

## ESTADO DEL ARTE SOBRE AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL STATE-OF-THE-ART REVIEW ON VERTICAL-AXIS WIND TURBINES (VAWT's)

**Eduard Matheo Alave-Vargas, Renán Orellana Lafuente, Daniel Felipe Sempértégui-Tapia**

*Centro de Investigaciones Ópticas y Energías (CIOE)*

*Universidad Privada Boliviana, Cochabamba, Bolivia*

*dsempertegui@upb.edu*

(Recibido el 26 de mayo 2022, aceptado para publicación el 15 de julio 2022)

### RESUMEN

Con la tendencia actual de sustituir las fuentes de energías fósiles por energías renovables, la energía eólica se muestra como una de las más prometedoras entre las energías renovables. Nuevos avances resultantes de la gran cantidad de estudios realizados permiten la generación de grandes cantidades de energía en sitios estudiados. Si bien en su mayoría se presentan en forma de aerogeneradores de eje horizontal (HAWT's), los aerogeneradores de eje vertical (VAWT's) permiten una gran integración a la vida urbana y microgeneración en áreas residenciales o rurales. La gran cantidad de VAWT's existentes permiten accesibilidad a soluciones energéticas que requiere la industria actualmente, como luminarias autosustentables, soluciones energéticas móviles y micro generación diversa. En este sentido, el presente artículo analiza una gran cantidad de VAWT's al igual que sus características principales en términos de generación eléctrica. Se categorizan los hallazgos e instalaciones de generadores por sus principios de funcionamiento. El documento también estudia avances recientes en la investigación de VAWT's y las tendencias en aplicaciones futuras.

**Palabras Clave:** Generación de Energía, Energía Eólica, Aerogeneradores de Eje Vertical, Savonius, Darrieus, Turbinas de Viento.

### ABSTRACT

Considering the current trend to replace fossil energy sources with renewable energy sources, caused by the existing global crisis, wind energy is shown as one of the most promising among the renewable energies. In the last years, wind energy has been widely studied with good results in terms of quantity of energy generated for some projects. Although the majority of these studies are on horizontal-axis wind turbines (HAWT's), vertical-axis wind turbines (VAWT's) had also need to be considered because they allow a good integration between urban life and microgeneration on residential and rural areas. In this sense, this work presents and discusses the working principle and the principal characteristics of all kinds of VAWT's present in the literature. Besides, recent research and advances related to VAWT's are also presented and discussed.

**Keywords:** Energy Generation, Wind Energy, VAWT's, Savonius, Darrieus, Wind Turbines.

### 1. INTRODUCCION

El uso de las energías renovables se ha incrementado considerablemente en la última década. Este fenómeno fue ocasionado gracias a la necesidad de solucionar la crisis climática, además del incremento de la demanda energética global. En países desarrollados, donde la demanda energética usualmente se suplía con combustibles fósiles, se establecieron políticas que exigen el incremento del aporte de las energías renovables en la matriz energética. Esto a su vez promovió un incremento perceptible de la investigación científica en energías alternativas de manera global. La investigación relacionada a energías renovables se la realizó en diversas áreas: energía solar térmica y fotovoltaica, energía hidroeléctrica, energía geotérmica y energía eólica. Esta última, considerada por muchos como la generación eléctrica de mayor potencial al ser considerada como la más competitiva comercialmente [1].

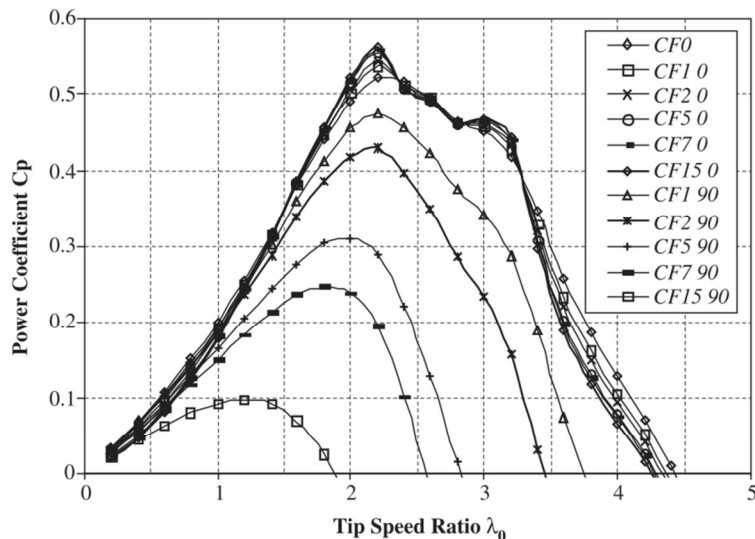
En los últimos años, los países desarrollados han tenido grandes avances en la tecnología para el aprovechamiento adecuado de la energía eólica, esto asociado al hecho que el aprovechamiento de la energía fotovoltaica aún se encuentra en proceso de perfeccionamiento y las hidroeléctricas son proyectos complejos y costosos [2]. Sin embargo, en países en vías de desarrollo aún existe cierta sensibilidad sobre la inclusión de la energía eólica a gran escala debido a su intermitencia y su efecto en los sistemas interconectados. Si bien este es un riesgo latente en todo tipo de generación, los avances actuales en la tecnología permiten disminuirlo, además de generar interés de potenciales inversores, viabilizando proyectos.

La tendencia de los aerogeneradores recae en una configuración horizontal de sus ejes o HAWT's; debido a su gran capacidad de generación dentro de un área específica. Para la implementación de estos se requiere una serie de estudios que garanticen su viabilidad: estudios anemométricos, de suelo, proyecciones de generación, fluctuación de la dirección del viento y el impacto medioambiental que puede ocasionar. A todo ello se añade la rentabilidad del proyecto, que,

gracias a su gran potencial de generación, pueden ser competitivos respecto a otras alternativas de generación de energía. Los HAWT's son proyectos complejos que no pueden competir en mercados a microescala por las exigentes condiciones de operación que enfrentan [3].

