

Artículo Ingeniería Aplicada

Diseño y Construcción De Un Aerogenerador De Eje Vertical Tipo Banki Para Microgeneración Urbana

Design and construction of a Banki Vertical Axe Wind Turbine for Energy Harvesting

 Rafaella Hazel Rojas-Rojas¹,  Daniel Felipe Sempértegui-Tapia²,  Omar Castellón-Castellón³,
 Renán Orellana-Lafuente⁴.

¹Estudiante Ingeniería Electromecánica. Universidad Privada Boliviana. Cochabamba. Bolivia. rafa.hazel.rojas@gmail.com

²Docente. Director Laboratorio de Energías Alternativa. Universidad Privada Boliviana. Cochabamba. Bolivia. dsempertegui@upb.edu

³Gerente IngresteC. IngresteC-Metrología y Calibración. Cochabamba. Bolivia. omar.castellon.c@gmail.com

⁴Docente. Director Carrera Electromecánica. Universidad Privada Boliviana. Cochabamba. Bolivia. renanorellana@upb.edu

RESUMEN

El acuerdo de París y el establecimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) han impulsado a los países que firmaron estos acuerdos a invertir en la investigación y desarrollo de alternativas de generación de energía limpia y reducir la dependencia en los combustibles fósiles. Una de las estrategias para esta transición es la microgeneración en sistemas productivos urbanos, donde la energía eólica destaca debido a su flexibilidad de diseño y adaptabilidad. En este sentido, en este trabajo se diseña y construye un Aerogenerador de Eje Vertical (VAWT por su sigla en inglés) tipo Banki para microgeneración urbana. Para este propósito, primero se verifican mediante simulaciones numéricas los parámetros de diseño óptimos (número de álabes, ángulo de ataque del álabe y relación altura-diámetro) sugeridos en un trabajo previo del mismo grupo de investigación. Posteriormente, se analiza la influencia del perfil de los álabes del aerogenerador, un parámetro que no había sido considerado anteriormente. A partir de los resultados obtenidos de velocidad angular de los diferentes perfiles de álabes se llegó a un diseño final del aerogenerador. Finalmente, se logró construir un prototipo de aerogenerador de eje vertical el cual, en las pruebas, llegó hasta 600 RPM y consiguió generar una diferencia de voltaje de hasta 100 mV. Además, se verificó experimentalmente la importancia del ángulo de incidencia del viento en la rotación del aerogenerador.

Palabras claves: Aerogenerador Eje Vertical, Banki, Microgeneración, Generación Eólica, Energía Renovable.

ABSTRACT

The Paris Agreement and the establishment of the Sustainable Development Goals (SDGs) have prompted the countries that signed these agreements to invest in research and development of clean energy generation alternatives and reduce dependence on fossil fuels. One of the strategies for this transition is energy harvesting in urban production systems, where wind energy stands out due to its design flexibility and adaptability. In this regard, this work designs and builds a Banki Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) for urban energy harvesting. To this end, the optimal design parameters (number of blades, attack angle of the blade, and height-to-diameter ratio) suggested in a previous study made by the same research group, first verified through numerical simulations. Subsequently, the influence of the blade profile, a parameter that had not been

Citar como: Rojas-Rojas, R.H., Sempértegui-Tapia, D.F., Castellón-Castellón, O., Orellana-Lafuente, R. Diseño y Construcción De Un Aerogenerador De Eje Vertical Tipo Banki Para Microgeneración Urbana. *Journal Boliviano De Ciencias*, 21(58) 42-59 <https://doi.org/10.52428/20758944.y21i58.1391>

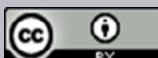
Recepción: 17/05/2025

Aceptado: 30/10/2025

Publicado: 30/12/2025

Declaración: Derechos de autor 2025 Rojas-Rojas, R.H., Sempértegui-Tapia, D.F., Castellón-Castellón, O., Orellana-Lafuente, R. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](#).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



previously considered, is analyzed. Based on the angular velocity results obtained for the different blade profiles, a final wind turbine design was arrived at. Finally, a prototype for the VAWT was built, which, in tests, reached speeds of up to 600 RPM and was able to generate a voltage difference of up to 100 mV. Furthermore, the importance of the incidence angle of wind on the rotation of the wind turbine was experimentally verified.

Key words: Vertical Axe Wind Turbine, Banki, Energy Harvesting, Wind Energy Generation, Clean Energy.

1. INTRODUCCION

En el año 2015 se firma el acuerdo de París (Nations, 2020), en el cual 196 países se comprometen a reducir sus emisiones de carbono, esto mayormente por medio de la transición de una matriz energética dependiente de combustibles fósiles a energía limpia, como ser solar, eólica y termal. Además, la Organización de Naciones Unidas (ONU) estableció 17 Objetivos para el Desarrollo Sostenible (Moran, 2023), en el cual el séptimo objetivo corresponde a la generación de energía limpia. La ONU reconoce en este punto que el desarrollo y acceso a una fuente de energía limpia es una necesidad para garantizar el suministro de localidades que se encuentran aisladas y disminuir la dependencia de aquellos que generan energía por medio de combustibles fósiles. Bolivia es uno de los países que depende de un combustible fósil para la generación de energía (71% de la matriz energética está compuesta por plantas de ciclo combinado, las cuales utilizan gas natural para la producción de energía eléctrica) y firmo tanto el acuerdo de París como los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Actualmente, Bolivia cuenta con plantas de energía solar y eólica, aunque la cantidad de energía que inyectan al interconectado eléctrico es muy pequeña (alrededor del 6%), se está investigando formas de aumentar la participación de las energías limpias por medio de la generación distribuida para autoconsumo tanto en ciudades como en zonas rurales y poblaciones alejadas que no pueden ser partes del interconectado nacional y por lo tanto no tienen acceso ninguna clase de energía eléctrica. Uno de los métodos propuestos para esta microgeneración es la instalación de aerogeneradores para aprovechar la energía del viento.

