

IT-29-2015

DESARROLLO DE UN SISTEMA EOLICO DE 4 KW PARA BOMBEO UTILIZANDO GENERADORES DE IMANES PERMANENTES Y GRUPO SECUENCIAL DE ELECTROBOMBAS

Ing. Franco Canziani Amico
Waira Energía SAC
Lima, Lima, Perú
franco@waira.com.pe

Ing. Oscar Melgarejo Ponte
Pontificia Universidad Católica
del Perú
Lima, Lima, Perú
omelgar@pucp.edu.pe

Dr. Rosendo Franco Rodríguez
Pontificia Universidad Católica
del Perú
Lima, Lima, Perú
rofranco@pucp.pe

RESUMEN

Waira Energía SAC, en colaboración con la empresa Función Ferrosa SRL, la PUCP y el apoyo de los fondos FIDECOM del FINCYT, ha desarrollado un sistema de electrobombeo directo eólico de 4 kW con el objetivo de reducir los costos de bombeo de agua en zonas remotas donde hay tierras eriazas aun por habilitar para uso agrícola. Para ello se ha diseñado y fabricado una nueva turbina eólica de 5 m de diámetro y 4 kW de potencia nominal a 10.5 m/s de velocidad de viento, provista de un generador eléctrico de imanes permanentes que es capaz de activar electrobombas trifásicas comerciales mediante un control especialmente desarrollado con un PLC que activa cada una de las 3 bombas de 1.1 kW de manera secuencial de acuerdo a la intensidad del viento. El sistema se ha instalado y probado en la localidad de Montegrande, distrito de Changuillo de la provincia de Nasca, Ica, demostrando su buen rendimiento y operatividad para bombear agua y también proveer de energía eléctrica a las viviendas.

Palabras clave: Energía Eólica, Bombeo de Agua, Irrigación de tierras eriazas, Energía Renovable, Sostenibilidad, Ampliación de frontera agrícola. Generador de imanes permanentes, Electrificación Rural. Aerogenerador.

I. INTRODUCCIÓN

En el año 2002 la PUCP junto Waira accedió a un fondo del CONCYTEC para el desarrollo de un generador de imanes permanentes de 1 kW de potencia para utilizarlo en un aerogenerador de la misma capacidad que se diseñó de manera específica para ello. El proyecto concluyó satisfactoriamente en el 2003 probándose el equipo y obteniendo las curvas de potencia en la estación de pruebas que se montó en la bahía de Paracas. Gracias a este proyecto se dio un paso muy importante en el desarrollo local de pequeñas turbinas eólicas: hasta entonces veníamos utilizando generadores automotrices comerciales (alternadores) que requieren de una transmisión multiplicadora y son muy ineficientes para la operación a bajas velocidades. Con los generadores de imanes permanentes se tiene una mucho mayor eficiencia, simplicidad en el diseño y confiabilidad. En esa ocasión se utilizó una configuración de generador radial con una armadura de poliuretano que, al no ser un material magnético, resultaba en una densidad de flujo reducida. En el año 2010 se mejoró el diseño incorporando una armadura laminada de acero silicio, lográndose mejoras en la densidad de flujo magnético de aproximadamente 300%.

Ya desde el primer generador de imanes permanentes que desarrollamos con tecnología propia, nos dimos cuenta de las posibilidades que se abrían ante nosotros. Al tener la capacidad de diseñar nuestros propios generadores podíamos ajustar los niveles de voltaje y frecuencia para diferentes usos: entre ellos la de operar motores eléctricos trifásicos comerciales de manera directa, sin la intermediación de reguladores, baterías o inversores. En el año 2011 accedimos a un fondo FIDECOM del FINCYT que nos permitió tener la oportunidad de

materializar esta idea, mediante un proyecto PIPEI de 18 meses de duración, ahora concluido satisfactoriamente. Para este efecto la colaboración entre las empresas y la Universidad ha sido fundamental y muy productiva, Ferrosa aportó sus amplios conocimientos en el desarrollo de piezas fundidas especiales, Waira sus conocimientos de rotores aerodinámicos y generadores de imanes permanentes y la PUCP su conocimientos y capacidades en las áreas de electricidad, electrónica y análisis computacionales de elementos finitos.