Una tecnología relegada pero no menos importante son los aerogeneradores de eje vertical o VAWT's; las cuales tienen un alza en su demanda gracias a la necesidad de aprovechar los recursos en entornos limitados. Estas permiten una fácil integración al mercado de productos para generación eléctrica y la instalación en áreas urbanas con destino a la micro generación y la generación distribuida. Si bien las tecnologías de las VAWT's están consolidadas en sus bases y fundamentos, existe una tendencia en la investigación en esta área que amplía el horizonte de aplicaciones; derivando en múltiples tipos de generadores que intentan reducir la barrera entre la eficiencia de estos aerogeneradores respecto al límite de Betz. Asimismo, las VAWT's resaltan debido a la posibilidad de autoinicio de la generación al igual que la capacidad omnidireccional de los vientos para la generación; factores que son limitantes para HAWT's. Además, nuevos estudios ponen en consideración el uso de conjuntos de VAWT's en diferentes configuraciones para incrementar la eficiencia o nuevos tipos de perfiles alares con el mismo propósito [4], aprovechando la mecánica del fluido y los fenómenos ocurridos en su funcionamiento.

Por otro lado, es importante mencionar que para comparar los aerogeneradores se usa el coeficiente de potencia o  $c_p$ , el cual muestra la eficiencia en forma de cociente de la energía recolectada respecto a aquella disponible en el viento para la generación (en el volumen espacial del generador). Otro parámetro importante es el *Tip-Speed Ratio* o TSR, el cual se define como el cociente entre la velocidad de la punta de la hélice o pala del aerogenerador respecto a la velocidad del viento. Cuando este valor supera un valor crítico, dependiente de la construcción y tipo de aerogenerador (en VAWT's puede ser 1), se considera que puede entrar en funcionamiento. Para las HAWT's el TSR suele ser fijo, para tener una generación eléctrica estable; pero en las VAWT's este valor puede ser variable requiriendo generar una gráfica  $C_p - \text{TSR}$  para analizar una velocidad óptima de funcionamiento, la Figura 1 ilustra un ejemplo de esta gráfica para distintas configuraciones de aerogeneradores [2]. Usualmente se recomienda un valor de TSR superior a 6, pero este puede variar de acuerdo al tipo de aerogenerador y sus características geométricas. El TSR, desde el punto de vista mecánico, puede ser un valor crítico, definiendo un tope de velocidad antes de llegar a la falla mecánica.



**Figura 1:** Gráfica  $C_p$  vs TSR para distintas configuraciones de aerogeneradores [3].

En este sentido, y gracias a todas las ventajas mencionadas de los aerogeneradores de eje vertical, este trabajo realiza una revisión de la bibliografía respecto a los mismos, incluyendo clasificación e investigaciones más recientes. Buscando ser referente para la propuesta de nuevas aplicaciones urbanas, más allá de alternativas de generación para áreas rurales [5].

## 2. CLASIFICACIÓN DE LOS AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL

Los aerogeneradores de eje vertical son muy flexibles y versátiles, donde los tipos existentes son combinables entre sí para conseguir mejores efectos o reforzar falencias de algunas configuraciones de aerogeneradores. Los principales problemas de las VAWT's radican en su bajo torque de inicio, baja eficiencia y baja posibilidad de aumentar la escala del tamaño (debido a que resulta poco viable económicamente frente a otras alternativas).

Si bien existe una gran variedad de configuraciones disponibles que aprovechan el recurso eólico de una manera específica, los aerogeneradores de eje vertical se basan principalmente en dos principios físicos, en el arrastre de la masa eólica para la generación o en la fuerza de sustentación eólica que aprovecha un perfil alar específico para maximizar la energía colectada. Existen dos aerogeneradores clásicos de eje vertical, las Darrieus y las Savonius; donde la primera es de sustentación aerodinámica y la siguiente se basa fundamentalmente en el arrastre.

### 2.1 Aerogeneradores basados en el principio de sustentación (Darrieus)

Los primeros aerogeneradores de eje vertical desarrollados fueron basados en el principio de sustentación, logrando el interés de las compañías y de los investigadores para incursionar en el mercado por las ventajas y la novedad que representaban. Uno de los primeros modelos y más prominentes a lo largo de la historia fueron los Darrieus. De estos surgieron nuevos modelos y variantes que son la principal imagen de los aerogeneradores de eje vertical a lo largo del mundo.

Los Darrieus se destacan dentro de las VAWT's debido a su elevada eficiencia, pero con problemas de autoinicio producto de la masa de aire requerida para el inicio de generación, que termina traducéndose en una alta velocidad de *cut-in* (velocidad de umbral). En la década de los 70's, el embargo de petróleo árabe produjo la necesidad dentro de Estados Unidos de la generación de nuevas fuentes de energía; como resultado de esto comenzó la investigación científica en aerogeneradores de tipo Darrieus gracias a su alta eficiencia. Como consecuencia de los estudios surgió el modelo *Test Bed* de 34 m de altura, desarrollando un prototipo que fue utilizado en aplicaciones futuras. La Figura 2 ilustra el generador *Test Bed*, esta turbina de viento se localizaba dentro el *Agricultural Research Station* del departamento de agricultura de los Estados Unidos en Texas, siendo la más grande para su tiempo con una producción energética de aproximadamente 500 kW a 37,5 rpm y un viento de 12,5 m/s; se optó por un diseño conservador para esta máquina y con algunos componentes modulares como las palas, ya que estas requerían ser investigadas y facilitaba la realización de pruebas con distintas configuraciones geométricas [6][7].



Figura 2: Darrieus Test Bed en la ARS [8].

Si bien los Darrieus estaban comercialmente disponibles para la generación a gran escala, el problema fue la manufactura de las palas y su alta complejidad geométrica; derivando en un factor limitante dentro de la producción masiva de esta configuración y su consecuente baja popularidad. Múltiples autores contribuyeron al desarrollo de los Darrieus, donde los estudios terminan analizando las cargas dinámicas sobre las palas a diferentes velocidades de generación o bajo distintas cargas eólicas; por ejemplo, Mertens et al. [9] presentaron un modelo teórico de baja carga computacional que permite modelar el comportamiento de todo tipo de palas o propiedades geométricas, estructurales o aerodinámicas ante cargas concentradas, gravitacionales o centrífugas; con resultados coherentes con los datos experimentales.