Los aerogeneradores están divididos según la orientación del eje de su rotor en Aerogeneradores de Eje Horizontal, o HAWT por su sigla en inglés, y Aerogeneradores de Eje Vertical, o VAWT por su sigla en inglés. Al mismo tiempo los VAWTs están divididos en dos grupos según su principio de funcionamiento: aerogeneradores de sustentación (donde los álabes del aerogenerador al girar, crean una diferencia de presión que genera una fuerza de sustentación perpendicular al flujo de aire, impulsando el rotor para generar energía eléctrica) o Darrieus y aerogeneradores de arrastre (el viento empuja la superficie de los álabes para producir la rotación que generará la energía eléctrica) o Savonius.

Los aerogeneradores Darrieus se caracterizan por tener 2 a 3 álabes delgados de geometría compleja (Möllerström *et al.*, 2019). Una de las versiones más populares de este aerogenerador es el Giromill o aerogenerador Darrieus H, donde los álabes de geometría compleja son reemplazados por álabes rectos, que tienen una alta fuerza de sustentación (Du *et al.*, 2019). Otro aerogenerador de sustentación que se ha vuelto una opción viable para microgeneración es el aerogenerador Crossflex, cuyos álabes tienen una forma helicoidal con un rotor alargado, este aerogenerador

se ha logrado integrar en la fachada de los edificios y las residencias (Denoon *et al.*, 2008). Los aerogeneradores Crossflex han pasado la etapa de investigación y se encuentran disponibles en el mercado, por el contrario existe un generador de sustentación que aún se encuentra en la etapa de investigación y todavía no pasado a la etapa de prototipaje, el aerogenerador *Variable Geometry Oval Trajectory* o VGOT fue diseñado por Ponta *et al.* (Ponta *et al.*, 2007), este modelo consiste en un aerogenerador Darrieus cuyos alabes revolucionan en una trayectoria ovalada sobre un riel respecto al eje. Este diseño permite obtener generación eléctrica a mayor escala gracias a la estabilidad estructural, logrando un mejor torque de inicio y velocidad *cut-in*.

El aerogenerador Savonius, en su versión clásica, está compuesto por 2 medios cilindros huecos unidos a un eje; este aerogenerador presenta algunas ventajas sobre el aerogenerador Darrieus, el mecanismo de arrastre del aerogenerador permite que pueda ser adaptado a una gran cantidad de fluidos o flujos másicos de diferentes características (Al-shammary *et al.*, 2020). Las variantes que se lograron desarrollar del aerogenerador Savonius son: el aerogenerador Sistan, el aerogenerador Zephyr y el aerogenerador Banki. El aerogenerador Sistan, el cual se puede ver en la Figura N° 1 a), fue uno de los primeros en ser desarrollado, su nombre deriva de la región de Irán en la que fue utilizado, tiene una facilidad de integración arquitectónica lo cual permite su integración en áreas residenciales, se sugiere que incrementar el número de álabes puede incrementar el rendimiento del aerogenerador (Muller *et al.*, 2009). El aerogenerador Zephyr, el cual se puede ver en la Figura N° 1 b), tiene varios álabes en el estator que ayudan a controlar el flujo y la dirección del viento a la entrada de la turbina. El beneficio aerodinámico de los álabes es la reducción de la turbulencia generada y la posibilidad que el flujo se concentre de mejor manera sobre la superficie del álate, si bien estos tipos alternos de turbinas no suelen ser explorados, son una alternativa a configuraciones comunes existentes (Pope *et al.*, 2010)numerical and experimental studies are presented to determine the operating performance and power output from a vertical axis wind turbine (VAWT. Por último, la turbina Banki, la cual se puede ver en la Figura 1 c), tiene su origen en la generación hidroeléctrica, poca investigación fue realizada para su integración eólica, Qusai *et al.* (Qusai *et al.*, 2021) realizaron un estudio sobre un aerogenerador Banki aplicado para la generación eólica en carreteras.

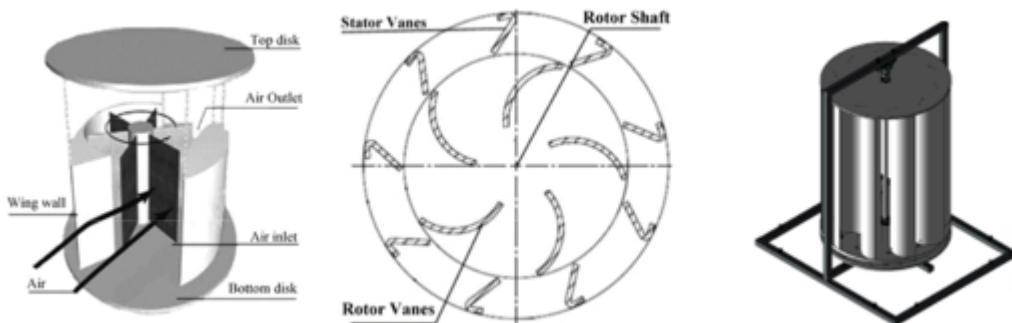


Figura N° 1. a) Aerogenerador Sistan, b) Aerogenerador Zephyr, c) Aerogenerador Banki,

fuentes:(Muller *et al.*, 2009), (Pope *et al.*, 2010)numerical and experimental studies are presented to determine the operating performance and power output from a vertical axis wind turbine (VAWT,(Qusai *et al.*, 2021).

