

Molinos de viento patentados por Jerónimo de Ayanz y Beaumont en el año 1606; un análisis conceptual desde una perspectiva ingenieril del año 2021

Gonzalo Abad¹, Markel Penalba² y Ander Zarketa-Astigarraga²

¹ Departamento de Electrónica e Informática, Mondragon Unibertsitatea.

² Departamento de Mecánica y Producción Industrial, Mondragon Unibertsitatea.

RESUMEN:

En el presente documento técnico, se realiza un análisis desde un punto de vista ingenieril de los molinos de viento patentados por Jerónimo de Ayanz y Beaumont el siglo XVII. El análisis que se presenta podría denominarse como “análisis conceptual” o “análisis cualitativo”, dado que no se centra en cuantificar ni realizar cálculos numéricos, modelizaciones, mediciones o experimentaciones. Por el contrario, basándose en los conocimientos y experiencias de los autores en las disciplinas de fluido-dinámica, generación de energía mediante aeroturbinas e ingeniería en general, busca realizar un análisis cualitativo de los molinos de viento patentados hace ya más de cuatro siglos por el genio de Gendulain.

Por tanto, primeramente se realiza una presentación de los dos molinos de viento a estudiar, esto es, el molino Ayanz de eje vertical y el molino Ayanz de aspas en tornillo. Dichos molinos han salido a la luz recientemente, gracias al trabajo realizado por Nicolás García Tapia, plasmado en el libro “Patentes de invención españolas en el siglo de oro”. Seguidamente, se proporcionan brevemente unos pocos datos históricos para enmarcar en qué contexto Ayanz patenta sus molinos. En tercer lugar, se identifican y exponen los aspectos técnicos relevantes de la inventiva realizada por Ayanz en los molinos de viento propuestos. A continuación, en los siguiente tres apartados, el documento profundiza en el estudio del molino Ayanz de eje vertical. En un primer apartado, se distinguen las similitudes y diferencias entre el molino de Ayanz de eje vertical y un molino de parecidas características que en la actualidad es muy popular, a saber; el molino patentado a principios del siglo XX denominado Savonius. Tras ello, se compara y evalúa el diseño concreto del molino de eje vertical que Ayanz propuso, con las diferentes variantes de molinos de similares características que se estudian y que se emplean en la actualidad. En el último apartado, se muestra lo bien posicionado que se encuentra el molino de Ayanz de eje vertical a día de hoy, para ser empleado en una aplicación tan en boga, como es la de generar energía eléctrica a partir del viento. Finalmente, se ofrecen una serie de conclusiones relevantes del estudio.

1.-PRESENTACIÓN DE LAS PATENTES OTORGADAS A JERÓNIMO DE AYANZ; PRIVILEGIOS DE INVENCION DEL 1606.

a.- Molino de viento Ayanz de eje vertical

Una copia digital del privilegio de invención otorgado a Jerónimo de Ayanz y Beaumont por el molino de viento de eje vertical, se muestra en la Figura 1 y la Figura 2.

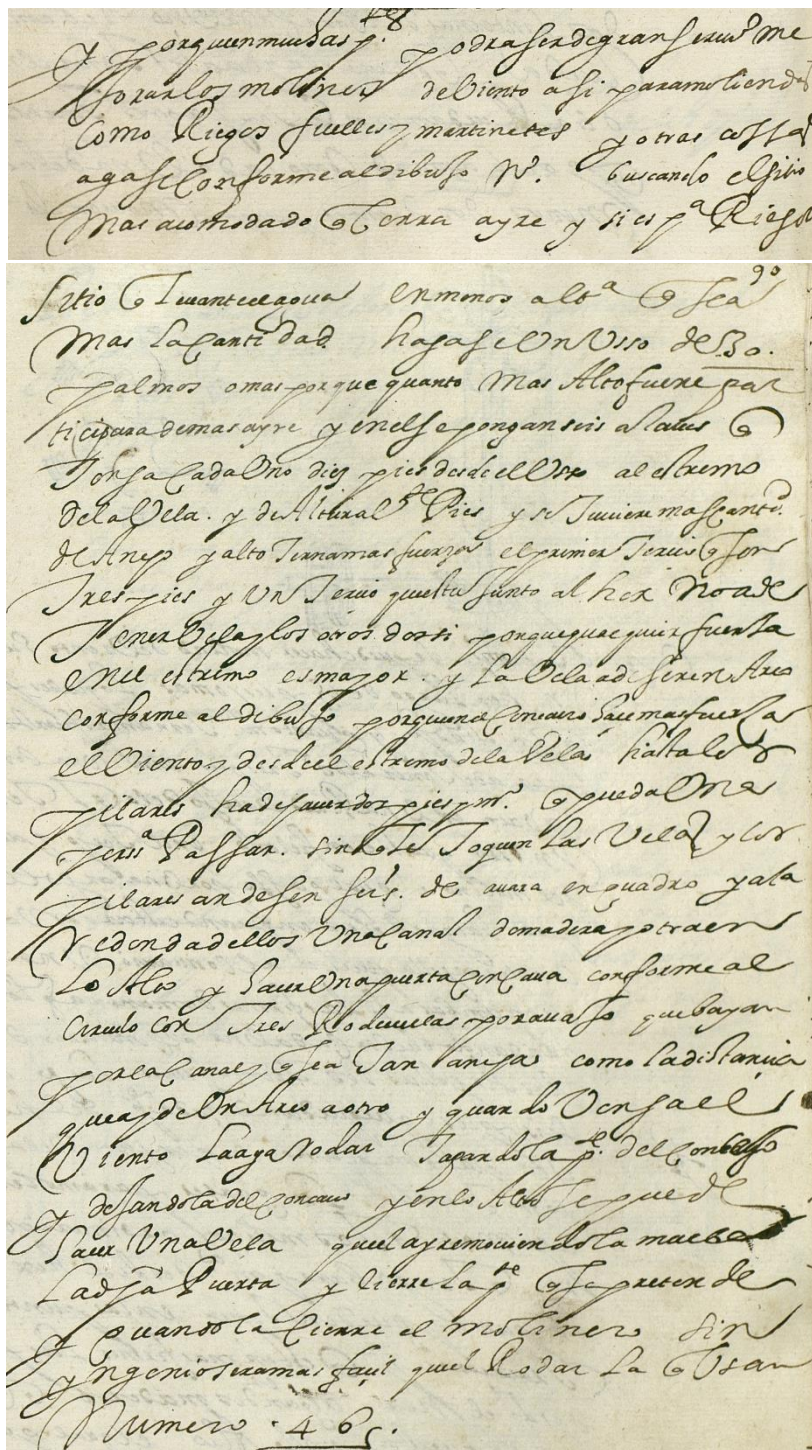


Figura. 1. Texto asociado al privilegio de invención otorgado a Ayanz por el molino de viento de eje vertical.
Permisos: España. Ministerio de Cultura y Deporte. Archivo General de Simancas, CCA, CED, 174, 90v-92v.

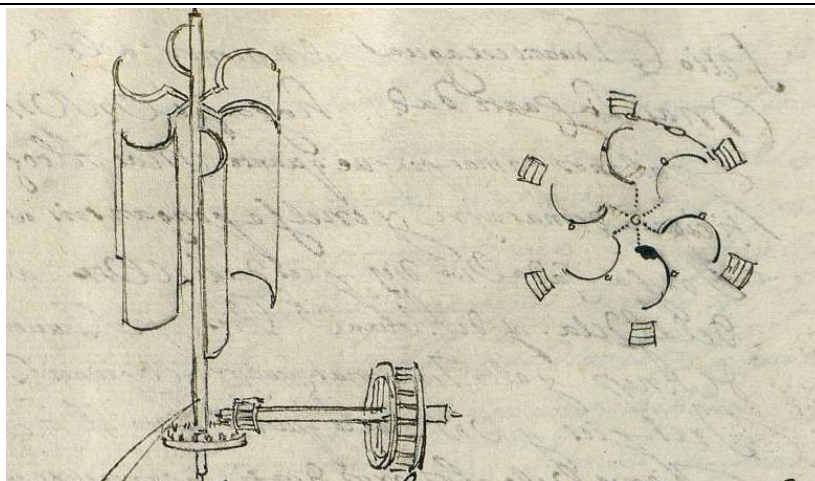


Figura. 2. Imagen asociada al privilegio de invención otorgado a Ayanz por el molino de viento de eje vertical.
Permisos: España. Ministerio de Cultura y Deporte. Archivo General de Simancas, CCA, CED, 174, 90v-92v.

La transcripción directa tomada del libro: Nicolás García Tapia, “Patentes de invención españolas en el siglo de oro”, editado por la oficina española de patentes y marcas, en el año 1990, es la siguiente:

“Y porque en muchas partes podrá ser de gran servicio mejorar los molinos de viento, así para moliendas como riegos, fuelles y martinetes y otras cosas, hágase conforme al dibujo n.⁰¹⁰³, buscando el sitio más acomodado [en] que corra [el] aire, y si es para riego o [fol. 90] sitio que levante el agua en menos altura que sea más la cantidad. Hágase un huso de 30 palmos o más, porque, cuanto más alto fuere, participará de más aire, y en él se pongan seis álabes, que tenga cada uno diez pies desde el huso al extremo de la vela y de altura veinte pies; y si tuviere más cantidad de ancho y alto, tendrá más fuerza. El primer tercio, que son tres pies y un tercio que está junto al eje, no ha de tener vela y los otros dos sí, porque cualquier fuerza en el extremo es mayor. Y la vela ha de ser en arco conforme al dibujo, porque en el cóncavo hace más fuerza el viento; y desde el extremo de la vela hasta los pilares ha de haber dos pies y medio, que pueda una persona pasar sin que le toquen las velas; y los pilares han de ser seis, de a vara en cuadro, y a la redonda de ellos una canal de madera y otra en lo alto, y hacer una puerta cóncava conforme al círculo, con tres rodezuelas por abajo que vayan por la canal, que sea tan ancha como la distancia que hay de un arco a otro; y cuando venga el viento, la haga rodar, tapando la parte del convexo y dejando la del cóncavo; y en lo alto se puede hacer una vela, que el aire moviéndola mueva la dicha puerta y cierre la parte que se pretende, y cuando la cierre el molinero sin ingenio, será más fácil que el rodar la que usan N.º 46”

*Nota: N.º 46 es la Figura 2 en el presente documento.

b.- Molino de viento Ayanz de aspas en tornillo

Una copia digital del privilegio de invención otorgado a Jerónimo de Ayanz y Beaumont por el molino de aspas en tornillo se muestra en la Figura 3 y la Figura 4.