II. HIPÓTESIS:

El proyecto se presentó con las siguientes hipótesis:

- Es posible desarrollar una turbina eólica con generador de imanes permanentes que active de forma directa electrobombas comerciales, conduciendo la energía a distancia y aprovechando las mejores ubicaciones para captar el viento y el bombeo de agua.
- Es posible compatibilizar el funcionamiento de la turbina eólica con un grupo de electrobombas conectadas en secuencia de acuerdo a la potencia disponible.
- Es posible lograr una reducción substancial de los costos de bombeo de agua en ubicaciones con condiciones favorables

III. CONCEPTO:

Para poder probar estas hipótesis se diseñó de manera específica un sistema eólico de 4 kW para que genere energía eléctrica trifásica cercana a los 220Vac y 60 Hz con vientos de 6 a 12 m/s por medio de una turbina axial de 3 palas con 5 m de diámetro, un generador de imanes permanentes de 24 polos, un chasis y sistema de orientación, una torre pivotante de 13 m de altura, control electrónico programable y un banco de electrobombas.

A. Turbina eólica

Se ha prestado especial atención y cuidado al diseño de los álabes aerodinámicos que conforman el rotor de la turbina eólica ya que de su buen desempeño y durabilidad depende la viabilidad de todo el sistema. Habiéndose analizado diferentes posibilidades se seleccionó una configuración axial de tres palas conformando un rotor de 5m de diámetro un coeficiente de velocidad ($V_{\text{punta}} / V_{\text{viento}}$) de 7 con perfiles aerodinámicos de la familia NACA 4412-4418. Los ángulos de posición cuerdas y perfiles para cada sección radial fueron establecidos siguiendo algoritmos ya utilizados con anterioridad.

El siguiente reto fue diseñar el procedimiento para fabricar los álabes o palas aerodinámicas. Para ello se utilizó fibra de vidrio multi-axial, con orientaciones establecidas de acuerdo a los principales ejes de las cargas mecánicas, y resina epóxica. Para evitar posibles problemas en las juntas o líneas de pegado se desarrolló un novedoso sistema de laminado en secuencia, el resultado del cual es una construcción mono-casco que no

presenta juntas siendo un laminado envolvente. El procedimiento también asegura que el borde de salida es suficientemente fino, cosa que es muy importante para el rendimiento aerodinámico.

Para verificar de primera mano las características mecánicas del material compuesto fibra de vidrio multi-axial y resina epóxica se diseñó y fabricó un instrumento para ensayos de flexión de 3 puntos. Con la ayuda de este equipo se hicieron pruebas a una considerable cantidad de probetas para determinar el esfuerzo admisible del material y su módulo de elasticidad.

B. Generador de imanes permanentes

El generador de imanes permanentes se calculó y diseñó de manera precisa para que tuviera un adecuado acoplamiento y compatibilidad con el rotor aerodinámico así como que los niveles de voltaje y frecuencia generados fueran los apropiados para alimentar electrobombas trifásicas comerciales. Es decir que en condiciones nominales de funcionamiento el generador produzca aproximadamente 220Vac y 60 Hz. Con el objeto de trabajar con una geometría de mayor precisión, posibilidad de escalamiento y disipación de calor se escogió una configuración radial. Se diseñó un rotor de acero fundido para soportar las 3 palas en su cara frontal y en el interior los 24 imanes permanentes cerámicos de Neodimio-Hierro-Boro. El estator está compuesto por una armadura de láminas troqueladas de acero silicio de 0.5 mm de espesor con 72 ranuras que aloja las 12 bobinas en serie de cada fase.



Figura 1: BANCO DE PRUEBAS PARA GENERADORES

Una vez construido el generador se montó sobre un banco de pruebas que fue diseñado para este propósito. Este equipo está provisto de un motor de inducción de 7.5 kW alimentado a través de un variador de frecuencia para poder ajustar la velocidad de giro a diferentes regímenes: desde 0 hasta 500 RPM, el soporte del generador está articulado para permitir la

medición del torque de reacción por medio de un brazo determinado y una balanza. Las pruebas que se realizaron incluyeron las mediciones de RPM, voltaje, amperaje, frecuencia, factor de potencia y forma de onda en vacío y con diferentes cargas: puramente resistivas y con motores de inducción. Con las mediciones de los parámetros eléctricos, el torque y la velocidad de giro se pudo determinar la eficiencia del generador: entre 95% para cargas pequeñas y 85% para plena carga (4 kW).