Uno de los primeros estudios de adaptación a generación eólica fue realizado por Al Maaitah *et al.* (Al-Maaitah, 1993), en este estudio se realizaron simulaciones por medio de las cuales se buscó evaluar el comportamiento de un aerogenerador Banki para la generación de energía eléctrica en una carretera, en la cual utilizaba el flujo de viento forzado de los autos que circulaban, encontrando que su desempeño era mejor al de otros generadores. Posteriormente, Tian *et al.* (Tian *et al.*, 2020) buscaron la mejor forma de aprovechar las corrientes de aire turbulento provocadas por el movimiento de los vehículos en las autopistas por medio de VAWT de tipo Banki. Por otro lado, Liu *et al.* (Liu *et al.*, 2019) propusieron un diseño híbrido de aerogenerador, en el que se combinan características del aerogenerador Savonius y el aerogenerador Darrieus, el diseño propuesto se puede apreciar en la Figura N° 2. En este trabajo de ingeniería aplicada, se analizó el funcionamiento teórico y se validó el diseño a partir del análisis de los resultados obtenidos a partir de simulaciones numéricas.

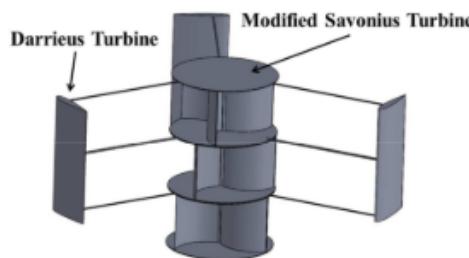


Figura N° 2. Turbina hibrida Darrieus-Savonius. Fuente: (Liu *et al.*, 2019)

Una buena cantidad de los trabajos de investigación de los VAWTs también analizan la influencia del perfil del álabe en los aerogeneradores de tipo Darrieus, ya que estos tienen un diseño más sencillo y el impacto de la forma del álabe es más notable. En sus respectivos trabajos sobre la influencia del perfil del álabe en el funcionamiento de un aerogenerador tipo Darrieus, Subramanian *et al.* (Subramanian *et al.*, 2017) y Sathiyamoorthy *et al.* (Sathiyamoorthy *et al.*, 2021) realizaron simulaciones con diferentes perfiles de álabe para verificar la influencia que estos tienen en el funcionamiento del VAWT para determinar cuál es la mejor combinación para incrementar la generación de energía.

Para profundizar el estudio de los VAWTs, se recomienda consultar el estado del arte realizado por Alave-Vargas *et al.* (Alave-Vargas *et al.*, 2022).

Por último, es necesario resaltar que, hasta este punto, todos los resultados encontrados son teóricos y no se han realizado prototipos para corroborar los resultados obtenidos por medio de simulaciones. En ese sentido, este trabajo propone no solo el diseño sino también la construcción y validación experimental de un aerogenerador eólico de eje vertical tipo Banki.

2. METODOLOGIA

El proyecto se desarrolló siguiendo una metodología investigativa, por medio del cual se buscó verificar que los parámetros de diseño encontrados anteriormente fueran óptimos para así pasar a la fabricación de un prototipo funcional.

Alave-Vargas *et al.* (Alave-Vargas *et al.*, 2023) determinaron, por medio de un análisis multivariable, los parámetros de diseño para el funcionamiento óptimo para la generación de energía eléctrica de un aerogenerador de eje vertical tipo Banki. Tras un análisis exhaustivo de la literatura, y considerando la aplicación de generación en carreteras y las características del espacio de separación entre los carriles contrarios de una autopista interdepartamental, los autores seleccionaron la relación altura/diámetro, el número de álabes y el ángulo de ataque como parámetros clave para el diseño de un VAWT de tipo Banki. El rango de valores de los parámetros seleccionados fueron los siguientes:

- La relación entre la altura y el diámetro del aerogenerador $H/D=9/14$ y $H/D=11/14$.
- El ángulo de ataque del álabe: 6° , 10° y 14° .
- El número de alabes del aerogenerador: 12, 16 y 20.

Los autores analizaron un total de 18 posibilidades (todas las combinaciones posibles entre los parámetros seleccionados), y por medio de un análisis multivariable determinaron que los parámetros óptimos de diseño para mayor generación son:

- Relación altura-diámetro: $H/D=9/14$
- Ángulo de ataque álabe: 11.55°
- Número de alabes: 12 álabes

Considerando la posible integración del aerogenerador en diversos lugares para microgeneración, se decidió diseñar y construir un prototipo más pequeño. Además, de esta forma se podrían realizar pruebas en un ambiente controlado, al mismo tiempo de dar flexibilidad para seleccionar materiales y escoger técnicas de fabricación. De esta forma, el radio externo fue fijado en 15 cm, el resto de las medidas disminuyeron en la misma proporción que el radio.

Tras la reducción del aerogenerador fue necesario verificar que el diseño del aerogenerador seguía siendo la versión óptima, es decir que su funcionamiento seguía siendo el mejor. Para realizar esta verificación se estudió el impacto que los parámetros del aerogenerador tendrían sobre su funcionamiento, específicamente sobre la velocidad de giro del aerogenerador, ya que este parámetro está directamente ligado a la generación de energía eléctrica del aerogenerador. Las pruebas de los parámetros óptimos se realizaron mediante simulaciones en el programa ANSYS (licencia Student). Primero, se estudió el efecto que el número de alabes tendría en el funcionamiento del aerogenerador. Se realizó una serie de simulaciones para aerogeneradores con 8, 12 y 16 álabes

Posteriormente, se realizaron simulaciones con modelos de aerogenerador con una relación H/D de $9/14$, $11/14$ y $13/14$, los resultados obtenidos confirmaron que, teóricamente, la relación $9/14$ otorga los mejores resultados, es decir que la velocidad de giro, la cual están directamente ligadas a la generación de energía eléctrica, es mayor para el aerogenerador que tiene una relación H/D igual a $9/14$.

