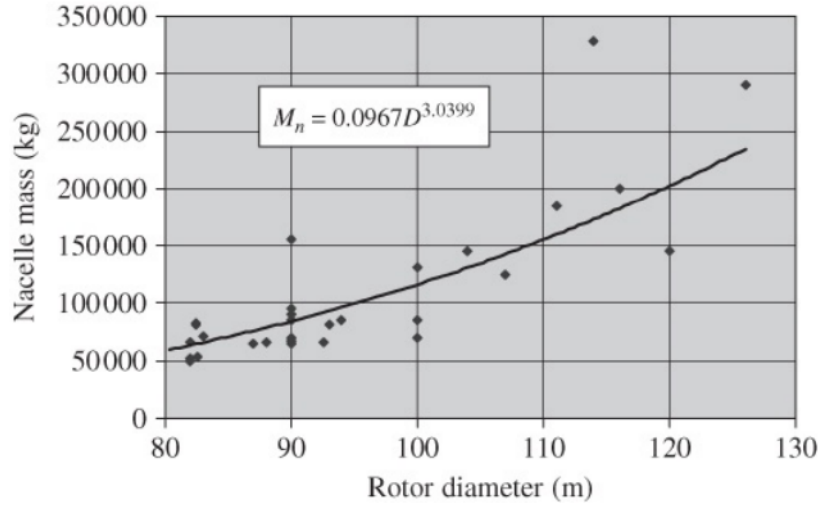


Figura 8: Ajuste de la masa de la góndola de diferentes aerogeneradores frente al diámetro del rotor. Se obtiene una relación indicada en la ecuación (14).Fuente: [21]

$$m_{\text{gondola}}(\text{kg}) = 0.0967D(\text{m})^{3.0399} \quad (14)$$

en la que las innovaciones tecnológicas todavía no han llegado a permitir una disminución del exponente cúbico en el escalado.

Finalmente, el último elemento común es el alternador eléctrico. En este caso, se trata de un alternador de inducción magnética (PMSG), cuyo ajuste de masa frente a potencia nominal es el siguiente:

$$m_{\text{alternador}} = 17.4P_N(\text{kW}) \quad (15)$$

## 2.3 Torre con aerogenerador

En este primer caso, se ha utilizado como modelo una torre de celosía con barras de aluminio (ver figura 9). Este modelo de torre es elegido frente a una torre tubular de acero, que en la actualidad es más común debido a que las ventajas que presenta son mayor que sus inconvenientes. La principal ventaja, que es lo que se está tratando de buscar es que su peso no incrementa tanto con la altura como en el caso de las torres tubulares de acero. Su principal desventaja, que es la accesibilidad compleja que perjudica a las tareas de mantenimiento es despreciable, ya que la duración de la misión es estimada que sea lo suficientemente corta como para que no haya tanto desgaste [22].



Figura 9: Ejemplo de torre de celosía que sostiene al aerogenerador. Fuente: [23]

En la situación donde se busque aumentar la altura, la base debe de aumentar a su vez, y debe resistir los momentos de flexión generados por la fuerza del aire en las paletas, que son proporcionales a la superficie barrida por las mismas, de forma que la masa aumenta según la altura de la torre y según el diámetro de las hélices de la siguiente forma:

$$m_{torre}(\text{kg}) = 6.53 \cdot h(\text{m})^{1.2} + 0.0241 \cdot h(\text{m}) \cdot \pi (D(\text{m})/2)^2 \quad (16)$$

En cuanto a los resultados que se ha tratado de obtener, se ha buscado el valor de  $\beta$  máximo sin importar dificultades técnicas que impidan el transporte como la altura de la torre o el diámetro de las hélices o incluso la imposibilidad de fabricar un alternador de cierta potencia nominal. El segundo resultado que se ha buscado ha sido teniendo en cuenta un valor promedio de altura de la torre de unos 80 m, que desde 2012 es el promedio de altura para las torres construidas en los EEUU [24] y finalmente, una torre sencilla de transportar de 13 m de altura y 10 m de diámetro de las hélices.

## 2.4 Globo-cilindro hueco

Como se ha descrito anteriormente, a mayores alturas, la velocidad del viento también se incrementa, sin embargo, no es viable construir una torre de cientos de metros. Por esto, se debe de pensar en un globo que sea capaz de mantener el aerogenerador a altitudes tan elevadas. En esta nueva situación, se debe de buscar el equilibrio estático, es decir, que sea el propio viento y el cable que una el globo con la superficie los que mantengan el aerogenerador en la altura óptima. Para ello, a la hora de realizar el diseño, se deben de tener en cuenta las máximas velocidades posibles que soplen sobre el globo y además, se necesita un equilibrio de fuerzas en los diferentes elementos que componen el diseño del globo.

Se ha supuesto un globo en forma de cilindro hueco de longitud y radio  $R$  lleno de hidrógeno, que sustenta al aerogenerador a una altura  $h$ , que a su vez está unido a la superficie de Marte a una distancia  $d$ , por un cable que forma una catenaria (ver figura 10).

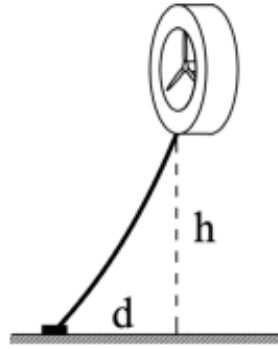


Figura 10: Modelo del globo-cilindro hueco.

Este tipo de globo-cilindro hueco está basado en el diseño BAT (Buoyant Air Turbine) de la empresa Altaeros Energies, que fue pionera en el desarrollo de este sistema, utilizado en zonas remotas donde no es tan sencilla la construcción de parques eólicos.



Figura 11: Fotografía del diseño BAT. Fuente:[1]

Una vez conocido el diseño del globo, se ha procedido a desglosar las ecuaciones del equilibrio de fuerzas según la parte del diseño que corresponde. Comenzando con el globo con aerogenerador, nos encontramos con la siguiente distribución de fuerzas:

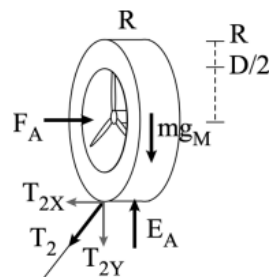


Figura 12: Boceto de las fuerzas que actúan sobre el globo-cilindro y el aerogenerador.

de manera que se cumple que:

$$\begin{cases} E_A = (m_{ag} + m_{gl})g_M + T_{2Y} \\ F_A = T_{2X} \end{cases} \quad (17)$$

donde el empuje de Arquímedes es ,teniendo en cuenta que la atmósfera de Marte es 95 % CO<sub>2</sub>:

$$E_A = \pi \left( R^2 - \frac{D^2}{4} \right) R(\rho_M - \rho_{H_2})g_M = \frac{21}{22} \pi \left( R^2 - \frac{D^2}{4} \right) R\rho_M g_M \quad (18)$$

la fuerza aerodinámica es:

$$F_A = C_A \frac{1}{2} \rho_M v^2 \pi R^2 \text{con } C_A \simeq 0.5 \quad (19)$$

y la masa del conjunto:

$$m = m_{ag} + m_{gl} = m_{ag} + \sigma_{gl} \pi \left( 3R^2 + DR - \frac{D^2}{4} \right) \quad (20)$$

siendo la gravedad marciana,  $g_M = 3.71 \text{ m/s}^2$  y  $\sigma_{gl} = 10 \text{ g/m}^2$ .

A continuación, se debe proceder con las fuerzas ejercidas sobre el cable:

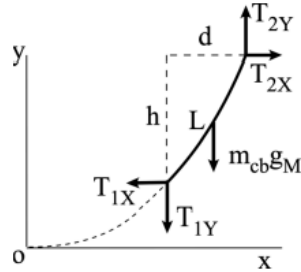


Figura 13: Boceto de la distribución de fuerzas en el cable.

donde el punto 1 es donde se ancla el cable al suelo y el punto 2 donde se unen el cable y el aerogenerador, siendo las ecuaciones de equilibrio:

$$\begin{cases} T_{2Y} = T_{1Y} + m_{cb}g_M \\ T_{1X} = T_{2X} = T_0 \end{cases} \quad (21)$$

Con respecto al cable, cabe destacar que este está compuesto por aluminio como material conductor y esté recubierto por Kevlar. Esta elección se debe a que el aluminio es menos denso que el cobre, una densidad de  $2700 \text{ kg/m}^3$  frente a los  $8930 \text{ kg/m}^3$  del cobre, pero tiene poca resistencia a la tracción, tan solo  $\sigma_{TAl} = 90 \text{ MPa}$  por lo que es necesario el Kevlar, que tiene también poca densidad ( $\rho_{kev}=1490 \text{ kg/m}^3$ ) pero gran resistencia a la tracción ( $\sigma_{kev} = 3620 \text{ MPa}$ ). La resistividad eléctrica que presenta el aluminio es de  $0.0277 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ .

Conociendo estos datos, se ha buscado que el cable tenga un área lo suficientemente grande como para que no se rompa debido a la fuerza que pueda ejercer el viento a velocidades tres veces mayores a las medidas con un margen amplio. Para esto se multiplica por un factor 3 y se subestima la resistencia a la tracción del Kevlar hasta un 10 % de su valor, de tal forma de que este margen sea suficiente (ver ecuación (22)). Esto con respecto al área de cable compuesto de Kevlar, pero con respecto a la parte de aluminio, se ha obtenido en función de la potencia nominal y de las pérdidas óhmicas (ver ecuación (23)).

$$A_{kev} = 10 \cdot 3 \cdot T / \sigma_{kev} \quad (22)$$

$$A_{Al} = \frac{2P_N r_{Al}}{f_{ohm} V^2} \quad (23)$$

donde  $r_{Al}$  es la resistividad eléctrica del aluminio,  $f_{ohm}$  es el factor de pérdidas óhmicas, que para valores de potencia nominal del orden de los kW se estima que es  $0.01 \text{ km}^{-1}$  y  $V$  el voltaje, que vale 10 kV.