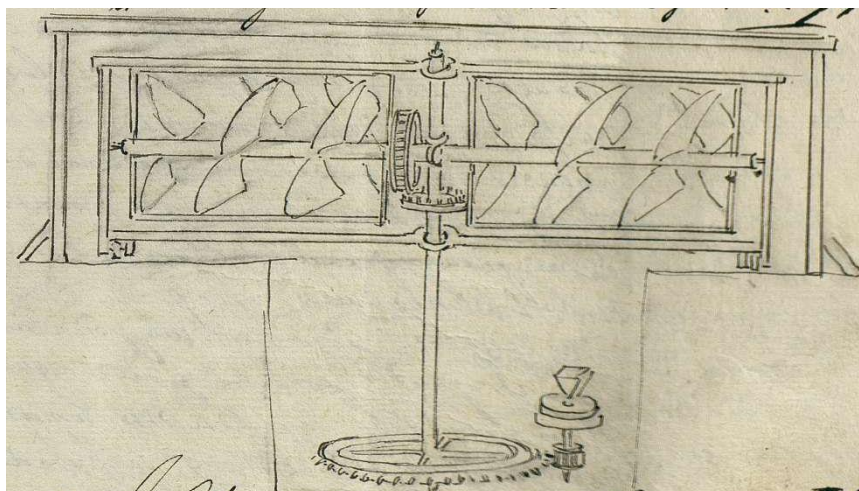


Figura. 4. Dibujo asociado al privilegio de invención otorgado a Ayanz por el molino de viento de aspas en tornillo.
Permisos: España. Ministerio de Cultura y Deporte. Archivo General de Simancas, CCA, CED, 174, 90v-92v.

La transcripción directa tomada del libro: Nicolás García Tapia, “Patentes de invención españolas en el siglo de oro”, editado por la oficina española de patentes y marcas en el año 1990, es la siguiente:

“Asimismo se puede hacer [un] molino de viento , haciendo un eje largo de 15 pies o más, lo que les pareciere que ya está dicho; y cuanto mayor, tendrá más fuerza ; este eje ha de tener a los tres pies en medio una linterna que bata en una rueda , debajo de la cual tenga un huso que esté enfilado en el techo y abajo del molino, el cual pase por una argolla , la cual asga el eje en que han de estar las velas , con otra argolla que esté[n] al contrario una de otra y ambas asidas firmes , de manera que los ejes van dando vuelta cada uno al contrario del otro , y las argollas los tienen firmes. Luego [en] los seis pies que quedan de cada parte del eje que está puesto en plano, se pongan velas que estén como tornillo, las cuales, para moler mucho más que los molinos ordinarios, bastará que tenga[n] vara y media desde el eje hasta la punta, y pueden tener en las puntas las trabazones para que estén más firmes las puntas. Desde el eje , asgan en dos maderos que caen de otro que está en lo alto , el cual , por mitad de lo alto, ha de tener una argolla por do pase el eje de la rueda baja y se asga en lo alto en parte fija , de manera que el eje de las [fol. 91] velas se ande a la redonda con su armadura ; y para que con recio viento esté más firme, a los lados de donde carguen los fuelles, se pongan en los maderos que hacen , dos rodezuelas y una canal de madera redonda , que cerque todo el molino por do vayan las ruedas, de suerte que afirme en ella las ruedas cuando el viento sople . Y también será bueno hacer una puerta, como la del capítulo de atrás, que cier[r]e y tape el viento si es muy recio. En lo bajo se aplique la molienda conforme a las demás trazas, o se levante aguas para riegos. Y lo mismo pueden hacer con los molinos de viento que se usan, porque es mucha el agua que saca. Y adviértase que las más de las trazas que declaro de movedores pueden servir para levantar agua para riegos y que lo que he declarado en unas, puedan servir otras, y así se aprovechen de las más fáciles y menos costosas. Esta ha de ser como se ve en el dibujo N. ° 47.”

*Nota: N.º 47 es la Figura 4 en el presente documento.

c.- Funcionamiento del molino de viento Ayanz de eje vertical

Haciendo uso de la terminología actual, el molino de viento Ayanz de eje vertical es un molino de arrastre dado que el viento arrastra o empuja las aspas y hace que se mueva. Debido a la geometría principal de sus aspas (cóncavas y convexas) y a su disposición opuesta sobre el eje al cual están sujetas, cuando un aspa gira en contra del viento incidente (convexa), experimenta menos resistencia al giro que cuando gira a favor (cóncavo), produciendo una resultante de fuerzas que hace que el molino gire. En contraposición a los molinos de eje horizontal, el molino de viento Ayanz de eje vertical no necesita orientarse a la dirección de donde sople el viento. En general, en condiciones de tamaño similares, los molinos cuyo principio de giro se basa en una fuerza de arrastre, extraen menos energía del viento que los molinos cuyo principio de giro se basa en una fuerza de sustentación. Por otro lado, los molinos de eje vertical frente a los de eje horizontal, en general, tienen la capacidad de arrancar con menores velocidad de viento y, asimismo, sus prestaciones se ven menos mermadas ante turbulencias. Si se observa el molino desde arriba, es decir, tomando la vista en planta del molino de Ayanz, se comprueba cómo las aspas tienen forma de hoz.

d.- Funcionamiento del Molino de viento Ayanz de aspas en tornillo

Tanto el funcionamiento como los detalles de este molino de viento pueden estar sujetos a varias interpretaciones. A continuación, se trata de exponer el funcionamiento del molino que los autores han considerado como el más probable.

Primeramente, es necesario destacar que el dibujo de la patente representa una especie de corte transversal del molino. Dependiendo de por dónde sople el viento, el aire entraría axialmente al eje horizontal al molino desde cualquiera de los flancos, tal y como se muestra en la Figura 5 retocada desde la originaria de la patente.

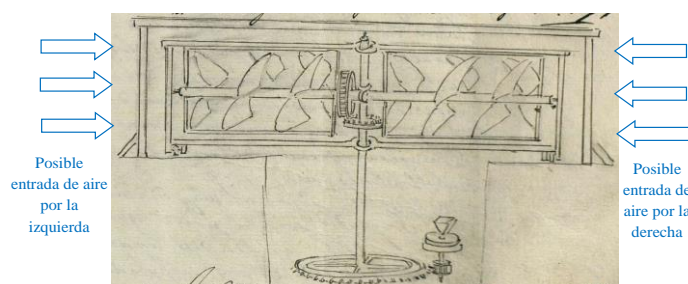


Figura. 5. Molino de viento de aspas en tornillo donde se ilustran los orificios por donde puede fluir el aire. Fuente: Adaptada de la Figura 4.

El aire se encauzaría por una especie de tambor que abraza a las aspas helicoidales del molino. Si el aire entra por la derecha, las aspas helicoidales o de tornillo del mismo lado girarían junto con las de la izquierda, todas en el mismo sentido. Lo mismo sucedería si el aire entrase por la izquierda, todas las aspas helicoidales girarían en el mismo sentido al unísono. El aire, según va pasando a través de las aspas, va perdiendo energía y, por tanto, velocidad. De este modo, las primeras aspas horizontales en ser movidas por el aire, generan mayor energía que las últimas,

que se ven accionadas por un viento más debilitado. Una vez el aire entra por el cerramiento y hace girar las aspas helicoidales junto con su eje horizontal a las que están unidas de manera solidaria, el giro horizontal se transmite al eje vertical mediante un sistema de transmisión que se ubica en el centro del molino (transmisión de “linterna y rueda catalina” para ejes perpendiculares). Finalmente, el eje vertical accionaría la rueda del molino de molienda situada en la parte baja del eje vertical, u otro elemento como la bomba para mover agua, y realizaría la labor o trabajo práctico encomendado. Al igual que el molino anterior de eje vertical, interpretamos también que todo el conjunto de aspas y cerramiento puede girar y por tanto, se puede orientar a la dirección por donde sopla el viento.

Este molino de viento que funciona en base a un eje horizontal y que dispone de varias etapas de aspas en forma helicoidal, puede interpretarse como una versión primitiva de las actuales turbinas axiales. Podría afirmarse que el principio de funcionamiento básico es el mismo, así como la física y aerodinámica que describe su funcionamiento.

2.-CONTEXTO HISTÓRICO EN EL QUE JERÓNIMO DE AYANZ y BEAUMONT OBTIENE LOS PRIVILEGIOS DE INVENCÓN

Siguiendo la estela de ciudades-estado como Florencia en 1421 y Venecia en 1474, el reino de Castilla a través de Isabel la Católica en Sevilla el año 1478, puso en marcha lo que se denominaron, en un inicio, Cédulas de privilegio por invenciones [1]. Fue el primer gran estado de amplia extensión, o reino, como se lo denominaba en la época, en adoptar una medida así en el mundo. Estas Cédulas de privilegio, son los verdaderos embriones de lo que hoy se conocen como patentes. Fueron creadas para proteger a los inventores de las copias que pudieran hacerse de los artificios o invenciones que ellos mismo creaban, dotándoles de la seguridad jurídica imprescindible para defender sus invenciones y fomentando, de esa manera, la aparición de nuevos inventores que se veían beneficiados por sus inventos. Desde ese inicio, quedaba definida la fórmula jurídica de que constaban las patentes: una exposición que explicaba en qué consistía la invención, el tiempo en el que se concedía la exclusiva y los castigos a aquellos que infringían la exclusiva y querían reproducir la invención durante el tiempo de concesión. El privilegio lo concedía el rey mismo, tras realizarse un examen ante un tribunal en el que el inventor debía demostrar experimentalmente la validez de su invención. Si el privilegio era concedido, la invención quedaba protegida en todos los territorios del reino y se realizaban tres copias; una copia se la quedaba el inventor, otra era para la administración del monarca y la tercera se recogía en los archivos generales. Gracias a esta tercera copia, han podido llegar los documentos de patentes asociados a estos privilegios hasta nuestros días [1].

