



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE  
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

**“Diseño y selección de un sistema eólico-eléctrico para mejorar  
el proceso de bombeo de agua con fines de riego en el sector  
El Palomar-Razuri”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
Ingeniero Mecánico Electricista**

**AUTOR:**

Castillo Soles, Marcos Cebojín (ORCID: 0000-0001-6223-1646)

**ASESOR:**

MSc. Sifuentes Inostroza, Teófilo Martín (ORCID:0000-0001-8621-236X)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Generación, transmisión y distribución

TRUJILLO – PERÚ

2020

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo, a mis padres José y Lucila por ser mi principal motivación para realizar todos mis logros.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por ser el eterno guía de mi camino.

A mis padres ser el ejemplo de honestidad y sencillez.

A mi esposa e hijos, que son la motivación de mis días.

A mis maestros de la Escuela de Mecánica Eléctrica por los conocimientos  
brindados.

A mis asesores por la paciencia y los buenos consejos para hacer realidad el  
presente estudio.

A mis amigos con los que termine la carrera y en especial a mi dos grandes  
amigos, Mario y Román.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA.....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO .....	4
III. MÉTODO.....	56
3.1. Tipo y diseño de investigación:.....	56
3.2. Variables y Operacionalización:.....	56
3.1. Población, muestra y muestreo. ....	57
3.2. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	58
3.2.1. Técnicas de recolección de datos. ....	58
3.2.2. Validación y confiabilidad del instrumento.....	58
3.3. Métodos de análisis de datos. ....	59
3.4. Aspectos éticos.....	59
IV. RESULTADOS .....	60
4.1. Evaluar las condiciones actuales de bombeo y los requerimientos de riego en el sector El Palomar-Rázuri. ....	60
4.1.1. Requerimientos de bombeo de agua .....	62
4.2. Determinar mediante el análisis correspondiente, el dimensionamiento y factibilidad técnica del mejoramiento del sistema e identificar los activos que conforman la línea crítica.....	66
4.2.1. Fuente de abastecimiento de agua .....	66
4.2.2. Evaluación del recurso eólico.....	67
4.2.3. Identificación de los activos principales que conforman la línea mediante un estudio de criticidad. ....	69
4.3. Diseñar y seleccionar los componentes del sistema de bombeo y equipos complementarios. ....	70
4.3.1. Cálculo de carga de bombeo y producto volumen-carga (PVC) .....	70
4.3.2. Cálculo del diámetro de la tubería.....	71
4.3.3. Determinación de pérdidas por rozamiento en tubería.....	72

4.3.4. Dimensionamiento y factibilidad técnica del sistema.....	73
4.4. Comprobación del gasto entregado por el sistema de bombeo diseñado. .	81
4.4.1. Cálculo de la capacidad del tanque de almacenamiento. ....	81
4.5. ¿Por qué se ha escogido la dupla: Aerogenerador ENAIR E30PRO & BOMBA NASTEC 4HS? .....	83
4.6. Determinación de costos y beneficios económicos de la implementación del diseño del sistema eólico propuesto. ....	85
4.6.1. Características del equipo de bombeo tradicional:.....	85
4.6.2. Costos del equipo de bombeo tradicional: .....	86
4.6.3. Costos de sistema eólico-eléctrico diseñado: .....	87
4.6.4. Beneficio Útil: .....	88
4.6.5. Retorno operacional de la inversión: .....	88
V. DISCUSIONES.....	89
VI. CONCLUSIONES .....	92
VII. RECOMENDACIONES.....	94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
ANEXOS:.....	96

## RESUMEN

La presente investigación se realizó con la finalidad de diseñar y seleccionar un sistema de bombeo de agua aprovechando el recurso eólico de la zona y así mejorar el sistema de bombeo existente, satisfacer las necesidades de riego agrícola y mejorar la calidad de vida del agricultor aprovechando de mejor manera los recursos de agua y viento locales. En particular este trabajo abarca el tema de bombeo de agua para riego tecnificado existente (riego por goteo), aplicaciones auxiliares de agua para animales y el consumo domiciliario. Éste tipo de aplicaciones es de gran impacto en lugares con disponibilidad de agua, suelos fértiles y potencial eólico, en los cuales la única limitación para su explotación es el problema de la extracción del agua.

Para ello se ha considerado tomar como dato la energía de generación anual de un aerogenerador instalado en la parcela donde se pretende instalar el sistema propuesto. Con respecto al recurso hídrico disponible (pozo zanja) se tomará en cuenta la información proporcionada por el agricultor de la parcela. Posteriormente, conociendo todos los parámetros necesarios, se procederá a realizar los cálculos para obtener la demanda energética a cubrir del sistema.

El presente trabajo comprende el diseño y selección de un sistema de extracción de agua utilizando energía eólica, en base a equipos disponibles en el mercado que satisfaga las necesidades de pequeños agricultores del sector el Palomar. Con este tipo de implementación se apunta a terminar con la dependencia en los combustibles fósiles en la extracción de agua, teniendo efectos positivos locales para los beneficios directos del proyecto y medioambientales derivados de la disminución de emisiones contaminantes.

Finalmente se obtendrán los resultados del sistema propuesto que nos llevara elaborar las conclusiones y recomendaciones.

**Palabras clave:** Diseñar, seleccionar, bombeo, recurso hídrico, demanda energética.

## ABSTRACT

The present investigation was carried out with the purpose of designing and selecting a water pumping system taking advantage of the wind resource of the area and thus improving the existing pumping system, satisfying the needs of agricultural irrigation and improving the quality of life of the farmer taking advantage of better way local water and wind resources. In particular, this work covers the issue of pumping water for existing technified irrigation (drip irrigation), auxiliary applications of water for animals and household consumption. This type of applications is of great impact in places with water availability, fertile soils and wind potential, in which the only limitation for its exploitation is the problem of water extraction.

For this purpose, the annual generation energy of a wind turbine installed in the plot where the proposed system is intended to be installed has been considered. With respect to the available water resource (well ditch) the information provided by the farmer of the plot will be taken into account. Subsequently, knowing all the necessary parameters, the calculations will be carried out to obtain the energy demand to cover the system.

The present work includes the design and selection of a water extraction system using wind energy, based on equipment available in the market that meets the needs of small farmers in the Palomar sector. This type of implementation aims to end the dependence on fossil fuels in the extraction of water, having positive local effects for the direct benefits of the project and environmental benefits derived from the decrease in polluting emissions.

Finally, the results of the proposed system that will lead us to draw up the conclusions and recommendations will be obtained.

**Keywords:** Design, select, pump, water resource, energy demand.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años, varios países europeos y los Estados Unidos, han concentrado su atención en el viento considerándolo una fuente alternativa de energía de gran potencialidad para un futuro próximo. Este recurso, que fue olvidado a partir del uso predominante de los combustibles fósiles, siempre fue de sustancial importancia para el desarrollo de la humanidad desde tiempos pretéritos, ya sea en la molturación de granos, el bombeo de agua o impulsando las embarcaciones que surcaban los mares promoviendo el intercambio de bienes y el desarrollo económico de los pueblos (Herrera, Foresi, Gómez, & Sequi, 2005, p. 63).

El Perú posee un potencial eólico muy fuerte debido a los numerosos sitios donde se podrían realizar estos tipos de sistemas de energía eléctrica limpia, uno de ellos es el sector el Palomar distrito de Rázuri en la provincia de Ascope.

En las zonas rurales poco o casi nada se hace por mejorar la economía de los habitantes y en especial para los agricultores de esta zona de la costa ya que no cuentan con energía eléctrica para sus diversas actividades.

El uso de combustibles fósiles y los costos de mantenimiento del sistema de bombeo de agua que cubra sus necesidades de riego, les resulta antieconómico y poco sostenible; por lo tanto, esto conlleva a que los agricultores de esta zona abandonen las actividades agrícolas de sus parcelas y terminen trabajando en otro tipo de actividades.

No ajeno a ello, los pequeños agricultores del sector el Palomar-Rázuri, actualmente usan equipos rudimentarios de riego, para abastecimiento de agua a sus cultivos; teniendo como fuente de agua un pozo zanja, el cual alimenta a una red de distribución de agua haciendo uso de una Motobomba a gasolina, debido a que en esta zona no tienen cerca redes de energía eléctrica.



Por lo tanto mediante este estudio se pretende a partir del dimensionamiento de una vivienda agraria como residencia para seis miembros de una misma familia y la necesidad de suministro de agua durante todo el año para consumo humano, de animales considerando una tasa de crecimiento del 3% y el periodo de diseño de 20 años, así como una plantación de dos hectáreas de esparrago verde, la cual se encuentra implementada con un sistema de riego por goteo, nos proponemos mejorar el status de vida y satisfacer sus necesidades; por lo que planteamos la siguiente *formulación del problema*:

¿De qué manera, el diseño y selección de un sistema eólico eléctrico influyen en la mejora del proceso de bombeo de agua con fines de riego en el sector el Palomar - Rázuri?

Teniendo en cuenta todo lo analizado en cuanto a la problemática y habiendo formulado el problema de la presente investigación, se plantea la siguiente *hipótesis*: Mediante la aplicación del diseño y selección de un sistema eólico eléctrico para el proceso de bombeo de agua, se mejorarán las condiciones de riego y se promoverá el desarrollo y fortalecimiento de la agricultura en el sector el Palomar del distrito de Rázuri.

A continuación, es menester determinar los principales objetivos de la presente tesis, en virtud de la hipótesis planteada: El *objetivo general* consistirá en elaborar el diseño y selección de un sistema eólico eléctrico para mejorar el proceso de bombeo de agua con fines de riego en el sector el Palomar – Rázuri; y, para ello se deben tener en cuenta los siguientes *objetivos específicos*: (1) Evaluar las condiciones actuales de bombeo y los requerimientos de riego en el sector El Palomar-Rázuri; (2) determinar mediante el análisis correspondiente, el dimensionamiento y factibilidad técnica del mejoramiento del sistema e identificar los activos que conforman la línea crítica; (3) diseñar y seleccionar los componentes del sistema de bombeo y equipos complementarios; (4) efectuar la comprobación del gasto entregado por el sistema de bombeo diseñado, post mejora (cálculo de la capacidad del tanque de almacenamiento); y, (5) determinar los costos y

beneficios económicos de la implementación del diseño del sistema eólico eléctrico propuesto.

Enunciados nuestros objetivos y teniendo en cuenta que este desarrollo amerita un análisis correspondiente, debemos realizar las *justificaciones* del caso desde diferentes aspectos y establecer que, esta investigación se justifica *técnicamente* porque las condiciones actuales de bombeo y riego del sector El Palomar-Rázuri, son precarias y artesanales, por lo que con un sistema como el diseñado se logrará tecnificar tanto el proceso de bombeo, como el sistema de riego “por goteo” para las parcelas agrícolas del lugar; esto debe ser muy efectivo si al momento de realizar las actividades programadas, se cuenta con la logística adecuada respecto a la distribución del recurso hídrico para las labores eficientes de la comunidad; se justifica *económicamente* porque las familias usuarias de este sistema de bombeo, ya no tendrán gastos excesivos en consumo de combustibles fósiles para el funcionamiento de motobombas de agua y sus ingresos económicos podrán distribuirlos mejor en compra de semillas y mejoramiento del campo de cultivo; así mismo, los costos por gastos perdidos en desperdicio de agua que están relacionados directamente con la producción, se verán minimizados por el empleo estricto del agua suficiente y necesaria mediante el sistema de riego por goteo. La disminución del consumo de agua, en general mejorará la economía de la comunidad; también tiene una justificación *social* porque los diferentes procesos de aprovechamiento del sistema diseñado, ahora automatizados, redundarán en que el personal realice más labores agrícolas; existirán entonces oportunidades laborales atractivas y estables para trabajadores idóneos en estos trabajos y consecuentemente se incrementarán los estándares de cosecha. Desde el punto de vista *ambiental*, el empleo del sistema eólico para bombeo de agua, es el más ecológico de todos los métodos de producción de energía, por lo que es recomendable su uso y aplicación en menesteres de producción de potencia y fuerza motrices para diferentes actividades, como bombeo, transformación de energía mecánica en eléctrica, etc. en condiciones totalmente sanas.

## II. MARCO TEÓRICO

En base a lo indicado líneas arriba y como respaldo a la presente investigación, se han tomado como referencia trabajos afines, que se realizaron previamente. Así, (Medina Noguerón, 2011) en su tesis titulada “Diseño Aerodinámico de las Palas de una Turbina de viento de eje horizontal como fuente de energía alterna”, presentada en el Instituto Politécnico Nacional – México, rediseña el rotor de un aerogenerador de tres palas de eje horizontal de 4 metros de diámetro, empleando el Modelo de Rankine-Froude y simulando con el software de CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) en la obtención de las fuerzas aerodinámicas para diferentes configuraciones del rotor. El cálculo y diseño de estas palas de turbina de viento se han realizado para un sistema capaz de extraer 1500 watts de potencia de una corriente de aire de 11 m/seg. y mediante la simulación en CFD se pudo dar un resultado superior al que se pueda dar con métodos experimentales, ya que el acercamiento a la exactitud es más elocuente, pues se pueden realizar varias iteraciones, lo que permitirá una mejor toma de decisiones.

En forma similar, (Andrade Naccha y Quispe Conde, 2016) en su trabajo denominado “Diseño y selección de un sistema eólico solar para la generación de energía eléctrica que mejore el sistema de bombeo de agua con fines de riego en el Centro poblado de Chinumani- Yunguyo, 2016”, presentado en la Universidad Nacional del Altiplano, realizaron un análisis y selección de componentes para un sistema híbrido eólico solar para generar energía eléctrica y un sistema de bombeo para fines de riego en el centro poblado de Chinumani, dicho proyecto consta de cuatro generadores fotovoltaicos y un generador eólico el cual cumplirá con la demanda de carga hecha por el equipo de bombeo de agua, con ello se reemplazara las actividades de riego a mano que actualmente se realizan en el riego por surcos, conducido por tuberías en busca del bienestar de diez familias en el centro poblado de Chinumani. Dicha investigación contempla el estudio de todos los elementos que conforman un sistema eólico solar para generar energía eléctrica y con ello un sistema de bombeo para el riego de sus

áreas de cultivo con el cual se pretende mejorar y finalmente analizar todos los resultados, con softwares computacionales como el Homer 2 entre otros, con el fin de garantizar su funcionamiento y aplicación en la agricultura para el centro poblado de Chinumani del distrito de Yunguyo. El beneficio energético en la zona de estudio sería sustentable puesto que las fuentes de energía eólica y solar son perdurables.

Asimismo, (Sandoval Chero, 2018), en la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Chiclayo, presentó un estudio de investigación denominado “Diseño de una aerobomba para riego tecnificado, con energía eólica para el sembrío de papaya en la localidad de Acerillo – Bagua – Amazonas”, en esta tesis se proyecta que, mediante bombeo de agua del río Utcubamba al almacenamiento de un tanque de acero de capacidad de  $20m^3$ , en la parte más alta, se conseguirá abastecer el riego de sembríos de cultivo papaya; existe la necesidad de poder regar 10 Há. de papaya en dicho sector, siendo importante para los comuneros de esta zona contar con la capacidad necesaria para dar solución a dicho problema. La energía eólica, materia de esta investigación, consiste en un estudio socio económico y demostrativo de la rentabilidad, para cuyo efecto se han realizado estudios de la fuerza que podría brindar el aire, sus características bajo mediciones manuales y automáticas, capacidad de bombear agua, el tipo de riego, la demanda de caudal requerido; Como premisa, se puede tomar en cuenta que, se tiene una fuente hidrológica inagotable como es el Río Utcubamba, en cuya parte inferior existe un área para desarrollo del proyecto de acuerdo al diseño de la AEROBOMBA, su rentabilidad en el tiempo con respecto a otras fuentes de energía, así como su mantenimiento preventivo y correctivo, materia de esta tesis.

También como antecedente, podemos citar a Auccacusi Montejo (2014) quien en su tesis denominada “Análisis Técnico Económico para la selección del equipo óptimo de bombeo en Muskarumi - Pucyura – Cuzco, utilizando fuentes renovables de energía”, presentada en la Pontificia Universidad Católica del Perú, se presentan métodos para dar solución a

la problemática de falta de agua para riego en una zona específica del Perú, analizando su geografía, clima, fuentes hídricas y racionalidad de la población y así mejorar la calidad de vida de la población rural. En esta investigación se determinó que el caudal de agua necesario para 3 hectáreas de cultivo, durante el día más seco del año, es de aproximadamente 3 l/s, por lo que se necesitaría bombear un volumen de 282 m<sup>3</sup> al día; por otro lado, se definió que el tipo de riego más adecuado para la zona es el de aspersión. Entonces eligiendo los aspersores a utilizar se determinó que se necesita en promedio de 3.5 bar de presión, lo cual nos da la referencia de la altura en la cual se debe ubicar el tanque de agua. Se realizó, asimismo, el análisis económico con el fin de hallar la rentabilidad del proyecto tomando como tasa de interés mínima 11% anual según Agro Banco, por lo que se hallaron los costos fijos y variables de todas las bombas analizadas, así como el costo de producir vegetales en la zona, para luego realizar un análisis financiero mediante las técnicas de evaluación del valor actual neto y tasa interna de retorno determinando qué productos agrícolas harán factible el proyecto; por lo expuesto antes, según el análisis económico, los requerimientos de caudal y presión para el sistema de riego se seleccionó la bomba solar como el equipo óptimo de bombeo para la zona de estudio, además se determinó que el producto en generar mayor utilidad es la cebolla. Aplicando el uso de la bomba solar, el costo aproximado del proyecto de bombeo y riego es de aproximadamente \$39 000 cuyo valor actual neto es de \$54 000 y tasa interna de retorno es de 58%, lo cual nos indica la rentabilidad y factibilidad del mismo.