No se realizaron pruebas sobre el impacto del ángulo de ataque del álabe, en cambio se prefirió observar el impacto que el perfil del álabe podría tener sobre el funcionamiento del aerogenerador.

Para homogeneizar el diseño, el estudio y la fabricación de los álabes, el Comité Nacional Asesor para Aeronáutica o NACA por su sigla en inglés, clasifica los perfiles de alabes con dígitos que corresponden a la misma cantidad de parámetros de caracterizan el perfil en cuestión. Los perfiles de álabes tienden a utilizar entre 1 a 7 dígitos en su nomenclatura. Los perfiles de alabes más populares y los que más se usan en trabajos investigativos de comparación de desempeño de VAWT son los de 4 y 5 dígitos.

La Tabla N° 1 muestra un resumen de la caracterización de los perfiles de álabes de 4 y 5 dígitos de acuerdo a NACA, donde la cuerda hace referencia a la longitud transversal del perfil del álabe, es decir la distancia que existe entre los extremos del perfil.

Tabla N° 1. Clasificación de perfiles de álabes de acuerdo a NACA.

Álabe de 4 dígitos NACA MPXX	Álabe de 5 dígitos NACA LPQXX
M es la curvatura máxima del perfil dividido entre 100 de la cuerda del ala.	L controla la curvatura, indica si el coeficiente de elevación (Cl) multiplicado por 3/20.
P es la posición de la curvatura máxima dividido por 10 de la cuerda del ala.	P es la posición de la curvatura máxima dividido por 200 de la cuerda del ala.
XX es el espesor dividido entre 100 de la cuerda del ala.	Q = 0, línea de curvatura normal. Q = 1, línea de curvatura reflejada. XX es el espesor máximo dividido entre 100 de la cuerda del ala

Fuente: Elaboración propia.

Para este trabajo, se seleccionaron y analizaron 4 perfiles de álabe: 2 perfiles de 4 dígitos y 2 perfiles de 5 dígitos. Se seleccionó perfiles cuya forma fuera notablemente diferente entre sí, esto para incrementar la posibilidad de obtener resultados diferentes que permitan observar el impacto que tiene el perfil del álabe en el rendimiento del aerogenerador. Los perfiles seleccionados fueron los siguientes: NACA0008, NACA2410, NACA24112 y NACA23015. La Figura N° 3 muestra una representación gráfica el perfil de álabe de 4 dígitos NACA2410 mientras que la Figura N° 4 ilustra el perfil de álabe de 5 dígitos NACA23015.

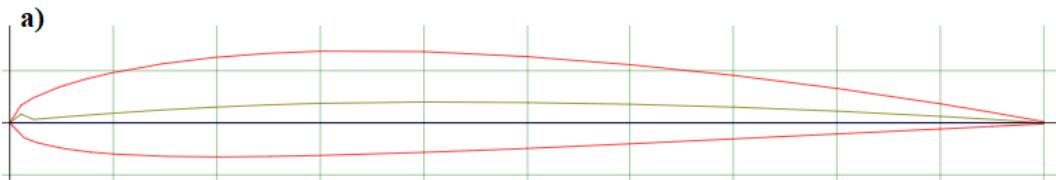


Figura N° 3. perfil de 4 dígitos NACA 2410. Fuente: <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>.

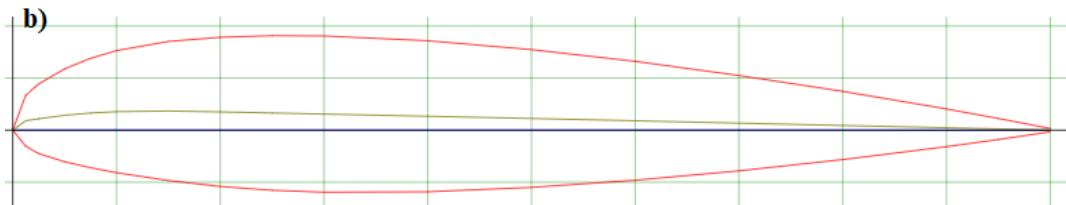


Figura N° 4. perfil de 5 dígitos NACA 23015. Fuente: <http://airfoiltools.com/airfoil/naca5digit>.

Se estudió el comportamiento que los aerogeneradores con perfil de álabes modificados. Por medio de simulaciones en ANSYS, se obtuvieron datos de la velocidad máxima en RPM.

Con los resultados obtenidos de la fase de simulación, se validaron los parámetros óptimos y se evaluó el impacto de modificar otros elementos del diseño, como el perfil del álar (considerando la adopción de perfiles aerodinámicos NACA). Posteriormente, se procedió al diseño estructural completo del aerogenerador, contemplando tanto el rotor como el sistema de soporte y su integración mecánica.

A partir del diseño final se construyó un prototipo funcional del aerogenerador, utilizando materiales seleccionados por su disponibilidad, resistencia y facilidad de manufactura. La fabricación incluyó los álabes con las dimensiones y perfil definidos, las tapas de soporte del rotor y un sistema de sujeción robusto que garantizara estabilidad durante la operación. Cabe destacar que el proceso fue iterativo, especialmente en la interacción entre el diseño del sistema de sujeción y su implementación práctica.

Una vez construido el prototipo, se realizó la validación experimental en condiciones reales de operación. Se registraron parámetros como la velocidad del viento incidente, la velocidad de rotación del rotor (RPM) y el voltaje generado. Asimismo, se analizó la influencia del ángulo de incidencia del viento sobre el rendimiento.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Parámetros óptimos de diseño

Se estudió el efecto que el número de alabes tendría en el funcionamiento (velocidad angular) del aerogenerador. Se realizó una serie de simulaciones en el programa ANSYS (licencia student) para aerogeneradores con 8, 12 y 16 álabes. Se confirmó

que el número de álabes óptimo para velocidades del viento inferiores a 10 m/s, velocidad realística a la que el viento puede llegar sin tener vientos huracanados, es 12 (ver Figura N° 5).