De esta forma, se puede estimar cuál es la masa del cable y el valor del peso por unidad de longitud:

$$m_{cb} = L(A_{kev} \rho_{kev}) + A_{al} \rho_{Al} \quad (24)$$

$$\mu = (A_{kev} \rho_{kev}) + A_{al} \rho_{Al} g_M \quad (25)$$

Con este último valor, se puede obtener el valor de la constante  $\gamma$  de la catenaria que forma el cable, como se puede observar en la figura 13, siendo  $\gamma = \frac{T_0}{\mu}$ , de tal forma que la ecuación de la catenaria es:

$$y = \gamma \left( \cosh \left( \frac{x}{\gamma} \right) - 1 \right) \quad (26)$$

El punto 1, donde se ancla el cable a la superficie de Marte, sufrirá una fuerza hacia arriba  $T_{1Y}$ . Esta fuerza depende de la distancia horizontal  $d$  ( $x_2 - x_1$ ), entre el punto de anclaje y el globo. Se puede conseguir que  $T_{1Y} = 0$ , pero entonces la distancia  $d$  es demasiado grande, del orden de km. Con distancias horizontales menores tendremos que  $T_{1Y} > 0$  que tirará del punto de anclaje. Suponiendo que sujetamos el cable a una roca basáltica de las que abundan en Marte, podemos estimar el volumen necesario para que aguante la fuerza  $T_{1Y}$ . El valor de este volumen debe de ser:

$$Vol \geq \frac{T_{1Y}}{\rho_{bas} g_M} \quad (27)$$

siendo  $\rho_{bas} = 2900 \text{ kg/m}^3$ .

Con las ecuaciones [17-27], se debe de seguir un procedimiento numérico para que a partir de una altura  $h$ , el radio  $R$  del globo y la potencia nominal,  $P_N$ , se obtenga el valor máximo del parámetro  $\beta$ . Además de esto, se debe buscar el valor donde  $T_{1Y}$  tenga sentido físico, ya que no es posible obtener un volumen de basalto superior a cierta cantidad. Evidentemente  $T_{1Y}$  debe ser mayor que 0, porque sino el globo no llegaría a flotar.

Otra consideración a tener en cuenta es que estos cálculos se han realizado para un valor de velocidad bastante mayor al que se producirá normalmente, de forma que el valor de la longitud de cable necesario es el máximo y se necesitará de un mecanismo automático que detecte la velocidad y sea capaz de soltar y recoger cable para que la longitud del mismo sea la adecuada a cada velocidad.

## 2.5 Generadores triboeléctricos

A estos dos diseños previamente mencionados hay que añadirles una variación, que es la de emplear generadores triboeléctricos en vez de unos de inducción magnética. Estos suponen un rendimiento inferior pero también una masa notablemente menor, de forma que tiene sentido estudiar su viabilidad. Para estos, se debe sustituir la expresión de la ecuación (10) para la eficiencia por la ecuación (28), y la ecuación (15) para la masa por la ecuación (29).

$$\eta = 0.5 \cdot 0.6 \quad (28)$$

$$m(\text{kg}) = 1.69P_N(\text{kW}) \quad (29)$$

donde en la eficiencia se estima que en el momento presente existen generadores capaces de proporcionar voltajes de kV y densidades de potencia eléctrica de 10 MW por m<sup>2</sup> de superficie de rozamiento, con unas eficiencias de conversión de trabajo mecánico a eléctrico cercanas al 60 % y en la masa, el efecto de la potencia nominal es mucho menor.

Para obtener el valor óptimo de la ecuación (11) se ha desarrollado un programa con diversos módulos utilizando *Python*, mediante el cuál se han desarrollado ciertas herramientas y en el cual variando diferentes parámetros e iterando se ha conseguido obtener el valor óptimo que cumple tanto las ecuaciones de equilibrio como una serie de restricciones, como por ejemplo el volumen máximo de la roca de basalto que sujete al globo-cilindro o el hecho de que el diámetro de la hélice evidentemente no puede superar la altura de la torre.

### 3 Resultados y análisis

En esta sección, se ha puesto un ejemplo utilizando datos reales de cómo se caracteriza la velocidad del viento y se ha desarrollado y mostrado todos los resultados obtenidos para los diversos modelos y los respectivos casos dentro de estos que pueden ser interesantes.

#### 3.1 Distribución de Weibull

En primer lugar, como ha sido previamente explicado, todo el desarrollo matemático de las ecuaciones del equilibrio estático se ha hecho empleando los datos tomados por el Perseverance Rover en la planicie Elysium, mostrados en la tabla 1. De esta tabla, se toma el dato de parámetros de Weibull que mayor velocidad real significa, siendo este el del intervalo 2, correspondiente al mediodía, entre las 10:00 y las 15:00. De esta manera, se obtienen para una altura  $h = 1.6$  m, un parámetro de escala,  $c = 10.28$  m/s y un parámetro de forma,  $k = 3.60$ . Con estos valores se obtiene la siguiente distribución (figura 14), que debería ser actualizada para diferentes alturas a las que se deban de colocar los aerogeneradores:

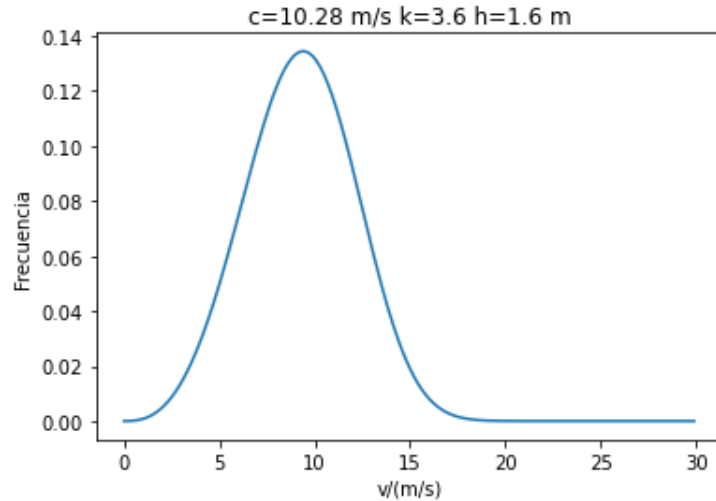


Figura 14: Distribución de Weibull para los parámetros medidos máximos a una altura de 1.6 m.

Tras conocer cómo se comporta la probabilidad del viento y utilizando valores medios de velocidad, con la ayuda de un código en Python, se ha procedido a hallar los valores máximos de  $\beta$ . Evidentemente esta distribución no es igual a la de otras alturas.

#### 3.2 Torre con alternador de inducción electromagnética

El primer modelo que se ha estudiado es el más común y más extendido en la Tierra, una torre unida a unas hélices tripala, cuyo generador de energía eléctrica a partir de energía mecánica es un alternador de inducción electromagnética. Para este, se ha dividido en tres subcasos. El primero buscando una obra bastante pequeña, donde el diámetro de las hélices sea de 10 m, el segundo recreando los valores de altura de los molinos promedio que existen en la Tierra, unos 80 m, al planeta rojo y finalmente buscando el valor máximo de  $\beta$  sin tener en cuenta posibles dificultades a la hora de construir e implementar el diseño.

### 3.2.1 Torre con hélices de 10 m de diámetro

Este diseño, como ya ha sido mencionado, es el que menor dificultad requiere a la hora de construirlo, ya que no existe tampoco tanta dificultad a la hora de montarlo si las hélices pueden ser transportadas en piezas y ser acopladas allí. De esta manera, lo que puede variar es la altura de la torre y la potencia nominal del alternador, de forma que iterando en varias ocasiones se encuentra que los valores óptimos de altura y potencia nominal son los siguientes,  $h = 19$  m y  $P_n = 3.7$  kW, con un valor de  $\beta = 1.0645 \cdot 10^{-3}$  kWh/kg, como se puede observar en las siguientes figuras:

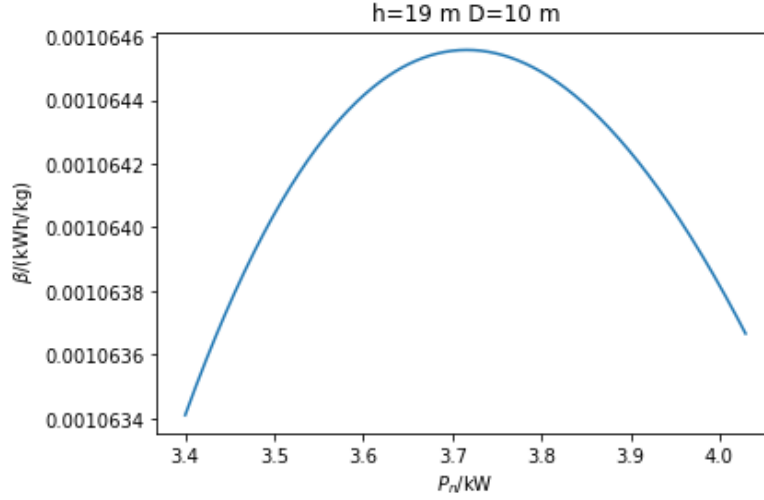


Figura 15: Valor de  $\beta$  para una altura fija de la torre de 19 m y un diámetro de las hélices de 10 m en función de la potencia nominal del alternador.

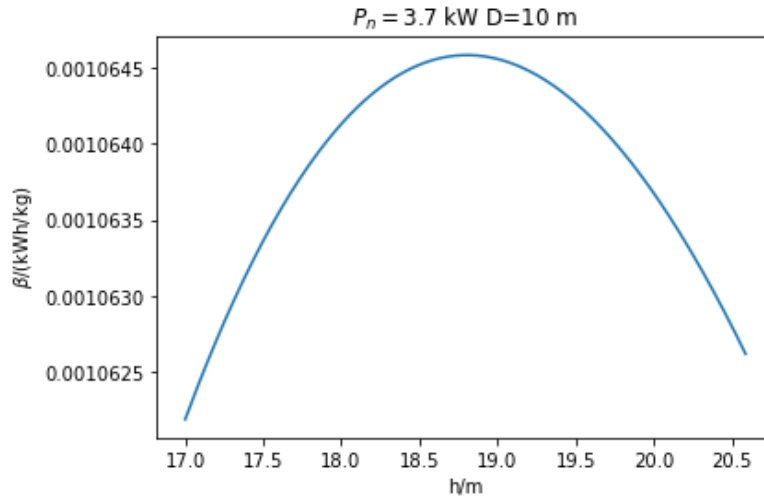


Figura 16: Valor de  $\beta$  para una potencia nominal fija del alternador de 3.7 kW y un diámetro de las hélices de 10 m en función de la altura de la torre.