Otra serie de verificaciones muy importantes que se realizaron fueron el funcionamiento del generador y el grupo de bombas por muchas horas para determinar la temperatura de estabilización de las máquinas eléctricas. Las electrobombas se hicieron trabajar en circuito cerrado ofreciendo una resistencia hidráulica regulable para simular la altura de bombeo deseada que se midió con un manómetro en la tubería de descarga. Se comprobó que los bobinados del generador de imanes permanentes no superaba los 50°C luego de un tiempo suficiente de estabilización, asimismo las electrobombas no mostraron ninguna anomalía durante las pruebas.

La estabilidad térmica del generador es de fundamental importancia para asegurar su durabilidad en condiciones de campo. Para verificar esto se instaló una termocupla en la armadura y un pirómetro en la base de la torre para monitorear la temperatura en condiciones reales de funcionamiento. Las mediciones que se realizaron con el sistema funcionando varias horas a plena carga mostraron que la temperatura se estabiliza por debajo de los 50°, en esto ayuda el flujo de aire que se introduce por la tapa posterior del generador con el propio giro.



Figura 2: VISTA POSTERIOR DEL GENERADOR DE IMANES PERMANENTES

C. Chasis y sistema de orientación

El chasis tiene la función de soportar y conectar los componentes estructurales del conjunto turbina, generador, cola orientadora y torre. Se diseñó una configuración en forma de caja construida con planchas de acero que conecta en sus caras a la torre, el eje principal del generador y el soporte articulado de la cola orientadora. Es importante señalar que el diseño del chasis y la cola orientadora incorporan el mecanismo de

protección de la turbina por medio de la desviación progresiva del rotor de la dirección del viento, lo que se conoce como mecanismo de tornamesa excéntrica y cola articulada. La tornamesa del chasis sobre la cual gira todo el conjunto sobre el tope de la torre está desalineada 75 mm respecto del eje del generador y rotor, la cola orientadora está acoplada al chasis por medio de una bisagra con un ángulo determinado de modo que cuando el viento empieza a ser excesivo la presión generada en el rotor hace que la cola orientadora de pliegue sobre el eje de la bisagra y el rotor se desvíe de la dirección del viento. De esta manera el rotor presenta menos área expuesta, reduce su velocidad y estabiliza la potencia generada. Dada la complejidad y la incertidumbre de los cálculos para determinar el ángulo preciso para la bisagra de la cola orientadora, que tenga el comportamiento deseado, se adaptó un mecanismo de bisagra con ángulo regulable desde 0 a 8° lo que permitió realizar ajustes para lograr el efecto deseado de desviación dado un viento superior a un valor determinado. Haciendo algunas aproximaciones sucesivas se logró que la turbina se desviara a partir de los 12 m/s de viento de modo que se protegiera adecuadamente el sistema. Cabe señalar que consideramos que con un rotor de 5 m de diámetro se está cerca del límite de diseño de una turbina con tornamesa accionada por una cola orientadora, rotores de mayor diámetro estarían sujetos a momentos giroscópicos excesivos y hasta destructivos en caso de giros bruscos por cambios en la dirección del viento.

D. Torre pivotante

Con el diseño de la torre se busca que la turbina esté expuesta a un mejor viento a cierta altura, un viento más intenso y menos turbulento que el que fluye cerca de la superficie; tiene que ser económica, fácil de transportar, montar y permitir el acceso al cabezal para los trabajos de instalación y mantenimiento. Al mismo tiempo el diseño debe utilizar materiales que resistan la corrosión y la abrasión del viento que puede arrastra partículas.

Basándonos en experiencia anteriores se ha trabajado con un poste tubular pivotante compuesto por 4 segmentos de 3.2 m de largo unidos por bridas y estabilizado por 8 cables o “vientos” de acero inoxidable: 4 altos y 4 bajos. No utilizamos templadores para ajustar los cables, preferimos tener una conexión directa entre los anclajes y la torre, sin la intermediación de los templadores roscados que no dan la adecuada seguridad. No vemos la necesidad de templar los cables en exceso, basta un templado firme manual, la torre misma se estabiliza con la fuerza del viento.