Pues bien, los dos molinos de viento inventados por Jerónimo de Ayanz y mostrados en el apartado anterior, fueron privilegios de invención otorgados en este caso por Felipe III durante el año 1606 [1]. En una situación de verdadera bonanza social, Ayanz siguió los pasos de una multitud de inventores, que antes que él realizaron una incontable cantidad de invenciones y patentes a lo largo de más de un siglo. De hecho, todavía a día de hoy no se han recuperado todas por los historiadores e investigadores. Ejemplos de inventores destacados de esa época al servicio de la corona española fueron; Calvi, Tercio, Sitoni, Paccioto, Leoni, Spanocchi, Locadello, Fratin, Turriano y Antonelli, todos ellos venidos desde Italia. Mientras que originarios españoles también hubo multitud; Azlor, Girava, Lastanosa, Zubiaurre, Garay, Esquivel, Morales, Rojas, Montalbán, Lobato y el mismo Ayanz claro está entre otros [2]. Las invenciones fueron de todo tipo y lógicamente orientadas a solventar problemáticas o necesidades de la época; por ejemplo

hubo invenciones como balanzas de precisión, invenciones en la técnica naval, hornos, destiladores de agua marina, artilugios para mover el agua, invenciones para molinos, precedentes de las turbinas hidráulicas y un larguísimo etcétera.

En este contexto, Jerónimo de Ayanz y Beaumont nace en Gendulain, en el año 1553 en el seno de una familia noble. Desde muy joven entró al servicio de Felipe II como paje real. Más tarde se dedicó a la carrera militar, participando en multitud de batallas. Destacó por su extraordinaria fuerza física. También sobresalió como músico, tanto como compositor de canciones como por sus dotes de canto. Fue considerado, asimismo, un buen pintor [2]. En 1597 fue nombrado administrador general de las minas del reino y tuvo la ocasión de conocer más de 550 minas. A partir de este periodo, ideó múltiples soluciones para los problemas de la explotación de las minas que se encontró, y más tarde fueron aprobadas con éxito como privilegios de invención por Felipe III. Se sabe que en 1606, Ayanz obtuvo la patente para la explotación de más de cincuenta invenciones. Los inventos que Ayanz realizó y que quizás sean más conocidos fueron: un sistema de desagüe mediante un sifón, una bomba para desaguar barcos, un precedente del submarino, un horno para destilar agua marina, balanzas de precisión, ingenios para los molinos, bombas para el riego, un mecanismo de transformación del movimiento que permite medir el denominado ‘par motor’, es decir, la eficiencia técnica, algo que solo siglo y pico después iba a volver a abordarse, un traje de buceo y diferentes variantes de ‘máquinas de vapor’. Muchas de las inventivas se recogen en la referencia [1]. En la Figura 6, se muestra el retrato de Ayanz realizado por Eulogia Merle.



Figura. 6. Retrato de Jerónimo de Ayanz y Beaumont. (Fuente: Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, Eulogia Merle) .

Pues bien, aunque los molinos de viento inventados por Ayanz no han sido hasta la fecha destacados de manera especial, en este documento se pretende profundizar algo más de lo dicho hasta hoy sobre dichos molinos.

3.-ASPECTOS RELEVANTES DE LA INVENTIVA EN LOS MOLINOS DE VIENTO DE AYANZ

a.- Introducción

No se tiene evidencia documental alguna de que los molinos de viento propuestos por Jerónimo de Ayanz el año 1606, hubieran sido utilizados antes en ningún lugar del mundo. Las configuraciones de molinos de viento tradicionalmente utilizadas y que aparecen en todas las referencias eran las dos siguientes:

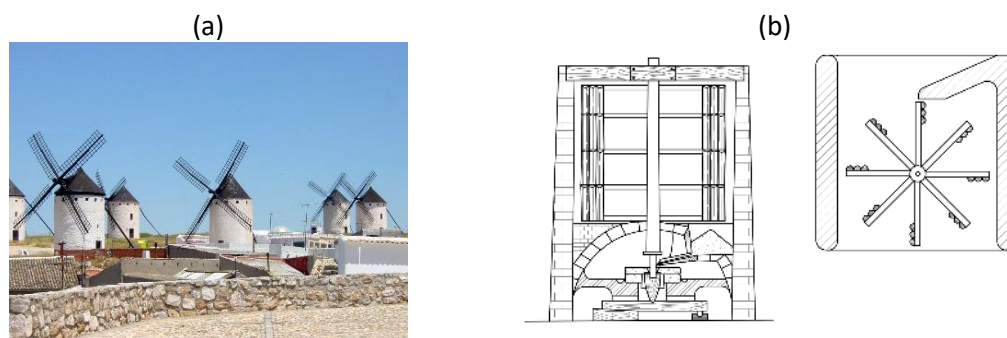


Figura. 7. (a) Molinos antiguos de eje horizontal (Fuente: Lourdes Cardenal - Trabajo propio, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=50667>), (b) Recreación de un antiguo molino persa de eje vertical (Fuente: Kaboldy – Trabajo propio, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8537002>).

En la inmensa mayoría de los casos, el uso principal que se les venía dando era el de moler el grano de cereal. Sin embargo, existen algunas evidencias por ejemplo de que en China utilizaban desde tiempo inmemorial, unos molinos llamados *panémonas*, que se utilizaban fundamentalmente para el bombeo de agua y posterior riego [3]. Algunas fuentes afirman que los molinos persas también se utilizaban para mover agua. Previos a estos molinos, en todas las fuentes se cita el “molino de viento” o “ingenio de viento” ideado por Herón de Alejandría en el siglo I después de Cristo y que servía para mover los fuelles de un órgano, tal y como se muestra en la Figura 8.

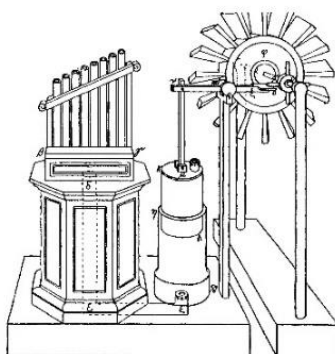


Figura. 8. Ingenio de viento ideado por Herón de Alejandría en el siglo I después de Cristo que servía para mover los fuelles de un órgano (Fuente: W. Schmidt, Public domain, via Wikimedia Commons).

Posteriormente a modo de dato histórico, los primeros molinos de viento que se utilizaron para generar electricidad se llevaron a cabo a finales del siglo XIX, por Charles Brush en EEUU y por James Blyth en Escocia. Todo esto pudo realizarse gracias a invenciones eléctricas clave como son las baterías y las máquinas eléctricas, realizadas unos años antes [4]. Nótese como el molino de viento utilizado por Blyth, guarda ciertas similitudes de apariencia con el molino patentado por Jerónimo de Ayanz tal y como se observa en la Figura 9.

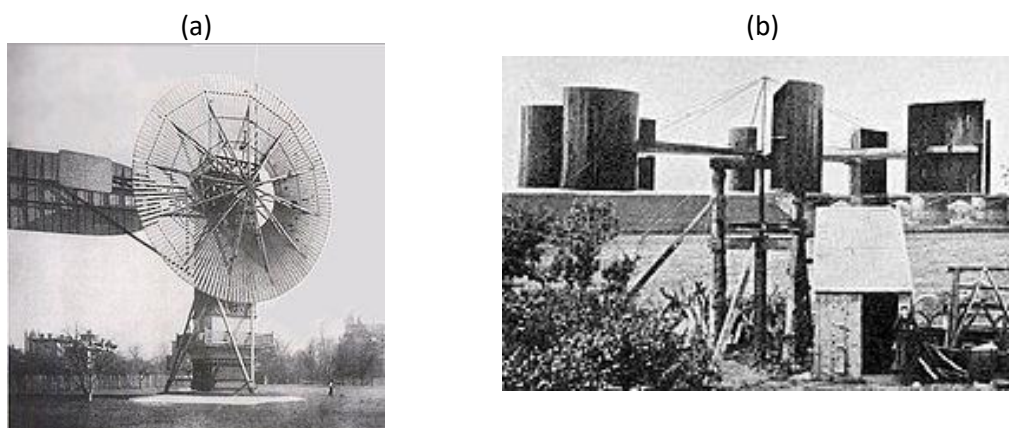


Figura. 9. Primeros molinos de viento utilizados para generar electricidad. (a) Molino de viento de Charles Brush de 1888 (Fuente: Autor desconocido, dominio público, via Wikimedia Commons), (b) Molino de viento de James Blyth de 1891 (Fuente: dominio público).

b.- Molino de viento Ayanz de eje vertical

Pues bien, desde el punto de vista de la morfología de molino que propuso Jerónimo de Ayanz el año 1606, quizás una de las mayores inventivas radica en que propuso unas aspas, o velas como las llamó él, con forma curvada, o de medio cilindro, o en arco. Ayanz cuando afirma; “*y la vela ha de ser de arco conforme al dibujo, porque en el cóncavo hace más fuerza el viento*” da pruebas de que está entendiendo perfectamente que en su giro, el aspa cóncava hace más fuerza a favor del avance, que el aspa convexa que en su retroceso se opone al mismo. Existen estudios actuales que han cuantificado que un aspa cóncava puede llegar a tener un coeficiente de empuje del orden de tres veces mayor que un aspa convexa [5].

Además, cuando afirma; “*...y hacer una puerta cóncava... y cuando venga el viento, la haga rodar, tapando la parte del convexo y dejando la del cóncavo*”, se puede interpretar que de alguna manera está tratando de taponar el viento que llega a la parte convexa de las aspas, para minimizar en la medida de lo posible la fuerza en contra realizada por las partes convexas. Para facilitar la comprensión de este hecho, se ofrece al lector la siguiente figura ilustrativa.