Por otro lado, en el ámbito local Cornejo y Gayoso (2010), presentaron en la Universidad César Vallejo de Trujillo, una investigación titulada “Evaluación Técnica y Económica para la generación de energía eléctrica híbrida Eólica – Solar para la Comunidad de San Luis en el Distrito de Pimentel, Región Lambayeque”, la misma que inicia conceptualizando parámetros intervinientes como son las energías renovables eólico – solares, sus generalidades, etc.; también, el tema refiere las técnicas y

métodos para el análisis del recurso energético eólico – solar de la zona de estudio; asimismo, muestra puntualmente el dimensionamiento del sistema híbrido eólico – solar, así como su presupuesto económico para la instalación de este proyecto; de igual manera, se realizaron la evaluación y cálculo de la conversión del recurso renovable eólico solar, como alternativa de generación eléctrica para la zona de estudio. Finalmente, luego de dar las conclusiones y las recomendaciones, en anexos se detallan las mediciones del recurso eólico – solar en la comunidad de San Luis, distrito de Pimentel, fichas de características técnicas del panel solar seleccionado, así como del aerogenerador, entre otros más. En la investigación se determina, igualmente, que el potencial de aprovechamiento energético en la zona de estudio es prácticamente inagotable, tanto el sol como el viento son fuentes perdurables, es por ello que la propuesta de un sistema de generación híbrido eólico solar estableciendo que fuentes renovables de energía, se complementan y aportan su potencial energético, la cual se proyecta de la siguiente manera: Demanda de energía eléctrica proyectada a 10 años es de 14.55 KWh/día, utiliza para este fin 1 Regulador solar 100 A y 24V, 01 controlador eólico de 3000 W, 24V, 50 – 60 A, 01 inversor general de 4000 W. El aprovechamiento del sistema de conversión de energía fotovoltaica en conjunto es del 20%, mientras que el aprovechamiento para el sistema eólico es el 80%. El dimensionamiento de la instalación fotovoltaica cubre una demanda de 1997.68 Wh/día, compuesta por 09 paneles solares de 135 W, de 24 voltios y finalmente, el costo de inversión del sistema híbrido eólico-solar es de S/. 49,571.03.

A continuación, es necesario involucrar conceptos que ayudarán con el desarrollo de nuestra investigación, como son los referentes a sistemas de bombeo, diseño y selección de equipos y demanda energética para el sector El Palomar-Rázuri. Se realizan frecuencias dinámicas, de acuerdo con las recomendaciones de fabricantes de equipos de Aero generación, como seguidamente se detalla:

## El viento

Es una fuente natural que presenta diversa variabilidad en distintos sentidos del lado energético se logra determinar:

- La Potencia útil
- EL emplazamiento más óptimo.
- Las cargas en el sistema, para el dimensionamiento idóneo.
- Operación de arranque, parada, regulación, orientación al viento, etc.
- La vida útil del sistema.
- El comportamiento energético de la explotación eólica.

## Energía Eólica

Es una fuente de energía renovable que se produce a través de la energía cinética proveniente del viento que va a mover unas palas que posteriormente harán funcionar una turbina que dará como resultado energía eléctrica.

Desde el punto de vista monetario, el sistema eólico requiere mayor inversión que un sistema Diésel para su instalación, sin embargo, el equipamiento eólico es más barato en su mantenimiento, "combustible" gratis y una vida útil prolongada de 20 años a más, lo que les va a permite competir con otras fuentes energéticas.

## Energía y potencia del viento

La masa ( $m$ ) con circulación homogénea unidireccional de celeridad ( $v$ ) tiene energía cinética:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.1)$$

Si ( $\rho$ ) es la densidad del aire de la corriente homogénea, la energía expresada en unidad de volumen es:

$$e = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (1.2)$$

En la siguiente expresión se tiene flujo volumétrico ( $\dot{Q}$ ) y la superficie de control de sección frontal ( $A$ ) es:

$$\dot{Q} = Av \quad (1.3)$$

Posteriormente, el flujo de energía eólica en corriente a través de  $A$  es:

$$P_{viento} = e\dot{Q} = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (1.4)$$

La expresión anterior nos demuestra que la velocidad tiene una gran dependencia con ello optamos que operar a nivel del mar la densidad es aprovechable con un valor de 1,225 kg/m<sup>3</sup>.

La cantidad de potencia mecánica disponible de la turbina en su eje está dada por:

$$P_{turbina} = \frac{1}{2}\rho Av^3 C_p \quad (1.5)$$

Donde:

- $C_p$  es llamado el coeficiente de potencia y  $A$  es el área de barrido de las palas de la turbina.
- El  $C_p$  es independiente del tamaño de la turbina y es un indicador de la eficiencia de la turbina, también es una función de la relación de velocidad de punta de pala  $C_p = f(\lambda)$ , que se puede calcular por:

$$\lambda = \frac{\omega r}{v} \quad (1.6)$$

Donde,

$\omega$  : Es la velocidad de rotación angular de la turbina en rad/s.

Los gráficos del coeficiente de fuerza en función de la celeridad de punta dependen del tipo de diseño de la turbina eólica a utilizar. Los coeficientes de potencia para varios diseños de turbinas se muestran en la Figura 1. Una turbina eólica no puede capturar toda la potencia del viento que pasa



a través del área barrida de las palas de la turbina. Si este fuera el caso, ningún viento pasaría a través de las palas y la turbina se detendría.

Según (Mathew 2006), la cantidad máxima teórica de energía eólica que puede ser capturada por las aspas de una turbina y convertirse en energía mecánica es del 59.3%. Esta eficiencia máxima teórica se denomina límite de Betz, ver figura (1)

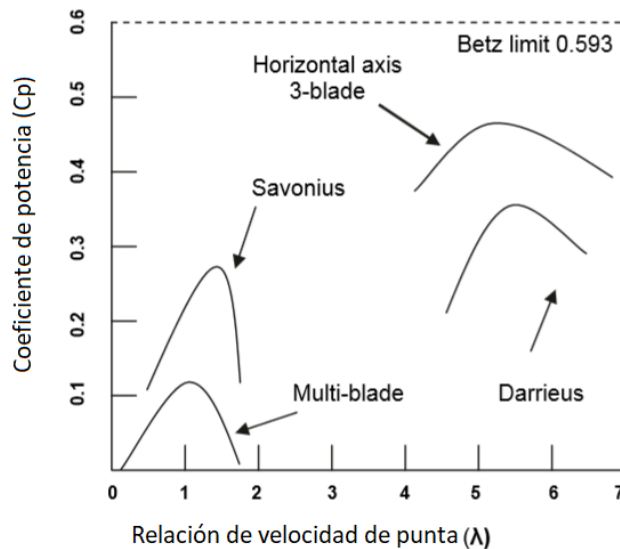


Figura 1:  $C_p - \lambda$  Curvas para diferentes diseños de turbinas eólicas.  
Fuente: (Mathew 2006).

El número de álabes de la turbina para un área de barrido de turbina dada, determina la solidez de la turbina. Las turbinas de alta solidez se utilizan en condiciones de baja velocidad del viento para aplicaciones de alto par. Sin embargo, en las altas velocidades del viento, el mayor número de aspas restringe el flujo de aire a través del área barrida de las aspas y hace que la eficiencia de la turbina disminuya considerablemente.

Las turbinas eólicas de baja solidez tienen una alta eficiencia en condiciones de alta velocidad del viento porque el bajo número de aspas permite un buen flujo de aire. La potencia disponible en el viento para un área barrida de turbina dada tiene un aumento cúbico con un aumento en la velocidad del viento. Estas turbinas de baja solidez se

utilizan, por lo tanto, en regímenes de velocidad de viento de media a alta, debido a la alta potencia y eficiencia de la turbina.

### **Clasificación de las turbinas de viento**

- Podemos clasificar a las turbinas en dos grupos:
- Turbinas eólicas de eje vertical (TEEV)
- Turbinas eólicas de eje horizontal (TEEH).

### **Turbinas eólicas de eje vertical**

Los dos diseños principales de turbinas de eje vertical son Darrieus y Savonius, como se muestra en la Figura 2.

Estos diseños tienen la ventaja de ser omnidireccionales y no necesitan una paleta de cola para orientar la turbina hacia el viento. Las torres necesarias para estos diseños también son rentables y fáciles de fabricar e instalar. El área barrida de un TEEV es la mitad de su área física total de turbina porque solo la mitad de su área total de turbina está expuesta al viento en un momento dado. Por lo tanto, el tamaño del TEEV debe ser mucho mayor que un TEEH para entregar la misma potencia. La turbina Savonius tiene una alta solidez y, por lo tanto, tiene un bajo coeficiente de potencia, como podemos ver en la Figura 1.

Para aplicaciones de alto par a bajas velocidades del viento, como el bombeo de agua, es ideal el diseño. El Darrieus está diseñado para operar a altas velocidades de viento donde existe una gran energía eólica. También tiene un coeficiente de potencia más alto que el de Savonius y puede usarse para generar energía. Una desventaja importante de un Darrieus, sin embargo, es la ausencia de cualquier par de arranque. Deben mejorarse con una excitación externa.

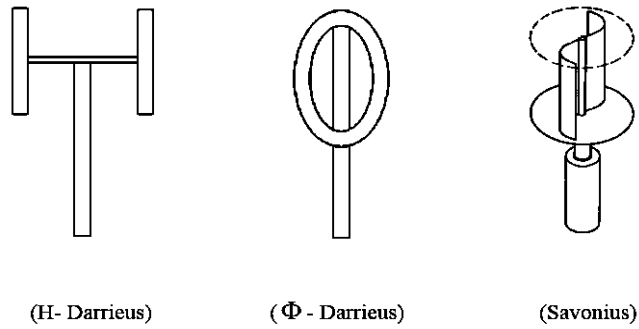


Figura 2: diseños de aerogeneradores de eje vertical  
Fuente:(P. Gipe, 2004).

### Turbinas eólicas de eje horizontal.

El único criterio de diseño de la turbina de eje horizontal es el número de aspas que se utiliza, como se puede ver en la figura 3. El diseño tradicional de palas múltiples tiene un alto número de aspas y es similar al diseño de Savonius, ya que la alta solidez de la turbina de palas múltiples también lo hace ideal para aplicaciones de par alto con velocidades de viento bajas. LA TEEH de tres aspas es el diseño óptimo de baja solidez. Es superior a los diseños de una y dos palas porque las tres palas hacen que se equilibre dinámicamente y reducen el ruido del viento. El diseño tiene una capacidad de autoarranque y un coeficiente de potencia más alto que el diseño de Darrieus, lo que la convierte en la opción de turbina preferida para la generación de energía en sitios con regímenes de vientos medios a altos.

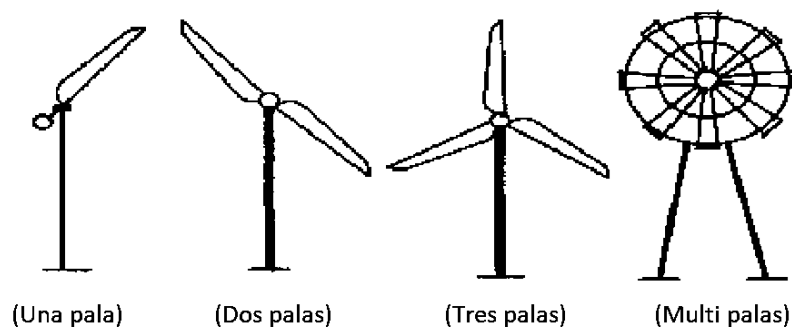


Figura 3: diseños de aerogeneradores de eje horizontal  
Fuente: (P. Gipe, 2004)

## Análisis de los regímenes de viento

### Ubicación de la turbina

Un buen conocimiento de las condiciones eólicas prevalecientes en el lugar de instalación de un aerogenerador es esencial para estimar el rendimiento del aerogenerador. Los datos del viento de las estaciones meteorológicas cercanas a la instalación de la turbina pueden ofrecerle una indicación de las condiciones del viento presentes en la instalación.

El eje de la turbina debe erigirse a una altura libre de obstrucciones, como árboles y edificios. Estas obstrucciones causan turbulencias que no solo reducen la corriente de aire a través de las cuchillas y reducen la potencia que puede desarrollarse, sino que también colocan cargas de fatiga en las cuchillas. Sitios de viento muy turbulentos también incluyen crestas y pasos de montaña. Una buena regla general es colocar siempre el centro lejos de la obstrucción más alta al doble de la altura de esta obstrucción más alta.

Las velocidades de los vientos aumentan con un aumento en la altura porque el aire ofrece menos resistencia al flujo de aire que la superficie de la tierra. Por lo tanto, la turbina experimentaría un aumento de la velocidad del viento cuando se erigiera alto y potencialmente podría extraer más energía del aire. Sin embargo, la densidad del aire debe tenerse en cuenta al instalar turbinas en sitios con elevaciones elevadas sobre el nivel del mar. Esto se debe a que la densidad del aire baja debido a grandes altitudes y podría reducir la potencia que puede ser extraída del aire por la turbina de acuerdo con (1.4). La densidad del aire,  $\rho$  a una altura específica sobre el nivel del mar puede ser calculada por la ley de los gases:

$$\rho = V_{ref} \frac{1000P_H}{RT_H} \quad (1.7)$$

Donde:

R Es la constante universal de los gases, 287.04 J / Kg

$V_{ref}$  Volumen ocupado por un gas

$P_H$  Es la presión el aire atmosférico

$T_H$  Es la temperatura en Kelvin a una altura específica.

El medio ambiente es la razón de la disminución de la temperatura con la altura. Para una altura de hasta 11 000 m, la tasa de caducidad es de 6,5 °C / 1000 m de aumento según la (ICAO 1993). La ecuación hidrostática se puede utilizar para calcular la presión atmosférica del aire,  $P_H$  a una altura específica sobre el nivel del mar:

$$P_H = P_o [(T_o - \Psi H_{asl}) / T_o]^{g/R\Psi} \quad (1.8)$$

Donde:

$P_o$  Es la presión estándar a nivel del mar (101.325 kPa)

$T_o$  Es la temperatura estándar a nivel del mar (293.15 K)

$H_{asl}$  Es la altura sobre el nivel del mar,

$\Psi$  Es la gradiente de temperatura (0.0065 ° C/m)

$g$  Es la aceleración de la gravedad (9.8 m/s<sup>2</sup>).

La temperatura del aire a una cierta altura,  $T_H$  se puede calcular simplemente usando el gradiente térmico ambiental:

$$T_H = T_o - \Psi H \quad (1.8)$$

El gradiente de temperatura ( $\Psi$ ) no siempre refleja la temperatura inmediata real a una cierta altura; es solo una generalización y el valor de la temperatura real puede variar. Sin embargo, ofrece una buena estimación del nivel de densidad del aire en diferentes elevaciones.

Las curvas de suministro de potencia de una turbina eólica se determinan a una densidad de aire específica que suele ser la densidad la cual está en el mismo nivel del mar, 1.225 kg / m<sup>3</sup>. Se puede aproximar utilizando (1.7) - (1.8), la densidad del aire a cualquier altura sobre el nivel del mar.

Si se instala la turbina, por ejemplo, a una altura de 1000 m, la densidad del aire disminuirá al valor de  $\approx 1.16$  kg / m<sup>3</sup>. Por lo tanto, las curvas de

suministro de potencia de la turbina deberían ajustarse con un factor de  $1.16/1.225 \approx 0.95$ .

### Parámetros de interés para cálculos energéticos

Un parámetro importante es la *media anual del cubo de las velocidades* ( $v^3$ ), que no debe confundirse con el cubo de la velocidad media anual  $c$ . Para una distribución de Weibull viene dada por:

$$\overline{(v^3)} = \int_0^{\infty} v^3 p(v) dv = c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (1.9)$$

La velocidad eficaz  $v$ , se define como aquella velocidad que elevada al cubo coincide con la media anual de las velocidades al cubo. Definida según:

$$v = (\overline{(v^3)})^{1/3} \quad (1.10)$$

A partir de las expresiones anteriores se obtiene el siguiente conjunto de relaciones:

-Velocidad media anual/parámetro  $c$ :

$$\frac{v}{c} = \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (1.11)$$

-Desviación estándar/velocidad media anual:

$$\frac{\sigma}{v} = P_o \left[ \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1 \right]^{1/2} \quad (1.12)$$

-Factor patrón de energía, factor de energía o factor de potencia eólica (FPE):

$$\frac{\overline{(v^3)}}{(\overline{v})^3} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (1.13)$$

El FPE varía entre 1.5 y 3. Generalmente su valor se situa en el entorno de 2. En la figura 1.4 se muestra su variación frente al factor de forma  $k$ .

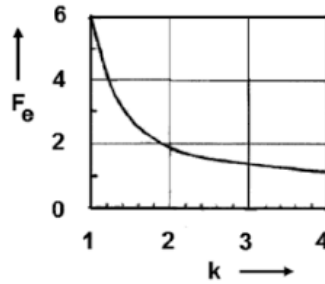


Figura 4. Variación del factor de energía FPE en función del factor de forma **k**.  
(Fuente: Villarrubia, 2011)

### **Estimación del rendimiento de un sistema de bombeo eólico-eléctrico.**

Se define como el volumen de fluido suministrado por el sistema en un período de tiempo determinado, generalmente por año. Para estimar el rendimiento de este sistema, se debe conocer lo siguiente:

### **Potencial de salida hidráulico del sistema de bombeo eólico-eléctrico.**

Este sistema de bombeo puede diseñarse para operar de forma rápida y eficiente posible para una aplicación con una determinada aplicación de bombeo y un régimen de viento disponible en el sitio de instalación de la turbina. La salida hidráulica o el potencial de entrega de la bomba se pueden definir como la velocidad de flujo por hora que el sistema puede lograr potencialmente a cada velocidad del viento que se presenta a la turbina en el sitio de instalación. Este potencial de salida hidráulica puede aproximarse durante el diseño del sistema que se abarcará posteriormente más adelante. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de dicho potencial de salida hidráulica de SBEE.