La característica pivotante de la torre es muy conveniente para el montaje y mantenimiento de la turbina, con la ayuda de un malacate lineal (Tirfor), un polipasto y un puntal de 5 m se logra colocar la torre en posición horizontal para instalar el cabezal y todos los componentes trabajando a nivel del piso, luego se eleva todo el conjunto hasta que queda en posición vertical y estabilizada lateralmente por los cables de acero inoxidable. La torre demostró ser fácil de transportar, montar y erguir sin la ayuda de grúas o equipos cuyo traslado y operación en lugares remotos sería muy costoso.



Figura 3: TORRE PIVOTANTE A NIVEL DEL PISO PARA ACOPLARSE AL CABEZAL



Figura 4: CONTROL DE BOMBAS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

E. Control y banco de electrobombas

El control que gestiona el funcionamiento del banco de 3 electrobombas se basa en una tarjeta transductora que mide el voltaje producido por el generador de imanes permanentes y establece rangos determinados para enviar señales a un PLC que de acuerdo a su programación activa los contactores que conectan las electrobombas al generador. En caso de vientos muy intensos que produzcan voltajes por encima de los 240V con las tres bombas activadas por un tiempo determinado se conecta el generador a una resistencia trifásica de 24 kW de capacidad para frenar la turbina de manera suave, quedando frenada hasta la intervención del operador. Esta resistencia también puede ser activada manualmente a discreción del operador.

Fue bastante intenso el trabajo para llegar a tener una programación adecuada del PLC con la flexibilidad necesaria para establecer independientemente los tiempos de entrada y salida de la primera, segunda y tercera bomba. Encontramos que la forma más adecuada de trabajar es conectar la primera bomba muy rápido, digamos luego de 1.5 segundos después que el voltaje generado supera los 230Vac, más pausadamente la segunda (3.5 s) y bastante más lenta la tercera (8 s). Inversamente cuando el viento disminuye y el voltaje decae por debajo de los 200Vac se desconecta muy rápidamente la tercera bomba, menos rápido la segunda y muy lentamente la primera. De esta manera el sistema funciona de manera estable, manteniendo a la turbina con una carga creciente o decreciente en la medida que hay mayor o menos velocidad del viento.

Con la idea de aprovechar la capacidad de la turbina cuando el viento está en el rango de 4.5 a 6 m/s, en el que no se llegan a activar las bombas, se diseñó e instaló un cargador de baterías de 500W que se utiliza para la electrificación de las viviendas de los agricultores.

IV. ANÁLISIS AERODINAMICO Y ESTRUCTURAL POR MÉTODOS NUMERICOS COMPUTACIONALES:

El cálculo y diseño original de la turbina, chasis y torre se realizó utilizando métodos de aerodinámica, mecánica y resistencia de materiales convencionales. Sin embargo, de manera independiente, el grupo de investigación INACOM de la sección de Ingeniería Mecánica de PUCP efectuó un estudio completo del diseño aerodinámico y estructural del rotor de la turbina y de la estructura integral del sistema. En primera instancia por métodos analíticos y luego mediante los programas computacionales de métodos numéricos y elementos finitos de los que disponen.

Este trabajo ha sido de gran importancia ya que se contrastan, verifican y validan los cálculos originales por otros profesionales y por los avanzados software disponibles. La convergencia de los resultados en torno al diseño establecido nos dan la garantía de la estabilidad estructural de este sistema y nos permiten aspirar a realizar diseños de mayor envergadura.

V. CONCLUSIONES

El proyecto fue llevado a término exitosamente teniendo como resultado principal un nuevo sistema eólico completo para aplicaciones de bombeo de agua en zonas remotas. E irrigación de tierras eriazas.

- Se demostró que es posible fabricar una turbina eólica y un generador de imanes permanentes que producen energía eléctrica compatible con los requerimientos de las electrobombas comerciales, de manera que se pueden distanciar los componentes eólicos y mecánicos para aprovechar de manera óptima el recurso eólico e hídrico.
- El nuevo sistema eólico también ha sido utilizado para aplicaciones de electrificación rural, cargando baterías y operando inversores electrónicos.
- El diseño validado por el INACOM y los métodos computacionales aseguran el buen rendimiento y estabilidad estructural del sistema, tal como se ha podido comprobar en las pruebas de campo.