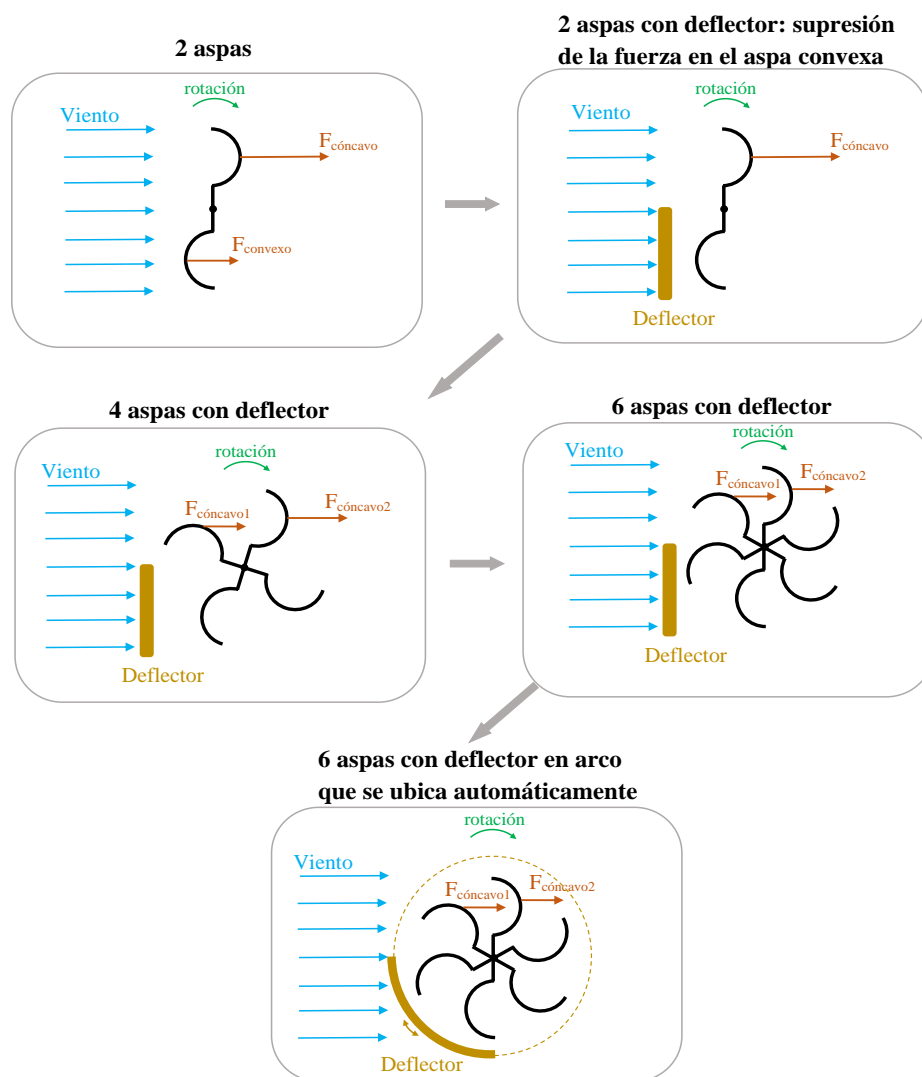


Figura. 10. Ilustración que muestra las fuerzas que se dan en el molino de Ayanz de eje vertical y el efecto del deflector.

Que se sepa y al menos hasta que no se demuestre lo contrario, hasta la fecha de esta invención, todos los molinos de viento que se habían venido utilizando a lo largo de la historia tenían aspas planas. Desde un punto de vista aerodinámico y haciendo uso de los conocimientos de fluidodinámica que hoy tenemos y que en el 1606 aún no se habían desarrollado, se puede afirmar que en la configuración de molinos de eje vertical, las aspas en forma de medio cilindro presentan una importante ventaja frente a las aspas planas y sencillas que se venían utilizando hasta la fecha (Nota: las aspas más sofisticadas con variaciones en el grosor como las formas NACA y sus derivados que hoy se utilizan regularmente, se inventaron más de un siglo más tarde). En principio, frente a las aspas planas, las aspas en forma de medio cilindro son capaces de aprovechar mejor el flujo de aire incidente, produciendo un mayor par en el eje del molino y por tanto desarrollando una mayor potencia [5].

Pues bien, continuando con la morfología del molino que propuso, se observa como el molino era de eje vertical. Entendemos que Ayanz ya conocería molinos de eje vertical (modelos persas, derivados o molinos descritos por autores de su época como por ejemplo el de Francisco Lobato

[1] o modelos de Leonardo da Vinci), por tanto en ese aspecto no nos atrevemos a afirmar de que existiera inventiva. Entendemos que en sus estancias en Madrid, Ayanz pudo tener acceso a bibliotecas y libros muy importantes de la época donde posiblemente estaban estos molinos de eje vertical descritos. Es necesario tener en cuenta también, que Ayanz fue desde muy joven paje real de Felipe II, quien aglutinó la que quizás fuera la biblioteca más importante de la época y es probable que Ayanz tuviera acceso a dicha biblioteca, o al menos a personas que tuvieran acceso a ella o a otros libros ubicados en otro lugar. No obstante, si Ayanz desarrolló su molino de eje vertical sin conocimiento alguno de una existencia previa, fue algo efectivamente muy meritorio. Sin embargo, este aspecto es muy difícil de corroborar con una evidencia documental.

Por otro lado, tal y como se observa, configuró en su molino un número de seis aspas. Desconocemos porqué eligió ese número y no otro. Se desconoce si realizó ensayos y prototipos con otro número de aspas que le ayudaron a decantarse por el número de 6 aspas. Lo que sí podemos afirmar, es que todavía a día de hoy, el número óptimo de aspas a configurar en un molino de eje vertical es algo que no se tiene del todo claro. Existen multitud de investigaciones y publicaciones a este respecto [6]-[7]. Dependiendo del contexto, ubicación del molino y la utilidad que se le quiera dar, el número de aspas a utilizar puede ser diferente. Por lo general existe la opción de utilizar 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 aspas y existen casos menos habituales donde se pueden utilizar más de 8. En multitud de estudios realizados, se ha observado que confluyen una gran variedad de parámetros geométricos inter-dependientes, que tienen su impacto en el diseño óptimo. Es muy difícil decir nada concluyente en cuanto al número de aspas idóneo.

En cuanto al ingenio que ideó Ayanz que actúa de manera automática como concentrador o deflector del aire que entra al molino, mediante una puerta corredera accionadas con una vela (o veleta), sí que presenta una inventiva muy destacada. Se sabe hoy en día que mediante concentradores y deflectores, se puede incrementar considerablemente la eficiencia del molino, lográndose un importante incremento en la potencia que puede desarrollar para un viento incidente dado [6]-[8]. Además de esto, también se logra que el molino sea capaz de arrancar con velocidades de viento mucho menores, consiguiendo así que el mismo sea operativo en un rango de velocidades de viento más amplio. No se tiene evidencia de que un automatismo semejante fuera propuesto antes y mucho menos para mejorar el viento incidente en un molino. Este hecho se puede afirmar que es muy destacado. Sí que los molinos persas de la Figura 7 disponían de cerramientos, pero para aislarlos o protegerlos del viento cuando no se les quería dar uso. Sin embargo, el ingenio propuesto por Jerónimo de Ayanz va mucho más allá, puesto que se posiciona de manera automática.

Por otro lado, para turbinas actuales similares a la morfología propuesta por Ayanz y utilizadas con concentradores de aire, existen estudios muy recientes que postulan que un ratio altura-diámetro de 6:1 y 6 aspas es la configuración más ventajosa [9]. Como se puede observar, Ayanz se acercó a estos números sorprendentemente mucho con su diseño de molino y con su ingenio de puerta corredera.

En este sentido, es también muy relevante el hecho de que Ayanz especifique que ha de haber una distancia entre las velas y los pilares; *“y desde el extremo de la vela hasta los pilares ha de haber dos pies y medio, que pueda una persona pasar sin que le toquen las velas”*. Se puede interpretar aquí que con esto quiere reducir el hoy en día denominado “efecto pared” o “Wall Interference Effect”. Es decir, el evitar poner la puerta giratoria demasiado cerca de las aspas para evitar que el deflector en forma de puerta giratoria genere turbulencias que resten efectividad al conjunto. Nótese, que tampoco la puerta giratoria debe estar demasiado lejos,

porque tampoco haría efecto beneficioso alguno. Por tanto, el ubicar la puerta a una distancia adecuada es un aspecto crítico para su correcto funcionamiento.

Finalmente, a modo de ver de los autores, el ingenio de Ayanz ha de ser entendido como un conjunto. Es decir, el molino propuesto viene muy estrechamente ligado a la puerta corredera y viceversa, la puerta corredera es diseñada para el molino de seis aspas propuesto. Tal y como destaca Ayanz en la patente, desde un primer momento tiene claro que la parte cóncava de las aspas, realizan más fuerza que la parte convexa (*“y la vela ha de ser de arco conforme al dibujo, porque en el cóncavo hace más fuerza el viento”*). Además, parece ser que entiende perfectamente también que poniendo una puerta, obstáculo o deflector en la parte convexa, elimina las fuerzas que se oponen al movimiento en las aspas convexas y por tanto incrementa la fuerza al molino. Pues bien, tal y como se trata de mostrar ilustrativamente en la Figura 10, seis parece ser que es el número apropiado de aspas de molino, que se adecua a una puerta corredera que se mueve circularmente y que se orienta automáticamente con el viento. Es decir, tal y como se muestra en la Figura 10, con un número de aspas de dos o de cuatro, se puede intuir que probablemente una puerta corredera que gire en círculo, no sería tan fácil de que cumpliera su función de deflexión de manera efectiva y probablemente, no sería tan fácil de que se moviese y se orientase adecuadamente de manera automática (sus grandes dimensiones y gran amplitud de arco, dificultarían probablemente en gran medida la labor de la vela que la tiene que hacer girar). Por otro lado, con un número de aspas mayor que seis, hoy en día se sabe que interferencias de flujo de aire que se crean entre aspas pueden llegar a ser relevantes y, llegado a un punto, perjudicar el comportamiento del sistema en su conjunto. Las estelas turbulentas que generan las aspas influyen en sus posteriores, haciendo que trabajen en un régimen turbulento que dista mucho de ser una configuración óptima de flujo (Nota: ver explicaciones asociadas en la sección 5 de este documento).

Por tanto, los autores entienden que Ayanz eligió un número de seis aspas para su molino, muy probablemente sobretodo porque es el número de aspas que mejor se adecua al ingenio de la puerta corredera circular (o deflector) y que se orienta de manera automática. Y con ello, muy probablemente, configuró el mejor molino de eje vertical de los posibles que tiene aspas cóncavas y convexas. Es decir, este molino de seis aspas con deflector de posicionamiento automático, dará probablemente más fuerza que uno de dos aspas o de cuatro aspas, o de ocho aspas o de más aspas incluso, en todos los casos, sin y con deflectores (Nota: habría que inventar deflectores que se orienten y funcionen de manera adecuada para dos y cuatro aspas, cosa que no es evidente). De todos modos, para demostrar esta hipótesis, habría que realizar los ensayos experimentales pertinentes.