Posteriormente, se realizaron pruebas con un aerogenerador con una relación H/D de 9/14, 11/14 y 13/14, los resultados confirmaron que la relación 9/14 otorga los mejores resultados.

Los aerogeneradores con perfil NACA mostraron resultados promisorios, especialmente el NACA24112 que llegó a los 518 RPM para una velocidad de viento de 9 m/s, comparado al perfil de ala simple con ángulo de ataque de 11.55° que llegó a 235 RPM para la misma velocidad.

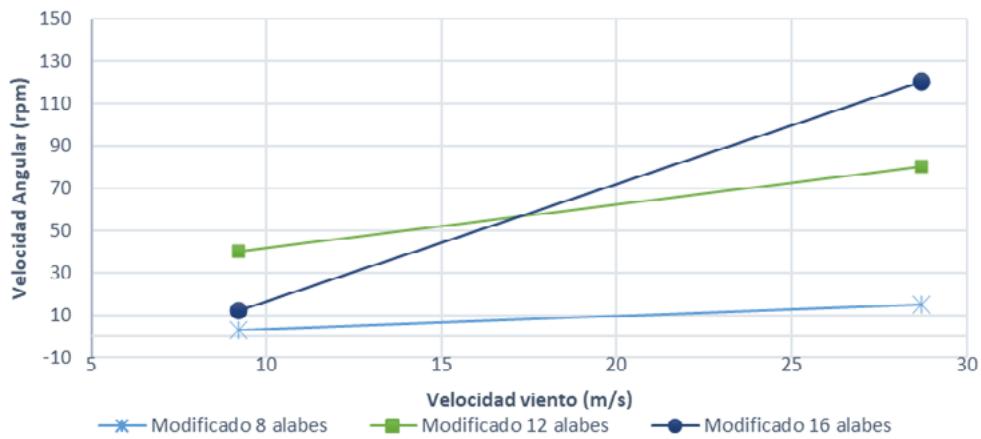


Figura N° 5. Rendimiento del aerogenerador con diferentes números de álabes, fuente: elaboración propia

Inicialmente se realizaron pruebas del comportamiento del aerogenerador sin tapa, es decir considerando que la turbina es el cuerpo principal del aerogenerador. Antes de validar los resultados obtenidos, se volvieron a realizar las pruebas añadiéndole tapas de 1 cm de espesor. Los resultados obtenidos en esta nueva serie de simulaciones diferían de los resultados anteriores, siendo que la velocidad máxima obtenida fue del aerogenerador de perfil clásico llegó a 90 RPM, mientras que la velocidad de giro del aerogenerador con perfil NACA24112 decayó a 40 RPM.

Posteriormente se añadió un borde de ataque a la tapa del aerogenerador Banki, es decir que el espesor externo de la tapa es menor al espesor interno (ver Figura N° 6), esta modificación ayudó a mejorar el funcionamiento del aerogenerador en aproximadamente un 25%, tal como se puede ver en la Tabla N.º 2. Solo se analizó, por medio de simulaciones numéricas, el impacto de esta modificación en el aerogenerador Banki con perfil de ala rectangular.



Figura N° 6. Borde de ataque en la tapa del aerogenerador. Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 2. Influencia de las tapas.

	Velocidad del viento (m/s)	Velocidad del aerogenerador (rpm)
Aerogenerador Banki sin tapa	9.2	235.65
	28.7	799.61
Aerogenerador Banki con tapa	9.2	90
	28.7	400
Aerogenerador Banki con borde de ataque	9.2	130
	28.7	556

Fuente: elaboración propia.

Tras las simulaciones iniciales se determinó que el aerogenerador con borde de ataque en la tapa tiene el mejor rendimiento teórico y es la mejor versión para la construcción.

Fabricación del aerogenerador

Tras la determinación de los parámetros óptimos de diseño del aerogenerador por medio de las simulaciones en ANSYS, se procedió con la fabricación del aerogenerador.

Se comenzó con el diseño de un sistema de soporte para el aerogenerador.

El diseño del sistema de soporte o sujeción fue un proceso iterativo en el cual se realizaron modificaciones de manera constante hasta llegar a un producto que sea satisfactorio. Se partió de la forma externa que el sistema de sujeción tendría y poco a poco se fueron determinando el resto de los detalles (posición de los rodamientos, espesores, topes de fabricación, etc). La parte más importante de este proceso fue el diseño de un sistema de sujeción que permitiera sujetar el aerogenerador de

manera estable a una base al igual que la generación de energía eléctrica con unos generadores de energía DC (corriente continua).

Para lograr un movimiento continuo, reducir la fricción y el efecto del peso al mínimo se utilizaron 2 rodamientos (uno grande y uno pequeño) en el sistema de sujeción. En la Figura N° 7 se pueden ver las diferentes piezas que formaron parte del sistema de sujeción (los rodamientos se encuentran pintados en amarillo).

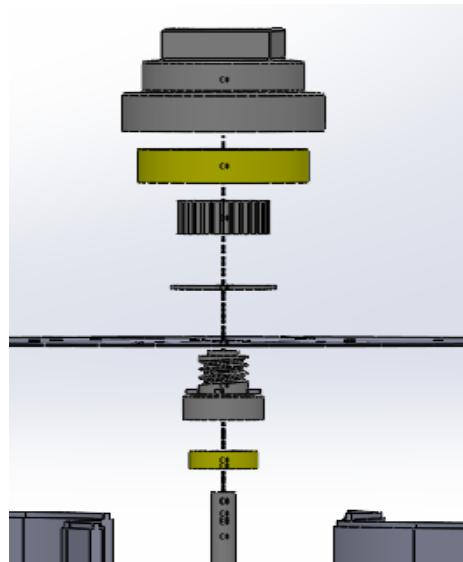


Figura N° 7. Sistema de Sujeción del aerogenerador. Fuente: elaboración propia.