#### ▪ Aerogenerador Giromill

Conforme la tecnología de fabricación de los Darrieus fue perfeccionándose surgieron muchas variantes las cuales buscan reducir sus deficiencias tradicionales con nuevos modelos geométricos, es así que surgió el aerogenerador Giromill. En este aerogenerador, las palas fueron reemplazadas por perfiles aerodinámicos rectos de diferentes geometrías, las cuales suelen poseer una alta fuerza de sustentación (aprovechando usualmente un ángulo de ataque fijo). Las configuraciones constructivas más comunes son aquellas basadas en 3 palas, donde pueden poseer un ángulo de ataque fijo o variable; intentando superar los problemas relacionados a la baja velocidad de *cut-in* experimentada en los modelos tradicionales [10]. Dentro de estas también entran los aerogeneradores tipo H, las cuales también presentan

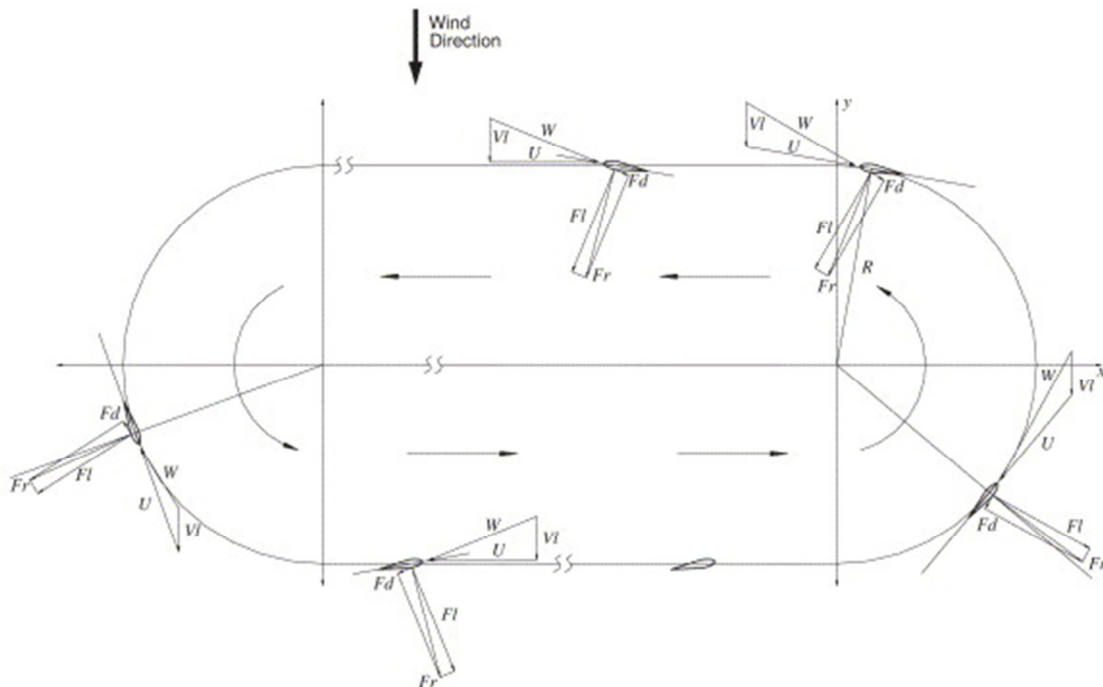
un rango de variación en cuanto a las configuraciones comercialmente disponibles; variando de 2 a 6 palas cuya proyección lateral toma la forma de una H [9]. La Figura 3 presenta un Darrieus tipo Giromill [11].



**Figura 3:** Darrieus de tipo Giromill [11].

#### ▪ Aerogenerador Variable Geometry Oval Trajectory (VGOT)

Ante los problemas de la baja velocidad de viento para el *cut-in* de los aerogeneradores de eje vertical, Ponta et al. [2] propusieron una solución donde la configuración resulta en un rotor Darrieus cuyas palas revolucionan en una trayectoria ovalada sobre un riel respecto al eje. Esta nueva propuesta permite obtener generación eléctrica a mayor escala gracias a la estabilidad estructural, logrando un mejor torque de inicio y, por consiguiente, la velocidad *cut-in*. Si bien es una excelente opción teórica para mejorar la escala de generación mediante VAWT's de manera factible, aún necesita tener prototipos reales con los cuales se puedan sustentar los cálculos [2]. La Figura 4 ilustra un esquema del aerogenerador de trayectoria ovalada de geometría variable [2].



**Figura 4:** Variable Geometry Oval Trajectory [2].

### ▪ Aerogenerador Crossflex

Si bien las configuraciones tradicionales de los Darrieus tienen la posibilidad de cierto nivel de integración arquitectónica, la realidad es que las dimensiones son restringidas y la estética es un aspecto primordial para el diseño arquitectónico; factores que son totalmente descuidados en modelos comunes de aerogeneradores. Respondiendo a los requerimientos de generadores eólicos integrables a edificios, Sharpe y Proven [8] diseñaron un rotor tipo Darrieus alargado con una geometría helicoidal, donde las aspas son unidas mediante una sujeción mecánica o mediante una soldadura. La eficiencia es mejorada frente a la de una tradicional debido a su baja masa inercial para el giro; este aerogenerador ya cuenta con prototipos reales e instalados. Pese a estas ventajas, no se la considera como una solución para la colección de energía eólica a gran escala. También muestra una particular ventaja en la eficiencia para lugares donde la velocidad de viento de flujo libre excede 14 m/s. La Figura 5 ilustra un sistema de aerogeneradores Crossflex instaladas en una edificación [8].