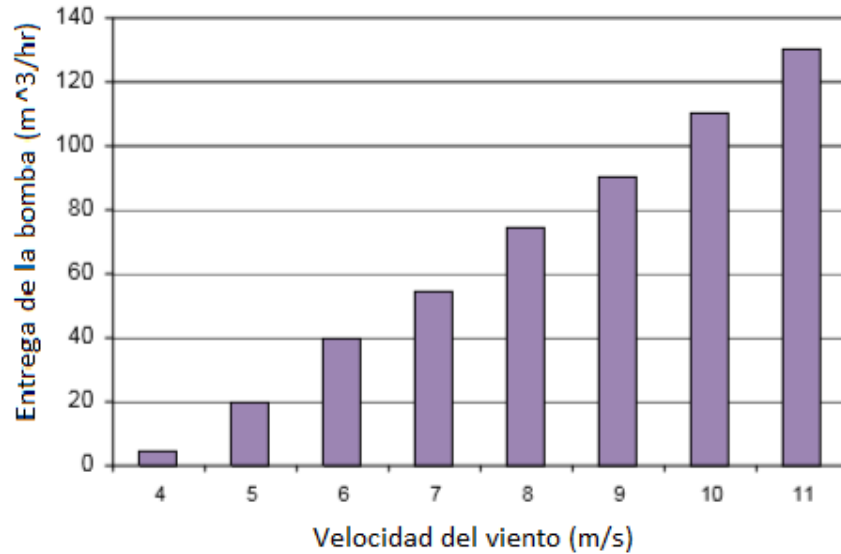


Figura 5: Ejemplo de posible salida hidráulica de un sistema eólico-eléctrico para cada velocidad de viento.  
Fuente: (E. Charles, 2009)

### Distribución de la velocidad del viento en el lugar de aplicación de la turbina.

Es un error común usar solo la velocidad promedio del viento en un sitio para estimar el rendimiento de la turbina. Este método puede subestimar o sobreestimar el rendimiento real de la turbina hasta en un 30% según (Gipe, 2004). Al utilizar la velocidad del viento y su distribución en un lugar, se pueden hacer estimaciones de rendimiento más precisas porque se tiene en cuenta la contribución de cada celeridad del viento. Un ejemplo de dicha distribución de la celeridad del viento se da en la Figura 6 en términos de la cantidad de horas que cada velocidad del viento ocurriría durante el año. La contribución en el volumen bombeado de cada velocidad del viento se puede calcular como se muestra en la Figura 7 multiplicando el potencial de entrega estimado del sistema eólico eléctrico para cada velocidad del viento en la Figura 5 con la cantidad de horas de ocurrencia de cada velocidad del viento en la Figura 6. La suma de estas contribuciones es el rendimiento anual del sistema eólico. La producción hidráulica anual total lograda por el rendimiento del sistema de bomba eólica en este ejemplo, por lo tanto, se estima en la Figura 7 en  $\approx 358\ 000\ \text{m}^3$ .



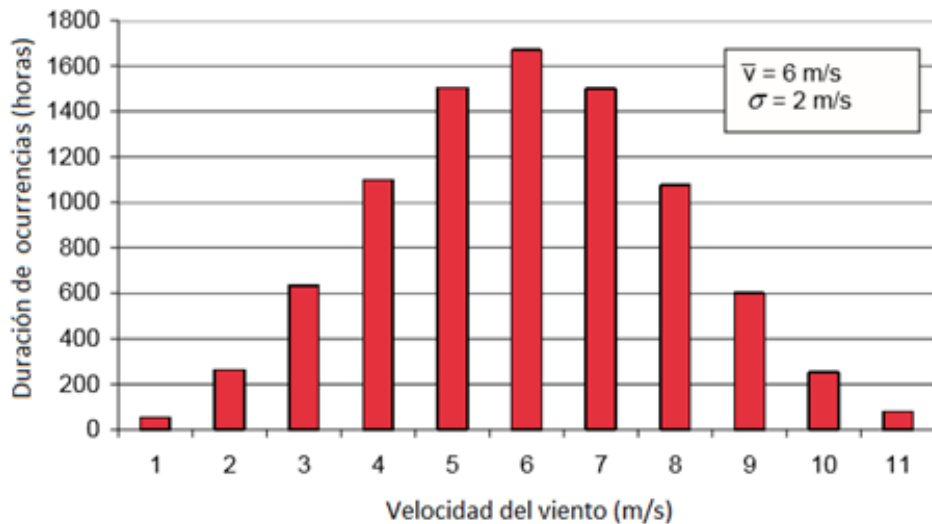


Figura 6: Ejemplo de distribución de velocidad del viento.  
Fuente: (E. Charles, 2009)

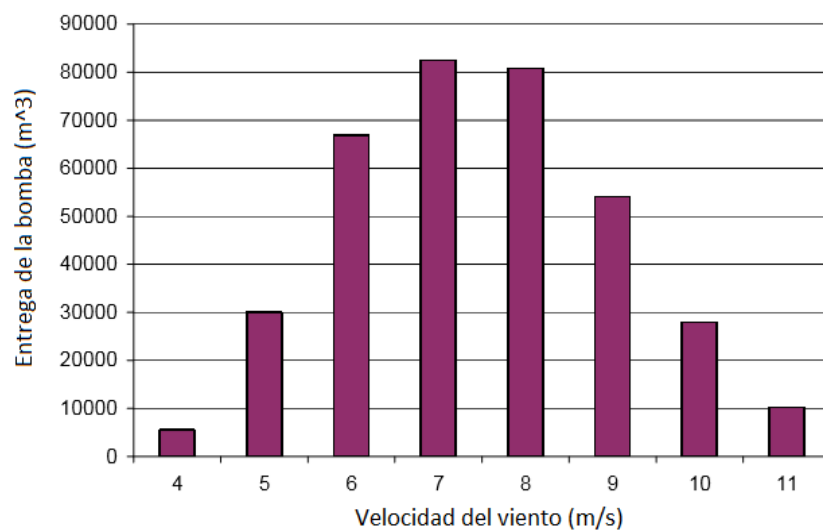


Figura 7: la contribución del volumen bombeado de cada velocidad del viento alcanzada por el sistema de bombeo eólico.  
Fuente: (E. Charles, 2009)

### Curvas de potencia

Con este diagrama podemos conocer cuando un aerogenerador suministra energía. (Escobar, 2012).

Con las curvas de potencia podremos calcular la curva disponible del viento y potencia eléctrica la cual es suministrada por el fabricante.

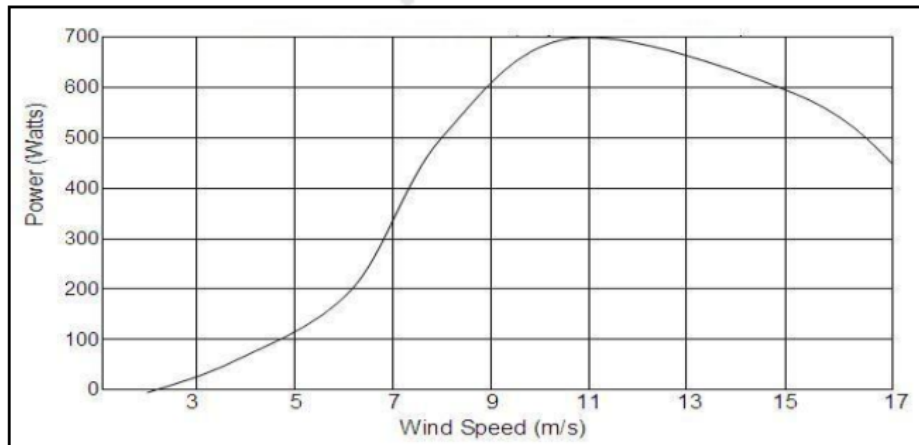


Figura 8: Curva de potencia de un aerogenerador.  
Fuente: (Escobar, 2012).

### La rugosidad

“El efecto de la morfología del territorio es indispensable cuantificarlos el territorio de todo el lugar para el aerogenerador sobre la velocidad del viento. Ello define la “rugosidad” expresada por la siguiente ecuación. Esta función cambia según lo que podemos encontrar en el lugar de trabajo” (Chercca, 2014).

$$v(z) = v_{ref} \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (1.14)$$

Donde:

$z$ : Es la altura desde el suelo.

$v_{ref}$ : Es la velocidad medida a una altura  $z_{ref}$ .

$z_0$ : Es la longitud de la rugosidad ver tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes de rugosidad

<b>Clase de rugosidad</b>	<b>Longitud de rugosidad (m.)</b>	<b>Indice de energía (%)</b>
0	0.0002	100
0.5	0.0024	73
1	0.03	52
1.5	0.055	45
2	0.1	39
2.5	0.2	31
3	0.4	24
3.5	0.8	18
4	1.6	13

Fuente: (Chercca, 2014).

Tabla 2: Clase de rugosidad por paisaje

<b>Clase de rugosidad</b>	<b>Tipo de paisaje</b>
0	Superficie del agua
0.5	Terreno completamente abierto con una superficie lisa
1	Agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos
1.5	Agrícola con algunas casa y setos (dist. 1250 m.)
2	Agrícola con algunas casa y setos (dist. 500 m.)
2.5	Agrícola con muchas, arbustos y planta (dist. 250 m.)
3	Pueblos, ciudades pequeñas, terrenos agrícolas
3.5	Ciudades más grandes con edificios altos
4	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos

Fuente: (Chercca, 2014).

## **Tecnología y cálculo del bombeo eólico**

### **Tipos de sistemas de bombeo eólico**

Se dividen en 4 categorías según su dependencia y construcción:

- ✓ El Molino de viento multipala tradicional o americano.
- ✓ Las Aerobombas ligeras o de segunda generación.
- ✓ Las Aerobombas informales o artesanales.
- ✓ Sistemas de bombeo eólico-eléctrico.

### **Molino de viento multipala tradicional**

Fue fabricado en los años 1850 y 1930 y fue conocido como "molino de viento americano" (American Farm Windpump) figura 9. (M. Castro G. 2011).

La característica de esta máquina fue que utilizó un rotor con 12 y 24 palas las cuales conducen a accionar una bomba de pistón la cual a través de un eje vertical es acoplado entre el rotor la cual acciona un mecanismo de reducción de velocidad a través de engranajes y permite el funcionamiento del mecanismo (ver figura 10).

Gracias a la caja reductora de velocidades la máquina es más versátil, y es adecuada para bombear agua desde profundidades de la tierra. Por otro lado, la baja velocidad de trabajo hace a la máquina más fiable esto disminuye el desgaste, además de disminuir las roturas por fatiga. En conclusión, estas máquinas requieren un mantenimiento mínimo.

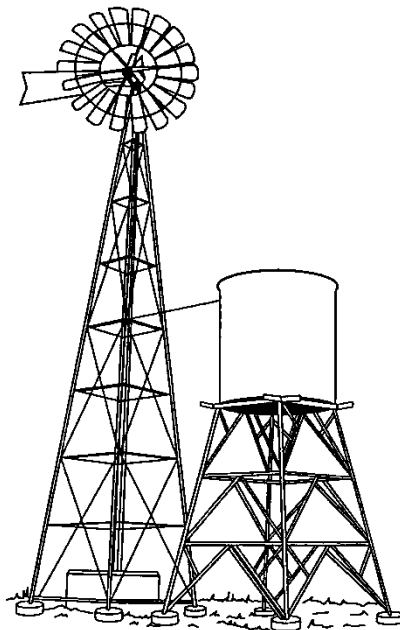


Figura. 9: Molino de viento multipala tradicional o americano.

Fuente: (M. Castro G. 2011).

La fabricación del diámetro del rotor oscila, entre 2 m y 5 m, pudiendo llegar a veces a los 10 m.

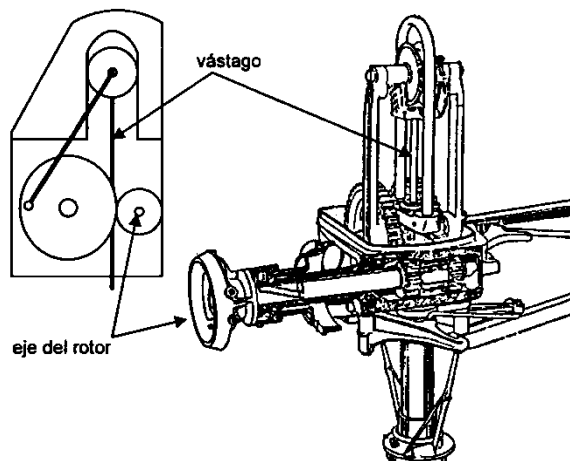


Figura 10: Sistema de transmisión de biela y manivela usado en molinos de viento.

Fuente: (M. Castro G. 2011).

Se puede instalar en lugares con bajas velocidades de viento entre 2 m/s y 5 m/s.

### **Aerobombas de segunda generación**

En su mayoría fueron desarrolladas después de 1975 fueron distintos los fabricantes y empresas como IT Power en Inglaterra, las Gaviotas en Colombia, CWD en Holanda (figura 11), Vita en EE.UU. y CAAMS en China, entre otros.

Los objetivos principales de las aerobombas de segunda generación son:

- Menor coste inicial.
- Estructura ligera y menor peso.
- Mantenimiento y Fabricación local.
- Mayor eficiencia.

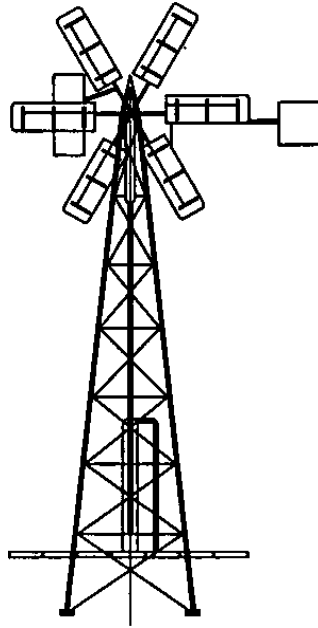


Figura 11: Aerobomba de segunda generación.

Fuente: (M. Castro G. 2011).

### **Aerobombas de fabricación artesanal**

Estas aerobombas se caracterizan por ser sencillas y fabricadas con materiales disponibles localmente. Los diseños pueden ser originales o modelos simplificados según lo existente, para adaptarlos a las disponibilidades locales.

Los materiales de construcción son variados, pudiéndose emplear la madera u otros materiales que se trabajen de forma artesanal con pocas herramientas. La mayoría de estas aerobombas no usan caja reductora de velocidad, sino simplemente un cigüeñal rudimentario o un sistema de leva.

Evidentemente, la fiabilidad y el comportamiento son pobres en la mayor parte de los casos. Las ventajas son los bajos costes y el fácil mantenimiento, que puede realizar el propio usuario.

La aplicación de estas máquinas está restringida para bajas cargas.

### **Sistema avanzado de bombeo eólico-eléctrico**

En los países desarrollados hay un gran número de fabricantes de aerogeneradores que recomiendan el uso de sus equipos acoplados a electro-bombas para el trasvase de líquidos. Se trata de los denominados

"sistemas avanzados de bombeo eólico-eléctrico" (figura 12). Éstos se componen de un aerogenerador eléctrico que alimenta al electromotor que mueve una bomba, con o sin baterías, y otros equipos de conversión de potencia.

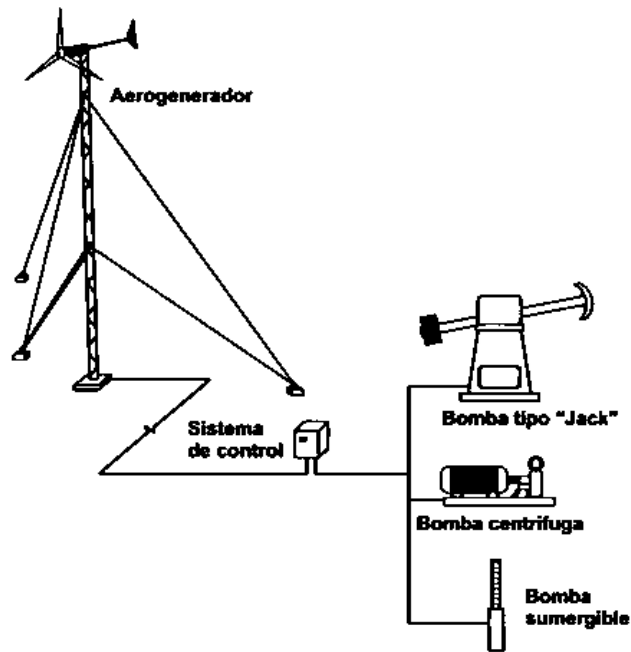


Figura 12: Sistema avanzado de bombeo eólico-eléctrico.  
Fuente: (M. Castro G. 2011).

Las principales ventajas con respecto a los sistemas mencionados anteriormente son:

- Mayor flexibilidad en cuanto a la ubicación, pudiéndose montar el aerogenerador en el lugar de mayor velocidad del viento aun cuando éste no coincida con el lugar del pozo.
- Mayor eficiencia de bombeo (10%-12 %).
- Incremento del volumen de agua bombeada, mayores cargas, debido a la posibilidad de usar rotores eólicos de mayor diámetro (10m- 40 m).
- Mayor versatilidad en el uso (bombeo, iluminación, etc.).
- Mayor fiabilidad.
- Menor requerimiento de mantenimiento.

Las desventajas principales son:

- Mayor coste de inversión inicial.

- Para la instalación y mantenimiento se necesita personal especializado.
- Necesita mayores velocidades de viento para operar ( $v > 4$  m/s).

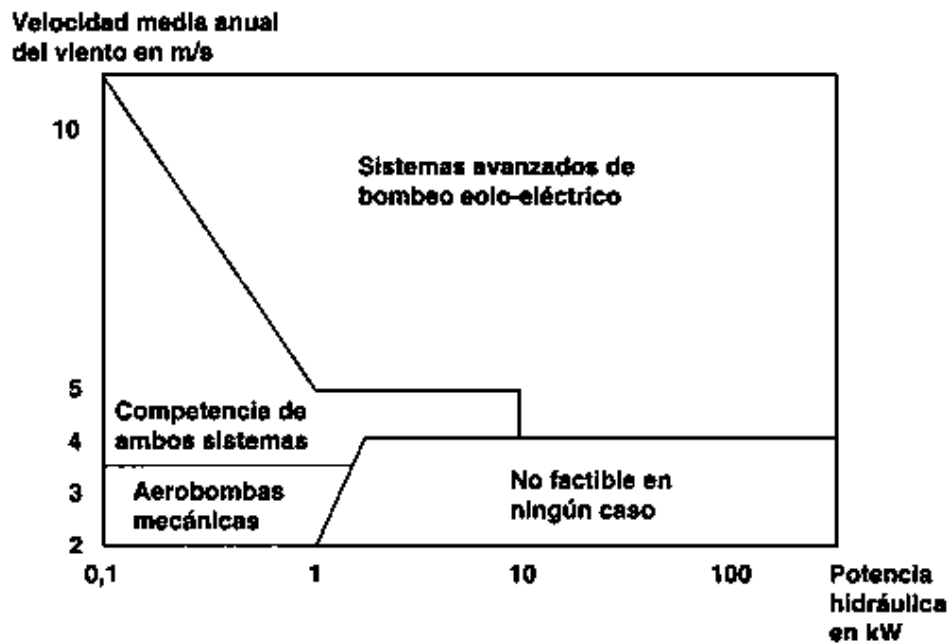


Figura 13: Campos de aplicación de los diferentes sistemas de bombeo eólico

Fuente: (M. Castro G. 2011).