Como se puede observar en ambas figuras, ambos son los valores que maximizan  $\beta$ , siendo la energía total producida,  $E_{el} = 0.635$  kWh y la masa del conjunto,  $m_T = 596.459$  kg.

### 3.2.2 Torre con una altura de 80 m

Este diseño, que es el más similar al que uno se podría encontrar en la Tierra, se trata de una torre de 80 m, a la cuál se va incrementando o disminuyendo el diámetro de sus hélices y la potencia nominal del alternador. De esta manera, se encuentra que el diámetro de las hélices debe de ser  $D = 28$  m y la potencia nominal del alternador,  $P_n = 46$  kW, obteniendo  $\beta = 1.5630 \cdot 10^{-3}$  kWh/kg. Esto se observa en las siguientes figuras:

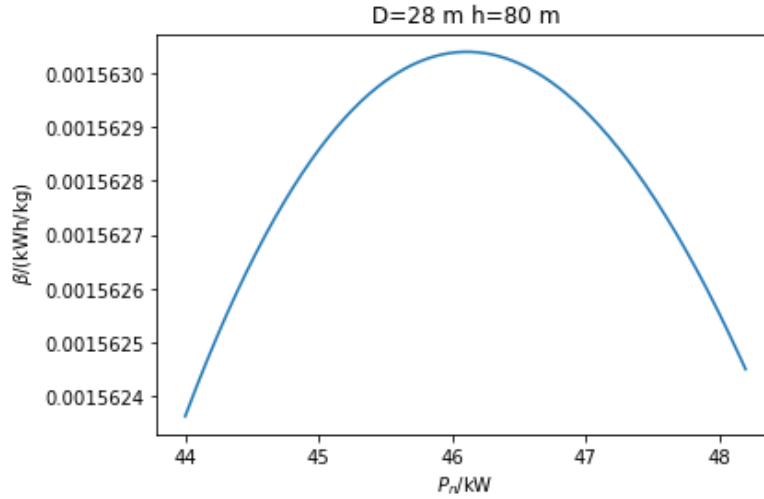


Figura 17: Valor de  $\beta$  para una torre de 80 m de altura cuyo diámetro de las hélices es de 28 m en función de la potencia nominal del alternador.

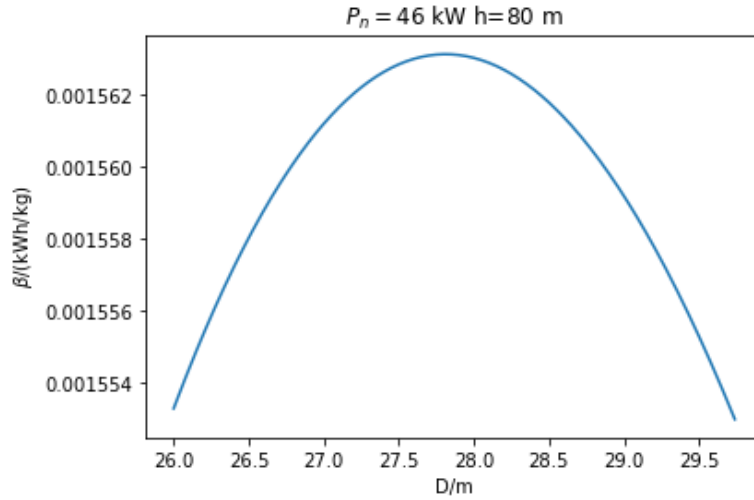


Figura 18: Valor de  $\beta$  para una torre de 80 m de altura cuyo alternador tiene una potencia nominal de 46 kW en función del diámetro de las hélices.

Es observado que los valores previamente mencionados son los que maximizan  $\beta$  y producen  $E_{el} = 9.960$  kWh y requiriendo una  $m_T = 6372.127$  kg.

### 3.2.3 Torre con el valor máximo de $\beta$

Este diseño, que es el más óptimo, es sin embargo, el más inverosímil de poder ser recreado en la realidad, ya que va a requerir de estructuras masivas, que en caso de ser posible sería muy productivo. Ahora mismo, existen estructuras en la Tierra todavía más grandes que la que se describe a continuación, sin embargo, el traslado de la misma a Marte parece, de momento, imposible. De todas formas, no está de más conocer cuál sería el límite de producción. En esta estructura no existe ningún parámetro fijado y se ha obtenido que las características más óptimas son una torre situada a 250 m de altura, con unas palas de 43 m de diámetro y un alternador cuya potencia nominal sea de 160 kW, obteniendo  $\beta = 1.6454 \cdot 10^{-3}$  kWh/kg. Se muestran a continuación tres gráficas que muestran la variación de  $\beta$ :

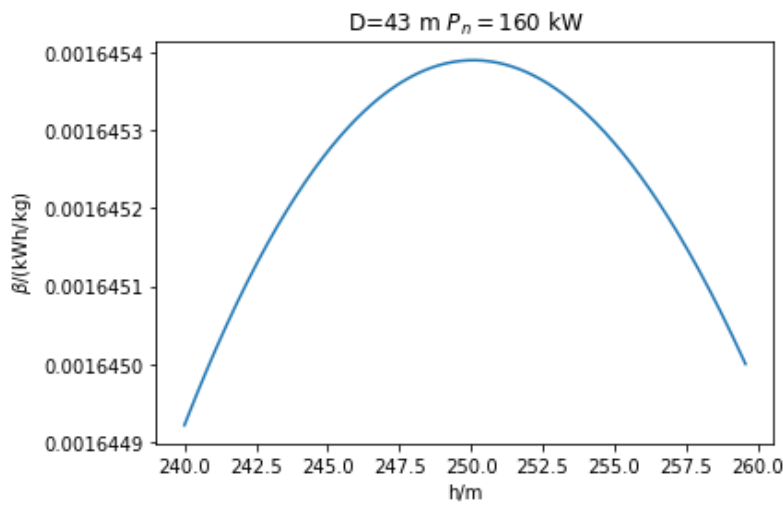


Figura 19: Valor de  $\beta$  en función de la altura de la torre cuando la potencia nominal del alternador es de 160 kW y el diámetro de las palas de 43 m.

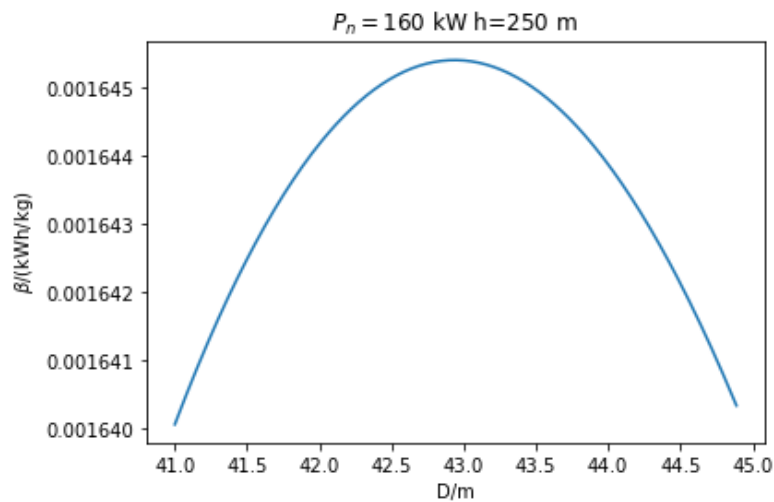


Figura 20: Valor de  $\beta$  en función del diámetro de las palas cuando la altura de la torre es de 250 m y la potencia nominal del alternador de 160 kW.

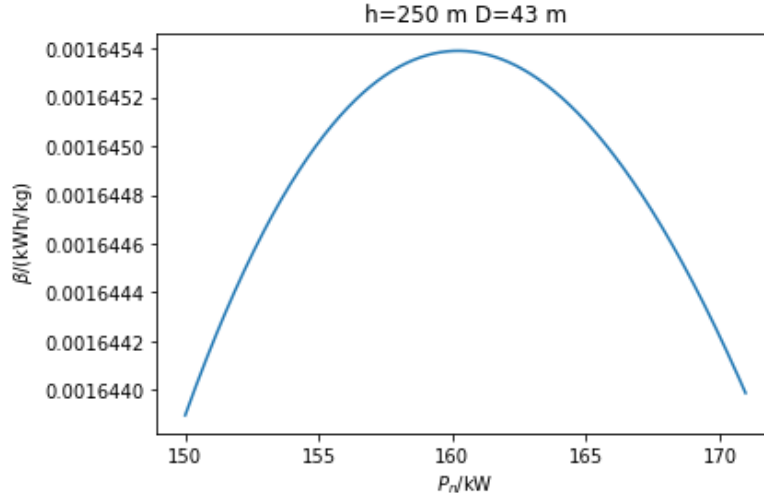


Figura 21: Valor de  $\beta$  en función de la potencia nominal del alternador cuando la altura de la torre es de 250 m y el diámetro de las palas de 43 m.

Tras observar que estos valores son los que maximizan  $\beta$ , también se obtiene que  $E_{el} = 35.536$  kWh y  $m_T = 21597.509$  kg.

De esta forma, se obtienen los siguientes resultados para los tres casos de este tipo de torre:

| Caso                            | $\beta$ /(kWh/kg)      | $E_{el}$ /kWh | $m_T$ /kg |
|---------------------------------|------------------------|---------------|-----------|
| $h=19$ m $D=10$ m $P_n=3.7$ kW  | $1.0645 \cdot 10^{-3}$ | 0.635         | 596.459   |
| $h=80$ m $D=28$ m $P_n=46$ kW   | $1.563 \cdot 10^{-3}$  | 9.960         | 6372.127  |
| $h=250$ m $D=43$ m $P_n=160$ kW | $1.6454 \cdot 10^{-3}$ | 35.536        | 21597.509 |

Tabla 2: Resultados obtenidos para el modelo de una torre con un alternador de inducción electromagnética

### 3.3 Globo-cilindro hueco con alternador de inducción electromagnética

Este segundo modelo, es una innovación técnica basada en los BAT desarrollados por antiguos estudiantes del MIT, donde en vez de en una torre, la masa está distribuida entre un globo, el aerogenerador y el cable que lo una a la superficie. Además, es necesario un volumen mínimo de basalto y alguna especie de mecanismo que sea capaz de recoger y soltar cable cuando sea necesario (de un peso ínfimo que puede ser despreciado). De esta manera, se consigue llegar a zonas donde la velocidad del viento es muy superior sin tener que incrementar tanto la masa total del modelo. Al igual que en el modelo de la torre, se ha estudiado un caso donde el diámetro de las hélices sea de 10 m y otro que simplemente maximice el valor de  $\beta$ .