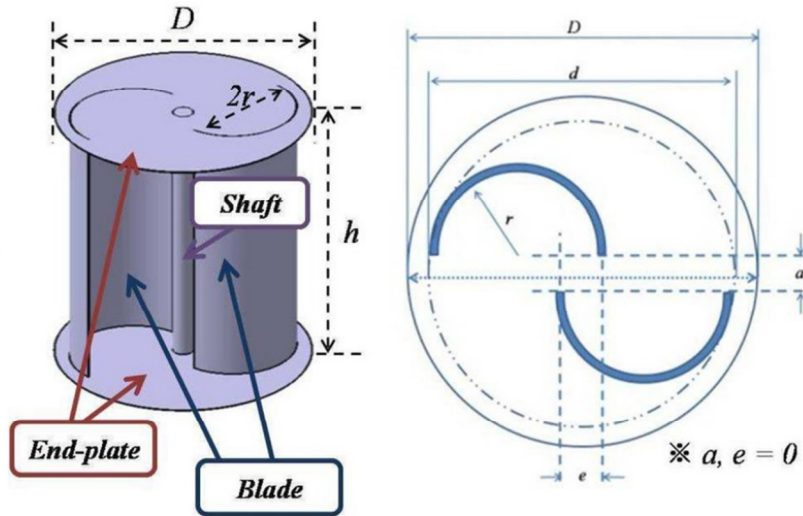


**Figura 5:** Aerogenerador de tipo Crossflex [8].

### 2.2 Aerogeneradores basados en el principio de arrastre (Savonius)

Las configuraciones basadas en el principio de arrastre surgen como un mecanismo natural de generación eléctrica donde no se requiere una geometría compleja que encarezca su producción. Muchas de estas configuraciones resultan en la versatilidad de estos aerogeneradores para trabajar con diferentes fluidos; donde resaltan las aplicaciones sobre la generación hidrocínética. En general, estos aerogeneradores no son muy eficientes, pero con los correctos elementos de diseño y otros componentes extra, estos generadores logran ser una alternativa competitiva; donde la configuración Savonius predomina y a su vez es la más investigada.

Las turbinas de viento Savonius muestran ventajas sustanciales frente a las Darrieus o aquellas que funcionan bajo el principio de sustentación. El arrastre, el cual es el principal mecanismo por el cual funcionan, permite que estas puedan ser adaptables a una gran cantidad de fluidos diferentes o flujos másicos de diferentes características. La principal desventaja de un rotor Savonius es la eficiencia inferior a las basadas en sustentación, gracias a la pérdida de energía cinética al chocar con las palas; pero cuenta con la habilidad de auto iniciarse aun con bajas velocidades. Al igual que otras VAWT's tienen la principal característica de aceptar el flujo de viento de manera omnidireccional [12]. La Figura 6 ilustra las características geométricas de los aerogeneradores Savonius.



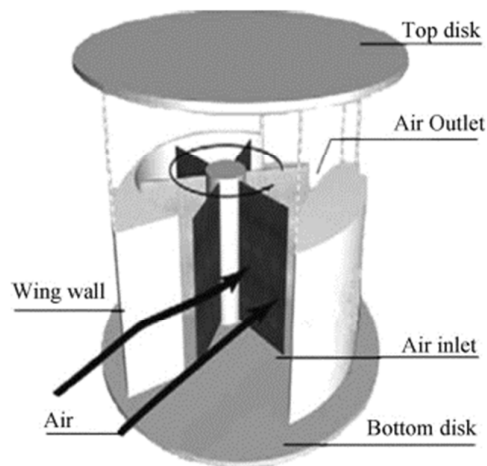
**Figura 6:** Turbina de viento de tipo Savonius tradicional [13].

Como una alternativa natural ante los problemas que presentan los dos principios de funcionamiento excluyentes: se propone una turbina combinada; tratando de compensar la baja eficiencia y contrarrestar la alta velocidad de inicio de generación. El aerogenerador Savonius – Darrieus es una respuesta cuyas principales ventajas obtenidas son la mayor eficiencia con una velocidad de inicio menor (*cut-in*). Gupta y Biswas [14] determinaron que el coeficiente de potencia resultante del mismo puede llegar hasta 0,35; resultando en una excelente eficiencia, frente a aerogeneradores similares e incluso a otros de eje horizontal.

Los aerogeneradores Savonius son los más investigados dentro de la comunidad científica, esto da lugar a la existencia de varias configuraciones tradicionales de estos. Existen configuraciones de sus palas en J, palas rectas, palas helicoidales, entre otras, la diferencia en cuanto a generación de energía entre estas configuraciones suele ser mínima. También existen otros tipos de turbinas de viento que surgen como alternativas a un modelo tradicional de arrastre como son los aerogeneradores Sistan, Zephyr y Banki.

#### ▪ Aerogenerador Sistan

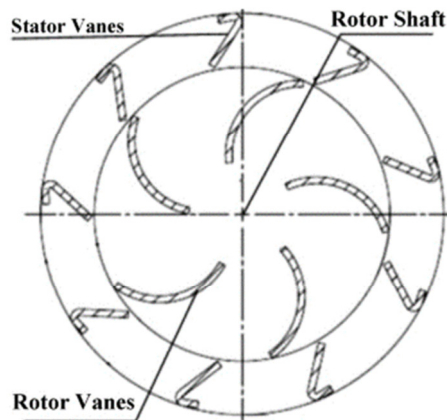
El aerogenerador de tipo Sistan es uno de los primeros existentes; fue utilizado en el área de Sistan de Irán, de donde deriva su nombre [15]. Al igual que Savonius funciona bajo el principio de arrastre y su particularidad es la fácil integración arquitectónica que posee. Muller et al. [16] sugieren mejoras a este tipo de turbina mediante la adición de discos superiores e inferiores, logrando una eficiencia de hasta 30%. También se sugiere que un incremento en el número de palas significaría un incremento de la eficiencia. La Figura 7 ilustra un esquema del Sistan.