- Los costos de fabricación y operación del sistema lo hacen competitivo respecto a la alternativa de bombeo solar y muy ventajoso respecto a operaciones de bombeo que utilizan diesel o más aun gasolina.
- El presente proyecto ha tenido como entregables adicionales equipos que son de interés para futuros desarrollos como lo son el banco de pruebas para generadores de imanes permanentes y el instrumento para la determinación de la resistencia mecánica de los materiales compuestos.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a Innovate Perú que apoya y permite que estos proyectos de innovación tecnológica se materialicen, a Fundición Ferrosa Srl como promotor del proyecto, a la Pontificia Universidad Católica del Perú, en especial a la Oficina de Innovación por la constante colaboración y coordinación a lo largo de la ejecución del proyecto. Nuestro especial agradecimiento al Sr. Claudio Soldi por permitirnos y facilitarnos las pruebas de campo en su fundo de Montegrande.

REFERENCIAS

- [1] CAMPBELL, Peter. 1999 Permanent Magnet Materials and their Application. Segunda edición. Cambridge University Press. UK
- [2] HULL, Derek. 1981 An Introduction to Composite Materials. Segunda edición. Cambridge University Press. UK
- [3] FRERIS, LL. et al 1990 Wind Energy Conversion Systems. Prentice Hall International. UK
- [4] EGGLESTONE, David M- FORREST, Stoddart 1987 Wind Turbine Engineering Design Van Nostrand. New York
- [5] AVALONE, Eugene A. et al 1987 Standard Handbook for Mechanical Engineers Novena edición. McGraw-Hill New York
- [6] KARAS SIK, Igor et al. Pump Handbook tercera edición 2001 McGraw-Hill New York
- [7] SPERA, David A. 1994 Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering. Primera edición. New York: ASME
- [8] LYSEN E.H. 1983 Introduction to Wind Energy SWD- Wind Energy Developing Countries, Holanda



Franco Canziani Amico, nació en Lima en 1962, recibió el grado de Ingeniero Mecánico de la Pontificia Universidad Católica del Perú, ha realizado estudios de postgrado en Gestión de Empresas y Tecnología de Polímeros y Materiales Compuestos.

Trabaja en el desarrollo de sistemas de Energía Renovable desde 1989, actualmente dirige Waira Energía SAC, empresa dedicada a ofrecer soluciones energéticas para el campo y la ciudad utilizando recursos renovables. Está a cargo de un proyecto FINCYT en curso sobre Micro-redes eléctricas para usos productivos y un premio BID Ideas para el desarrollo de la energía sostenible en el Perú.

Recientemente ha incorporado el tema de Movilidad Eléctrica a su interés y campo de acción.



Oscar Antonio Melgarejo Ponte, nació en el departamento de Anchash, Perú en 1955. Recibió su grado de Ingeniero Electricista en la Universidad Nacional de Ingeniería, en el año 1985, adicionalmente realizó estudios de maestría en Bioingeniería concluidos el año 2004 en la Pontificia Universidad Católica del Perú..

Actualmente es profesor en la Pontificia Universidad Católica del Perú Es Jefe del laboratorio de sistemas eléctricos y supervisor del taller de desarrollos especiales de la sección electricidad y electrónica de la PUCP. También es director de la revista ElectroElectronica, publicación de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Sus áreas de interés y especialización son: Accionamientos eléctricos, electrónica de potencia, control de máquinas eléctricas, estudios y análisis de calidad y ahorro de energía. Diseño, estudio e implementación de SPT y dimensionado de Sistemas Renovables de Generación Eléctrica



Rosendo Franco Rodríguez nació en Santa Clara, Cuba, en 1966. Realizó estudios de Mecánica Aplicada en la Universidad Técnica Checa, Praga, República Checa, desde 1985 hasta 1990. Es graduado de Ingeniero Mecánico y Master en Ingeniería Mecánica por la Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba, en 1996. Es

Doctor en Ciencias Técnicas por la Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba, en 1998.

Actualmente es Profesor Principal en la Pontificia Universidad Católica del Perú, en la Sección de Ingeniería Mecánica. Coordinador del Grupo de Investigación Asistida por Computadora (INACOM). Desarrolla soluciones de ingeniería

para la industria, tales como: diseños mecánicos, cálculos, análisis y simulaciones numéricas computacionales, software específico.

Sus áreas de interés y especialización son: Mecánica Computacional, Simulación Numérica, Métodos Numéricos en Ingeniería (Elementos Finitos, Volúmenes Finitos), Diseño Mecánico, Cinemática y Dinámica de Mecanismos y Sistemas Mecánicos, Algoritmos y Programación para Ingeniería, Desarrollo de Software, Herramientas CAD-CAE.