La Figura N° 8 ilustra el diseño final del aerogenerador de eje vertical montado en las bases de sujeción.

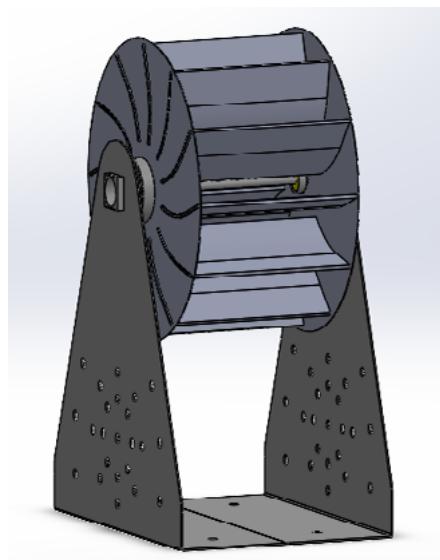


Figura N° 8. Base de sujeción para el aerogenerador. Fuente: elaboración propia.

Los álabes del aerogenerador y las piezas de soporte fueron fabricados por medio de impresión 3D en PLA, para tener igualdad entre las diferentes piezas (sobre todo los álabes) y por la facilidad de acceso que se tiene a esta tecnología, siendo una buena manera de obtener piezas de diferentes tamaños y geometrías de manera rápida y económica. Vale mencionar, que el tipo de material de los álabes tomado en cuenta durante las simulaciones debido a que se requiere datos asociados al material de fabricación del aerogenerador.

Durante el proceso de construcción, la tapa con borde de ataque definida en etapa de diseño se cambió por un disco metálico de 1 mm de espesor, esto debido a que las dimensiones de la impresora 3D con la que se trabajó (ENDER 3) no era lo suficientemente grande para fabricar la tapa en una sola pieza. Además, se verificó que tener una tapa montada con varias partes acarrearía problemas de encaje, los cuales podrían aumentar la resistencia al viento de las tapas y disminuir los beneficios ganados por la incorporación del borde de ataque de la tapa.

Para la construcción del sistema de sujeción, el rodamiento pequeño fue instalado entre el eje del aerogenerador y un asiento interno que permite la unión con la tapa. Por otro lado, el rodamiento grande se instaló de tal forma que permita que el aerogenerador gire mientras está sujetado por 2 bases de sujeción. Este rodamiento fue instalado al interior de un asiento externo que permite que el aerogenerador pueda ser sujetado por la base de sujeción al mismo tiempo que sirve de asiento para los generadores DC, tal y como se puede ver en la Figura N° 9.



Figura N° 9. Instalación rodamiento externo en el asiento externo. Fuente: elaboración propia.

Durante la construcción, montaje y pruebas preliminares se vio la necesidad de rediseñar algunas piezas. Un ejemplo de esto es la pieza ilustrada en la Figura N° 10, la cual es la unión de 3 piezas. Estas piezas están encargadas de unir el aerogenerador con el rodamiento externo, sin embargo, durante las pruebas de rotación iniciales estas no aguantaron los esfuerzos de rotación. El resultado final es una pieza más robusta, capaz de resistir los esfuerzos a los que será sometida durante la rotación.



Figura N° 10. Pieza modificada para el aerogenerador. Fuente: elaboración propia.

Es importante mencionar que a pesar de que el aerogenerador se encuentra sujetado en posición horizontal, esto no cambia en nada su principio de funcionamiento, el aerogenerador es posicionado de esta forma para tener mayor estabilidad en las etapas de validación experimental.

3.3 Pruebas experimentales

Se realizaron pruebas de funcionamiento iniciales con un túnel de viento, como se puede ver en la Figura N° 11. El aerogenerador Banki construido, con un peso de turbina de 4.56 kg y un momento de inercia teórico de 0.06 kg/m^2 , incluso después de llegar a una velocidad del viento de 5 m/s no logró rotar, en algún momento

mostró un indicio de movimiento y la estructura vibró ligeramente, sin embargo, el aerogenerador no logró realizar una rotación completa.



Figura N° 11. Pruebas en el túnel de viento. Fuente: elaboración propia.

Tras varias pruebas se utilizó un soplador de aire para generar el flujo de viento y un alabe auxiliar para distribuir el flujo de aire en su superficie al igual que darle un ángulo de incidencia sobre los álabes del aerogenerador, tal y como se puede ver en la Figura N° 12.

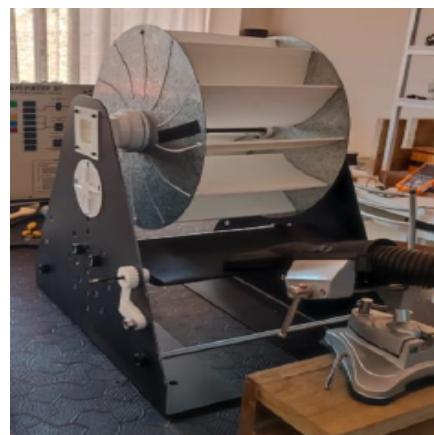


Figura N° 12. Escenario de prueba con el soplador. Fuente: elaboración propia.

Tras varias pruebas se encontró que el mejor ángulo para el álabe de apoyo es de 13.9°.