**Figura 7:** Aerogenerador Sistan [16].

### ▪ Aerogenerador Zephyr

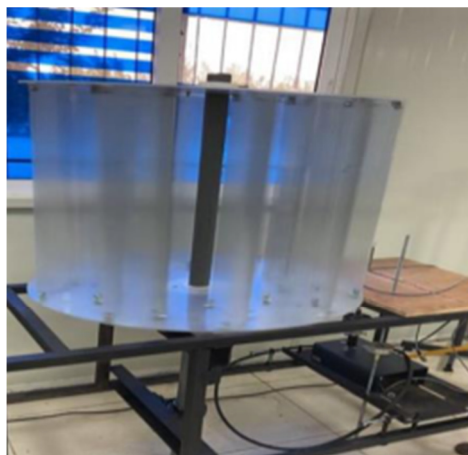
La turbina de tipo Zephyr también funciona bajo el principio de arrastre, donde existen varios álabes en el estator que ayudan a controlar el flujo y la dirección del viento a la entrada de la turbina. Aerodinámicamente, el beneficio de los álabes es la reducción de la turbulencia generada y la posibilidad que el flujo se concentre de mejor manera sobre la superficie de la pala. El coeficiente de potencia obtenido suele ser de 0,12 [17]; generando un aerogenerador que no es viable comercialmente, pero donde se pueden realizar múltiples investigaciones para mejorar su eficiencia. Si bien estos tipos alternos de turbinas no suelen ser explorados de manera profunda, son una alternativa a configuraciones comunes existentes. La Figura 8 muestra un esquema de los aerogeneradores de tipo Zephyr [17].



**Figura 8:** Aerogeneradores de tipo Zephyr [17].

### ▪ Aerogenerador Banki

Las turbinas Banki suelen ser conocidas bajo el nombre de turbinas Michel-Banki u Osberger, donde su origen y principales instancias son observables dentro de la generación hidroeléctrica, sirviendo como turbinas de acción colectando la mayor cantidad de energía cinética de los caudales con dos etapas de impacto del fluido [16]. Si bien estas turbinas tienen una gran aplicación comercial dentro del campo de la generación hidroeléctrica, poca investigación fue realizada para su integración eólica. Soud *et al.* [18] realizaron un estudio sobre un aerogenerador Banki aplicado para la generación eólica en carreteras, donde el modelo de prototipo alcanzó un coeficiente de potencia de 0,01 [18], este aerogenerador puede ser observado en la Figura 9. Si bien aún son aplicaciones experimentales, este tipo de turbina es prometedora para aplicaciones de flujos cortos de viento; pero de alta velocidad.



**Figura 9:** Aerogenerador de tipo Banki de policarbonato [18].

Para consolidar el conocimiento y todos los tipos de aerogeneradores descritos dentro del presente documento, la Tabla 1 ilustra una comparación de las principales características de los diversos aerogeneradores. En esta tabla se presentan cualitativamente diversos parámetros, como ser la integración en proyectos arquitectónicos (donde lo primordial es la operación en espacios pequeños y con aerogeneradores compactos), velocidad de *cut-in* y también el coeficiente de potencia, *cp*.

**TABLA 1 - CLASIFICACIÓN DE TURBINAS POR TIPO DE FUNCIONAMIENTO Y CARACTERÍSTICAS. ELABORACIÓN PROPIA**

Aerogenerador	Principio	Velocidad <i>Cut-in</i>	Cp	Integración Arquitectónica
Darrieus	Sustentación	Mala	Bueno	Buena
Giromill		Buena	Muy Bueno	Mala
VGOT		Buena	Muy Bueno	Muy Mala
Crossflex		Buena	Bueno	Muy Buena
Savonius	Arrastre	Muy Buena	Malo	Buena
Sistan		Buena	Malo	Buena
Zephyr		Buena	Malo	Buena
Banki		Buena	Malo	Mala
Savonius-Darrieus	Mixto	Muy Buena	Bueno	Mala

### 3. AVANCES RECIENTES DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO DE LAS VAWT'S

Las VAWT's son una gran alternativa frente a la generación eléctrica convencional. La generación eólica es la energía renovable más disruptiva dentro del mercado, compitiendo incluso con proyectos hidroeléctricos; cuando se supone que la energía hidroeléctrica es la más investigada y fiable [1]. Si bien el actual tema de investigación contempla a las VAWT's, son las HAWT's aquellas que son las soluciones comercialmente disponibles para grandes proyectos de generación. La disgregación resultante de la clasificación de la generación eólica en base a la orientación de los ejes resulta en que la mayoría de las VAWT's sean dejadas de lado en temas de investigación. Recientemente volvieron a tomar importancia debido a la crisis climática y la necesidad de diversos consumidores de obtener micro o nano generación eléctrica de manera económica y en regiones aisladas; donde la construcción de líneas de transmisión eléctrica no siempre es viable. Por otro lado, una prometedora integración urbana facilitada por su compacta presentación, hacen de los VAWT's un producto relevante.

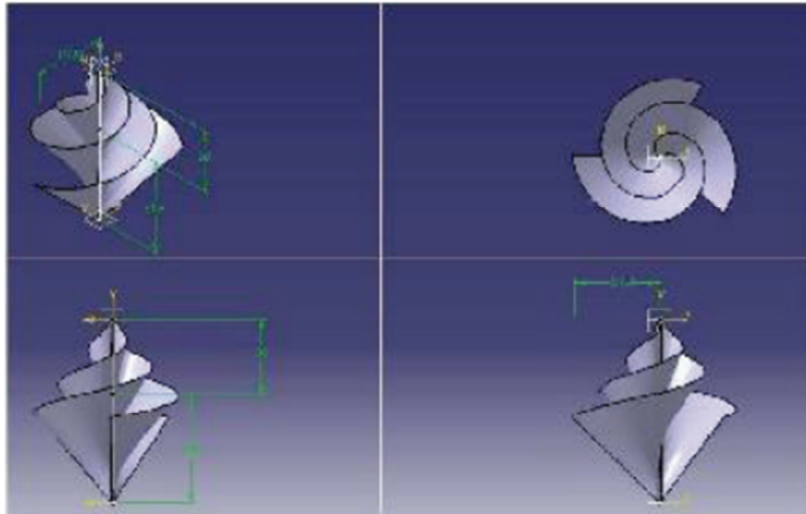
Las investigaciones realizadas sobre las VAWT's no siempre llegan al conocimiento de aquellos interesados en la generación eólica de eje vertical o a los consumidores que investigan sobre alternativas de turbinas de viento. Dejando una gran cantidad de temas o nuevos avances ignorados y limitando las posibilidades de encontrar una buena solución ante un problema ingenieril o de concepción de producto.