La figura 13 muestra los campos de aplicación aproximados de dos categorías de sistemas de bombeo eólico analizadas. Como puede observarse, los sistemas avanzados de bombeo eólico-eléctrico resultan más adecuados para sitios con regímenes de vientos altos-medios y uso de gran potencia, mientras que los sistemas mecánicos son más convenientes para lugares con regímenes de viento bajo-medio y aplicaciones de baja potencia.

### Sistemas de bombeo eólico-eléctrico (SBEE)

Este sistema se compone básicamente de:

- Aerogenerador.
- Conexión eléctrica aerogenerador-bomba y sistema de control.
- Electro-bomba hidráulica (sumergible en la mayoría de los casos).
- Tanque de agua.
- Sistema de apoyo (por ejemplo, baterías; no es imprescindible).



El tipo de conexión eléctrica aerogenerador/bomba y sistema de control dependen del tipo de corriente que entregue el aerogenerador (CA o CC) y de la corriente con que trabaje la electro-bomba. El caso más común comercialmente es el sistema que emplea corriente alterna, tanto en el aerogenerador como en la electro-bomba, y el sistema de control sólo controla la frecuencia que impone el aerogenerador, con el fin de evitar que la electro-bomba trabaje con baja velocidad de rotación y, por lo tanto, con baja eficiencia. Por lo general, los controladores de frecuencia limitan ésta a un mínimo de un 30% de la frecuencia nominal.

### **Aerogenerador**

El generador es el componente que convierte la energía mecánica que el rotor extrajo del viento en energía eléctrica. Por lo general se usan los siguientes tipos de generadores:

- Generador de imanes permanente
- Generador de inducción o asíncrono

#### **Generador de imanes permanentes**

Se distingue porque su campo inductor o de excitación es elaborado por imanes estables y no por bobinas. Un generador permanente de imanes puede funcionar a velocidades mínimas, por lo que es factible unir el rotor de la turbina directamente al eje del generador. Mayormente se emplea una escobilla pues las bobinas del inducido se hallan en el estator y el campo inductor de los imanes en el rotor (parte giratoria del generador).

Para que la energía se almacene en un banco de baterías, su salida eléctrica debe ser trifásica.

Existen tres tipos de generadores de imanes permanentes (Fig. 14):

- De rotor axial.
- De rotor cilíndrico interior.
- De rotor cilíndrico exterior

Las Figuras 14 a 15 muestran de manera esquemática las disposiciones básicas de generadores.

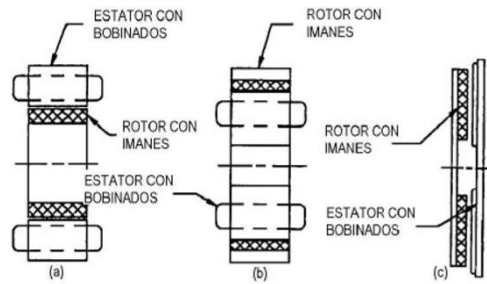


Figura 14: Disposiciones básicas de generadores.

Fuente:(E. García C. 2005)

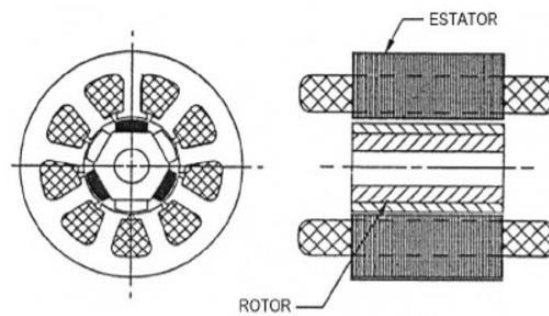


Figura 15: Disposición de rotor cilíndrico interior

Fuente:(E. García C. 2005)

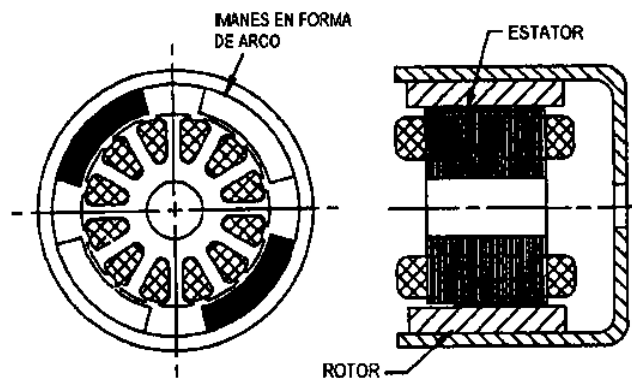


Figura 16: Disposición de rotor cilíndrico exterior

Fuente:(E. García C. 2005)

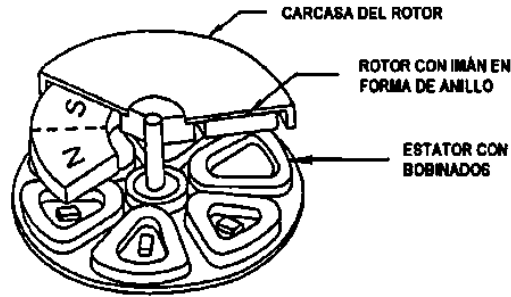


Figura 17: Detalle de una disposición de rotor axial  
Fuente:(E. García C. 2005)

## Generador de Inducción o Asíncrono

Son empleadas por lo general en gran potencia. Al encontrarse junto a la red se produce un campo magnético alterno gracias a la corriente de excitación que funciona también como una corriente alterna. Si la velocidad del generador es ligeramente más alta que la velocidad de sincronismo, esta alimentará al sistema de potencia al cual se encuentre conectado. Usando capacitores se puede corregir el factor de potencia y el voltaje de salida del generador se examina mediante la fuente de potencia a la cual ha sido conectada, en este caso la red eléctrica.

Para realizar la conexión a la red de los sistemas de control de generadores, e debe tener en cuenta que el giro del roto sea mayor a la velocidad de sincronismo, y cuando esta baje su velocidad, desconectarla.

La Figura 18 presenta áreas de bosques eólicos compuestos por aerogeneradores que utilizan generadores de inducción.



Figura 18: Gode Wind 1, 2 y 3 son parques eólicos marinos situados al noroeste de Norderney en el sector alemán del Mar del Norte.  
Fuente:( <https://elperiodicodelaenergia.com>)

## Conexión eléctrica aerogenerador-bomba y sistema de control

### Dimensionamiento de los conductores:

Los conductores son los encargados de transmitir y hacer llegar la corriente desde el punto de generación, en este caso los aerogeneradores, hacia el punto de consumo, que es el motor.

Al momento de escoger el conductor, este debe ser capaz de contener no solo perfectamente la corriente nominal de servicio y la corriente de arranque del motor, sino que debe sostener la corriente de cortocircuito durante el corto periodo de tiempo que demoran las protecciones en encontrar la falla y actuar, sin producirse defectos en el cable.

Para buscar el conductor idóneo para la instalación se deben hacer los siguientes cálculos.

Para ello disponemos de la siguiente ecuación:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot L \cdot I \cdot \cos\phi}{c \cdot \Delta V} \quad (1.14)$$

Donde:

S= Sección (mm<sup>2</sup>)

L= Longitud del conductor

I= Intensidad máxima (Datos del fabricante)

c= Conductividad del cobre

$\Delta V = 1\%$ , Caída de tensión (V)

$\cos\phi$  = Factor de potencia del motor (Datos del fabricante)

Tabla 3: Conductividad del cobre y el aluminio a distintas temperaturas.

Material	20° C	30° C	40° C	50° C	60° C	70° C PVC	80° C	90° C XPLE-EPR
Cu	56	54	52	50	48	47	45	44
Al	35	34	32	31	30	29	28	27

Fuente: <http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/11/39/a39>.

## **Dimensionamiento de las protecciones:**

Las protecciones son las responsables de actuar en caso de perturbaciones no anheladas producidas en el sistema, apartando los elementos por órdenes generadas por las mismas protecciones.

Las perturbaciones más comunes se producen por:

- Factores atmosféricos y climatología.
- Envejecimiento
- Influencia animal y vegetación
- Fallos electromecánicos
- Factores humanos
- Para que un sistema de protección sea eficiente debe cubrir las siguientes cualidades:
  - Fiabilidad: Los sistemas de protección deben proceder siempre y únicamente cuando sean necesarios.
  - Velocidad. Los sistemas de protección deben ser los más acelerados posibles para minimizar los efectos nocivos que puedan aparecer y separar las zonas sanas para permitir su continuo y óptimo funcionamiento.
  - Selectividad: Los sistemas de protección deben aislar la parte dañada aun en las peores condiciones
  - Sensibilidad: Facultad para detectarlas perturbaciones y sus efectos. Los casos más exagerados serán condiciones de mucha y poca carga.

Sistemas de protección para Baja Tensión:

- Interruptor: Permite soportar, establecer e interrumpir corrientes en condiciones de sobrecarga y normales. Durante un tiempo soporta intensidades de cortocircuito.
- Interruptor automático: Capaz de establecer, soportar e interrumpir corrientes en condiciones normales, además interrumpe corrientes de cortocircuito.
- Interruptor magnetotérmico: No permite disparos indirectos. Dispone de disparador magnético y disparador térmico

- Disparador térmico: Para sobrecargas y sobreintensidades pequeñas y prolongadas actúa la protección térmica.
- Disparador magnético: Para cortocircuitos actúa la protección magnética.
- Fusible: Provocan una apertura del circuito en el que está instalado por fusión, debido al calentamiento producido por una sobre intensidad.
- Seccionadores: Permiten la apertura o cierre con carga, crea aislamiento y distancia de seguridad (corte vivible).

Clasificación de fusibles de baja intensidad:

- Primera letra: g, de uso general capaz de cortar todos los valores de corriente desde 1,6.  $I_n$  hasta su poder de corte.
- Segunda letra:
  - R: Protección de circuitos con semiconductores
  - G: de uso general (cables y conductores)
  - B: Minería
  - M: Aparatos de maniobra y mando de motores
- Contactores: Son capaces de soportar, establecer e interrumpir corrientes nominales de servicio y sobrecarga, no cortocircuitos.
- Protecciones contra las sobrecargas: Se usan interruptores automáticos y magnetotérmicos, fusibles y contactores accionados con relés térmicos. Se deben desconectar antes de que la temperatura permitida llegue a tope.

$$I_B \leq I_N \leq I_Z \quad (1.15)$$

$$I_2 \leq 1.45 \cdot I_Z \quad (1.15)$$

Donde:

$I_B$ = Intensidad de empleo o utilización (A)

$I_N$ = Intensidad nominal del aparato de protección (A)

$I_Z$ =Intensidad máxima admisible por el elemento a proteger (A)

$I_2$ =Intensidad convencional de funcionamiento del aparato (A)

Para Interruptores magnetotérmicos:

$$I_2 = 1.45 \cdot I_N \quad (1.16)$$

Para fusibles tipo G:

$$I_2 = 1.60 \cdot I_N \quad (1.17)$$

### **Electro-bomba hidráulica**

En la actualidad existen bombas que no necesitan ningún componente electrónico externo; debido a que estas bombas, que son alimentadas por energías reutilizables, incorporen un variador de frecuencia integrado. Estas nuevas gamas de bombas pueden ser alimentadas por AC o DC con una amplia gama de voltajes (90 - 265 VAC / 90-340 VDC); también pueden conectarse directamente a paneles fotovoltaicos, baterías, aerogeneradores y grupos electrógenos, así como a la red eléctrica.

Un algoritmo especial en el software admite ajustar el rendimiento hidráulico para cada fuente de energía a su potencia máxima disponible maximizando el caudal de agua bombeada y el óptimo aprovechamiento de la energía otorgada.

Este tipo de bombas no requieren ningún componente electrónico externo; basta con conectar el cable de la bomba a la fuente de energía para empezar a bombear agua.

### **Sistema de control**

“Para el caso de aplicaciones de bombeo eólico, el uso de un sistema MPPT se encarga de ajustar la razón de conversión de los voltajes de modo de perdurar en el MPP asociado a la característica del generador empleado, asegurando la eficiencia máxima del sistema. Además, el sistema puede considerar en su algoritmo las limitaciones de corriente máxima admisible por la bomba a emplear.” (M.A. Navas M. 2008).

### **Tanque de agua**

Los tanques de almacenamiento en los sistemas de bombeo eólico cumplen dos funciones:

- Absorber los períodos de fluctuación del gasto entregado por el molino de viento, garantizando un flujo constante.
- Almacenar el agua bombeada durante los períodos de tiempo en los que no es usada directamente.

Para cumplir estas funciones el tanque debe ser lo suficientemente grande. El tamaño del mismo estará en función de determinadas informaciones como:

1. Frecuencia de los períodos de calma en cada mes.
2. Duración del período de calma más largo.
3. Demanda de agua (diaria o mensual).

El período de calma se define como el intervalo de tiempo durante el cual el aerogenerador no funciona, debido a que la velocidad del viento es insuficiente para vencer el par de arranque de la bomba. En la mayoría de las ubicaciones es frecuente que los períodos de calma no sobrepasen los 3 días.

La capacidad del tanque de almacenamiento se puede calcular de forma aproximada usando la siguiente fórmula:

$$C_T = D_{diario} \times P_{calma} \quad (1.18)$$

Donde:

$C_T$  = Capacidad tanque

$D_{diario}$  = Demanda diaria de agua

$P_{calma}$  = Período de calma más largo

### **Sistema de apoyo**

En este estudio se usará tanque de almacenamiento de agua en lugar de baterías.



## **Torres**

El objetivo de las torres es alcanzar una altura donde el viento sea más que suficiente, para poner en funcionamiento el aerogenerador. Mayormente se emplean torres tubulares de acero para gran potencia, mientras que las torres tubulares de acero con cable tensor y torres estructurales, se usan en pequeña potencia.

### **Torres tubulares de acero**

Estas torres son producidas de planchas de acero roladas. Las torres son de forma cónica, los tramos cónicos son soldados hasta completar la altura de la torre.

En las Figs. 18 y 19 se pueden ver torres tubulares cónicas de instalaciones de aerogeneradores de gran potencia.



Figura 19: Torres tubulares cónicas e instalaciones de aerogeneradores de gran potencia

Fuente:(E. García C. 2005)

### **Torres tubulares de acero con cables tensores**

Son Construidas usando tubos circulares de acero, de preferencia de pared gruesa, del tipo Schedule 80. Los fabricantes de aerogeneradores otorgan estas torres con su pluma de elevación en tramos de 2 ó 3 m con uniones embridadas para su posterior ensamble en el área de instalación.

Dependiendo del fabricante también se suministran los cables tensores y accesorios como templadores, grapas, anclajes, entre otros.

Las Figura 20 esquematiza la instalación de un aerogenerador con torre tubular con tensores y en la Tabla 4 se observa unas recomendaciones de diámetros de tubos según el diámetro de rotor.

Es mejor que el cable tensor sea flexible de secciones 7x7 ó 7x19 de acero galvanizado.

Tabla.4: Relación de diámetros de rotores y tubos para torres.

Diámetro de Rotor	Diámetro Nominal de Tubo	Diámetro exterior de Tubo
1 m	1,5 "	48,3 mm
2 m	2 "	60,3 mm
3 m	4 "	114,3 mm
5 m	6 "	165,1 mm

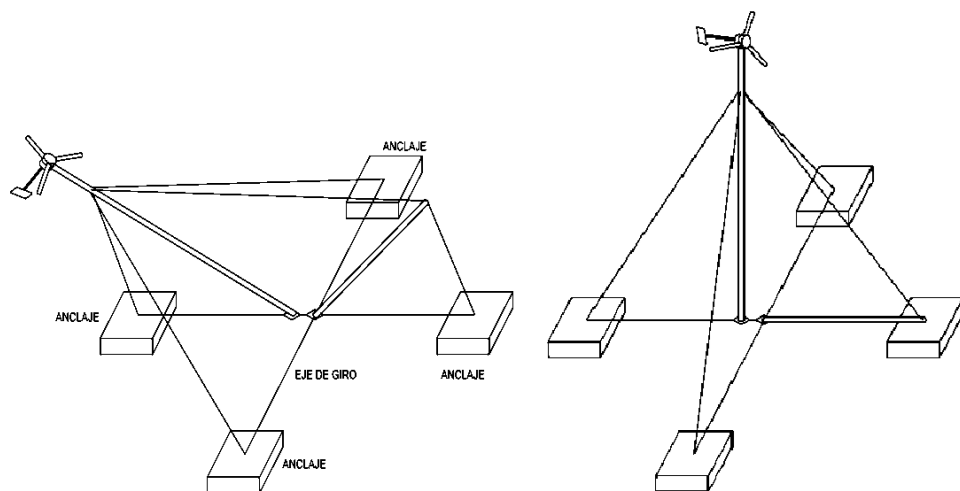


Figura 20: Izaje de torre con aerogenerador y aerogenerador elevado e instalado

Fuente:(E. García C. 2005)

### Torres estructurales

Este tipo de torres no demandan el uso de cables tensores, sin embargo, al estar sometidas a construcciones más pesadas y esfuerzos grandes resultan un poco más caras de lo normal. Buscando nuevas opciones se pueden construir nuevas torres estructurales esbeltas y con cables tensores, pero una torre tubular siempre va a resultar mejor y más eficaz.