Por otro lado, para concluir, en cuanto a la utilidad que dio Jerónimo de Ayanz a su molino, sí que se puede afirmar que es también una inventiva muy remarcable. El hecho de utilizarlo para mover agua, accionar martinets, fuelles y otros elementos de la época y no para moler el grano, sí que parece ser innovador. Aunque como se ha destacado antes, sí que existen evidencias de que en China antes también se utilizó para mover agua y algunas fuentes indican que los molinos persas también se utilizaron para regadíos. De todos modos, de nuevo, desconocemos si Ayanz sabría de ese uso previo, o si sin embargo se le ocurrió a él.

b.- Molino de viento Ayanz de aspas en tornillo

Desde un punto de vista morfológico, al igual que en el molino de viento de eje vertical comentado en el apartado anterior, quizás la inventiva primera o que más destaca en un primer análisis, radica en que Ayanz propuso unas aspas en forma de tornillo, o como hoy se denominarían, de forma helicoidal. No se dispone de evidencia documental alguna de que nadie antes hubiera utilizado unas aspas helicoidales en un molino de viento.

La inventiva realizada en la forma de las aspas, unidas al hecho de disponerlas en serie a lo largo de un mismo eje, junto con ubicarlas dentro de un cerramiento conductor para mejorar el flujo del aire, se puede afirmar que es otra inventiva destacada del molino patentado por Ayanz. Es de remarcar que este molino de viento, hace que nos recuerde a multitud de turbinas, hélices de barcos y a turbo-maquinas axiales que se utilizan hoy en día. Unos pocos ejemplos de estas turbinas comunes a día de hoy y que se utilizan en múltiples y diversas aplicaciones se muestran en la Figura 11.

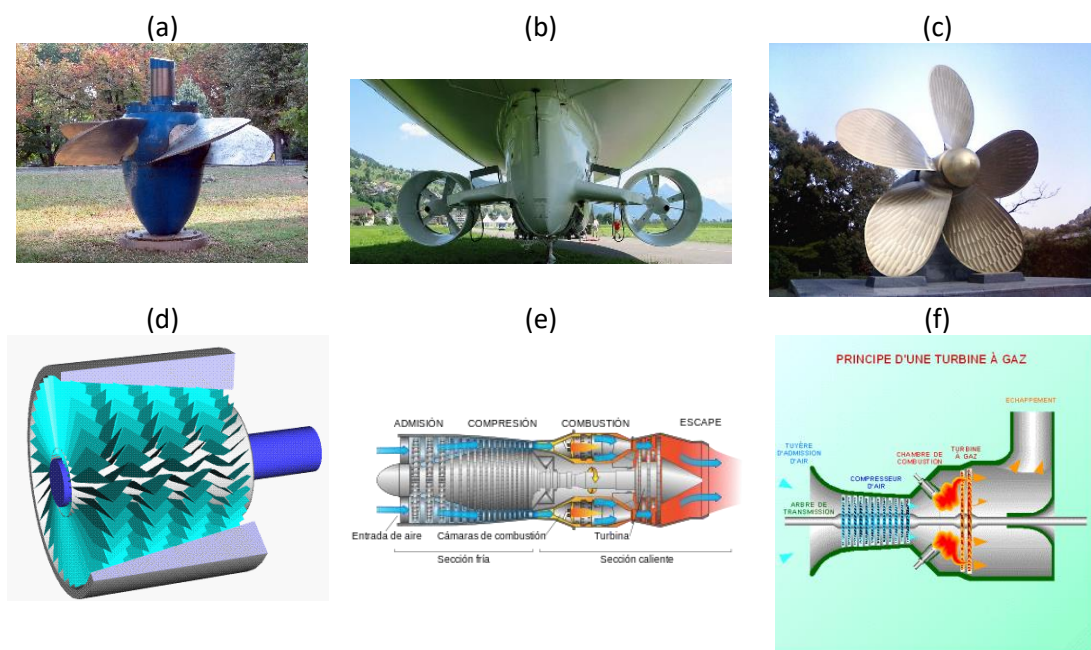


Figura. 11. Turbinas y máquinas axiales que se utilizan a día de hoy y que guardan cierta similitud con el molino de aspas en tornillo ideado por Ayanz. (a) Turbina Caplan (Fuente: Reinraum, CC0, via Wikimedia Commons), (b) Hélices tubulares en dirigibles (Fuente: Saperaud~commonswiki, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons) (c) Hélice de barco (Fuente: Toto-tarou, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons), (d) Compresor axial (Fuente: NASA, Public domain, via Wikimedia Commons), (e) Turboreactor (Fuente: CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons), (f) Turbina de gas (Fuente: Daniel BONNERUE, CC BY-SA 2.0, via Wikimedia Commons).

De este modo, se podría incluso afirmar que el molino de Ayanz, es el primigenio de lo que hoy en día se conoce como turbinas axiales. Tal y como se comentaba antes, se desconoce si existen evidencias documentales donde se muestren ingenios semejantes previos al realizado por Ayanz (aspas helicoidales dispuestas en varias etapas sucesivas a lo largo de un mismo eje, junto con ubicarlas dentro de un cerramiento). Se desconoce tampoco, si inventores de turbinas posteriores conocerían los molinos propuestos por Ayanz y pudieron basarse en los mismos.

Es destacable también que en la patente, Ayanz habla del aire como “los fuelles”, cosa que parece indicar que contemplaba la posibilidad de que cuando no hubiera viento, insuflaría aire al molino mediante fuelles manuales y podría conseguir mover el molino para la tarea que estaba dedicado (subir agua, moler grano, etc...). Nótese que esta idea con otra configuración de molino sería poca práctica (por ejemplo el molino de eje vertical propuesto por él mismo), pero en esta topología concreta podría ser muy útil. Nótese que dado al molino le entraba el aire por una sección de área relativamente pequeña, de manera concentrada y axialmente al eje horizontal a la cual las hélices están sujetas, es muy probable que mediante un fuelle de aire accionado por una o varias personas, conseguiría hacer la suficiente fuerza para realizar el trabajo al cual se dedicaba el molino.

4.- SIMILITUDES Y DIFERENCIAS ENTRE EL MOLINO AYANZ DE EJE VERTICAL Y EL MOLINO SAVONIUS

Es posible constatar que el molino Ayanz de eje vertical guarda muchas similitudes con el molino Savonius patentado por Sigurd J. Savonius, en el año 1922. En la figura siguiente se muestra el rotor Savonius tal cual se mostró en una de sus primeras patentes.

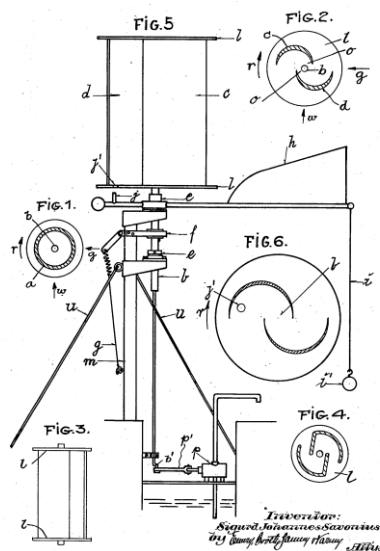


Figura. 12. Rotor Savonius tal cual se muestra en una de las primeras patentes del siglo XX (Fuente: [10]).

Quizás la primera diferencia que salta a la vista entre ambos molinos es el número de aspas. El molino Ayanz de eje vertical consta de 6 aspas, mientras que el molino Savonius en su configuración primigenia consta de dos aspas.

Existe otra diferencia significativa entre ambos molinos y es que mientras el molino de Ayanz tiene sus aspas amarradas al eje central de rotación, el molino Savonius deja un hueco en el centro del molino, de tal manera que el flujo de aire puede fluir entre las dos aspas por dicho hueco. Esta particularidad obliga al molino Savonius a tener dos placas perpendiculares al eje de rotación, una localizada en la parte superior y otra en la parte inferior, con el objetivo de poder amarrar las aspas a través de las placas perpendiculares, al eje de rotación y de esta manera, habilitar que las aspas puedan girar. Estas dos placas que aparecen en el molino Savonius, es otra diferencia significativa, ya que en el molino de Ayanz no son en principio

necesarias. Aunque depende de la capacidad del material utilizado a soportar fatigas y si se utilizara un material frágil, quizás serían necesarias también placas perpendiculares que refuercen el conjunto.

Por otro lado, aunque al lector le pueda parecer quizás excesivo, los autores quisieran dejar aquí recogido el siguiente apunte. Tal y como se observa en la Figura 13, que es la planta aumentada del molino, en tres de las aspas Ayanz parece que utilizó trazo discontinuo, o puntos suspensivos, para representar las uniones. Mientras que en otras tres aspas hizo uso de un trazo continuo. Desconocemos si hizo el dibujo así conscientemente o inconscientemente, o si simplemente, la tinta de la pluma le jugó una mala pasada. El caso es que se podría interpretar que el trazo discontinuo en las uniones, representa efectivamente huecos de aire que Ayanz quiso dejar para que pasara el aire entre aspas, tras haber comprobado él que podría acarrear algún beneficio aerodinámico. Entendemos, que al lector esta posibilidad le puede parecer algo remota, más si cabe que en la otra imagen del molino en la que aparece erguido, los hipotéticos huecos no se aprecian por ningún lado y en el texto de la patente, no se menciona este hecho. De todos modos, por si acaso fuera cierta, los autores han preferido recoger aquí por escrito esta curiosa casualidad.

¿Puntos que representan huecos
para que pase el aire?

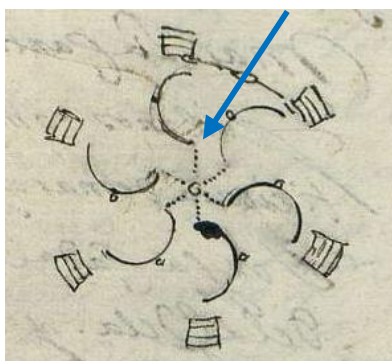


Figura. 13. Planta del molino aumentada donde se aprecia el trazo discontinuo en tres uniones de las aspas al eje. (Figura modificada de la original) Permisos: España. Ministerio de Cultura y Deporte. Archivo General de Simancas, CCA, CED, 174, 90v-92v.

Finalmente, otra gran diferencia entre ambos molinos bastante obvia, es el deflector en forma de puerta corredera automática que ingenió Jeronimo de Ayanz y que Savonius no lo contempló en su patente.