Para obtener la información expuesta se analizaron las publicaciones relevantes previas a principios de 2022. Se consideró la métrica de citaciones del artículo como principal criterio de selección para el análisis. Considerando la información obtenida como base, se expandió en cuanto a los conceptos que los autores dejaban sueltos, al igual que se intentó complementar los principales tipos de aerogeneradores existentes. La información recopilada se clasificó principalmente en cuanto a desarrollos de nuevas palas o perfiles aerodinámicos, simulaciones computacionales fluidodinámicas (*CFD*), aplicaciones de generación, dispositivos físicos externos y estudios de viabilidad de generación. Gracias al criterio de selección y la clasificación de información; a continuación, se exponen los avances más relevantes recientemente realizados dentro del área de generación eólica.

Nuevos avances de las VAWT's muestran una gran cantidad de nuevas turbinas de viento desarrolladas. Pramod et al. [19] se enfocaron en el diseño de una turbina de viento con un perfil de Nautilus (ver Figura 10), una geometría matemática continua, presenta una velocidad de *cut-in* de 1m/s y una eficiencia máxima entre 6 a 10 m/s. Este prototipo fue realizado en plástico ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y muestra la carga de una batería en un tiempo aproximado de 6 horas para una capacidad de 12 Ah. Blanco et al. [20] exponen una variante de perfil alar inspirado en la secuencia de Fibonacci analizando el término 34 y 55 de la misma para la construcción del perfil alar geométrico; de esta manera realiza una analogía a la naturaleza, donde el perfil resultante es homólogo a los rangos de eficiencia encontrados en la misma. Estos autores encontraron una mejoría del 14,5 % a la eficiencia normal de un aerogenerador Savonius en el cual se basó el modelo matemático. Sharma et al. [21] muestran un aerogenerador modificado bajo un algoritmo genético para lograr disminuir la velocidad de *cut-in* de la pala basada en una configuración Darrieus; centrándose en modificar el ángulo de curvatura. Rajpar et al. [22] muestran el uso de deflectores dentro del rotor de la turbina de viento como una manera de incrementar la eficiencia de la misma, observando un caso de aprovechamiento en generación urbana. Los deflectores permiten concentrar el flujo de aire para ser aprovechado por un rotor Savonius mejorando su velocidad y capacidad de *cut-in*. También se explora el modelo de una turbina de viento de tipo Banki

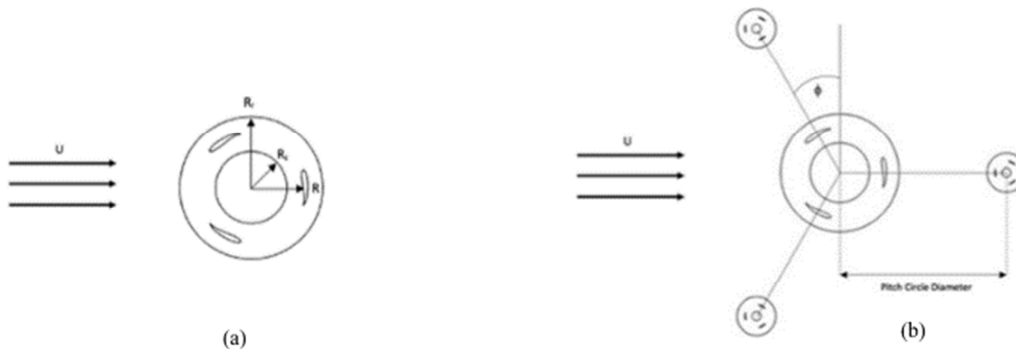


donde Maleki et al. [23] exploran la caracterización de los parámetros más importantes de la misma. Se obtiene un  $C_p$  de 0,3 para un tamaño de turbina de 1m x 1m.



**Figura 10:** Aerogenerador Nautilus [19].

Otro de los principales temas de investigación sobre turbinas de viento de eje vertical muestra como las configuraciones de las mismas en distintos arreglos pueden ser aprovechadas para maximizar la colección de energía. Durackz et al. [24] se centran en aerogeneradores de tipo Darrieus de tres palas y caracterizan un arreglo planetario de cuatro turbinas con un sol como ilustrado en la Figura 11. Concluye con una mejoría en la eficiencia frente a una turbina de viento normal con un ángulo de  $30^\circ$ ; el estudio también se sustenta mediante resultados experimentales. Brownstein et al. [4] realizan un estudio de flujo tridimensional de dos turbinas de viento de eje vertical interactuando en *upstream* y *downstream*; donde ciertas configuraciones de ángulos de incidencia muestran un incremento en el coeficiente de potencia,  $c_p$ , de la turbina. Resultante del estudio se proponen criterios para el posicionamiento entre arreglos de aerogeneradores y sirven de base para estudios posteriores de nuevas configuraciones de agrupación.



**Figura 11:** a) Aerogenerador aislado, b) Aerogeneradores en arreglo planetario [7].

Los estudios se concentran en nuevas aplicaciones de las VAWT's, donde es posible resaltar la generación rural y urbana. Maldonado et al. [25] desarrollaron un estudio sobre la construcción de turbinas Savonius para casas subsidiadas en México. Estudiando las configuraciones posibles y ángulos de incidencia posibles para maximizar el  $C_p$  y disminuir el costo de compra energética de las casas para el estado. Battisi et al. [26] estudian la turbina Darrieus de tipo H y L con dos palas y un perfil aerodinámico favorable para aplicaciones hidrocinéticas, logrando establecer una guía para adaptar este tipo de turbinas a estas aplicaciones. Se descartan las de tipo L debido a los problemas generados por su asimetría y se hace uso de *Gurney Flaps* para el control de flujo de manera pasiva. Ismael et al. [27] realizan una investigación completa considerando la generación eléctrica sobre una autopista de mediana velocidad, donde la energía máxima de salida es de 107,1 J por vehículo; también se realizan los cálculos para alimentar un sistema de iluminación local de la carretera y se dimensionan las baterías y la cantidad de luminarias requeridas. Por otro lado. Tian et al. [28] realizaron simulaciones numéricas para determinar la VAWT que tiene mejor desempeño entre la Darrieus, Savonius y Banki. Los autores determinaron que la turbina Banki tiene mejor rendimiento y, por tanto,

realizaron simulaciones numéricas con diversos arreglos de turbinas Banki en carreteras estudiando así el efecto del espacio entre ellas. Tian *et al.* [28] concluyeron que un arreglo de 3 turbinas tipo Banki con un espacio entre ellas de 4 veces el diámetro de la turbina proporcionaba una coeficiente de potencia promedio máximo.