### 3.3.1 Globo-cilindro con hélices de 10 m de diámetro

En este diseño, los parámetros que pueden variar son la altura a la que se sitúa el globo, el radio del mismo y la potencia nominal del aerogenerador. Para este caso, se ha obtenido que los parámetros más óptimos sería situar el globo a una altura de 0.37 km cuyo radio fuese de 20.30 m y la potencia nominal del generador de 5.8 kW. Con estos datos, se obtiene un valor de  $\beta = 4.1822 \cdot 10^{-3}$  kWh/kg. En las dos siguientes gráficas se muestra la variación de  $\beta$ :

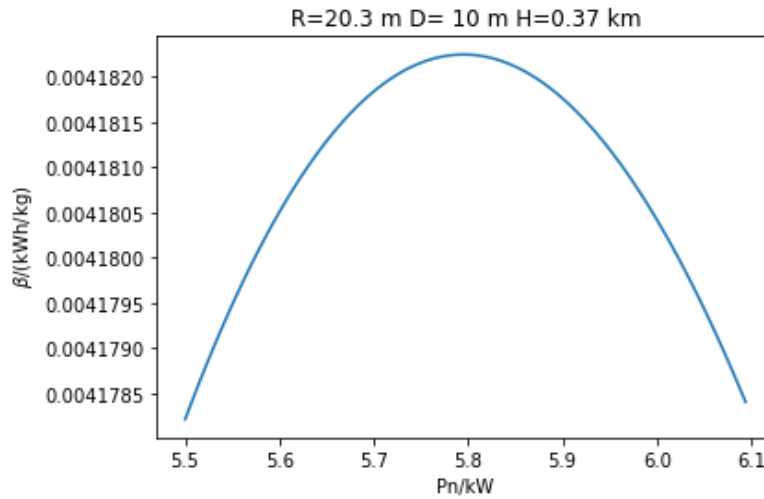


Figura 22: Valor de  $\beta$  en función de la potencia nominal del alternador cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.37 km, el radio del mismo de 20.30 m y el diámetro de las hélices de 10 m.

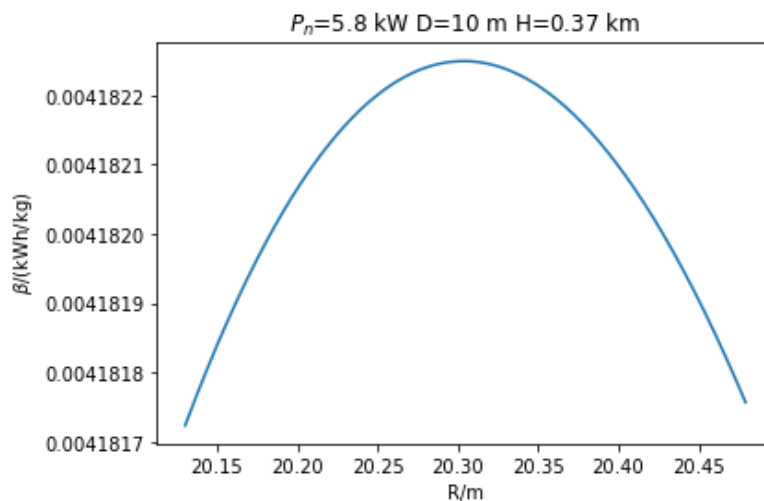


Figura 23: Valor de  $\beta$  en función del radio del globo cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.37 km, la potencia nominal del alternador 5.8 kW y el diámetro de las hélices de 10 m.

Estos valores dan como resultado final  $E_{el} = 1.765$  kWh y  $m_T = 422.047$  kg. Además, como datos adicionales, la masa del cable y del globo son solamente de unos 45 kg cada

uno, de forma que se observa como la mayor parte del peso la supone el aerogenerador. El volumen de basalto necesario es relativamente pequeño, del orden de  $53 \text{ dm}^3$ .

### 3.3.2 Globo-cilindro con el valor máximo de $\beta$

En este diseño no existe ningún parámetro fijo, de forma que la dificultad a la hora de iterar se incrementa, teniendo cuatro variables independientes. De todas maneras, se ha hallado que los parámetros óptimos son una altura de 0.39 km, una potencia nominal de 6.3 kW, un diámetro de las hélices de 10.33 m y un radio del globo de 20.92 m. Todos estos parámetros dan como resultado  $\beta = 4.1833 \cdot 10^{-3} \text{ kWh/kg}$ , variando ínfimamente el valor del modelo anterior. En las siguientes gráficas, se observa su evolución:

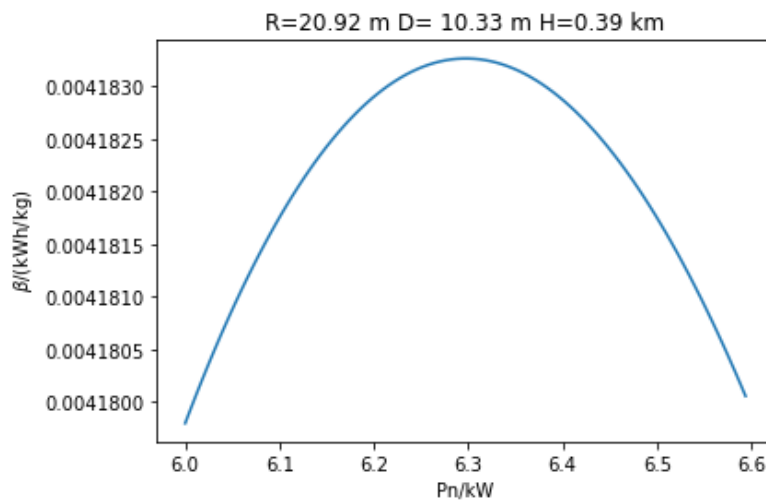


Figura 24: Valor de  $\beta$  en función de la potencia nominal del alternador cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.39 km, el radio del mismo de 20.92 m y el diámetro de las hélices de 10.33 m.

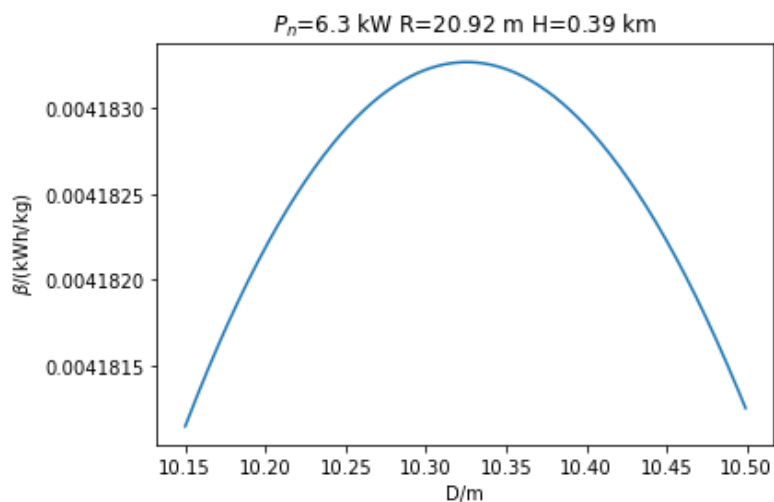


Figura 25: Valor de  $\beta$  en función del diámetro de las hélices cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.39 km, la potencia nominal del alternador 6.3 kW y el radio del globo de 20.92 m.

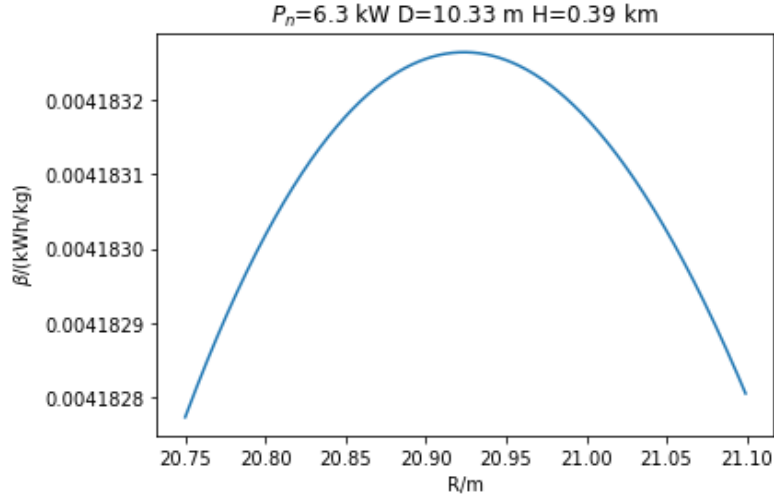


Figura 26: Valor de  $\beta$  en función del radio del globo cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.39 km, la potencia nominal del alternador 5.8 kW y el diámetro de las hélices de 10.33 m.

Con estos parámetros, se obtiene que  $E_{el}=1.917$  kWh y  $m_T = 458.657$  kg, que significan un pequeño incremento al modelo anterior, que se ven reflejados en la siguiente tabla:

| Caso                                 | $\beta/(kWh/kg)$       | $E_{el}/kWh$ | $m_T/kg$ |
|--------------------------------------|------------------------|--------------|----------|
| $h=0.37$ km $D=10$ m $P_n=5.8$ kW    | $4.1822 \cdot 10^{-3}$ | 1.765        | 422.047  |
| $h=0.39$ km $D=10.33$ m $P_n=6.3$ kW | $4.1833 \cdot 10^{-3}$ | 1.917        | 458.567  |

Tabla 3: Resultados obtenidos para el modelo de un globo-cilindro hueco con un alternador de inducción electromagnética

### 3.4 Torre con alternador triboeléctrico

En este nuevo modelo, se recupera el concepto del primer modelo expuesto, donde simplemente se varía el valor de la eficiencia del alternador y el valor de la masa utilizando la ecuación (28) y la ecuación (29). Este cambio disminuye la producción de energía eléctrica, pero a su vez disminuye notablemente el peso total del modelo.