5.- DIFERENTES VARIANTES E INVESTIGACIONES ACTUALES DE MOLINOS DE EJE VERTICAL DE ARRASTRE

En los últimos años, se vienen realizando un gran número de estudios entorno a evaluar las prestaciones de diferentes configuraciones de molinos de viento. Más concretamente en el contexto de la “mini-eólica”, existen multitud de artículos publicados que realizan análisis de diferentes variantes de molinos de eje vertical de modo empuje o arrastre, pudiéndose llegar a contar por cientos incluso.

Así por ejemplo, en la publicación [6] se realiza una interesante recopilación de estudios entorno a este tema de investigación. De este modo, se realiza un análisis de las principales

configuraciones que los autores denominan variantes de la topología de rotor Savonius. En la Figura 14, se muestran las principales variantes estudiadas:

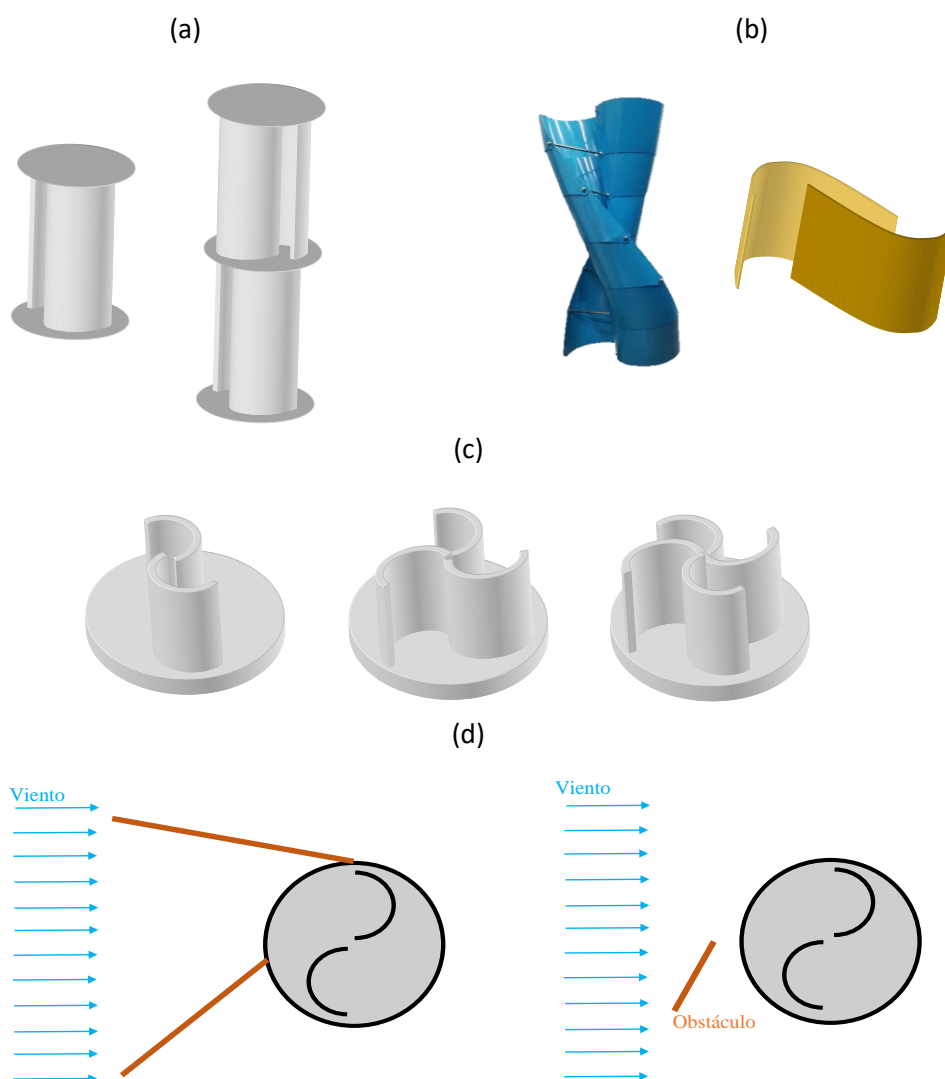


Figura. 14. Variantes actuales de molinos de eje vertical de arrastre. (a) apilamiento de distintas etapas Savonius, (b) distintas variantes de perfiles, (c) distinto número de aspas, (d) uso de deflectores y concentradores.

Tras analizar casi 200 publicaciones al respecto, se concluye lo siguiente en cuanto a cada una de estas variantes [6]:

-Relación de aspecto (H/D , según Figura 15): Se observa que ésta característica del molino no ha sido estudiada con suficiente detenimiento y que los resultados que se han obtenido no son del todo concluyentes. Por ello, se concluye que hace falta más análisis para determinar con certeza cuál podría ser un valor óptimo de relación de aspecto, concretando bajo qué criterios o circunstancias.

-Ratio de solapamiento y ratio de hueco (e/d y g/d , según Figura 15): Se concluye que en general ambos parámetros son beneficiosos para mejorar la eficiencia del molino. Aunque si dichos parámetros son muy altos o superan o valor umbral, su efecto comienza a ser perjudicial. Por

tanto, se conoce que existe un rango limitado en dichos parámetros en el cual, se beneficia a la eficiencia del molino. Fuera de dicho rango, se empeora el funcionamiento del mismo. Sin embargo, no existe un criterio simple o procedimentado para seleccionar dichos parámetros para un molino en general.

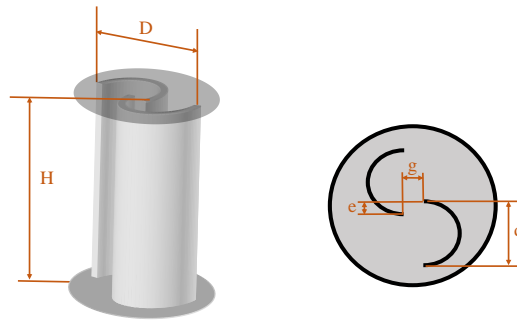


Figura. 15. Parámetros geométricos característicos del molino Savonius.

-Número de aspas: La mayoría de estudios se han encaminado a comparar número de aspas de 2 y 3, por lo que de nuevo, se dice que no se puede afirmar nada concluyente en torno a decir cual podría ser el número óptimo de aspas del molino. Sí que se afirma, que existen una serie de estudios que se han encaminado a analizar un número considerablemente alto de aspas y sí que se ha observado, que el número de aspas elevado sí que puede dar buenas características de arranque en el molino. Sin embargo, el alto número de aspas tiende a generar turbulencias entre aspas, que propician una bajada de rendimiento en el molino frente a un bajo número de aspas. De todos modos, de nuevo, se vuelve a afirmar que no hay resultados concluyentes y por lo tanto, es necesario realizar más estudios para poder afirmar convincentemente respecto al número de aspas óptimo.

-Orientación y forma de las aspas: En este sentido sí se han realizado muchos estudios y se puede afirmar que son bastante concluyentes. Por ejemplo, una conclusión destacada es que dotar de giro a las aspas ('twisted blades'), sí que es beneficioso para reducir oscilaciones de par en el molino, así como para mejorar las características de arranque del mismo. Por tanto, las investigaciones realizadas sí que parecen indicar que modificaciones en orientación y forma de las aspas, pueden acarrear beneficios a las prestaciones del molino.

-Apilado múltiple de molinos: De nuevo, se observa que es necesario realizar más estudios para poder obtener conclusiones convincentes. De todos modos, de entre los estudios realizados, parece ser que el apilamiento de dos molinos con un desfase de 90° entre los mismos ha proporcionado los mejores resultados.

-Utilización de deflectores y conductores: Este aspecto sí que se ha observado que suprime aspectos negativos en el comportamiento del par y por tanto, mejora sustancialmente el comportamiento general del molino en términos de eficiencia, habiéndose llegado en algunos casos a obtener eficiencias mayores al 50% incluso. De todos modos, también se afirma que los métodos de deflexión empleados, complican bastante la construcción y operación del molino, comprometiendo en cierto modo su practicidad real. Por ello, el encontrar un método de deflexión adecuado, sí que se observa como un reto de futuro a investigar.

Una vez vistas las tendencias de investigación para mejorar lo que la literatura técnica actual denomina variantes de rotor Savonius, en comparación con el molino de eje vertical patentado por Jerónimo de Ayanz, podría afirmarse lo siguiente:

-Relación de aspecto (H/D): Tal como Ayanz escribió la patente, sí que se puede afirmar que era consciente de que a mayor relación de aspecto, favorecería el incrementar la fuerza o potencia generada por el molino; *“Hágase un huso de 30 palmos o más, porque, cuanto más alto fuere, participará de más aire, y en él se pongan 6 álabes, que tenga cada uno diez pies desde el huso al extremo de la vela y de altura veinte pies; y si tuviese más cantidad de ancho y alto, tendrá más fuerza. El primer tercio, que son tres pies y un tercio que está junto al eje, no ha de tener vela y los otros dos sí, porque cualquier fuerza en el extremo es mayor”*. Sin embargo, no se refleja en el texto de la patente que analizara aspectos relacionados con la eficiencia del molino que es lo que la investigación actual principalmente se encamina a estudiar. Esto es normal, dado que la física y fluido-dinámica que describe aspectos físicos del molino, incluyendo a la eficiencia, no se habían desarrollado todavía en el 1606. Los avances descritos por Bernoulli por ejemplo, vendrían siglo y medio después aproximadamente. De todos modos, Ayanz una cierta noción de eficiencia se intuye que debió de tener, puesto que en uno de sus inventos desarrolló un medidor de par que podría estar encaminado entre otros objetivos, a medir la eficiencia o un concepto similar que él vislumbraba.

-Ratio de solapamiento y ratio de hueco (e/d y g/d): Tal y como apuntábamos antes, la hipótesis principal es que Ayanz no incluyó hueco para que pasara el aire entre las aspas. No dejar hueco alguno implica que se le pone un tope al aire que entra al espacio entre dos aspas y por tanto, impacta en cierta manera en las mismas. Esos impactos continuados en el tiempo que se dan mientras el molino gira, pueden ser causantes de vibraciones y cargas de fatiga, por un lado, y ruido acústico, por otro. Por tanto, en principio, no incluir orificio que permita paso de aire entre aspas, sería perjudicial para el molino. De todos modos, tal y como se apuntaba antes, dependiendo de cómo se interprete el dibujo de Ayanz el trazo discontinuo de unión entre aspas, también existe la posibilidad de que Ayanz tuviera en cuenta este hecho y contemplara el incorporar una serie de orificios entre aspas, que permitieran el paso del aire entre las mismas.