La Tabla 2 muestra un resumen de los aportes más recientes observados en la literatura y que fueron previamente discutidos.

**TABLA 2 - RESUMEN DE APORTE RECIENTES DENTRO DE LAS VAWT'S**

Autor (es)	Aerogenerador	Experimento	Resultados
Pramod <i>et al.</i> [19]	Nautilus	Diseño y caracterización experimental	Cut-in de 1 m/s con eficiencia máxima entre 6 a 10 m/s; carga de batería de 12V 1A en 6 horas
Blanco <i>et al.</i> [20]	Savonius inspirado en Fibonacci	Diseño y caracterización experimental	14,5% incremento de eficiencia a Savonius normal.
Sharma <i>et al.</i> [21]	Darrieus	Optimización mediante algoritmos genéticos	Coefficiente de momento máximo de 0,7 para una velocidad de cut-in de 3 m/s
Rajpar <i>et al.</i> [22]	Savonius	Mejoría de eficiencia por implementación de deflectores estáticos	Un deflector estático inspirado en perfil alar NACA 001 puede lograr aumentar el Cp en 50% a un TSR de 1,3
Al-Maaitah <i>et al.</i> [23]	Banki	Caracterización de turbina y corriente de aire	Cp experimental de 0,3; plausible mejoría con diferentes materiales de construcción
Durackz <i>et al.</i> [24]	Darrieus H	Caracterización de arreglos de turbinas	Incremento de eficiencia de 1,0.1 % en el conjunto a un ángulo oblicuo de 30°; efectos negativos a 0°, 60° y 90°
Brownstein <i>et al.</i> [4]	Giromill	Estudio de interacción de conjuntos y flujos cruzados	Con un flujo en downstream e incidencia de 50° puede haber incremento de 14% en la eficiencia
Maldonado <i>et al.</i> [25]	Savonius	Estudio de factibilidad de instalación de aerogenerador	Con el uso de deflectores y parámetros de distancia adecuados, el Cp muestra un incremento de 20%
Balduzzi <i>et al.</i> [26]	Darrieus	Aplicabilidad Hidrocinética	Potencial en turbinas de tipo H y uso de Gurney Flaps para localizar el flujo en estudios posteriores
Ismaeel <i>et al.</i> [27]	Banki	Generación eléctrica sobre autopista de mediana velocidad	Energía aprovechable de 107,1 J; de la cual se cosecha suficiente para un sistema de 18 lámparas LED de 250 W con 38 baterías de litio de 200 Ah
Tian <i>et al.</i> [28]	Darrieus Savonius Banki	Análisis numérico de VAWT's y de arreglos diferentes en autopistas.	Mejor desempeño de la turbina Banki comparada a la Darrieus y la Savonius. Coeficiente de potencia promedio máximo para un espacio de 4D para un arreglo de 3 aerogeneradores.

Fuente: Elaboración Propia.

#### 4. CONCLUSIONES

Las turbinas de viento o aerogeneradores de eje vertical son una solución competitiva ante la generación energética en áreas rurales o en sistemas aislados, donde una integración a la red es costosa y poco viable. Las VAWT's aún siguen siendo exploradas e innovadas, pero se encuentran aplicaciones recientes en mini y microgeneración que son confiables.

Sin embargo, las VAWT's presentan algunos problemas como su pobre integración arquitectónica y eficiencias reducidas, aunque su disponibilidad a bajas velocidades de viento al igual que su capacidad de generar con viento omnidireccional son un atractivo de las mismas. Otras aplicaciones se muestran como novedosas y atractivas a otros consumidores que buscan soluciones energéticas dentro de lugares aislados o simplemente buscan la independencia energética de la red; donde las soluciones ofrecidas dentro del mercado cada vez son más comunes.

Además, se puede concluir también que las VAWT's generan un beneficio económico para aerogeneradores de potencias bajas, donde la generación no excede 3 kW, pero este margen puede llegar hasta 10 kW con las nuevas soluciones comercialmente disponibles (y nuevos estudios que aún esperan una aplicación formal). El coeficiente de potencia (cp) y capacidad de autoinicio (*cut-in*) de los aerogeneradores son inversamente proporcionales, donde nuevas investigaciones muestran componentes mecánicos que mejoran la relación, bajo el costo de un aumento de la complejidad de construcción. Las VAWT's pueden ofrecer mejor integración arquitectónica que las HAWT's y múltiples turbinas fueron desarrolladas con el propósito de hacer viable la combinación. Los aerogeneradores de eje vertical no son explorados actualmente como solución a una colección de energía masiva, sino como una solución a sistemas eléctricos aislados, donde nuevas configuraciones, arreglos y la mejora de eficiencia de las mismas pueden competir económicamente con otras soluciones de generación.