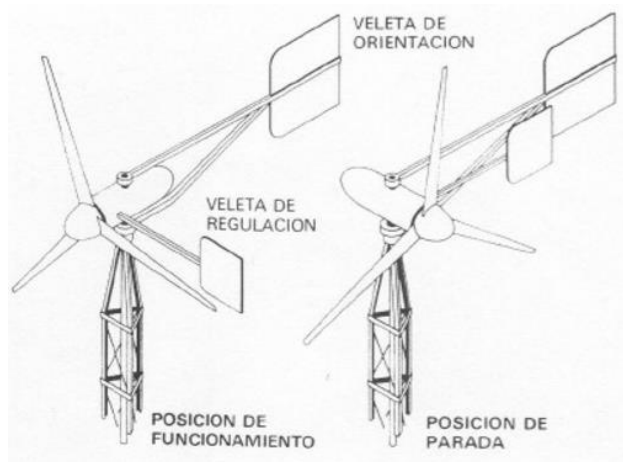


Figura 21: Aerogenerador con torre estructural

Fuente:(E. García C. 2005)

### **Necesidades energéticas de los sistemas de bombeo**

A la hora de establecer el potencial de aplicación de las fuentes renovables de energía es necesario contar con una estimación, al menos diaria o estacional, del consumo energético previsto, para de acuerdo a la disponibilidad de los recursos asociados a la climatología propia del emplazamiento (viento y radiación solar) y del rendimiento del sistema de conversión energética seleccionado (aerobomba, aerogenerador, panel solar térmico o fotovoltaico), determinar el grado de cobertura obtenible (que será mayor en el caso de los sistemas con aportación energética convencional), o las dimensiones de los componentes del sistema energético aislado o autónomo necesario para proporcionar de forma completa la energía requerida en cada caso.

Para el bombeo de agua, la demanda energética va a estar asociada a dos variables: una es la demanda de presión del sistema y la otra es la demanda en caudal.

La potencia teórica de la bomba puede estimarse de forma inicial mediante la siguiente expresión:

$$P = \rho_{\text{agua}} gHQ \quad (1.19)$$

Donde:

$P$  = Potencia hidráulica de la bomba

$\rho_{agua}$  = Densidad del agua ( $kg/m^3$ )

$g$  = Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$Q$  = Caudal volumétrico ( $m^3/s$ )

$H$  = Presión en términos de altura (m.c.a)

El resultado de esta operación se expresa en vatios.

Lógicamente, la potencia real será mayor, debido a los rendimientos de los sistemas de conversión eólico y solar considerados, así como al rendimiento electro-mecánico del sistema motor-bomba, tal como se verá más adelante.

Por otro lado, el recurso hídrico puede encontrarse en forma de aguas superficiales (río, lagunas, presas, etc.) o de aguas subterráneas, siendo esta última la situación más habitual a la hora de considerar la demanda en presión de los sistemas de bombeo, ya que una primera aproximación al análisis del consumo energético del proceso deberá tener en cuenta la necesidad de impulsar cierto caudal de agua por encima de la profundidad del acuífero. (M. Castro G. 2011).

La demanda en caudal es propia de la aplicación del recurso hídrico considerado, siendo lo habitual plantear, como ya se ha mencionado, dos situaciones distintas:

- a) La demanda de riego de los cultivos.
- b) El abastecimiento de agua a núcleos humanos o explotaciones ganaderas.

La característica principal de la primera situación es la estacionalidad del consumo, ya que el riego de los cultivos está determinado precisamente por la existencia, o no, de lluvias y por la evapotranspiración de las plantas, ambas cuestiones con una clara dependencia climática. En el caso del abastecimiento, la demanda suele ser más uniforme a lo largo del año.

## **Aguas subterráneas**

Las aguas subterráneas son aquellas que circulan a través de las cavidades y los intersticios o poros del terreno, bajo su superficie, y que poseen características físicas y químicas propias, las cuales les son transmitidas por su contacto con las rocas a través de las cuales circulan. Las aguas subterráneas tienen su origen en la infiltración directa de las lluvias en el terreno o de la infiltración indirecta de los ríos, lagos, etc.

### **Formas de captación:**

Las formas de captación son todas aquellas obras construidas con la finalidad de extraer el agua contenida en un depósito subterráneo. Consisten en realizar una excavación en el suelo, cuyas dimensiones dependen de la profundidad a que se encuentre la capa que contiene agua (acuífero). El fondo de la excavación debe estar por debajo del nivel del agua y de las paredes en contacto con el acuífero.

En las obras de captación lo que más interesa es sacar los máximos volúmenes de agua que permita el acuífero, por lo que se hace necesario incrementar las dimensiones de la excavación para así incrementar su contacto con el acuífero. Según sean incrementadas las dimensiones horizontales o las verticales, las obras se clasifican en:

- **Galerías filtrantes.** Cuando son incrementadas las dimensiones horizontales, es decir, las obras tienen un contacto horizontal con el acuífero. Entre ellas se encuentran las zanjas. Su utilización se recomienda en zonas donde exista peligro de contaminación marina, especialmente en islas pequeñas o cayos, donde se las conoce como "trincheras". También los túneles y drenajes constituyen galerías filtrantes.
- **Pozos.** La obra de captación es llamada pozo cuando se incrementa el contacto vertical de la excavación con el acuífero. En este caso, la obra es un agujero vertical. Generalmente, los molinos de viento se instalan directamente sobre el pozo.

Entre los distintos tipos de pozos, se encuentran los siguientes:

- Pozos excavados. Son poco profundos y se excavan generalmente a mano, normalmente de un diámetro de 1,5 m a 3 m. La profundidad es variable, dependiendo de la profundidad del acuífero, pero suele estar entre 8 m y 10m.
- Pozos profundos o tubulares. Son los más utilizados en la actualidad.

Existen diferentes métodos para su construcción, pudiéndose hacer a mano o con máquinas perforadoras, bien sean rotatorias o percutoras.

Un elemento muy importante a tener en cuenta es la capacidad potencial de un pozo, lo que se define como la propiedad que tiene el mismo para entregar un caudal determinado sin producir un descenso excesivo del manto. Depende del nivel estático del agua, de la curva de depresión del manto, de la permeabilidad del terreno y de la profundidad y diámetro del pozo (figuras 22, 23 y 24).

Las características fundamentales del pozo son:

- Nivel estático del agua: Es la distancia desde el terreno natural hasta el nivel del agua en el pozo cuando la bomba no está trabajando. También se le conoce como nivel del manto freático, profundidad del espejo de agua o nivel de yacencia.
- Descenso del nivel del agua: Es la distancia entre el nivel estático del agua y el nivel de la misma cuando la bomba está trabajando, y por tanto, varía en dependencia de la capacidad de esta última.

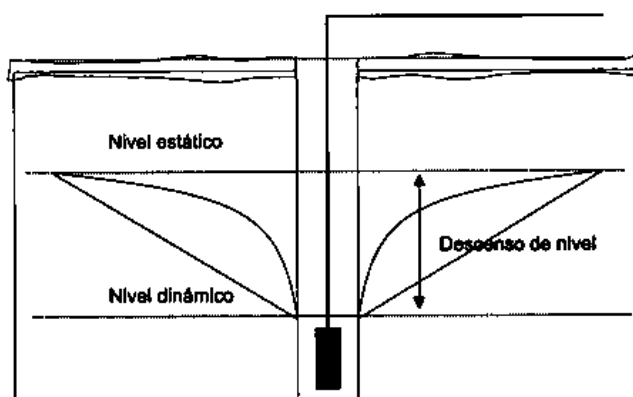


Figura 22: Efecto de la extracción de agua provocada por la bomba sobre el nivel del pozo.

Fuente: (M. Castro G. 2011).

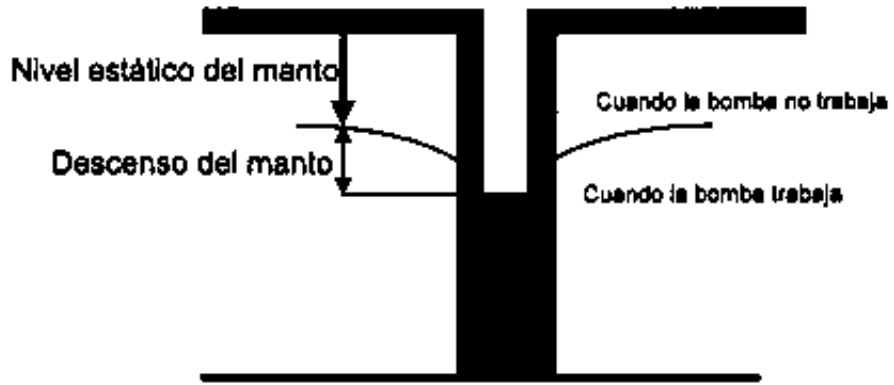


Figura: 23. Descenso del manto provocado por la bomba sobre el nivel del pozo.

Fuente: (M. Castro G. 2011).

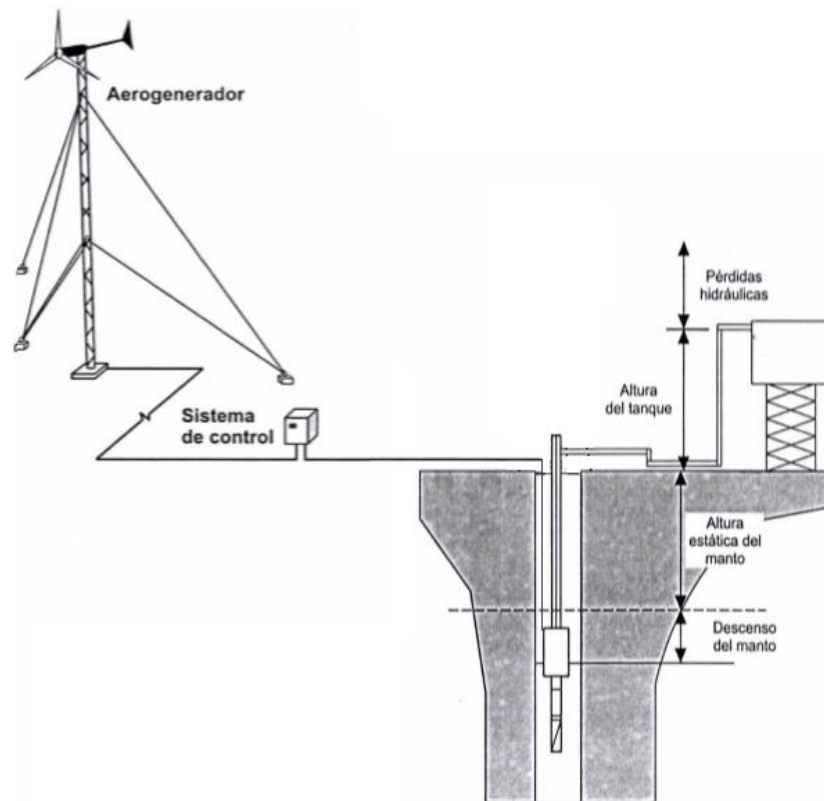


Figura 24. Cargas de bombeo.

Fuente: (Elaboración propia).

En resumen, para efectuar el bombeo de agua en pozos habrá que tener en cuenta diferentes aspectos que serán de obligado cumplimiento a la hora de seleccionar el esquema de la instalación de impulsión:

- Profundidad total del pozo y diámetros del mismo por intervalos.

- Nivel del espejo de agua (nivel del manto freático), y sobre todo, el que caracteriza al período seco. Descenso máximo del manto freático.
- Capacidad potencial de entrega del agua del pozo (gasto) y razón de restitución o grado de fertilidad.
- Calidad de las aguas, tanto química (dosis de mineralización adecuadas) como bacteriológica.

### **Análisis de la demanda en presión**

La presión total de bombeo requerida debe tener en cuenta los siguientes componentes (figura 23):

- **Nivel estático del manto freático:** Es la distancia desde el suelo hasta el nivel del agua en el pozo cuando la bomba no está trabajando. Como ya se ha indicado, es importante que esta distancia se mida durante la estación de sequía que es cuando el agua en el pozo se encuentra en su nivel más bajo.
- **Descenso del nivel del agua:** Es la distancia entre el nivel estático del manto y el nivel del agua cuando la bomba está funcionando. Este nivel varía con la capacidad de la bomba. Como se ha evaluado, las pruebas deben ser realizadas en el mes de mayor sequía del año que es cuando el nivel de agua baja.
- **Altura del agua en el tanque de almacenamiento:** Es la altura de la entrada del agua en el tanque, medida desde el suelo.
- **Pérdidas hidráulicas en las tuberías:** Es la carga adicional que soportará la bomba, consecuencia de la fricción entre el agua y las paredes de la tubería, así como en los accesorios.

Las pérdidas hidráulicas dependen de varios factores:

- Longitud de la tubería.
- Diámetro de la tubería.
- Caudal del agua a través de la tubería.
- Densidad y viscosidad del agua que circula.
- La rugosidad de la pared interior de la tubería.



La altura hidráulica total de bombeo es la presión efectiva que debe vencer la bomba. Es la suma de la altura estática ( $H_g$ ) y la dinámica ( $H_d$ ).

La altura estática o geométrica,  $H_g$  es la distancia desde el nivel del agua en el pozo (también conocido como nivel del manto freático, profundidad del espejo de agua o nivel de yacencia) hasta el punto más elevado por donde ésta sale. Es necesario considerar que el nivel del agua en el pozo baja, al producirse el bombeo, hasta una profundidad en la que la salida del caudal de agua se iguala con la entrada de caudal en el pozo.

Cuando no se posee información sobre el descenso y las pérdidas hidráulicas, se puede efectuar una estimación preliminar de la suma de ambos, considerándola un 10%- 15% de la suma de la altura estática del manto más la altura del tanque.

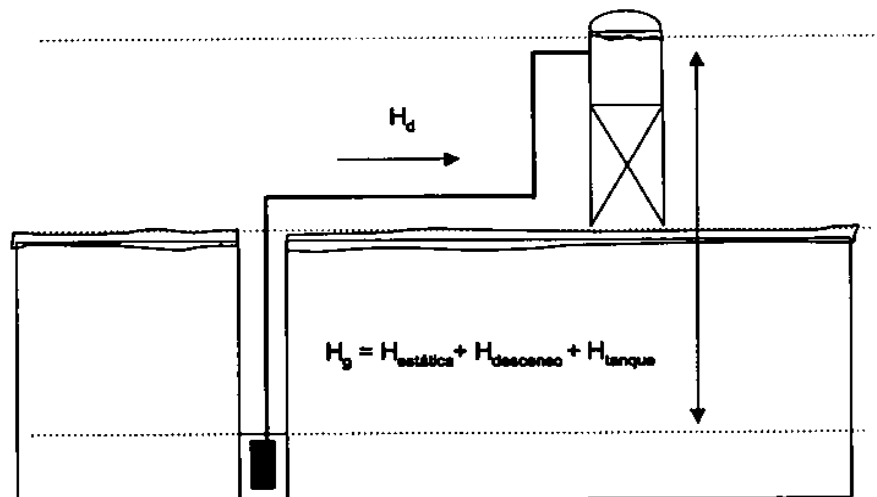


Figura 25: Cargas de presión a considerar en una instalación de bombeo.

Fuente: (M. Castro G. 2011).

La altura dinámica,  $H_d$  es la consecuencia de la caída de presión debida a cuando un líquido circula por el interior de una tubería. Esta disminución de la carga dependen de la longitud de la tubería, de su diámetro y del coeficiente de fricción  $f$ , el cual depende a su vez de la rugosidad de la superficie interior del tubo y de las peculiaridades de la corriente (régimen laminar o turbulento)

$$H_d = fLv^2/(2dg) \quad (1.20)$$

Donde:

$v$  = Velocidad media del fluido (m/s)

$d$  = Diámetro hidráulico de la tubería (m)

$g$  = Aceleración de la gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$H_d$  = Altura dinámica (m c.a., metros de columna de agua)

$f$  = Coeficiente de fricción de la tubería

$L$  = Longitud de la tubería (m)

Existen muchas fórmulas, nomogramas y ábacos para la determinación de estas pérdidas. Uno de los ábacos más difundidos universalmente es el conocido diagrama de Moody. La determinación de la pérdida de carga se puede realizar mediante la tabla 5.

Tabla 5: Pérdidas de carga en tuberías normales. (Catálogos GRUNDFOS).

Las cifras en negrita indican la velocidad en m/s.

Las cifras sin negrita indican la pérdida de carga en metros por cada 100 metros de tubería recta.