### 3.4.1 Torre con hélices de 10 m de diámetro

Como ha sido mencionado en la subsección denominada de la misma manera para la torre con alternador de inducción electromagnética, este es el modelo de torre más sencillo y en este caso, se obtiene el mayor valor de  $\beta$  cuando la torre se sitúa a 18 m con una potencia nominal de 3.6 kW. El valor hallado es  $\beta = 0.8662 \cdot 10^{-3}$  kWh/kg. En las siguientes figuras se observa su variación:

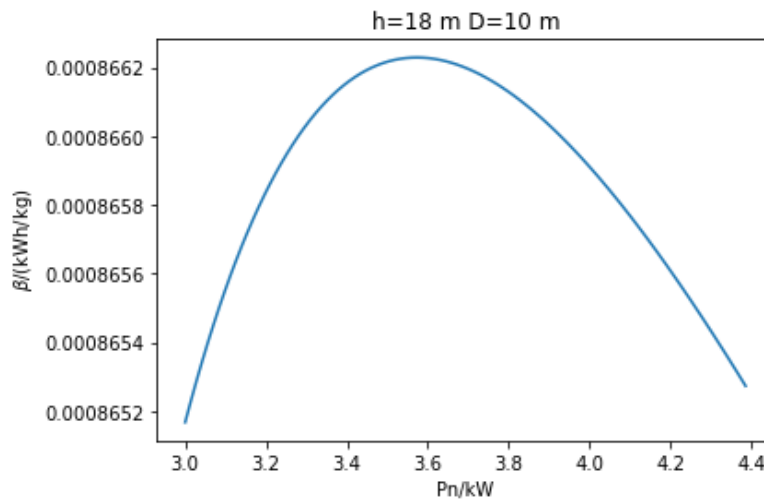


Figura 27: Valor de  $\beta$  para una altura fija de la torre de 18 m y un diámetro de las hélices de 10 m en función de la potencia nominal del alternador triboeléctrico.

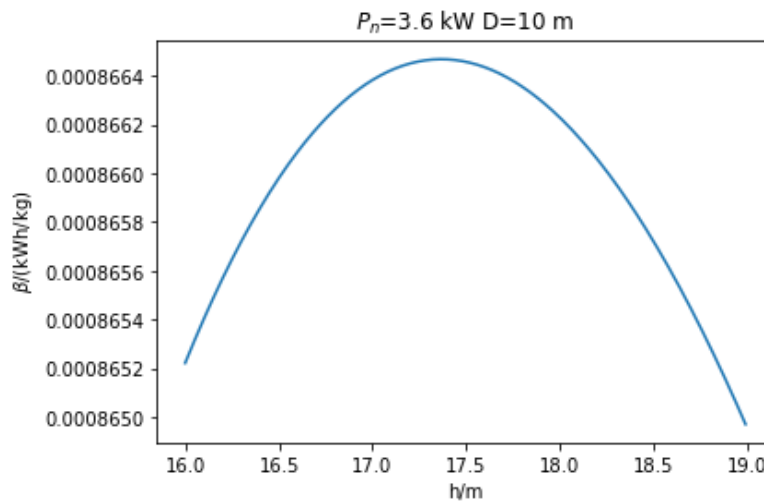


Figura 28: Valor de  $\beta$  para una potencia nominal fija del alternador triboeléctrico de 3.6 kW y un diámetro de las hélices de 10 m en función de la altura de la torre.

Los valores hallados son  $E_{el} = 0.450$  kW y  $m_T = 524.120$  kg en el caso del máximo valor de  $\beta$ . En este caso es bastante difícil de asegurar si a 17 o a 18 m se encuentra el valor máximo, por lo que tal vez hubiese sido mejor tratar de implementar una torre de 17.5 m.

### 3.4.2 Torre con una altura de 80 m

Repitiendo el proceso, se hallan como valores óptimos una potencia nominal del alternador de 46 kW y un diámetro de las hélices de 27 m. Estos valores resultan en que  $\beta = 1.1778 \cdot 10^{-3}$  kWh/kg.

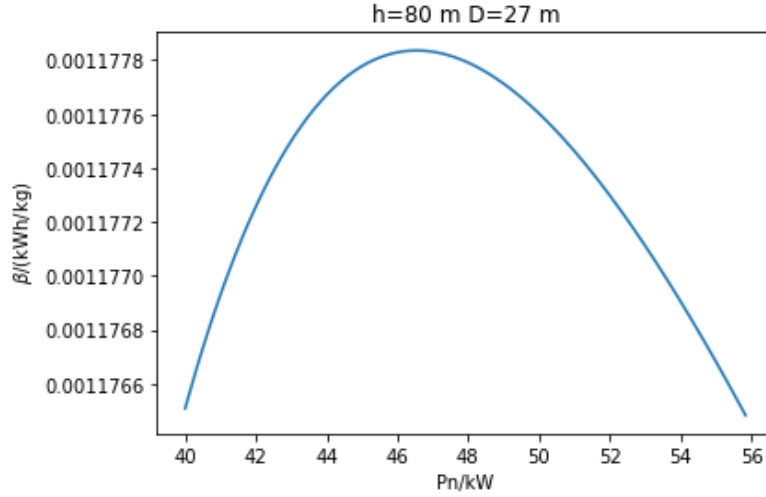


Figura 29: Valor de  $\beta$  para una torre de 80 m de altura cuyo diámetro de las hélices es de 27 m en función de la potencia nominal del alternador triboeléctrico.

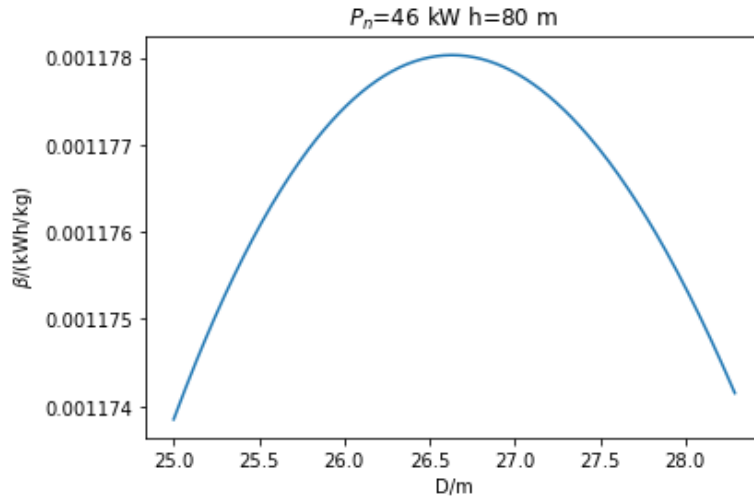


Figura 30: Valor de  $\beta$  para una torre de 80 m de altura cuyo alternador triboeléctrico tiene una potencia nominal de 46 kW en función del diámetro de las hélices.

Estos valores dan como resultado que  $E_{el} = 6.1827$  kWh y  $m_T = 5249.261$  kg. Es notorio como utilizando otro modelo, los valores que optimizan  $\beta$  sean los mismos que en el caso del alternador de inducción electromagnética y que, a pesar de ello, la producción energética disminuya tanto.

### 3.4.3 Torre con el valor máximo de $\beta$

Este es el último diseño de una torre y los parámetros elegidos son una altura de 196 m, un diámetro de las hélices de 38 m y una potencia nominal del alternador de 126 kW. Con todos estos parámetros se obtiene que  $\beta = 1.2163 \cdot 10^{-3}$  kWh/kg. La variación de  $\beta$  en función de los distintos parámetros es la siguiente:

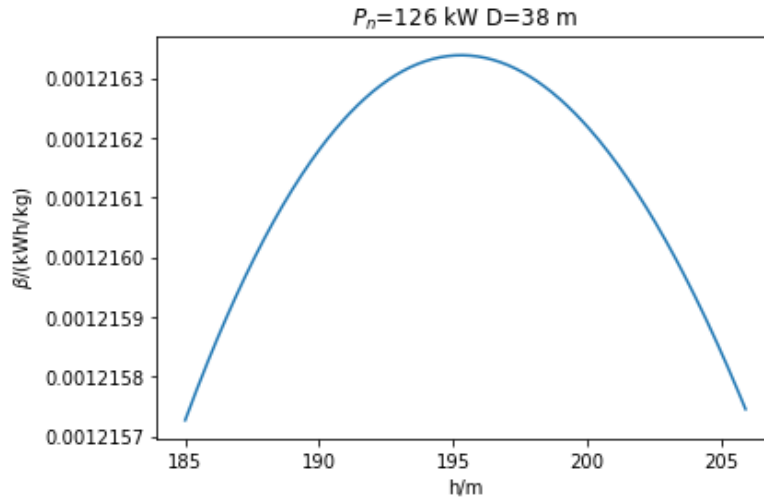


Figura 31: Valor de  $\beta$  en función de la altura de la torre cuando la potencia nominal del alternador es de 126 kW y el diámetro de las palas de 38 m.

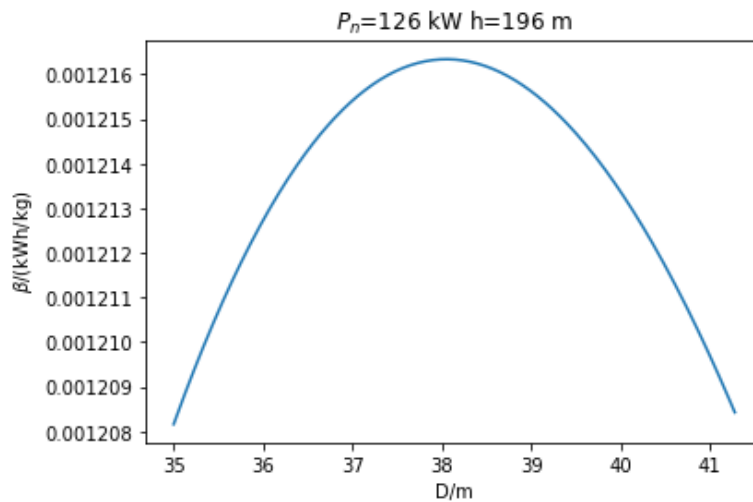


Figura 32: Valor de  $\beta$  en función del diámetro de las palas cuando la altura de la torre es de 196 m y la potencia nominal del alternador de 126 kW.