-Número de aspas: Ayanz en el texto de la patente no especifica porqué se decantó por un número de 6 aspas. Entendemos que debió realizar ensayos con diferentes prototipos, comparando diferentes número de aspas y se decantaría por el número de 6 tras sus ensayos y siempre teniendo muy presente que quería incorporar el deflector (puerta corredera que gira circularmente) para mejorar la fuerza que hacía el molino. Sin embargo, esto es algo sobre lo cual no tenemos información directa, por lo que solo se puede tomar como una hipótesis posible. No obstante, tal y como se apuntaba en la sección 3 de este documento, a nuestro entender, es altamente probable que un número de 6 aspas, que es un alto número de aspas haciendo uso de la terminología actual, sea una opción más adecuada que un número bajo de aspas. Siempre y cuando, al molino se le incorpore un deflector en forma de puerta corredera circular, tal y como lo propuso Ayanz y que tiene la ventaja de que la puerta se ubica de manera automática en el lugar adecuado, en función de por dónde venga el viento al molino. Sin embargo, esto debería analizarse mediante investigaciones exhaustivas y a poder ser, que contemplen la validación experimental.

-Orientación y forma de las aspas: En este aspecto, no tenemos evidencia alguna de que Ayanz realizase ninguna investigación en este molino de eje vertical. Sin embargo, es evidente que

otras formas de aspa, como el aspa helicoidal la estudió y de hecho la patentó, tal y como se constata en su otro molino de viento patentado.

-Apilado múltiple de molinos: No se dispone evidencia de que Ayanz analizase este aspecto.

-Utilización de deflectores y conductores: En este aspecto, sí se puede afirmar que la inventiva de Ayanz fue muy significativa. Tal y como se observa en las investigaciones actuales, este aspecto es el que mayor margen de mejora puede proporcionar a un molino desde el punto de vista de su eficiencia o fuerza que ejerce para un viento dado. El hecho de que lo incorporara a su molino y además, con un mecanismo automático que se ajustara a la dirección del viento, es una inventiva ciertamente meritoria o incluso sorprendente se podría afirmar. Tal y como se ha comentado anteriormente, a día de hoy en una temática de investigación muy en boga, el encontrar un cerramiento simple y que a su vez sea efectivo. A día de hoy, no conocemos ningún fabricante de molinos que proponga un cerramiento similar. Si se demostrase que el cerramiento propuesto por Ayanz efectivamente funciona e incrementa la eficiencia del molino y a su vez, es razonablemente fácil de llevar a cabo, sería posiblemente una configuración de molino la propuesta por Ayanz que se comenzaría a vender e instalar con mucho éxito.

En definitiva, con lo que se sabe hoy en día, se puede concluir diciendo que Jerónimo de Ayanz entendió y vio claramente un aspecto clave para la mejora del rendimiento de los molinos, como es el del conductor o deflector para mejora del flujo de viento incidente en el molino. Queda por demostrar si puede tener efectividad y encaje hoy en día. A su vez, la configuración de molino que propuso, a día de hoy incluso, no podemos afirmar con rotundidad sin realizar ningún estudio experimental cuantitativo, que sea mejor o peor que alguna variante propuesta ya actualmente (número de aspas, apilado múltiple u otras).

Tampoco se puede afirmar con rotundidad, que el conjunto de molino y puerta corredera propuesto por Ayanz, sea “mejor” o “peor” que cualquiera de los molinos comerciales que por ejemplo ya se emplean actualmente para generar energía eléctrica. Queda por demostrar este hecho también.

6.- POSIBLES UTILIDADES DEL MOLINO DE AYANZ DE EJE VERTICAL A DÍA DE HOY

Los molinos de viento hoy en día, mayoritariamente se utilizan para generar energía eléctrica. Quizás en algunos lugares del mundo, molinos de viento de pequeñas dimensiones se utilizan también para mover agua de un lugar a otro, pero se puede afirmar que el uso predominante de los molinos actualmente se centra en generar energía eléctrica.

La tipología de molino de viento mayormente utilizada es el molino de tres palas o tri-pala. Con molinos tri-palas de diferentes dimensiones y características eléctricas, se genera electricidad para su consumo regular en diferentes países sobre todo en el primer mundo. La terminología actual también emplea los vocablos “aeroturbina eólica” o “molino eólico” para denominar a los molinos de viento cuando se emplean para generar electricidad. En la Figura 16 se muestra un parque eólico, que consiste en la agrupación de un gran número de molinos de viento, todos ellos dedicados para la generación de electricidad. La potencia total instalada en molinos de viento tri-pala en todo el mundo a fecha de 2020 es de más de 700GigaWattios de potencia [11].



Figura. 16. Parque eólico de Elgea, ubicado en la provincia de Alaba y que está formado por molinos de viento tri-pala (uno de los primeros parques eólicos instalados en España).

A su vez, también existe otra tipología de molinos de viento de menores dimensiones que las anteriores y que comúnmente se les engloba dentro del término de la “mini-eólica”. Son como su nombre indica, molinos de viento de menores dimensiones y por tanto de menor potencia que los grandes molinos de viento tri-pala que, en la actualidad, ya incluso comienzan a superar los 10MegaWattios de potencia cada uno. En general, para enmarcar un molino de viento dentro del rango de la mini-eólica, dicho molino debe tener una potencia máxima de generación de 100kiloWattios.

Los molinos de viento dentro del rango de la mini-eólica, se emplean en general por consumidores particulares que buscan principalmente dos objetivos. Uno podría ser el autoabastecerse de electricidad reduciendo la factura de la luz. Otro podría ser el autoabastecerse de electricidad en lugares remotos, donde no se dispone de una conexión a la red eléctrica convencional. Según los datos que nos proporciona la WWEA (World Wind Association) a finales de 2015, existían prácticamente 1 millón de molinos de mini-eólica instalados por todo el mundo, con una potencia total instalada de 900MegaWattios [12].

Dependiendo del lugar donde se quiere ubicar el molino y más concretamente del viento que en ese lugar suele hacer, se escoge la tipología de molino que más se adecúa al lugar. Lugares donde la velocidad de viento media es baja todo el año y además sopla “racheado”, se tiende a instalar molinos de eje vertical dado que son más eficientes con esos vientos que los de eje horizontal, como por ejemplo el tri-pala, aunque existen excepciones. La potencia del molino a instalar puede ir desde menos de 1kiloWattio hasta las docenas de kiloWattios. La potencia eléctrica que es capaz de suministrar un molino, viene muy estrechamente ligada a las dimensiones del mismo.

Se puede afirmar que no existe consenso a la hora de determinar cuál es la mejor tipología de molino de viento dentro del rango de la mini-eólica. Existen una multitud de factores, que hacen que las ventajas y desventajas entre las diferentes tipologías existentes sean muy exiguas entre ellas. Prueba de ello, es que existen multitud de fabricantes que se decantan por comercializar diferentes tipologías de molinos. En la Figura 17 se ofrece una pequeña muestra de los posibles tipologías de molinos de viento que se pueden adquirir en el mercado.



Figura. 17. Diferentes tipologías de molinos de viento que se comercializan hoy en día. Fotos tomadas en el laboratorio de túnel de viento de Mondragon Unibertsitatea.

Pues bien, en este contexto de la mini-eólica, tal y como se puede apreciar a simple vista, los molinos de viento de Jerónimo de Ayanz y Beaumont podrían encajar perfectamente. Al igual que se hace con el resto de molinos de viento actualmente, los molinos patentados por Ayanz hace más de 4 siglos, servirían efectivamente para generar electricidad y probablemente, tal y como se ha mostrado anteriormente, de manera muy competitiva frente al resto de molinos actualmente utilizados. En la Figura 18 se proporciona un esquema, que muestra los diferentes elementos necesarios desde un punto de vista eléctrico, para un molino Ayanz de eje vertical. Al igual que se hace con los molinos actuales, sería necesario acoplar al eje de giro del molino un generador eléctrico que se encarga de la conversión de la energía de mecánica a eléctrica.