Cantidad de agua			Pérdidas de carga en tuberías normales														
m³/h	Litros/min.	Litros/seg.	Diámetro nominal de la tubería en pulgadas y diámetro interior en (mm)														
			½"	¾"	1"	1¼"	1½"	2"	2½"	3"	3½"	4"	5"	6"			
0,6	10	0,16	0,855 9,910	0,470 2,407	0,292 0,784												
0,9	15	0,25	1,282 20,11	0,705 4,862	0,438 1,570	0,249 0,416											
1,2	20	0,33	1,710 33,53	0,940 8,035	0,584 2,588	0,331 0,677	0,249 0,346										
1,5	25	0,42	2,138 49,93	1,174 11,91	0,730 3,834	0,415 1,004	0,312 0,510										
1,8	30	0,50	2,565 69,34	1,409 16,50	0,876 5,277	0,498 1,379	0,374 0,700	0,231 0,223									
2,1	35	0,58	2,993 81,54	1,644 21,75	1,022 8,949	0,581 1,811	0,436 0,914	0,289 0,291									
2,4	40	0,67		1,879 27,66	1,168 8,820	0,664 2,290	0,499 1,160	0,308 0,368									
3,0	50	0,83		2,348 41,40	1,460 13,14	0,830 3,403	0,623 1,719	0,385 0,544	0,229 0,159								
3,6	60	1,00		2,819 57,74	1,751 18,28	0,996 4,718	0,748 2,375	0,462 0,751	0,275 0,218								
4,2	70	1,12		3,288 76,49	2,043 24,18	1,162 6,231	0,873 3,132	0,539 0,988	0,321 0,287	0,231 0,131							
4,8	80	1,33			2,335 30,87	1,328 7,940	0,997 3,988	0,616 1,254	0,367 0,363	0,263 6,164							
5,4	90	1,50			2,627 38,30	1,484 9,828	1,122 4,927	0,693 1,551	0,413 0,449	0,269 0,203							
6,0	100	1,67			2,919 46,49	1,660 11,90	1,247 5,972	0,770 1,875	0,459 0,542	0,329 0,244	0,248 0,124						
7,5	125	2,08			3,649 70,41	2,075 17,93	1,558 8,967	0,962 2,802	0,574 0,809	0,412 0,365	0,310 0,185	0,241 0,101					
9,0	150	2,50				2,490 25,11	1,870 12,53	1,154 3,903	0,668 1,124	0,494 0,506	0,372 0,256	0,289 0,140					
10,5	175	2,92				2,904 33,32	2,182 16,66	1,347 5,179	0,803 1,488	0,576 0,670	0,434 0,338	0,337 0,184					
12	200	3,33				3,319 42,75	2,493 21,36	1,539 6,624	0,918 1,901	0,659 0,855	0,496 0,431	0,385 0,234	0,251 0,084				
15	250	4,17				4,149 64,86	3,117 32,32	1,924 10,03	1,147 2,860	0,823 1,282	0,620 0,646	0,481 0,350	0,314 0,126				
18	300	5,00					3,740 45,52	2,309 14,04	1,377 4,009	0,988 1,792	0,744 0,903	0,577 0,488	0,377 0,175	0,263 0,074			
24	400	6,67					4,987 78,17	3,078 24,04	1,836 8,828	1,317 3,053	0,982 1,530	0,770 0,829	0,502 0,294	0,351 0,124			
30	500	8,33						3,848 38,71	2,295 10,40	1,647 4,622	1,240 2,315	0,962 1,254	0,628 0,445	0,439 0,187			
36	600	10,0						4,618 51,84	2,753 14,82	1,976 6,505	1,488 3,261	1,155 1,757	0,753 0,623	0,526 0,260			
42	700	11,7							3,212 19,52	2,306 8,693	1,736 4,356	1,347 2,345	0,879 0,831	0,614 0,347			
48	800	13,3							3,671 25,20	2,635 11,18	1,984 5,582	1,540 3,009	1,006 1,066	0,702 0,445			
54	900	15,0							4,130 31,51	2,964 13,97	2,232 6,983	1,732 3,762	1,130 1,328	0,790 0,555			
60	1000	16,7							4,589 38,43	3,294 17,06	2,480 8,521	1,925 4,595	1,256 1,616	0,877 0,674			
75	1250	20,8								4,117 26,10	3,100 13,00	2,406 7,010	1,570 2,458	1,097 1,027			
90	1500	25,0								4,941 38,97	3,720 18,42	2,887 9,892	1,883 3,468	1,318 1,444			
105	1750	29,2									4,340 24,76	3,368 13,30	2,197 4,665	1,535 1,934			
120	2000	33,3									4,960 31,94	3,850 17,16	2,511 5,895	1,754 2,496			
150	2500	41,7										4,812 26,26	3,139 9,218	2,193 3,807			
180	3000	50,0											3,767 13,05	2,832 5,417			
240	4000	66,7												5,023 22,72	3,509 8,926		
300	5000	83,3													4,388 14,42		
Codos de 90°, válvulas de compuerta			1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,6	1,7	2,0	2,5			
Uniones en T, válvulas de retención			4,0	4,0	4,0	5,0	5,0	5,0	6,0	6,0	6,0	7,0	8,0	9,0			

La tabla está calculada de acuerdo con la fórmula de H. Lang a = 0,02 y para una temperatura del agua de 10 °C.

La pérdida de carga en codos, válvulas de compuerta, uniones en T y válvulas de retención es equivalente a los metros de tubería recta indicados en las dos últimas líneas de la tabla. Para hallar la pérdida de carga en válvulas de pie, multiplicar la pérdida en las uniones en T por dos.

Tabla 6: Pérdidas de carga en tuberías de plástico. (Catálogos GRUNDFOS).

Las cifras en **negrita** indican la velocidad en m/s.

Las cifras sin **negrita** indican la pérdida de carga en metros por cada 100 metros de tubería recta.

Cantidad de agua			PELM/PEH PN 10														
m <sup>3</sup> /h	Litros/min.	Litros/seg.	PELM					PEH									
			25 20,4	32 26,2	40 32,6	50 40,8	63 51,4	75 61,4	90 73,6	110 90,0	125 102,2	140 114,6	160 130,8	180 147,2			
0,6	10	0,16	0,49 1,8	0,30 0,66	0,19 0,27	0,12 0,065											
0,9	15	0,25	0,76 4,0	0,46 1,14	0,3 0,6	0,19 0,18	0,12 0,63										
1,2	20	0,33	1,0 6,4	0,61 2,2	0,39 0,9	0,25 0,28	0,16 0,11										
1,5	25	0,42	1,3 10,0	0,78 3,5	0,5 1,4	0,32 0,43	0,2 0,17	0,14 0,074									
1,8	30	0,50	1,53 13,0	0,93 4,6	0,6 1,9	0,38 0,57	0,24 0,22	0,17 0,092									
2,1	35	0,58	1,77 16,0	1,08 6,0	0,69 2,0	0,44 0,70	0,28 0,27	0,2 0,12									
2,4	40	0,67	2,05 22,0	1,24 7,5	0,80 3,3	0,51 0,93	0,32 0,35	0,23 0,16	0,16 0,063								
3,0	50	0,83	2,64 37,0	1,64 11,0	0,99 4,8	0,63 1,40	0,4 0,50	0,28 0,22	0,2 0,09								
3,6	60	1,00	3,06 43,0	1,85 15,0	1,2 6,5	0,76 1,90	0,48 0,70	0,34 0,32	0,24 0,13	0,16 0,050							
4,2	70	1,12	3,43 50,0	2,08 18,0	1,34 8,0	0,86 2,50	0,54 0,83	0,38 0,38	0,26 0,17	0,18 0,068							
4,8	80	1,33		2,47 25,0	1,59 10,5	1,02 3,00	0,64 1,20	0,45 0,50	0,31 0,22	0,2 0,084							
5,4	90	1,50		2,78 30,0	1,8 12,0	1,15 3,50	0,72 1,30	0,51 0,57	0,35 0,26	0,24 0,092	0,18 0,05						
6,0	100	1,67		3,1 39,0	2,0 16,0	1,28 4,6	0,8 1,80	0,56 0,73	0,39 0,30	0,26 0,12	0,2 0,07						
7,5	125	2,08		3,86 50,0	2,49 24,0	1,59 6,6	1,00 2,50	0,70 1,10	0,49 0,50	0,33 0,18	0,25 0,10	0,20 0,055					
9,0	150	2,50			3,00 35,0	1,91 8,6	1,20 3,5	0,84 1,40	0,59 0,63	0,39 0,24	0,30 0,13	0,24 0,075					
10,5	175	2,92			3,5 38,0	2,23 11,0	1,41 4,3	0,99 1,80	0,69 0,78	0,48 0,30	0,36 0,18	0,28 0,09					
12	200	3,33			3,99 50,0	2,55 14,0	1,60 5,5	1,12 2,40	0,78 1,0	0,52 0,40	0,41 0,22	0,32 0,12	0,26 0,065			0,25 0,065	
15	250	4,17				3,19 21,0	2,01 8,0	1,41 3,70	0,98 1,50	0,66 0,57	0,51 0,34	0,40 0,18	0,31 0,105	0,25 0,06			0,25 0,06
18	300	5,00				3,82 28,0	2,41 10,5	1,69 4,60	1,18 1,95	0,78 0,77	0,61 0,45	0,48 0,25	0,37 0,13	0,29 0,085			0,29 0,085
24	400	6,67						3,21 19,0	2,26 8,0	1,57 3,60	1,06 1,40	0,81 0,78	0,65 0,44	0,50 0,23	0,39 0,15		
30	500	8,33						4,01 28,0	2,81 11,5	1,96 5,0	1,1 2,0	1,02 0,63	0,81 0,33	0,62 0,21	0,49 0,21		
36	600	10,0						4,82 37,0	3,38 15,0	2,36 6,6	1,57 2,60	1,22 1,50	0,97 0,82	0,74 0,45	0,59 0,28		
42	700	11,7						5,64 47,0	3,95 24,0	2,75 8,0	1,84 3,50	1,43 1,90	1,13 1,10	0,87 0,60	0,69 0,40		
48	800	13,3							4,49 26,0	3,13 11,0	2,09 4,5	1,62 2,60	1,29 1,40	0,99 0,81	0,78 0,48		
54	900	15,0							5,07 33,0	3,63 13,5	2,36 5,5	1,83 3,20	1,46 1,70	1,12 0,95	0,98 0,58		
60	1000	16,7							5,64 40,0	3,93 16,0	2,63 6,7	2,04 3,90	1,62 2,2	1,24 1,2	0,96 0,75		
75	1250	20,8								4,88 25,0	3,27 9,0	2,54 5,0	2,02 3,0	1,56 1,6	1,22 0,95		
90	1500	25,0								5,88 33,0	3,93 8,0	3,06 4,1	2,42 4,1	1,86 2,3	1,47 1,40		
105	1750	29,2								6,86 44,0	4,59 17,5	3,56 9,7	2,83 5,7	2,17 3,2	1,72 1,9		
120	2000	33,3									5,23 23,0	4,06 13,0	3,23 7,0	2,48 4,0	1,96 2,4		
150	2500	41,7									6,56 34,0	5,08 18,0	4,04 10,5	3,10 6,0	2,46 3,5		
180	3000	50,0									7,86 45,0	6,1 27,0	4,86 14,0	3,72 7,6	2,94 4,89		
240	4000	66,7										8,13 43,0	6,47 24,0	4,96 13,0	3,92 7,5		
300	5000	83,3											8,08 33,0	6,2 18,0	4,89 11,0		

La tabla está basada en un nomograma.

Rugosidad: K = 0,01 mm.

Temperatura del agua: t° = 10 °C.

Si el sistema tiene otro tipo de accesorios (válvulas, codos, té, reducciones, grifos, etc.) se puede calcular la pérdida de carga en cada elemento adicional como:

$$H_d = \left( \sum K v^2 \right) / (2g) \quad (1.21)$$

Donde:

$H_d$  = Altura dinámica (m c.a., metros de columna de agua)

$K$  = Coeficiente de pérdidas singulares

$v$  = Velocidad media del fluido (m/s)

$g$  = Aceleración de la gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>)

Tabla 7: Cuantificación de pérdidas en accesorios.

<i>Accesorios</i>	<i>Coeficiente K</i>
Unión de depósitos a tubería. Conexión a ras de pared	0,500
Unión de depósitos a tubería. Tubería rasante	1,000
Unión de depósitos a tubería. Conexión abocinada	0,005
De tubería a depósito	1,000
Codo 45°	0,350 - 0,450
Codo 90°	0,500 - 0,750
Unión en T	1,500 - 2,000

Otra posible manera de proceder, a la hora de calcular las pérdidas de carga del circuito debidas a los accesorios del mismo, es utilizando las longitudes equivalentes. Se entiende como longitud equivalente a la longitud de tubería (de igual tipo que la empleada en el circuito) que crea la misma pérdida de carga que el accesorio correspondiente.

Así pues, si sabemos la longitud equivalente de cada accesorio, sólo nos quedará sumarlas, y tratar al resultado como si fueran metros de tubería, es decir, calculando la pérdida de carga de dicha longitud total equivalente a partir de la tabla 5.

En la tabla 8 se encuentran las longitudes en metros correspondientes a algunos accesorios típicos.

Hay que notar que en esta tabla se exponen los valores medios aproximados de longitud equivalente, que se deben utilizar en el caso de que no dispongamos de mejores datos facilitados por el fabricante de los accesorios.

Tabla 8

Diámetro del tubo	Codo de 90°	Curva de 90°	Válvula de pie	Válvula de retención	Válvula de compuerta
25	2,0	1	4	4	1
32	2,5	2	5	4	2
40	2,5	2	5	4	2
50	2,5	2	6	5	2
60	3,0	2	6	5	3
80	3,0	2	7	6	3
100	4,0	3	8	6	3
125	4,0	3	10	8	4
150	5,0	3	12	10	4
200	6,0	4	14	12	5
250	7,0	4	18	15	6
300	8,0	5	24	20	7
350	8,0	5	30	25	8

### **Análisis de demandas hídricas**

El diseño de cualquier sistema hidráulico consiste en estimar el volumen de agua a bombear según la demanda. Se debe hacer una estimación del consumo diario de agua en diferentes etapas del año, además del crecimiento de dicho consumo en un futuro próximo, que debe ser igualmente satisfecho por el sistema diseñado. La estimación debe hacerse teniendo en cuenta el consumo de agua doméstico y las otras necesidades, tales como riego, el abastecimiento de agua para ganado y otros propósitos agrícolas y sociales, si existiesen.

### **Determinación de la demanda doméstica**

La forma tradicional de estimar la demanda doméstica de agua es multiplicar el consumo per cápita por el número de personas al final del

período de diseño. El consumo per cápita variará en dependencia con los servicios domésticos a satisfacer y con la estación del año.

La demanda de agua para la población dependerá del número de habitantes.

Para viviendas aisladas el consumo será de unos 40 LPD (Litros por Día).

### **Determinación de la demanda para usos sociales**

El consumo para las necesidades sociales comprende el suministro de agua para escuelas, hospitales, centros de recreación y otros usos sociales. En este caso, igualmente, debe tenerse en cuenta el crecimiento futuro de estas demandas sobre la base de estimaciones locales.

### **Demanda de agua para la ganadería**

El consumo puede ser estimado a partir de la cantidad de animales y la demanda por animal según estación del año o mes (tabla 9). Para estos cálculos es necesario tener en cuenta la tasa de crecimiento de la población ganadera. En lo concerniente al ganado, las necesidades varían según las razas, épocas, duración de estabulado, etc.

Tabla 9: Distribución de consumo de agua según tipo de animal

<i>Tipo de animal</i>	<i>Consumo diario (litros/cabeza)</i>
Vaca en producción	200
Vaca	120
Buey	120
Toro	120
Novilla	90
Caballo de trabajo	80
Añojo	60
Cerdo	40
Ternero	30
Oveja	15
Cabra	5
Aves	2

Estimación de períodos de operación medios de 5 años o más, la tasa de crecimiento de la población local (personas y/o animales) debe de tenerse en cuenta en el momento de estimar la demanda de agua para uso doméstico, social y ganadero. La tabla 10 puede resultar útil para el cálculo del incremento de la población, para varias tasas de crecimiento.

Tabla 10: Incremento de la población para varias tasas de crecimiento.

Tasa anual de crecimiento	% de incremento de la población		
	5 años	10 años	20 años
1 %	5	10	22
2 %	10	22	48
3 %	16	34	81
4 %	22	48	119
5 %	28	63	265
6 %	34	79	321

La tabla anterior muestra el incremento de la población, en tanto por ciento (%) se ha calculado a partir de la fórmula del interés compuesto  $(1 + c)^t$ , siendo esta ampliamente utilizada para estudios demográficos,

Donde:

$c$  = tasa anual de crecimiento (en tanto por uno)

$t$  = tiempo en años (para los cuales queremos calcular el rendimiento)

Así, para  $e = 3 \%$  y  $t = 20$  años, tenemos:

$(1 + 0.03)^{20} = 1.81$ , se obtiene 81 % de incremento de la población.

### **Demanda de agua para riego**

Consiste en determinar cuál es la cantidad de agua necesaria que deben de tener las áreas de cultivo para asegurar su necesidad o, aunque sea una fracción de esta.

Cuando el agua de riego sea el único aporte de agua del que la gente dispone, la necesidad de la misma será igual o al menos igual a las necesidades básicas hídricas para el cultivo siendo mayor cuando existan



y menor cuando la planta puede satisfacer sus necesidades hídricas a partir de otros recursos (lluvia, reservas de agua en el suelo, etc.).

Por tanto, para poder planificar los riegos, en frecuencia como en dosis, se necesita conocer los factores y condiciones, las características del suelo y del propio cultivo (especie, variedad, estado fenológico, adaptación al hábitat de cultivo, etc.), existiendo tablas estandarizadas para las variedades de plantas más habituales. Un ejemplo orientativo se muestra en la tabla 11.

Tabla 11: Datos de ejemplo de diferentes cultivos.

<i>Cultivo</i>	m <sup>3</sup> /hectárea/día (1 Ha = 10 000 m <sup>2</sup> )
Arroz	100
Granjas rurales	60
Frutales	55
Algodón	55
Hortalizas	50
Cereales	45
Patatas	45
Maíz	40
Tomate	40
Cítricos	35
Olivo	15

## **Diseño y selección de un sistema de bombeo eólico-eléctrico**

### **Análisis de la demanda energética**

El objetivo de este procedimiento es ofrecer la información necesaria para diseñar y seleccionar un sistema de bombeo accionado por máquinas eólicas, al objeto de satisfacer las necesidades de agua a una determinada zona rural. Se explica el proceso paso a paso y se presentan las fórmulas necesarias para la realización del cálculo.

El proceso de análisis puede ser aplicado tanto para aerobombas mecánicas, como para sistemas eólico-eléctricos de bombeo. En este caso se aplicará al último mencionado.

En este paso se realiza una estimación de la energía requerida sobre la base de la demanda de agua y de la carga total de bombeo. El consumo diario promedio de agua ( $m^3/día$ ) en diferentes épocas del año (mes, trimestre, estación del año, etc.) debe estimarse para el sitio seleccionado, incluyéndose la demanda de agua para uso doméstico, ganadería, agricultura y otras demandas de la comunidad.

Además, se calcula la carga total de bombeo, que incluye la carga estática más las pérdidas de carga de la tubería para las condiciones del lugar. El requerimiento para el bombeo de agua se expresa en  $m^3 \cdot m$ , lo que se denomina Producto Volumen-Carga (PVC), que es una medida de la energía requerida para dicho bombeo. El cálculo del volumen de agua a bombear (demanda) se debe hacer según lo explicado.

### **Disposición del recurso eólico**

La información de la velocidad del viento en el sector el Palomar, se recurrirá al atlas eólico del Perú, actualizado el 2016, la base de datos de la nasa y del sistema de energía eólica existente en la parcela (la generación anual de energía).

### **Evaluación del recurso eólico**

El siguiente paso consiste en recopilar y analizar los datos del viento disponibles.