Durante las pruebas se obtuvieron velocidades que llegaban hasta los 650 RPM, esta velocidad es mayor a lo anticipado por las simulaciones (un máximo de 400 RPM), esto puede ser explicado por la modificación de la tapa, al trabajar con una

tapa más delgada se logró incrementar la velocidad de giro del aerogenerador. Se utilizaron 2 generadores, uno a cada extremo del aerogenerador, para incrementar la generación de energía ya que no se podía modificar los generadores para asegurar un mejor rendimiento. Las frecuencias medidas con el osciloscopio fueron diferentes entre estos 2 generadores, esto debido a su fabricación, aunque externamente los generadores sean iguales, eléctricamente son diferentes. El generador 1 llegó a generar un máximo de 80 mV a 33,5 Hz de frecuencia, mientras que el generador 2 logró generar un máximo de 100 mV a una frecuencia de 34,74 Hz.

Los resultados se pueden ver resumidos en la Tabla N° 3.

Tabla N° 3. Resultados pruebas funcionales.

VELOCIDAD VIENTO		RPM		VOLTAJE			
		Generador 1		Generador 2		Generador 2	
Min.	Max.	Min.	Max.	Freq. (Hz)	Vp-p (mV)	Freq. (Hz)	Vp-p (mV)
1,1	1,8	239	563,5	22,44	40	99,34	65
1	1,5	191	537	22,4	45	56,11	60
1,1	1,9	178	641	33,51	80	33,97	100
1,1	1,9	55	645,5	33,41	80	34,74	100

Fuente: elaboración propia.

Durante las pruebas se observó que el tiempo de estabilización del aerogenerador es de aproximadamente 4 minutos. En la Figura N° 13 se puede observar cómo evoluciona la generación de energía, medida a partir del voltaje generador, contra la velocidad media del viento medida durante las pruebas. No se tiene resultados para una velocidad del viento inferior a 1.1 m/s ya que el aerogenerador empieza a rotar de manera constante a partir de esta velocidad.

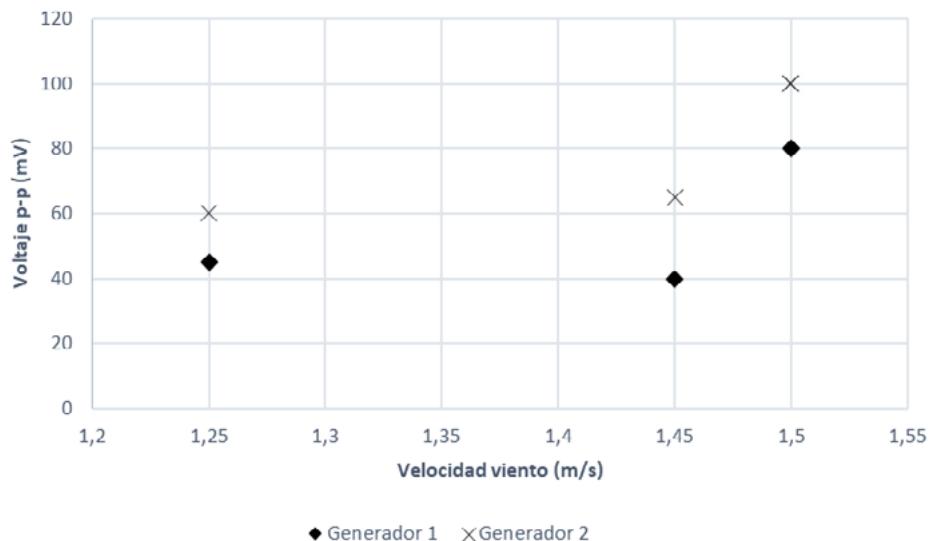


Figura N° 13. Voltaje p-p generador vs Velocidad media del viento. Fuente: elaboración propia

3.4 Discusión

Durante la etapa de pruebas se obtuvieron velocidades de giro para el aerogenerador que superaban lo esperado según las simulaciones.

Puesto que gran parte de la literatura disponible en cuanto a la investigación de aerogeneradores de eje vertical trata no van más allá de las simulaciones y análisis numéricos, no se encontraron proyectos previos en los cuales se evaluará el desempeño del prototipo de un aerogenerador de eje vertical de tipo Banki, independientemente de los parámetros utilizados para el diseño del aerogenerador.

Aunque las velocidades obtenidas superaban lo esperado por las simulaciones, esto todavía no se traduce a una generación óptima de energía. El sistema de generación utilizado, dos generadores acoplados al eje del aerogenerador, aun puede ser optimizado para mejorar la generación de energía. al mismo tiempo también se debe diseñar el sistema por medio del cual la energía generada será rectificada y almacenada en baterías para su utilización.

El trabajo realizado sirve de base para todos los proyectos relacionados que se hagan a futuro, es un punto de partida y comparación que se puede referenciar según las modificaciones que se deseen implementar, ya sea al diseño o al proceso de fabricación. De momento se ha propuesto un prototipo del cuerpo de la turbina Banki y su sujeción para garantizar un movimiento constante y evitar desbalanceo y vibraciones, sin embargo, aún quedan varios componentes por implementar para

tener un sistema de generación de energía completo que nos dé como producto final energía que pueda ser utilizada directamente o almacenada.

4. CONCLUSIONES

Entre las conclusiones del presente trabajo se pueden mencionar:

- Se corroboró la optimización de diseño de un aerogenerador obtenida por un trabajo previo del mismo grupo de investigación (Alave-Vargas *et al.*, 2023). Estos parámetros óptimos de diseño son: $H/D=9/14$, 12 álabes y ángulo de ataque de 11.55° , independientemente del diámetro con el que se trabajó.
- La forma y espesor de las tapas de un aerogenerador, parámetro que no suele ser tomado en cuenta en simulaciones en la literatura, resultó ser una de las variables de mayor influencia en su rendimiento. Se comprobó experimentalmente que trabajar con una tapa más delgada permitió incrementar la velocidad de rotación esperada a través de las simulaciones.
- La etapa de diseño del sistema de sujeción y la construcción del aerogenerador fue un proceso iterativo en el que se tenía que probar de manera experimental el encaje entre la diferentes piezas y la resistencia de estas durante el armado y funcionamiento del aerogenerador. Fue un proceso de aprendizaje, con intentos fallidos y piezas rotas que nos ayudó a llegar al montado final de un aerogenerador funcional.
- Se diseñó, construyó y validó un aerogenerador de eje vertical funcional. Se realizaron pruebas prácticas en un ambiente controlado y se demostró que se puede generar hasta 100 mV a una frecuencia de 33.5 Hz con cada uno de los generadores acoplados.