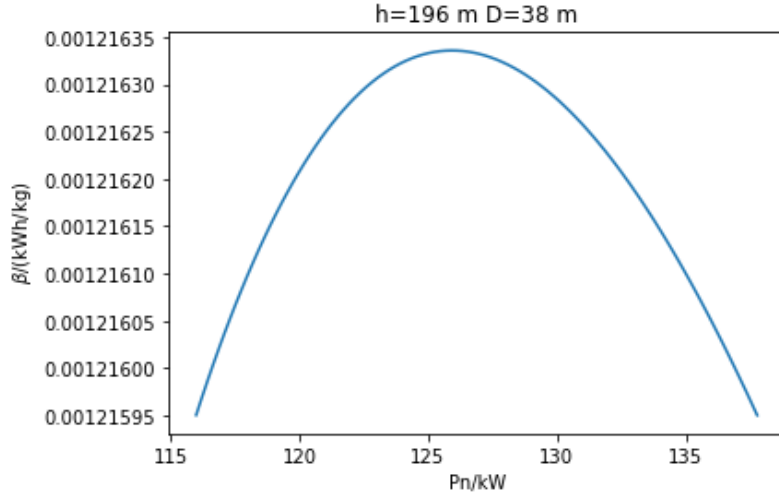


Figura 33: Valor de  $\beta$  en función de la potencia nominal del alternador cuando la altura de la torre es de 196 m y el diámetro de las palas de 38 m.

Se obtiene como resultado  $E_{el} = 16.755$  kWh y  $m_T = 13772.696$  kg. En la siguiente tabla se muestra un resumen de los valores obtenidos utilizando el modelo de torre con un alternador normal:

| Caso                            | $\beta$ /(kWh/kg)      | $E_{el}$ /kWh | $m_T$ /kg |
|---------------------------------|------------------------|---------------|-----------|
| $h=18$ m $D=10$ m $P_n=3.6$ kW  | $0.8662 \cdot 10^{-3}$ | 0.450         | 524.120   |
| $h=80$ m $D=27$ m $P_n=46$ kW   | $1.1778 \cdot 10^{-3}$ | 6.183         | 5249.261  |
| $h=196$ m $D=38$ m $P_n=126$ kW | $1.2163 \cdot 10^{-3}$ | 16.755        | 13722.696 |

Tabla 4: Resultados obtenidos para el modelo de una torre con un alternador triboeléctrico.

Resulta bastante evidente que en todos los casos, comparando con la tabla 2, que tanto la energía producida como el valor de  $\beta$  es menor en el caso del alternador triboeléctrico, lo cual indica como en el modelo de la torre, el hecho de que el alternador sea de menor peso con el costo de producir menos energía no sale nada rentable.

### 3.5 Globo-cilindro hueco con alternador triboeléctrico

En este último modelo, se toma prestado el segundo modelo con el mismo cambio que el tercero, el empleo de un alternador triboeléctrico. Este debería de ser el motivo por el que la utilización de alternadores triboeléctricos pueda valer la pena, que aunque produzcan menor cantidad de energía, su masa sea tan ínfima que se puedan transportar varios de ellos.

### 3.5.1 Globo-cilindro con hélices de 10 m de diámetro

En este caso, los parámetros utilizados para optimizar  $\beta$  son situar el globo a una altura de 0.42 km, utilizando un alternador con una potencia nominal de 7.6 kW y el radio del globo de 15.36 m, obteniendo como resultado  $\beta = 4.6006 \cdot 10^{-3}$  kWh/kg. En las siguientes gráficas se muestra la variación de  $\beta$ :

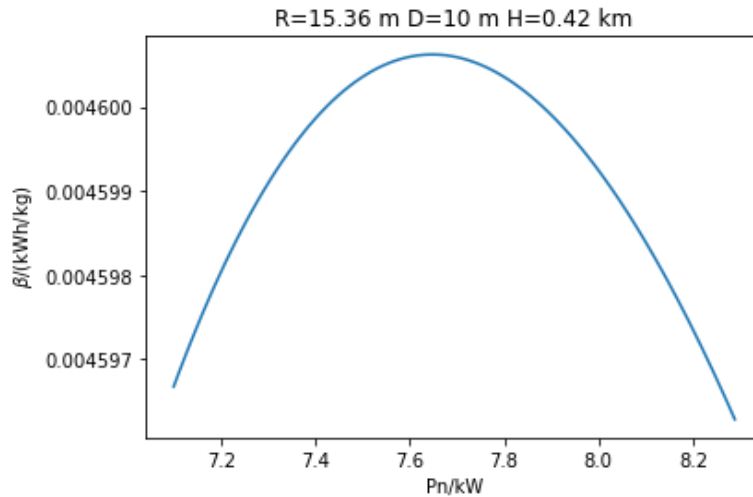


Figura 34: Valor de  $\beta$  en función de la potencia nominal del alternador triboeléctrico cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.42 km, el radio del mismo de 15.36 m y el diámetro de las hélices de 10 m.

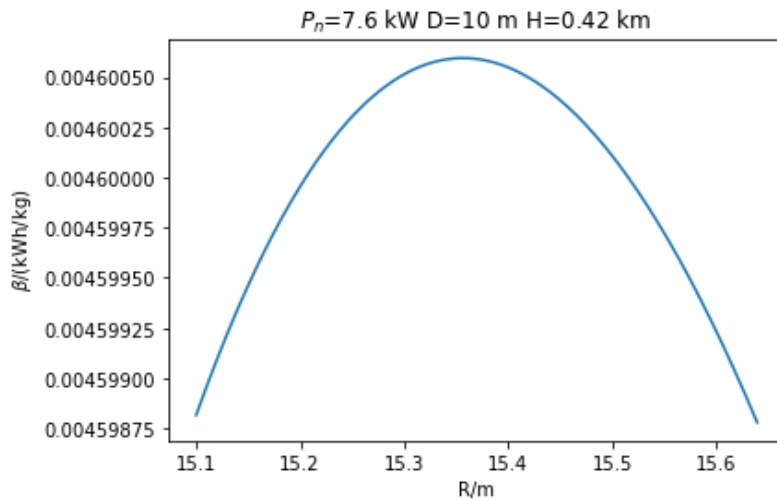


Figura 35: Valor de  $\beta$  en función del radio del globo cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.42 km, la potencia nominal del alternador 7.6 kW y el diámetro de las hélices de 10 m.

Para estos parámetros, se genera una  $E_{el} = 1.411 \text{ kWh}$  y la masa total es  $m_T = 306.657 \text{ kg}$ . La masa del cable es de 26 kg y la del globo de 17 kg. El volumen de la piedra de basalto de  $30 \text{ dm}^3$ .

### 3.5.2 Globo-cilindro con el valor máximo de $\beta$

Finalmente, el último caso de los 10 que se han analizado, empleando las dos “innovaciones”, utilizando el globo-cilindro y un alternador triboeléctrico. Buscando el máximo valor de  $\beta$ , se obtiene a una altura de 0.26 km, para un radio del globo de 11.02 m, un diámetro de las hélices de 6.5 m y para una potencia nominal del alternador de tan solo 2.7 kW. Con estos datos, se obtiene que  $\beta = 4.7510 \cdot 10^{-3}$  kWh/kg. A continuación, se muestra la variación de  $\beta$ :

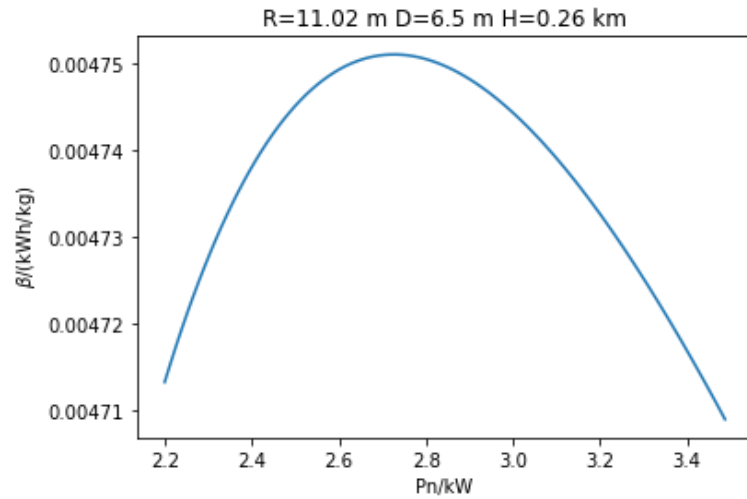


Figura 36: Valor de  $\beta$  en función de la potencia nominal del alternador triboelectrico cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.26 km, el radio del mismo de 11.02 m y el diámetro de las hélices de 6.5 m.

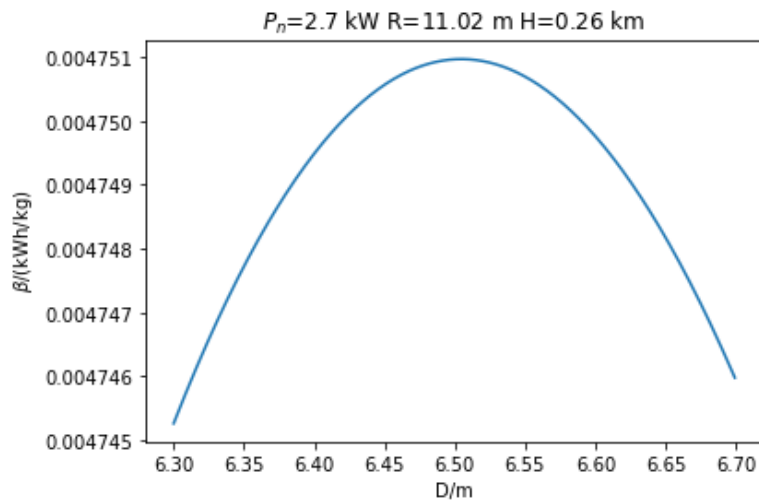


Figura 37: Valor de  $\beta$  en función del diámetro de las hélices cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.26 km, la potencia nominal del alternador triboeléctrico 2.7 kW y el radio del globo de 11.02 m.