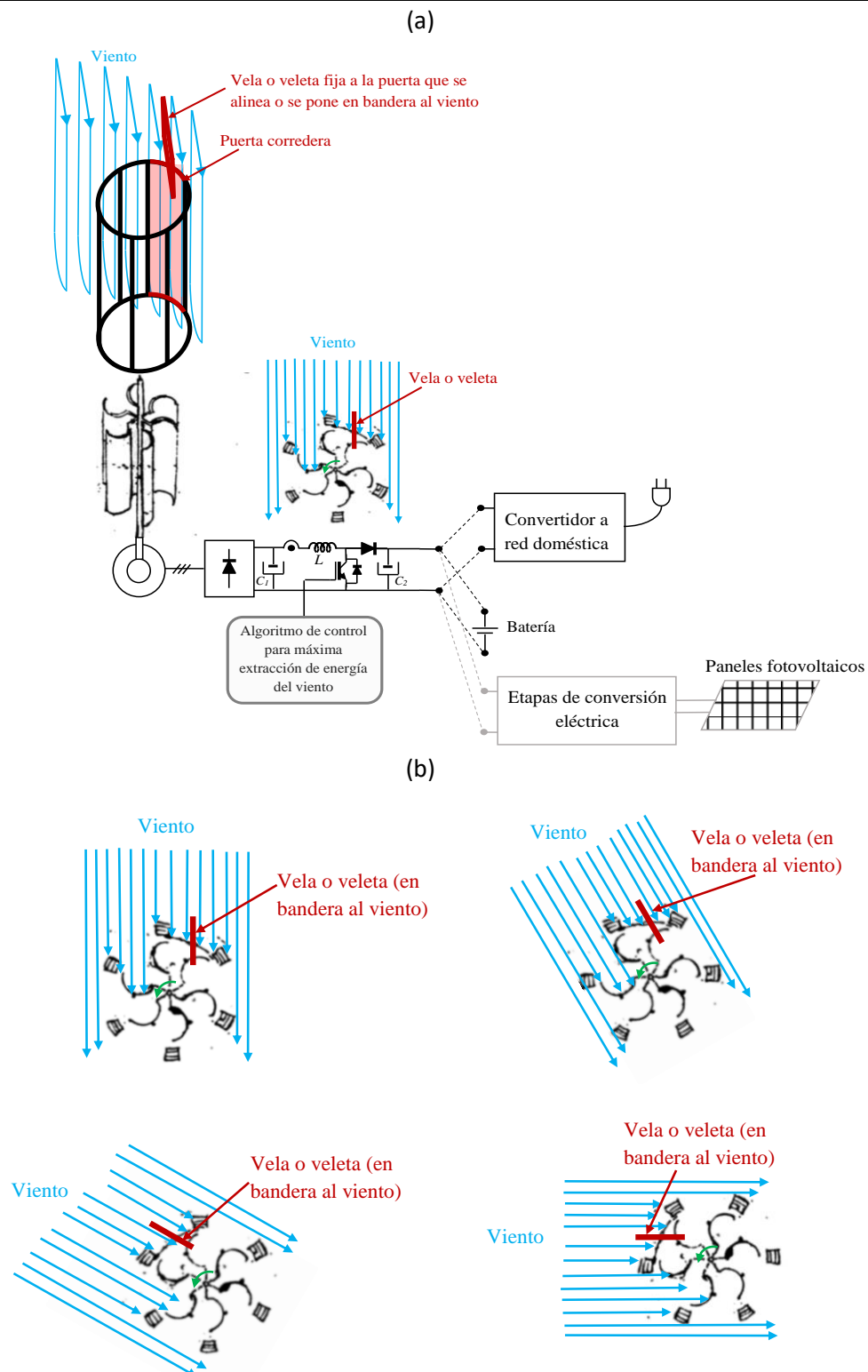


Figura. 18. Ilustración donde se muestra el molino Ayanz de eje vertical y un ejemplo de la electrónica necesaria para generar energía eléctrica en combinación con otras fuentes de energía. (b) Ejemplos de ubicación de puerta corredera y veleta para diferentes direcciones de viento (Nota: La ubicación y forma de la veleta dibujada trata de mostrar solo una idea orientativa de la misma, no tiene porqué ser la mejor de las soluciones ni tampoco tiene que coincidir con lo que Ayanz tenía en mente).

Después haría falta una electrónica que consta de un convertidor AC/DC controlado en varias etapas, que permitiría extraer la máxima energía del viento, así como adecuarla a una energía en modo DC para alimentar a unas baterías, o incluso mediante otra etapa de conversión adicional, verter la energía a la red eléctrica o a cargas domésticas. Si se considera oportuno, es muy común hoy en día combinar la energía generada por el molino con la energía generada por unos paneles fotovoltaicos.

De esta manera, está por demostrar si los molinos de viento Ayanz exhibirían ventajas frente al resto de molinos existentes, que hagan decantarse a los fabricantes por comercializar este tipo de molinos al menos en ciertos contextos. Como se ha mostrado anteriormente, el molino de eje vertical Ayanz, parece ser un muy buen candidato a imponerse en ubicaciones donde el viento medio no es muy alto y además es bastante racheado. Un punto a favor que tiene es su naturaleza de eje vertical, que hace que no necesite orientarse a la dirección por donde viene el viento. Además, sus 6 aspas, dotan al molino de una estabilidad inercial considerable para obtener un buen comportamiento ante vientos racheados o poco constantes, tal y como se comentaba antes. Con los medios que se tienen hoy en día, su complejidad constructiva sería prácticamente nula y su robustez mecánica a medio y largo plazo parecería notable. Finalmente, si se consigue construir un deflector efectivo y robusto, dotarían un valor añadido al molino en términos de eficiencia frente al resto de opciones, francamente significativo. Nótese que dicho ingenio de deflector, podría ser aplicado también en otros muchos molinos de viento de eje vertical, como es el Savonius y algunos de sus “derivados”. En los siguientes meses, en los laboratorios de Mondragon Unibertsitatea se espera probar un prototipo, que proporcione evidencias empíricas de sus ventajas y desventajas en comparación a otras tipologías de molino.

CONCLUSIONES

Tras haber llevado a cabo el análisis conceptual de los molinos de viento patentados por Ayanz a principios del siglo XVII, es posible extraer las siguientes conclusiones.

En primer lugar, en cuanto al molino de eje vertical ideado, se puede afirmar que las inventivas principales radican en dos aspectos. En el hecho de utilizar aspas de forma cilíndrica por un lado y en el idear un deflector que se direcciona automáticamente con el viento por el otro. Por medio de estas dos inventivas, la capacidad de absorber energía del viento se ve incrementada significativamente con respecto a los molinos de viento que se conocían hasta la época.

En segundo lugar, en cuanto al molino de aspas en tornillo ideado, se destacarían tres inventivas principales. Serían la propuesta de aspas con forma de tornillo o helicoidales, el cerramiento que encauza el viento a través de las aspas y el hecho de disponer varias etapas de aspas en serie. Esta estructura de molino, es muy similar a la estructura de lo que a día de hoy se denomina turbina axial. Por ello, se puede afirmar que el molino propuesto por Ayanz, puede considerarse como un primigenio de las turbinas axiales utilizadas en multitud de aplicaciones hoy en día.

Cabe destacar, que dado que no se dispone de evidencia documental que atestigüe que estas tipologías de molinos se conocían antes, los autores de este artículo han supuesto en todo momento que los molinos propuestos por Ayanz los ideó él mismo.

Por otro lado, desde un punto de vista más general, en los molinos de viento patentados por Ayanz se muestra una vez más que multitud de invenciones e innovaciones realizadas a lo largo de la historia, se realizan de una manera más bien intuitiva, manual y empírica y sin hacer uso

de lo que a menudo se denomina “conocimientos científicos”. Es decir, Ayanz ideó sus molinos de viento, sin conocer las leyes de la física y fluido dinámica que se desarrollaron muchísimos años más tarde y que explican y describen comportamientos de sus invenciones de una manera más formal podría decirse. Ejemplos de leyes y principios de la física formulados mediante ecuaciones matemáticas, que se emplean hoy en día para estudiar los molinos de viento y que son posteriores a las invenciones de Ayanz podrían ser; toda la metodología de análisis aerodinámico que describe el funcionamiento de las turbinas desarrollados por Betz y otros autores posteriores durante el siglo XX, o los fundamentos previos de la hidrodinámica postulados por Helmholtz, Reynolds y Rayleigh del siglo XIX, o principios previos más básicos y generales como el de Bernoulli o el efecto Venturi ambos del siglo XVIII, o incluso el principio de inercia enunciado por Newton a mediados del siglo XVII y que actúa de manera tan ventajosa por ejemplo en el molino Ayanz de eje vertical. En definitiva, a juicio de los autores, las invenciones en los molinos de viento de Ayanz son un ejemplo más de una tónica muy común a lo largo de la historia; muchas invenciones tecnológicas primeramente se realizan de una manera predominantemente más intuitiva, manual o empírica, mientras que posteriormente, por medio de conocimientos científicos como pueden ser las matemáticas, la física, o la química, se describen o se explican dichas invenciones tecnológicas [4].

Finalmente, desde el punto de vista de la utilidad actual que se pueden dar a los molinos Ayanz, los autores destacarían que el molino de eje vertical propuesto, se presta mucho a ser utilizado para generar energía eléctrica. Principalmente en el rango de potencias entorno a los pocos kilowatios o menores y en contextos de generar energía eléctrica para autoconsumo doméstico o en lugares remotos donde no existe conexión con la red eléctrica. De hecho, tal y como se ha mostrado en este documento, morfologías muy similares al molino propuesto por Ayanz se estudian de manera muy activa a día de hoy para tal fin, e incluso se comercializan. De hecho, a juicio de los autores, todavía es un problema abierto y no se conoce con total seguridad, qué tipología de molino de viento puede ser la que más adecua en una ubicación concreta que tiene unas condiciones de viento concretas. A juicio de los autores, está por demostrar si el molino Ayanz de eje vertical, puede ser una opción ventajosa frente al resto de molinos, por ejemplo en ubicaciones donde las velocidades de viento son bajas y además poco constantes o bastante racheadas. Por tanto, desde este punto de vista, se puede afirmar que el molino de eje vertical propuesto por Ayanz hace más de cuatro siglos, sigue muy vigente hoy en día. Y además se podría decir, que es de rabiosa actualidad para los ingenieros que buscan mejorar molinos de viento.

REFERENCIAS

- [1] García Tapia, Nicolás. *Patentes de invención españolas en el siglo de oro*. Editado por la oficina española de patentes y marcas, España, 1990.
- [2] García Tapia, Nicolás. *Privilegios de invención*, en *El Renacimiento* / coord. Por Manuel Silva Suárez , 2004, ISBN 84-7820-742-2, págs. 545-576.
- [3] Rojas-Sola, JI; Amezcua-Ogáyar, JM. Origen y expansión de los molinos de viento en España. *INCI* v.30 n.6 Caracas jun. 2005. ISSN 0378-1844.
- [4] Abad, G; Milikua A; Baraia, I. Electric Technology in Wind Turbines from a Dialectic Perspective, en *Techné: Research in Philosophy and Technology*. 2019. 174-203. 23:2. [doi: 10.5840/techne2019823101](https://doi.org/10.5840/techne2019823101).

-
- [5] Chang, T.-L.; Tsai, S.-F.; Chen, C.-L. Optimal Design of Novel Blade Profile for Savonius Wind Turbines. *Energies* 2021, 14, 3484. <https://doi.org/10.3390/en14123484>.
- [6] Maldar, N; Ng, C; Oguz, E. A review of the optimization studies for Savonius turbine considering hydrokinetic applications, *Elsevier Energy Conversion and Management*. Vol. 226, 15. Dec 2020.
- [7] Emmanuel B, Jun W. Numerical study of a six-bladed Savonius wind turbine. *J Sol Energy Eng* 2011; 133: 1–5. <https://doi.org/10.1115/1.4004549>.
- [8] Altan, BD; Atilgan, M. The use of a curtain design to increase the performance level of a Savonius wind rotors. *Renew Energy* 2010; 35:821–9. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.025>.
- [9] Garcia, O.; Ulazia, A.; del Rio, M.; Carreno-Madinabeitia, S.; Gonzalez-Arceo, A. An Energy Potential Estimation Methodology and Novel Prototype Design for Building-Integrated Wind Turbines. *Energies* 2019, 12, 2027. <https://doi.org/10.3390/en12102027>.
- [10] US Patent: US1697574. S. J. Savonius, Rotor adapted to be driven by wind or flowing water. Aug. 1925.
- [11] Artículo de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_e%C3%B3lica.
- [12] WWEA. *WWEA Released Latest Global Small Wind Statistics*; WWEA: Bonn, Germany, 2018.: <http://small-wind.org/wwea-released-latest-global-small-wind-statistics/>.