Con los datos recopilados se procederá a calcular las velocidades medias de cada mes y, además se determinará los valores de desviación estándar mes por mes, promediando para un período de tiempo que deberá de ser lo más amplio posible. Lo más adecuado podría ser realizar mediciones en el propio sitio, lo cual por lo general no es posible.

Debido a que debe cumplirse la ecuación de conservación de la masa en el flujo de aire (condición de continuidad), no se puede extraer toda la potencia eólica disponible en el viento ( $A$ ).

La potencia requerida para el bombeo y la entregada por la máquina vienen dadas por las siguientes ecuaciones, respectivamente:

$$P = \rho_{agua} gHQ/\eta_v \eta_m \quad (1.22)$$

$$P_a = \frac{1}{2} \rho_{aire} (\bar{v})^3 FPE A_r \eta_r \quad (1.23)$$

Donde:

$(\bar{v})$  = Velocidad media del viento

$FPE$  = factor de patrón de energía

$\rho_{aire}$  = densidad del aire ( $Kg/m^3$ )

$A_r$  = área del rotor

$\eta_v$  = rendimiento volumétrico de la bomba

$\eta_m$  = rendimiento mecánico de la bomba

$\eta_r$  = eficiencia total del rotor

La potencia eólica aprovechable como se ve en la ecuación (1.23), depende de la característica de funcionamiento de la máquina:

$$P_a/A = \frac{1}{2} \rho_{aire} (\bar{v})^3 FPE \quad (1.24)$$

Donde:

- $FPE$  = Factor patrón de energía, el cual se determina a partir del factor de forma  $k$  de la distribución de Weibull según:

$$FPE = \frac{\overline{(v^3)}}{(\bar{v})^3} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (1.25)$$

La selección de la velocidad del viento mensual de diseño puede ser ahora determinada. El mes de diseño es el mes donde la razón entre la potencia disponible del viento y el producto Volumen-Carga (PVC) alcanza el valor mínimo. Lógicamente, si el sistema satisface las necesidades en este mes, satisfará las del resto de meses. Si el PVC es constante, el mes de diseño es el mes de menor potencia disponible de viento.

## Dimensionado y factibilidad del sistema

A continuación, se contempla el cálculo aproximado del diámetro del rotor eólico requerido y un análisis de la factibilidad técnica del sistema, en dependencia a nuestro requerimiento total para el bombeo de agua (PVC) y el valor de potencia eólica disponible.

### Cálculo aproximado del diámetro del rotor

Una situación que puede presentarse, es conocer solamente la velocidad media anual del viento, en el lugar donde se va a instalar el molino de viento. En este caso el procedimiento a seguir para calcular el área necesaria del rotor eólico consiste en la igualación de la potencia generada en el rotor (1.23) y la potencia necesaria (1.22) para elevar la cantidad de agua requerida hasta la altura  $H$ . Luego de las simplificaciones pertinentes, obtenemos:

$$D_r = \sqrt{\frac{C H Q}{(\bar{v})^3 F P E}} \quad (1.26)$$

Donde  $C$  es una constante que depende del tipo de bombeo, con un valor de  $C = 3,01$  para el bombeo mecánico. Este valor se obtiene considerando  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ , la densidad del aire igual a  $1,225 \text{ kg/m}^3$  y  $\eta_r \eta_b = 8\%$  (bombeo mecánico).

En el caso de bombeo eléctrico se puede estimar un  $\eta_r \eta_b = 12\%$  y, por tanto,  $C = 2$ .

Siendo:

$$\eta_b = \eta_m \eta_v$$

### Factibilidad técnica

Una vez calculado el diámetro aproximado del rotor ( $D_r$ ), éste debe compararse con los diámetros de rotores de los aerogeneradores comercialmente disponibles, con el fin de verificar si el diseño es factible técnicamente.

Es necesario poseer la mayor cantidad de datos sobre las máquinas disponibles comercialmente para poder hacer una correcta selección. Si lo

anterior no fuese suficiente para cubrir las necesidades, se debe pensar en la instalación de más de un aerogenerador o quizás en otro de mayor potencia.

Si el resultado no es factible técnicamente porque el diámetro calculado se encuentra fuera del rango disponible, se puede intentar elevar la altura de la torre. Una torre más alta implica una mayor velocidad media del viento, y esto puede tratar de equiparar la diferencia con los rotores comerciales.

### **Comprobación del gasto entregado por el sistema de bombeo diseñado**

Habiendo seleccionado el sistema de bombeo eólico y sus componentes, se puede pasar a comprobar si éste entrega la cantidad de agua que se exige para cada mes. Si todos los pasos se han verificado correctamente, la demanda de agua de cada mes debe ser satisfecha.

La ecuación que permite determinar el gasto de agua ( $\rho_{agua} = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) que se entrega el sistema diariamente ( $\text{m}^3/\text{día}$ ), es la siguiente:

$$Q = \left[ 3.6 \times 24 \left( \frac{\pi}{4} \right) \left( \frac{1}{2} \right) \rho_{aire} (\bar{v})^3 FPE \eta D_r^2 \right] / (Hg) \quad (1.27)$$

Donde:

$Q$  = Demanda de agua ( $\text{m}^3/\text{día}$ )

$H$  = Carga total (m.c.a., metros de la columna de agua)

$\rho_{aire}$  = Densidad del aire ( $1.225 \text{ kg/m}^3$ )

$D_r$  = Diámetro del rotor (m)

$\eta$  = Eficiencia total =  $\eta_b \eta_r$

$FPE$  = Factor patrón de energía

$\bar{v}$  = Velocidad media mensual del viento

También, se puede obtener el caudal entregado por el sistema despejando  $Q$  de la ecuación(1.26), así:

$$Q = C_1 D^3 (\bar{v})^3 / (Hg) \quad (1.28)$$

Donde:

$$- C_1 = FPE / C, \text{ para bombeo eléctrico } C=2.$$

Conociendo el diámetro del rotor ( $D_r$ ), y sustituyendo en la ecuación los valores de la carga total ( $H$ ) y velocidad media para cada mes ( $\bar{v}$ ), se comprueba si la demanda es satisfecha

Si se conociera la curva de gasto entregado por el molino en función de la velocidad del viento (o la "curva de potencia" en el caso de un aerogenerador), y la curva de distribución de frecuencia del viento, se podría determinar con mayor exactitud el gasto total entregado por la máquina cada mes o en el período que se analice. En general, esto no se puede realizar porque los fabricantes no suelen dar las curvas del comportamiento de los molinos de viento.

### III. MÉTODO

#### 3.1. Tipo y diseño de investigación:

“La investigación aplicada, pragmática o tecnológica, tiene como objetivo general satisfacer necesidades relativas para el bienestar de la sociedad. Es así como su función busca fórmulas que permitan aplicar conocimientos científicos en solución de problemas para la producción de bienes y servicios” (Ortiz, 2008).

Esta investigación es aplicada, ya que, se van a utilizar los principios básicos del diseño y la selección de un sistema para poder otorgar una respuesta a la realidad problemática que planteo para la empresa en este estudio.

Stanley nos dice que en la literatura sobre la investigación cuantitativa puede ser factible encontrar diferentes clasificaciones de los diseños. Se adopta la siguiente clasificación:1 Investigación experimental e investigación no experimental. A su vez, la primera puede dividirse de acuerdo con las clásicas categorías en: pre experimentos, experimentos “puros” y cuasi experimentos” (Stanley, 1966).

Nuestro estudio tiene un diseño de investigación de tipo pre experimental, ya que se realizarán acciones sin manipular deliberadamente la variable independiente, dado que se toman varias mediciones en una población y diferente muestra, luego se administra un estímulo y después se aplica una medición para observar el efecto en la variable dependiente, con pre-prueba y post-prueba.

#### 3.2. Variables y Operacionalización:

- **Variable independiente.**

Sistema eólico eléctrico de bombeo de agua.

- **Variable dependiente.**

Riego agrícola en parcela del sector El palomar – Rázuri.

## Operacionalización de Variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Indicadores	Escala de medición
V.I. Sistema eólico eléctrico de bombeo de agua.	Aerogenerador acoplado a electrobomba para transvase de líquidos, el cual permitirá el mejoramiento del sistema de bombeo de agua con sistemas convencionales de combustible fósil.	El sistema eólico eléctrico será accionado por el recurso eólico el cual convierte la energía mecánica en energía eléctrica, para accionar una electrobomba de agua.	Demanda energética requerida por la bomba	Numérica
V.D. Riego agrícola en parcela del sector El Palomar – Rázuri.	Permite practicar la agricultura y diversifica las cosechas así como también contribuye al incremento de los ingresos económicos de los agricultores.	La necesidad de agua de la parcela estará cubierta por la electrobomba accionada con el aerogenerador.	Demanda de agua del cultivo existente en la parcela	Numérica

### 3.1. Población, muestra y muestreo.

Quesada nos plantea que la población es el conjunto de individuos que otorgan información necesaria sobre el fenómeno que se estudia. La población va a englobar el conjunto de elementos que forman parte del grupo de estudio, por tanto, se refiere a todos los elementos que en forma individual podrían ser acobijados en la investigación” (Quesada,2010).



Nuestra población la constituyen las parcelas del sector El Palomar distrito de Rázuri; la muestra está referida a la Parcela UC. 13718 del sector El Palomar distrito de Rázuri; el muestreo es intencional, porque el investigador selecciona la muestra de estudio y aplica el método correspondiente.

### 3.2. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para recopilar la información necesaria, se trasladará hasta el lugar donde se encuentra ubicada la parcela donde se realizará el presente estudio, en el cual se encuentra instalado un aerogenerador domestico del cual se obtendrá la energía anual generada y aforo del agua que proporciona el sistema de bombeo de agua.

#### 3.2.1. Técnicas de recolección de datos.

Técnica	Instrumento	objeto	Objetivo
Observación	Hojas de datos	Proceso operación de motobomba	Determinación especificaciones de operación, tiempo de operación, capacidad de los equipos
Entrevista	Hojas de preguntas	Operación de motobomba	Determinar problema de operación y mantenimiento, de costos, opción modelo del aerogenerador
Medición	Manómetro	Motobomba de potencia 6.5 Hp * Q= 60m <sup>3</sup> /h H = 20 m.c.a.	Determinar la presión efectiva de bombeo, que se debe respetar en el cambio de bares

#### 3.2.2. Validación y confiabilidad del instrumento

Las entrevistas van a ser realizadas según los procedimientos estándares, mientras que los cuestionarios u hojas de datos, serán propuestos y elaborados por el tesista para el personal técnico de operación del sistema.

### **3.3. Métodos de análisis de datos.**

- **Análisis Cuantitativo**

En este análisis se va a usar la estadística descriptiva que va a consistir en las medidas de dispersión y las medidas de tendencia central y el análisis de ingeniería eólica.

- **Análisis Cualitativo**

Aquí se va a utilizar una guía de observación, entrevistas y guías de análisis.

### **3.4. Aspectos éticos.**

Esta investigación es ejecutada completamente con información fidedigna y nace como un estudio para la mejora de condiciones laborales, de bienestar familiar y actualización hacia sistemas tecnológicos de última generación.

## IV. RESULTADOS

### 4.1. Evaluar las condiciones actuales de bombeo y los requerimientos de riego en el sector El Palomar-Rázuri.

La ubicación del área de estudio pertenece al Distrito de Rázuri, Provincia de Ascope, Región La Libertad. Geográficamente le pertenece al Valle de Chicama el cual se encuentra según las coordenadas UTM (WGS 84-17S): 9149334-9149978 N y 675045-675821 E.

El área bajo estudio considerada se ubica en la Finca WICHAY y cuenta con una extensión aproximada de 2 Has. de un total de 27.5 Has.

La carretera panamericana Norte es la principal vía de acceso al distrito de Razuri, la carreta atraviesa el Valle Chicama comunicándose por el Norte con la Provincia de Pacasmayo, por el Este con los distritos de Casa Grande y Paiján, por el Sur con el Distrito de Magdalena de Cao.

Figura 26: Ubicación de la zona de estudio en el sector El Palomar.



Fuente: (Google Earth, 2018)

El Valle Chicama tiene un clima desértico. En este Valle no hay presencia de lluvias durante todo el año. Este clima es considerado BWh

según la clasificación climática de Köppen-Geiger. La temperatura media anual es 20.2 ° C en Chicama. La precipitación es de 16 mm al año.

El campo en estudio se encuentra ocupado por el cultivo de espárrago verde y un bajo funcionamiento del sistema de riego por goteo, el cual tiene el tiempo de un año para operaciones desde su instalación.

La cuenca del río Chicama tiene una extensión de 4,814 km<sup>2</sup> y cuenta con 05 sub-cuencas tributarias y dos sub-cuencas que conforman el cauce principal. Se le llama río Chicama a la confluencia de las sub-cuencas de los ríos Chuquillanqui (909 km<sup>2</sup>) y Huancay (1,186 km<sup>2</sup>) para luego dirigirse por las sub-cuencas Media (457.8km<sup>2</sup>) y finalmente la Baja (1,149.2km<sup>2</sup>) y desembocar en el Océano Pacífico. Geográficamente, sus puntos extremos de la cuenca se hallan comprendidos entre los 7° 21' y 8° 01' de Latitud Sur y los 78° 16' y 79°27' de Longitud Oeste (Atlas hidrológico 1976 del SENAMHI). El cauce principal del río Chicama recorre 169.2 km. Su pendiente varía de 4.5% a 0.9% y finalmente 0.6% en las sub-cuencas de Huancay, Media y Baja respectivamente. Su régimen irregular y torrencioso origina una alta concentración de sus descargas entre los meses de enero y abril y de extrema escasez los meses que quedan del año.

El área de estudio cuenta con un pozo zanja, el cual alimenta a una red de distribución haciendo uso de una Motobomba a gasolina, debido a que en esta zona no se cuenta con el servicio de electricidad.

Esta investigación parte del dimensionamiento de una vivienda agraria. Dicha vivienda es ocupada por seis integrantes de una misma familia, por lo cual, necesitan suministro de agua durante los doce meses del año, el agua debe ser para consumo humano como también para animales con una tasa de crecimiento del 3% y el periodo de diseño es de 20 años. En la actualidad la vivienda cuenta con una plantación de dos hectáreas de espárrago verde, la cual se encuentra implementada con un sistema de riego por goteo en superficie con las características mostradas en la tabla 12.

Tabla 12: Características del sistema de riego

<b>Cultivo (s)</b>	Esparrago Verde
<b>Marco (s) de plantación</b>	1.50 x 0.30 m
<b>Edad de las plantas</b>	2 Años
<b>Área de sombreamiento (m2)</b>	0.07
<b>Tipo (s) de emisor</b>	RODRP 505-20-500, acción de flujo en vórtice y resistente a obturaciones
<b>Caudal del emisor</b>	500 LPH/100 m. (1m3/hr.)@0.55 BAR
<b>Nº emisores por planta</b>	2
<b>Distancia entre emisores</b>	20 Cm.
<b>Nº de laterales por hilera</b>	56
<b>Diámetro laterales</b>	16 mm (5/8")
<b>Longitud máx. de laterales (m)</b>	100 m.
<b>Nº de sectores de riego</b>	2
<b>Criterios de aplicación de riego</b>	2 horas diaria por hectárea, cada dos días

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1. Requerimientos de bombeo de agua

El primer aspecto para determinar es la *demanda doméstica* total de agua que debe entregar el sistema al cabo de 20 años de periodo de diseño. En la tabla 13 se establece la demanda del uso doméstico y del ganado. Se ha supuesto que el ganado aumenta con una tasa de crecimiento idéntica a la de las personas.

Tabla 13: Demanda (uso doméstico y del ganado) total de agua.

<b>Consumidor</b>	<b>Población actual</b>	<b>Tasa de crecimiento (%)</b>	<b>incremento en 20 años</b>	<b>población al cabo de 20 años</b>	<b>consumo unitario (l/día)</b>	<b>Demanda de agua futura (m3/día)</b>
Personas	6	3	11	17	40	0.67
Añojo	2	3	4	6	60	0.34
Gallinas	20	3	36	56	2	0.11
<b>Total</b>						<b>1.12</b>

El segundo aspecto, constituye la demanda de agua para riego, cuyo caudal se obtiene a partir del consumo de agua del espárrago. Esto se determina utilizando la información meteorológica de la estación "Casagrande", cuyos valores promedios anuales de temperatura mínima,

temperatura máxima y precipitación son proporcionados por el programa Climwat v2, el cual se presenta en la tabla 14

Tabla 14: Datos climáticos proporcionados por el Climwat v2.

Mes	Temp. Min. °C	Temp. Max. °C	Humedad %	Viento m/s	Insolación horas	Precipitación mm.
Enero	17.9	30.7	73	4.0	7.2	3.0
Febrero	19.1	31.5	73	3.6	7.4	4.0
Marzo	18.9	31.2	75	3.6	6.2	5.0
Abril	17.4	29.6	75	4.0	6.3	2.0
Mayo	15.6	27.1	76	4.0	5.7	0.0
Junio	14.4	25.9	79	3.6	5.7	0.0
Julio	13.8	24.6	80	3.6	5.0	0.0
Agosto	13.3	24.4	78	4.0	5.3	0.0
Setiembre	13.7	25.3	77	4.0	4.4	0.0
Octubre	14.2	25.9	76	4.4	5.8	1.0
Noviembre	14.3	26.8	76	4.0	5.6	1.0
Diciembre	15.6	28.6	74	4.4	6.2	2.0

Para calcular la evapotranspiración de referencia se usó el programa Cropwat 8.0 aplicando el método de FAO Penman-Monteith, Tabla 15

Tabla 15: Resultados de datos obtenidos por el Cropwat 8.0 del requerimiento hídrico del espárrago.