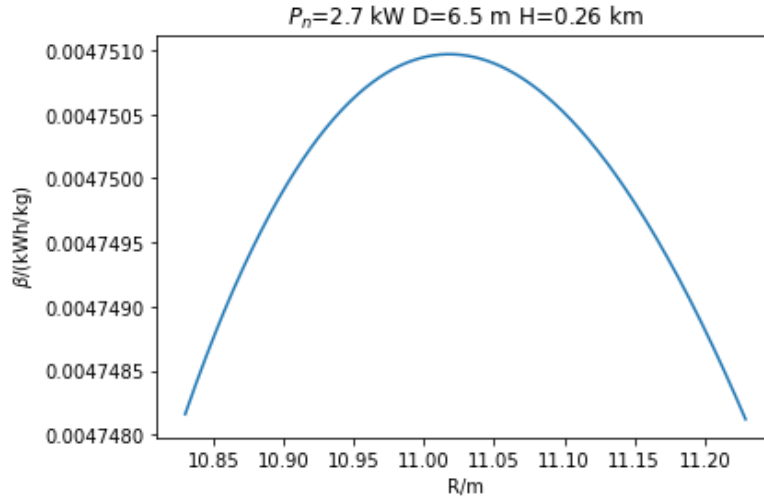


Figura 38: Valor de  $\beta$  en función del radio del globo cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.26 km, la potencia nominal del alternador 2.7 kW y el diámetro de las hélices de 6.5 m.

Con estos datos, también se obtiene que  $E_{el} = 0.519 \text{ kWh}$  y  $m_T = 109.160 \text{ kg}$ . Este diseño es el que cuenta con el valor máximo de  $\beta$ , pero curiosamente es el segundo que menos energía genera. Esto se debe a que la maximización de  $\beta$  va más por la notable disminución de la masa que por el aumento en la producción energética. La estimación de la masa del cable y del globo desciende a tan solo 30 kg, mientras que el volumen de basalto a  $7.5 \text{ dm}^3$ .

A continuación, se muestra la última tabla de resultados:

| Caso                                                       | $\beta/(kWh/kg)$       | $E_{el}/kWh$ | $m_T/kg$ |
|------------------------------------------------------------|------------------------|--------------|----------|
| $h=0.42 \text{ km } D=10 \text{ m } P_n=7.6 \text{ kW}$    | $4.6006 \cdot 10^{-3}$ | 1.411        | 306.657  |
| $h=0.26 \text{ km } D=11.02 \text{ m } P_n=2.7 \text{ kW}$ | $4.7510 \cdot 10^{-3}$ | 0.519        | 109.160  |

Tabla 5: Resultados obtenidos para el modelo de un globo-cilindro hueco con un alternador triboeléctrico.

Como se puede observar a lo largo de este capítulo, es más rentable a nivel energía-masa utilizar el modelo de globo-cilindro hueco que el modelo de la torre, aunque se genere bastante menos energía con una única unidad. De esta manera habrá que trasladar mayor número de aerogeneradores del modelo globo-cilindro hueco para conseguir la misma energía. Sin embargo, con respecto al uso de un tipo de alternador u otro, depende de los modelos. En el siguiente capítulo se realiza una conclusión sobre si este tipo de modelo servirá para futuras misiones en Marte.

## 4 Conclusión y discusión

A lo largo del trabajo, se ha ido explicando cómo funciona la generación de energía eléctrica a partir de energía eólica y como puede ser esta implementada de diversas maneras en una misión que vaya a Marte. Tras los resultados obtenidos, se pueden extraer una serie de conclusiones, entre las que destacan que la producción de energía es bastante superior utilizando el modelo de la torre frente al del globo-cilindro, obteniendo valores de producción de energía que llegan hasta el orden de pocas decenas de kWh frente a un modelo que produce apenas valores superiores a 1 kWh, mientras que este último es bastante más eficiente en términos de energía-masa, consiguiendo valores de  $\beta$  cerca de 4 veces mayores. De esta manera, se demuestra como aún generando más energía la torre, lo que importa es que con varios globo-cilindros huecos se podría llegar a esa energía generada suponiendo menos masa. Otro factor a añadir es que todos los modelos cuentan con ciertas desventajas que deberían ser valoradas, como por ejemplo, la torre que utiliza un alternador de inducción magnética más eficiente es inviable de trasladarse con facilidad a la realidad por la cantidad de metros de diámetro de la pala que impediría su transporte, ya que las palas estarían hechas de una sola pieza para que sean más resistentes, algo que no sucede con la torre, que está formada por celosía por esto mismo, para que pueda ser transportada por piezas. Otro ejemplo, podría ser el de cualquier caso de globo-cilindro, que a pesar de ser eficiente, se necesitarían varios para poder obtener la energía producida por el modelo de torre eólica, lo que puede dar lugar a más posibilidad de que alguno de los generadores dé problemas.

Además, la realidad es la siguiente, según el estudio realizado por Michelle Rucker [2], se estima que la potencia requerida para una misión de este tipo ronda los 40 kW, necesitando en un día marciano del orden de 986 kWh de energía, de forma que la energía que se produce por cualquiera de estos modelos no es capaz con de cubrir esta demanda una única unidad, sino que se necesitarían varios generadores. Como esta fuente de energía en un principio simplemente serviría como refuerzo en caso de que la producción de energía solar se viese muy disminuida por las tormentas de arena no era necesario cubrir la totalidad de los 986 kWh, pero los valores que se alcanzan son tan ínfimos que no se puede conseguir que la energía eólica sirva ni siquiera como apoyo. Para que por ejemplo se cubriese el 50 % de la necesidad energética, se necesitarían cerca de 950 globos-cilindro con alternador triboeléctrico, que supondrían unas 100 toneladas, un peso bastante complicado de transportar. El principal motivo que impide una producción de energía tan insignificante es la densidad de Marte, 100 veces menos densa en promedio que la terrestre, que no puede compensarse por un valor ligeramente mayor en la velocidad del viento, de forma que la energía producida no es suficiente. De todas formas, todos los modelos de producción de energía descritos en el trabajo no son suficientes porque los tamaños con los que se han producido, poco tienen que ver con ciertas megaestructuras que son muy innovadoras y se están realizando en la Tierra en la actualidad, de manera que no puede ser comparable con esas estructuras sino con las más extendidas en la superficie del planeta. Comparando con la relación energía-masa de las pilas nucleares, que cuentan con una potencia de 110 W y pesan 45 kg [18], se obtiene un valor de  $\beta = 60.2793 \cdot 10^{-3}$  kWh/kg, siendo un orden de magnitud mayor que la eficiencia obtenida en nuestro caso. El inconveniente de esta fuente de energía como ya ha sido mencionado es la gestión de los residuos nucleares, algo con lo que no cuentan las energías “limpias” como es el caso de la eólica.

## Referencias

- [1] “Imagen BAT.” <https://news.mit.edu/2014/high-flying-turbine-produces-more-power-05>  
Acceso: 11 de julio de 2023.
- [2] M. Rucker, “Integrated surface power strategy for Mars,” tech. rep., 2015.
- [3] P. Fernández Díez, U. de Cantabria. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, and U. de Cantabria. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, *Energía eólica*. Santander: Universidad de Cantabria, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, 1993.
- [4] A. P. Talayero Navales, E. Telmo Martínez, and A. Bayod Rújula, *Energía eólica*. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza, 2<sup>a</sup> ed., 2011.
- [5] J. Moragues and A. Rapallini, “Energía eólica,” *Buenos Aires: Instituto Argentino de la Energía General Mosconi*, 2003.
- [6] “Fuerza resultante en las palas.” <https://grupo15fluidos.wordpress.com/2016/04/24/funcionamiento-de-la-turbina/>. Acceso: 28 de junio de 2023.
- [7] N. Goudarzi and W. Zhu, “A review of the development of wind turbine generators across the world,” in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, vol. 45202, pp. 1257–1265, American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- [8] G. Zhu, J. Chen, T. Zhang, Q. Jing, and Z. L. Wang, “Radial-arrayed rotary electrification for high performance triboelectric generator,” *Nature communications*, vol. 5, no. 1, p. 3426, 2014.
- [9] D. S. Portree, *Humans to Mars: fifty years of mission planning, 1950-2000*. No. 20, National Aeronautics and Space Administration, 2001.
- [10] D. Viúdez-Moreiras, M. Lemmon, C. Newman, S. Guzewich, M. Mischna, J. Gomez-Elvira, K. Herkenhoff, A. Sánchez-Lavega, M. Torre, J. Rodríguez-Manfredi, R. Lorenz, J. Pla-García, R. Hueso, M. Richardson, L. Tamppari, M. Smith, V. Apéstigue, D. Toledo, and J. Bell, “Winds at the Mars 2020 landing site. Part 2: Near-surface wind patterns at Jezero crater,” *Journal of Geophysical Research: Planets*, vol. 127, 12 2022.
- [11] A. Colozza and M. Shahinpoor, “Solid State Aircraft Phase I Final Report,” 11 2002.
- [12] G. A. Landis, “Dust obscuration of mars solar arrays,” *Acta Astronautica*, vol. 38, no. 11, pp. 885–891, 1996.
- [13] O. B. Toon, J. B. Pollack, and C. Sagan, “Physical properties of the particles composing the martian dust storm of 1971–1972,” *Icarus*, vol. 30, no. 4, pp. 663–696, 1977.
- [14] A. Nier, W. Hanson, A. Seiff, M. McElroy, N. Spencer, R. Duckett, T. Knight, and W. Cook, “Composition and structure of the Martian atmosphere: Preliminary results from Viking 1,” *Science*, vol. 193, no. 4255, pp. 786–788, 1976.