## REFERENCIAS

- [1] P. De Jong, A. S. Sánchez, K. Esquerre, R. A. Kalid, and E. A. Torres, "Solar and wind energy production in relation to the electricity load curve and hydroelectricity in the northeast region of Brazil," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 23, pp. 526–535, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.01.050.
- [2] F. L. Ponta, J. J. Seminara, and A. D. Otero, "On the aerodynamics of variable-geometry oval-trajectory Darrieus wind turbines," *Renew. Energy*, vol. 32, no. 1, pp. 35–56, 2007, doi: 10.1016/j.renene.2005.12.007.
- [3] T. Chaichana and S. Chaitep, "Wind power potential and characteristic analysis of Chiang Mai, Thailand," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 7, pp. 1475–1479, 2010, doi: 10.1007/s12206-010-0415-3.
- [4] I. D. Brownstein, N. J. Wei, and J. O. Dabiri, "Aerodynamically Interacting Vertical-Axis Wind Turbines: Performance Enhancement and Three-Dimensional Flow," *Energies*, vol. 12, no. 14, p. 2724, 2019, doi: 10.3390/en12142724.
- [5] M. Islam, A. Fartaj, and D. S. K. Ting, "Current utilization and future prospects of emerging renewable energy applications in Canada," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 8, no. 6, pp. 493–519, 2004, doi: 10.1016/j.rser.2003.12.006.
- [6] H. J. Sutherland, D. E. Berg, and T. D. Ashwill, "A Retrospective of VAWT Technology," *Security*, no. January, pp. 1–64, 2012.
- [7] E. Möllerström, P. Gipe, J. Beurskens, and F. Ottermo, "A historical review of vertical axis wind turbines rated 100 kW and above," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 105, no. May 2018, pp. 1–13, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.12.022.
- [8] T. Sharpe and G. Proven, "Crossflex: Concept and early development of a true building integrated wind turbine," *Energy Build.*, vol. 42, no. 12, pp. 2365–2375, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.07.032.
- [9] S. Mertens, G. Van Kuik, and G. Van Bussel, "Performance of an H-Darrieus in the skewed flow on a roof," *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 125, no. 4, pp. 433–440, 2003, doi: 10.1115/1.1629309.
- [10] R. Howell, N. Qin, J. Edwards, and N. Durrani, "Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine," *Renew. Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 412–422, 2010, doi: 10.1016/j.renene.2009.07.025.
- [11] R. Denoon, B. Cochran, D. Banks, and G. Wood, "Harvesting wind power from tall buildings," *CTBUH 2008, 8th World Congr. - Tall Green Typology a Sustain. Urban Futur. Congr. Proc.*, no. January, pp. 320–327, 2008.
- [12] S. A. Al-Shammari, A. H. Karamallah, and S. Aljabair, "Blade Shape Optimization of Savonius Wind Turbine at Low Wind Energy by Artificial Neural network," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 881, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/881/1/012154.
- [13] S. Kim and C. Cheong, "Numerical analysis on the low noise designs of savonius wind turbines by inducing phase difference in vortex shedding," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, vol. 38, no. 3, pp. 269–274, 2014, doi: 10.3795/KSME-A.2014.38.3.269.
- [14] R. Gupta and A. Biswas, "Computational fluid dynamics analysis of a twisted three-bladed H-Darrieus rotor," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 2, no. 4, 2010, doi: 10.1063/1.3483487.
- [15] M. M. Aslam Bhutta, N. Hayat, A. U. Farooq, Z. Ali, S. R. Jamil, and Z. Hussain, "Vertical axis wind turbine - A review of various configurations and design techniques," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 4, pp. 1926–1939, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.12.004.
- [16] G. Müller, M. F. Jentsch, and E. Stoddart, "Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 5, pp. 1407–1412, 2009, doi: 10.1016/j.renene.2008.10.008.
- [17] K. Pope *et al.*, "Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis wind turbine," *Renew. Energy*, vol. 35, no. 5, pp. 1043–1051, 2010, doi: 10.1016/j.renene.2009.10.012.
- [18] S. Qusai, S. Esraa, and R. Aseel, "Polycarbonate Bladed Highway Wind Turbine: A Case Study," *2021 12th Int.*

- Renew. Eng. Conf. IREC 2021*, pp. 0–4, 2021, doi: 10.1109/IREC51415.2021.9427820.
- [19] R. Pramod, G. B. V. Kumar, P. S. S. Harsha, and K. A. U. Kumar, “Design and development of nautilus whorl-wind turbine,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1859, 2017, doi: 10.1063/1.4990246.
- [20] J. Blanco, J. de D. Rodriguez, A. Couce, and M. I. Lamas, “Proposal of a nature-inspired shape for a vertical axis wind turbine and comparison of its performance with a semicircular blade profile,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 13, 2021, doi: 10.3390/app11136198.
- [21] M. Sharma, B. Rieger, C. Jou, and B. Butka, “Development of helical vertical axis wind turbine,” *Conf. Proc. - IEEE SOUTHEASTCON*, pp. 0–4, 2012, doi: 10.1109/SECon.2012.6196967.
- [22] A. H. Rajpar, I. Ali, A. E. Eladwi, and M. B. A. Bashir, “Recent development in the design of wind deflectors for vertical axis wind turbine: A review,” *Energies*, vol. 14, no. 16, 2021, doi: 10.3390/en14165140.
- [23] A. A. Al-Maaitah, “The design of the Banki wind turbine and its testing in real wind conditions,” *Renew. Energy*, vol. 3, no. 6–7, pp. 781–786, 1993, doi: 10.1016/0960-1481(93)90085-U.
- [24] J. Durkacz *et al.*, “CFD modelling and prototype testing of a Vertical Axis Wind Turbines in planetary cluster formation,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 119–126, 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.06.019.
- [25] R. D. Maldonado *et al.*, “Design, simulation and construction of a Savonius wind rotor for subsidized houses in Mexico,” *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 691–697, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.224.
- [26] F. Balduzzi, P. F. Melani, G. Soraperra, A. Brighenti, L. Battisti, and A. Bianchini, “Some design guidelines to adapt a Darrieus vertical axis turbine for use in hydrokinetic applications,” *E3S Web Conf.*, vol. 312, p. 08017, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202131208017.
- [27] T. A. Ismaeel, S. Aljabair, O. A. Abdulrazzaq, and Y. A. Abood, “Energy recovery of moving vehicles’ wakes in highways by vertical axis wind turbines,” *FME Trans.*, vol. 48, no. 3, pp. 557–565, 2020, doi: 10.5937/fme2003557I.
- [28] W. Tian, B. Song, and Z. Mao, “Numerical investigation of wind turbines and turbine arrays on highways,” *Renewable Energy*, vol. 147, no. 1, pp. 384–398, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.08.123.