Se puede considerar el aerogenerador construido como una base sobre la cual se puede modificar los componentes o mecanismos para llegar a un prototipo con mayor rendimiento. Se llegaron a varias conclusiones satisfactorias a lo largo de este proyecto, sin embargo, aún hay aspectos que se pueden seguir desarrollando y mejorando en futuras versiones del aerogenerador, entre ellos estudiar la forma en la que el aerogenerador podría ser integrado al paisaje urbano para una generación energética más eficiente.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo de los docentes de la universidad por ayuda, conocimientos y guía a lo largo de este proyecto, en especial se agradece al ingeniero Omar Castellón-Castellón y a todo el grupo de trabajo de INGESTEC por su apoyo y conocimientos técnicos durante la fabricación del prototipo del aerogenerador, los cuales permitieron obtener el prototipo con el cual se trabajó a lo largo de este proyecto. Este trabajo es solo el primer paso y como en cualquier proyecto investigativo todavía queda un largo camino por recorrer.

6. REFERENCIAS

- Alave-Vargas, E. M., Orellana Lafuente, R., Sempértegui-Tapia, D. F., Alave-Vargas, E. M., Orellana Lafuente, R., & Sempértegui-Tapia, D. F. (2022). ESTADO DEL ARTE SOBRE AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL. *Investigación & Desarrollo*, 22(1), 161-172. <https://doi.org/10.23881/idupbo.022.1-13i>
- Alave-Vargas, E. M., Sempertegui-Tapia, D. F., Villarroel-Beltran, V. R., Orellana Lafuente, R., & Tapia-Siles, C. (2023). Design and Simulation of a Banki Cross-Flow Wind Turbine for Highways Under High Turbulence and High Altitude Conditions. *36th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2023)*, 1588-1599. <https://doi.org/10.52202/069564-0144>
- Al-Maaitah, A. A. (1993). The design of the Banki wind turbine and its testing in real wind conditions. *Renewable Energy*, 3(6), 781-786. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(93\)90085-U](https://doi.org/10.1016/0960-1481(93)90085-U)
- Al-shammari, S., Karamallah, A., & Aljabair, S. (2020). Blade Shape Optimization of Savonius Wind Turbine at Low Wind Energy by Artificial Neural network. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 881, 012154. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/881/1/012154>
- Denoon, R., Cochran, B., Banks, D., & Wood, G. (2008). Harvesting wind power from tall buildings. *Congress Proceeding of CTBUH*.
- Du, L., Ingram, G., & Dominy, R. G. (2019). A review of H-Darrieus wind turbine aerodynamic research. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C*, 233(23-24), 7590-7616. <https://doi.org/10.1177/0954406219885962>
- Http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit.* (s. f.). Recuperado 27 de febrero de 2024, de <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>
- Http://airfoiltools.com/airfoil/naca5digit.* (s. f.). Recuperado 11 de marzo de 2024, de <http://airfoiltools.com/airfoil/naca5digit>
- Liu, K., Yu, M., & Zhu, W. (2019). Enhancing wind energy harvesting performance of vertical axis wind turbines with a new hybrid design: A fluid-structure interaction study. *Renewable Energy*, 140, 912-927. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.120>
- Möllerström, E., Gipe, P., Beurskens, J., & Ottermo, F. (2019). A historical review of vertical axis wind turbines rated 100 kW and above. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.022>
- Moran, M. (2023). Energía. *Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- Muller, G., Jentsch, M., & Stoddart, E. (2009). Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings. *Renewable Energy*, 34, 1407-1412. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.10.008>
- Nations, U. (2020). *El Acuerdo de París | Naciones Unidas*. United Nations; United Nations. <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>

Ponta, F. L., Seminara, J. J., & Otero, A. D. (2007). On the aerodynamics of variable-geometry oval-trajectory Darrieus wind turbines. *Renewable Energy*, 32(1), 35-56. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.12.007>

Pope, K., Rodrigues, V., Doyle, R., Tsopelas, A., Gravelsins, R., Naterer, G. F., & Tsang, E. (2010). Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*, 35(5), 1043-1051. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.10.012>

Qusai, S., Esraa, S., & Aseel, R. (2021). Polycarbonate Bladed Highway Wind Turbine: A Case Study. *2021 12th International Renewable Engineering Conference (IREC)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/IREC51415.2021.9427820>

Sathiyamoorthy, K., Gorli, S. S., Sai, P. K., & Varma, N. N. S. (2021). Numerical analysis of vertical axis wind turbine with the wing profile of NACA0021. *Journal of Physics: Conference Series*, 2054(1), 012088. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2054/1/012088>

Subramanian, A., Yogesh, S. A., Sivanandan, H., Giri, A., Vasudevan, M., Mugundhan, V., & Velamati, R. K. (2017). Effect of airfoil and solidity on performance of small scale vertical axis wind turbine using three dimensional CFD model. *Energy*, 133, 179-190. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.118>

Tian, W., Song, B., & Mao, Z. (2020). Numerical investigation of wind turbines and turbine arrays on highways. *Renewable Energy*, 147, 384-398. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.123>