- [15] “With Mars Methane Mystery Unsolved, Curiosity Serves Scientists a New One: Oxygen.” <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/with-mars-methane-mystery-unsolved-curiosity-serves-scientists-a-new-one-oxygen>. Acceso: 5 de julio de 2023.
- [16] A. J. Abel, A. J. Berliner, M. Mirkovic, W. D. Collins, A. P. Arkin, and D. S. Clark, “Photovoltaics-driven power production can support human exploration on Mars,” *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, vol. 9, p. 78, 2022.
- [17] P. Read, M. Collins, F. Forget, R. Fournier, F. Hourdin, S. Lewis, O. Talagrand, F. Taylor, and N. Thomas, “A GCM climate database for mars: for mission planning and for scientific studies,” *Advances in Space Research*, vol. 19, no. 8, pp. 1213–1222, 1997.
- [18] F. Ritz and C. E. Peterson, “Multi-mission radioisotope thermoelectric generator (mmrtg) program overview,” in *2004 IEEE aerospace conference proceedings (IEEE Cat. No. 04TH8720)*, vol. 5, pp. 2950–2957, IEEE, 2004.
- [19] V. L. Hartwick, O. B. Toon, J. K. Lundquist, O. A. Pierpaoli, and M. A. Kahre, “Assessment of wind energy resource potential for future human missions to mars,” *Nature Astronomy*, vol. 7, no. 3, pp. 298–308, 2023.
- [20] “Datos de aerogeneradores.” <https://www.atlantissolar.com/>. Acceso: 10 de julio de 2023.
- [21] P. Jamieson, *Innovation in wind turbine design*. John Wiley & Sons, 2018.
- [22] R. Gálvez Román, “Diseño y cálculo preliminar de la torre de un aerogenerador,” B.S. thesis, 2005.
- [23] M. Veljkovic, M. Feldmann, J. Naumes, D. Pak, L. Simões, da Silva, and C. Rebelo, “9 - Wind turbine tower design, erection and maintenance,” in *Wind Energy Systems* (J. D. Sørensen and J. N. Sørensen, eds.), Woodhead Publishing Series in Energy, pp. 274–300, Woodhead Publishing, 2011.
- [24] “Promedio de altura de torres en los EEUU.” <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=33912>. Acceso: 1 de agosto de 2023.

# Índice de figuras

|    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | Descomposición de la fuerza generada por la diferencia de presiones sobre los perfiles de la pala. Fuente [6] . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 5  |
| 2  | a) Ilustraciones esquemáticas del generador triboeléctrico, que tiene dos partes, el rotor y el estator. Las imágenes ampliadas en el extremo interno b) y en el extremo externo c) revelan como los electrodos tienen patrones complementarios y están separados por pequeños surcos entre ellos. d) Fotografía de un rotor y e) fotografía de un estator. Fuente: [8] . . . . .                                                                                                                                                                              | 6  |
| 3  | Estado inicial en el que el rotor está alineado con el electrodo A. Las tres secciones de arriba a abajo ilustran el esquema tridimensional, la distribución de carga en condición de circuito abierto y la distribución de carga en condición de cortocircuito, respectivamente. (b) Estado intermedio en el que el rotor está girando alejándose de la posición inicial en un ángulo de $\alpha$ . (c) Estado final en el que el rotor está alineado con el electrodo B. El rotor se ha rotado $\alpha_0$ lejos de la posición inicial. Fuente:[8] . . . . . | 6  |
| 4  | Variación de la potencia eléctrica generada en los diferentes intervalos de velocidad. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 7  |
| 5  | Variación de la densidad marciana con la altura definida en tres tramos diferentes, cuando la altura es menor a 0.1 km, cuando la altura está entre 0.1 km y 1 km y, finalmente cuando la altura está entre 1 y 10 km. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 8  |
| 6  | Representación gráfica de la eficiencia energética de diversos generadores frente a la potencia nominal de los mismos. En azul, los datos proporcionados y en rojo, la ley empírica aproximada. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 14 |
| 7  | Ajuste de la masa de las palas frente al diámetro del rotor. Se obtiene una relación mostrada en la ecuación (12). Fuente: [21] . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 15 |
| 8  | Ajuste de la masa de la góndola de diferentes aerogeneradores frente al diámetro del rotor. Se obtiene una relación indicada en la ecuación (14).Fuente: [21] . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 16 |
| 9  | Ejemplo de torre de celosía que sostiene al aerogenerador. Fuente: [23] . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 17 |
| 10 | Modelo del globo-cilindro hueco. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 18 |
| 11 | Fotografía del diseño BAT. Fuente:[1] . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 18 |
| 12 | Boceto de las fuerzas que actúan sobre el globo-cilindro y el aerogenerador.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 18 |
| 13 | Boceto de la distribución de fuerzas en el cable. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 19 |
| 14 | Distribución de Weibull para los parámetros medidos máximos a una altura de 1.6 m. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 22 |
| 15 | Valor de $\beta$ para una altura fija de la torre de 19 m y un diámetro de las hélices de 10 m en función de la potencia nominal del alternador. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 23 |
| 16 | Valor de $\beta$ para una potencia nominal fija del alternador de 3.7 kW y un diámetro de las hélices de 10 m en función de la altura de la torre. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 23 |
| 17 | Valor de $\beta$ para una torre de 80 m de altura cuyo diámetro de las hélices es de 28 m en función de la potencia nominal del alternador. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 24 |
| 18 | Valor de $\beta$ para una torre de 80 m de altura cuyo alternador tiene una potencia nominal de 46 kW en función del diámetro de las hélices. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 24 |
| 19 | Valor de $\beta$ en función de la altura de la torre cuando la potencia nominal del alternador es de 160 kW y el diámetro de las palas de 43 m. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 25 |

|    |                                                                                                                                                                                                                          |    |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 20 | Valor de $\beta$ en función del diámetro de las palas cuando la altura de la torre es de 250 m y la potencia nominal del alternador de 160 kW. . . . .                                                                   | 25 |
| 21 | Valor de $\beta$ en función de la potencia nominal del alternador cuando la altura de la torre es de 250 m y el diámetro de las palas de 43 m. . . . .                                                                   | 26 |
| 22 | Valor de $\beta$ en función de la potencia nominal del alternador cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.37 km, el radio del mismo de 20.30 m y el diámetro de las hélices de 10 m. . . . .                 | 27 |
| 23 | Valor de $\beta$ en función del radio del globo cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.37 km, la potencia nominal del alternador 5.8 kW y el diámetro de las hélices de 10 m. . . . .                       | 27 |
| 24 | Valor de $\beta$ en función de la potencia nominal del alternador cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.39 km, el radio del mismo de 20.92 m y el diámetro de las hélices de 10.33 m. . . . .              | 28 |
| 25 | Valor de $\beta$ en función del diámetro de las hélices cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.39 km, la potencia nominal del alternador 6.3 kW y el radio del globo de 20.92 m. . . . .                    | 28 |
| 26 | Valor de $\beta$ en función del radio del globo cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.39 km, la potencia nominal del alternador 5.8 kW y el diámetro de las hélices de 10.33 m. . . . .                    | 29 |
| 27 | Valor de $\beta$ para una altura fija de la torre de 18 m y un diámetro de las hélices de 10 m en función de la potencia nominal del alternador triboeléctrico. . . . .                                                  | 30 |
| 28 | Valor de $\beta$ para una potencia nominal fija del alternador triboeléctrico de 3.6 kW y un diámetro de las hélices de 10 m en función de la altura de la torre. . . . .                                                | 30 |
| 29 | Valor de $\beta$ para una torre de 80 m de altura cuyo diámetro de las hélices es de 27 m en función de la potencia nominal del alternador triboeléctrico. . . . .                                                       | 31 |
| 30 | Valor de $\beta$ para una torre de 80 m de altura cuyo alternador triboeléctrico tiene una potencia nominal de 46 kW en función del diámetro de las hélices. . . . .                                                     | 31 |
| 31 | Valor de $\beta$ en función de la altura de la torre cuando la potencia nominal del alternador es de 126 kW y el diámetro de las palas de 38 m. . . . .                                                                  | 32 |
| 32 | Valor de $\beta$ en función del diámetro de las palas cuando la altura de la torre es de 196 m y la potencia nominal del alternador de 126 kW. . . . .                                                                   | 32 |
| 33 | Valor de $\beta$ en función de la potencia nominal del alternador cuando la altura de la torre es de 196 m y el diámetro de las palas de 38 m. . . . .                                                                   | 33 |
| 34 | Valor de $\beta$ en función de la potencia nominal del alternador triboeléctrico cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.42 km, el radio del mismo de 15.36 m y el diámetro de las hélices de 10 m. . . . .  | 34 |
| 35 | Valor de $\beta$ en función del radio del globo cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.42 km, la potencia nominal del alternador 7.6 kW y el diámetro de las hélices de 10 m. . . . .                       | 34 |
| 36 | Valor de $\beta$ en función de la potencia nominal del alternador triboeléctrico cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.26 km, el radio del mismo de 11.02 m y el diámetro de las hélices de 6.5 m. . . . . | 35 |
| 37 | Valor de $\beta$ en función del diámetro de las hélices cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.26 km, la potencia nominal del alternador triboeléctrico 2.7 kW y el radio del globo de 11.02 m. . . . .     | 35 |

|    |                                                                                                                                                                                                     |    |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 38 | Valor de $\beta$ en función del radio del globo cuando la altura a la que se sitúa el globo es de 0.26 km, la potencia nominal del alternador 2.7 kW y el diámetro de las hélices de 6.5 m. . . . . | 36 |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## Índice de tablas

|   |                                                                                                                          |    |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | División del día marciano en 7 tramos diferentes con sus respectivos parámetros de Weibull. Fuente:[10] . . . . .        | 12 |
| 2 | Resultados obtenidos para el modelo de una torre con un alternador de inducción electromagnética . . . . .               | 26 |
| 3 | Resultados obtenidos para el modelo de un globo-cilindro hueco con un alternador de inducción electromagnética . . . . . | 29 |
| 4 | Resultados obtenidos para el modelo de una torre con un alternador triboeléctrico. . . . .                               | 33 |
| 5 | Resultados obtenidos para el modelo de un globo-cilindro hueco con un alternador triboeléctrico. . . . .                 | 36 |