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento m/s	Insolación horas	Rad MJ/m <sup>2</sup> /día	ETo mm/día
Enero	17.9	30.7	73	4.0	7.2	21.0	5.22
Febrero	19.1	31.5	73	3.6	7.4	21.5	5.34
Marzo	18.9	31.2	75	3.6	6.2	19.2	4.90
Abril	17.4	29.6	75	4.0	6.3	18.1	4.61
Mayo	15.6	27.1	76	4.0	5.7	15.8	3.88
Junio	14.4	25.9	79	3.6	5.7	15.0	3.35
Julio	13.8	24.6	80	3.6	5.0	14.4	3.12
Agosto	13.3	24.4	78	4.0	5.3	16.0	3.46
Septiembre	13.7	25.3	77	4.0	4.4	15.9	3.68
Octubre	14.2	25.9	76	4.4	5.8	18.7	4.20
Noviembre	14.3	26.8	76	4.0	5.6	18.4	4.22
Diciembre	15.6	28.6	74	4.4	6.2	19.3	4.73
Promedio	15.7	27.6	76	3.9	5.9	17.8	4.23

Fuente: Cropwat 8.0, 2015, elaboración propia.

Posteriormente con los datos obtenidos por el Cropwat 8.0 se elabora la tabla 16 de evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) en mm/día,

tomándose los valores más elevados para obtener el máximo requerimiento y poder seleccionar el sistema hídrico.

**Tabla 16: Evapotranspiración potencial (ETo) promedio**

Ene.	Febr.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	ETo
5.22	5.34	4.90	4.61	3.88	3.35	3.12	3.46	3.68	4.2	4.22	4.73	mm/día

La demanda de agua se obtiene:

Evapotranspiración potencial (Eto)		Estación Casagrande	
Según (FAO)	Mes		
	Enero	Febrero	Marzo
Eto Max. (mm/día)	5.22	5.34	4.90
Eto Max. Promedio (mm/día)		5.15	

#### Cálculo de la evapotranspiración Real (ETR)

Con una eficiencia de aplicación de 95% por ser riego por goteo.

$$f = \frac{2.34 * PS + 0.5 * (1 - PS)}{2}$$

$$\% \text{ de sombreado (PS)} = \frac{\text{Area de sombreado}}{\text{Area marco de plantación}}$$

$$ETR = \frac{ETo * Kc * f}{Cu * Efa}$$

Donde:

*Eto* = Evapotranspiración potencial

*Kc* = Coeficiente del cultivo

*f* = Factor de cobertura del cultivo

*Cu* = Coeficiente de uniformidad

*Efa* = Eficiencia de aplicación del sistema

PS= % de sombreado

<b>Cultivo Esparrago Verde</b>	
Área Sombreada (m2)	0.07
Área marco plantación (m2)	0.54
PS	0.13
<i>f</i>	1.00
Kc (según la FAO)	0.95
Coef. de Uniformidad (asumido)	0.90
Factor de seguridad	1.20
ETR (mm/día)	<b>6.87</b>

Por lo tanto, la demanda en m<sup>3</sup>/día es:

$$Q = 0.00687(\text{m/día}) * 1(\text{ha}) * 10000(\text{m}^2/\text{ha}) = \mathbf{68.7 \text{ m}^3/\text{día}}$$

Volumen de agua máximo requerido **68.7m<sup>3</sup>/ha/día**

Asimismo, dado que la población de plantas por hectárea la constituye:

- Una ha. (10000 m<sup>2</sup>) sector de 100 m. largo x 100 m. ancho
- Distancia entre surcos es de 1.80 m.
- Distancia entre plantas de 0.30 m.
- Número de surcos = 100 m. de ancho /1.80 entre surco = 56 Surcos.
- Número de plantas = 100 m. de largo /0.30 entre planta = 333 plantas por lateral.
- Total, de plantas por hectárea = 56 laterales x 333 plantas por lateral = 1864 plantas/hectárea.
- Número de emisores por lateral = 100 m. /0.20 m. = 500 Emisores.
- Caudal por emisor = (500Lph cada 100 m.) / 500 Emisores = 1 Lph.
- Caudal por hectárea Q (l/h) = 500 Lph x 56 Surcos = 28000 Lph.
- Caudal total para 2 hectáreas = 28000 Lph x 2 has = 56000 Lph/ha.
- Caudal total = 56000 Lph/ha = 56 m<sup>3</sup>/h/ha (diario).
- Caudal para 2 horas de riego día = 56 m<sup>3</sup>/h x 2 horas de riego = **112 m<sup>3</sup>/h/ha.**



Los diferentes consumos que influyen sobre la demanda total de la parcela se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 17.

Mes	Demanda doméstica (m3/día)	Demanda del ganado (m3/día)	Demanda agrícola total (m3/día)	Demanda total (m3/día) Q
Enero	0.67	0.45	52.20	53.32
Febrero	0.67	0.45	53.40	54.52
Marzo	0.67	0.45	49.00	50.12
Abril	0.67	0.45	46.10	47.22
Mayo	0.67	0.45	38.80	39.92
Junio	0.67	0.45	33.50	34.62
Julio	0.67	0.45	31.20	32.32
Agosto	0.67	0.45	34.60	35.72
Setiembre	0.67	0.45	36.80	37.92
Octubre	0.67	0.45	42.00	43.12
Noviembre	0.67	0.45	42.20	43.32
Diciembre	0.67	0.45	47.30	48.42

Fuente: Elaboración propia.

**4.2. Determinar mediante el análisis correspondiente, el dimensionamiento y factibilidad técnica del mejoramiento del sistema e identificar los activos que conforman la línea crítica.**

#### **4.2.1. Fuente de abastecimiento de agua**

El abastecimiento de agua es proporcionado por un pozo zanja de 8.02 metros de ancho por 41.25 metros de largo y una profundidad de 9.00 m. El estudio de los recursos hídricos de la zona indica que posee acuíferos con buenas características en cuanto a calidad de agua doméstica y agrícola. El nivel estático del manto freático no excede de los 6 m de profundidad en la época de sequía, y de 3 m en la época de lluvias. La altura del tanque es de 12 metros.

Sobre el descenso del manto freático, la experiencia de los campesinos con pozos similares en los alrededores de la parcela indica que éste alcanza 2 m en la época seca, y los 1.5 m en épocas de lluvia.

#### 4.2.2. Evaluación del recurso eólico.

Para la evaluación del recurso eólico se tuvo en consideración la base de datos de la Nasa año 2018 los cuales nos dan un promedio anual de 4.97 m/s y del Atlas eólico del Perú 2016 el cual nos arroja un promedio de 5.14 m/s figuras 27 y 28.

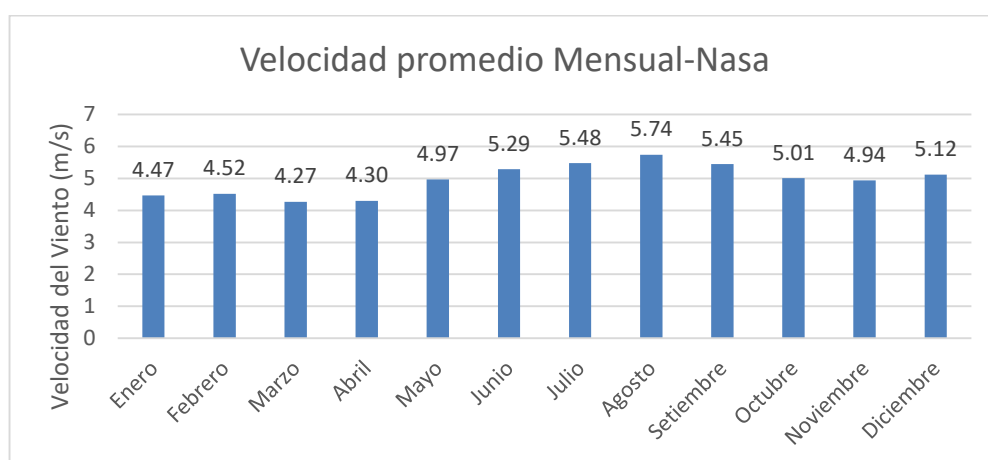


Figura 27: Velocidad promedio mensual

Fuente: NASA

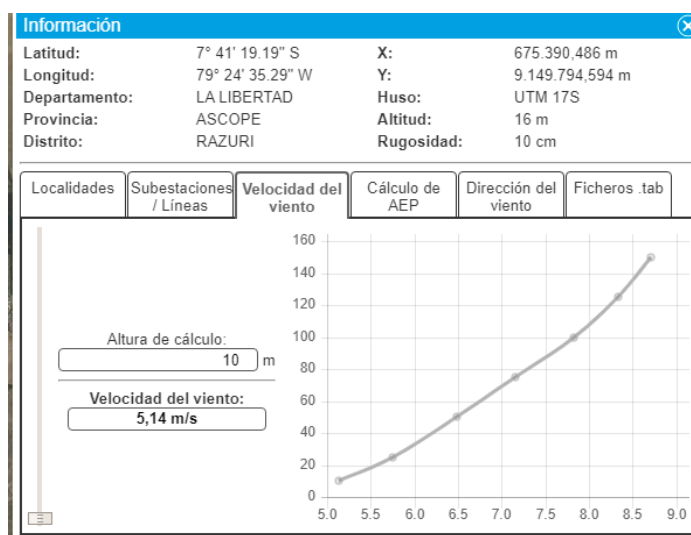


Figura 28: Velocidad promedio del viento

Fuente: Atlas eólico del Perú 2016

Los datos del viento recopilados se muestran en la segunda columna de la siguiente tabla 18, donde aparecen los valores de la velocidad media mensual, tomados a 10 m de altura, el terreno de la parcela tiene una rugosidad superficial baja ( $Z_0=0.03\text{m}$ ). La altura de la torre del aerogenerador se estimará en 15 m.

Extrapolando la velocidad de referencia de 10 m. a la altura de 15 m. aplicando la fórmula 1.14 obtenemos las velocidades del viento a la altura del buje (m/s):

$$v(z) = 4.14 \frac{\ln\left(\frac{15}{0.03}\right)}{\ln\left(\frac{10}{0.03}\right)}$$

$$v(z) = 4.78 \text{ m/s}$$

Tabla 18

Mes	PVC (m3.m.)	Velocidad del viento a 10 m de referencia (m/s)	Velocidad del viento a la altura del buje (m/s)	Potencia viento a la altura de la torre P/A (W/m2)	Potencia disponible/PVC [(W/m2 / m3.m)]
Enero	1081.23	4.47	4.78	127.93	0.118
Febrero	1105.56	4.52	4.84	132.27	0.120
Marzo	1013.40	4.27	4.57	111.51	0.110
Abril	954.76	4.30	4.60	113.88	0.119
Mayo	665.40	4.97	5.32	175.84	0.264
Junio	575.49	5.29	5.66	212.04	0.368
Julio	537.26	5.48	5.86	235.71	0.439
Agosto	593.77	5.74	6.14	270.88	0.456
Setiembre	632.06	5.45	5.83	231.86	0.367
Octubre	718.73	5.01	5.36	180.12	0.251
Noviembre	873.70	4.94	5.28	172.67	0.198
Diciembre	979.02	5.12	5.48	192.24	0.196

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla 18, el mes de diseño deberá ser de **marzo** que, aun teniendo una velocidad de diseño de 4.57 m/s, la cual se escogió por tener la menor relación entre la potencia del viento a la altura del rotor y las necesidades de bombeo de agua [w/m2 / (m3.m)].

### 4.2.3. Identificación de los activos principales que conforman la línea mediante un estudio de criticidad.

A fin de justificar las principales labores y costos de mantenimiento, se ha tenido por conveniente realizar un análisis de criticidad del sistema eólico-eléctrico, cuya tabla resumen se presenta a continuación y proviene de la evaluación correspondiente del Anexo 4.

Tabla 19:

*Tabla resumen del análisis de criticidad del sistema eólico-eléctrico (aerogenerador)*

N°	Falla	Clasificación	Tipo de Mtto	Valor de criticidad
1	Soltura de palas, timón, eje de giro, puntera y torre del molino.	Crítico	Mantenimiento preventivo	560
2	Vibraciones anómalas del Molino y/o de la torre del aerogenerador.	Crítico	Mantenimiento predictivo	192
3	Ruido y/o aflojamiento de rodamientos del paso variable.	Semi crítico	Mantenimiento preventivo	84
4	Bloqueamiento del sistema e interruptor de frenado del molino.	Crítico	Mantenimiento preventivo	126
5	Desgaste de escobillas, anillos rozantes y cables de conexión.	Crítico	Mantenimiento predictivo	320
6	Desconexión del regulador de carga, baterías, inversor y resistencias.	Semi crítico	Mantenimiento preventivo	90

7	Ruptura del eje de transmisión de la bomba.	Crítico	Mantenimiento predictivo	480
8	Cambio de voluta por desgaste interno de la caja de la bomba.	Crítico	Mantenimiento preventivo	320
9	Desgaste de la unidad rotativa de la bomba	Crítico	Mantenimiento preventivo	162
10	Desgaste de acoplamiento flexible	Crítico	Mantenimiento predictivo	200

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3. Diseñar y seleccionar los componentes del sistema de bombeo y equipos complementarios.

Los diferentes consumos proyectados que influirán sobre la demanda total de la parcela se muestran en la tabla 17.

##### 4.3.1. Cálculo de carga de bombeo y producto volumen-carga (PVC)

Se calcula la potencia media mensual disponible del viento a partir de la velocidad media mensual, la densidad del aire del lugar y el factor patrón de energía (FPE), de acuerdo con la ecuación (1.24):

$$P_a/A = \frac{1}{2} \rho_{aire} (\bar{v})^3 FPE$$

En la tabla siguiente se incluyen los valores del FPE según los valores de  $k$ .

Tabla 20

<i>k</i>	<i>FPE</i>	<i>k</i>	<i>FPE</i>
1,2	3,99	2,6	1,53
1,4	3,03	2,8	1,46
1,6	2,48	3,0	1,40
1,8	2,14	3,2	1,36
2,0	1,91	3,5	1,30
2,2	1,75	4,0	1,23
2,4	1,63	5,0	1,15

Fuente: (M. Castro G. 2011).

Para nuestro caso utilizaremos  $k=2$ , y el  $FPE=1.91$ .

#### 4.3.2. Cálculo del diámetro de la tubería

Para estaciones que son operadas las 24 horas del día, el diámetro económico viene dado por la siguiente expresión:

$$D = k\sqrt{Q}$$

Donde:

D = Diámetro económico, m.

K = Coeficiente entre 0.9 - 4.0.

Q = Caudal de bombeo, m<sup>3</sup> /s.

- Para un caudal de 0.00063 m<sup>3</sup>/s. tenemos:

$$D = 1.5\sqrt{0.00063}$$

$$D = 0.03765m.$$

$$D = 37.65mm.$$

- Diámetro elegido para diseño

$$\text{Diámetro nominal } D = 42mm.$$

$$\text{Diámetro interno } D = 38.14mm,$$

$$D = 0.038m.$$

- Cálculo de la velocidad

$$V = Q/A$$

$$V = 0.00063 / 0.001134$$

$$V = 0.5555 \text{ m/s}$$

### 4.3.3. Determinación de pérdidas por rozamiento en tubería.

La distancia que debe recorrer el agua entre los dos puntos es de 39.28m.

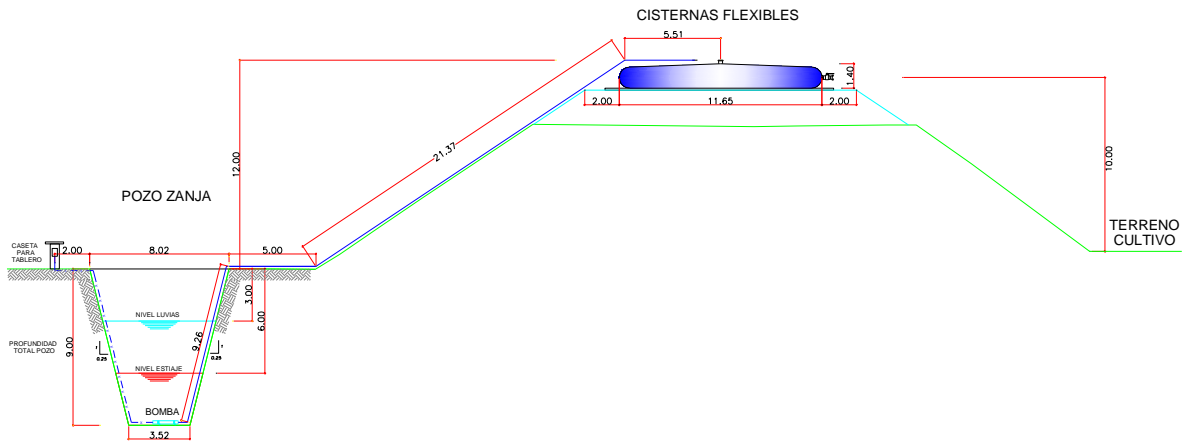


Figura 29: Diagrama de recorrido de la tubería

Fuente: Elaboración propia

Para determinar las pérdidas en la tubería y las de los obstáculos que encuentra el agua a su paso, se calcula con la ayuda de la tabla 5, la longitud equivalente del circuito:

01 válvula de compuerta Ø 38 mm.....	1m
03 curvas de Ø 38 mm.....	2+2+2m
40.79m de longitud de tubería hasta el tanque.....	
<b>40.79m</b>	

**Total = 47.79 m**

Por lo tanto, tenemos 47.79 m. de longitud equivalente. En la tabla 5 podemos encontrar las pérdidas por rozamiento para diferentes diámetros de tubería y para diferentes caudales. En nuestro caso, el caudal es  $54.5 \text{ m}^3/24\text{h} = 2.27 \text{ m}^3/\text{h}$ , y diámetro de la tubería es de 38 mm. Así pues, para dicho mes y según la tabla 5, tenemos una pérdida de carga de aproximadamente, 1.16 m.c.a por cada 100 metros. Para hallarlo se han seleccionado los valores más parecidos

de la tabla 1.4:  $C = 2.4 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  $\varnothing = 41.25\text{mm}$ . Para los demás meses se procederá de igual manera, ver tabla 21.

El cálculo de pérdida de carga se multiplicará por un coeficiente corrector de 0.5 para tubería de PVC como se muestra en la siguiente expresión:

$$\text{Pérdida de carga estática} = 44.79 \times 0.0116 = 0.519 \text{ m.c.a.}$$

$$0.519 \times 0.5 = \mathbf{0.259 \text{ m.c.a.}}$$

La siguiente tabla presenta el cálculo del producto volumen-carga:

(PVC = demanda futura x carga total de bombeo).

Tabla 21

Mes	Demanda agrícola total Q (m <sup>3</sup> /día)	Demanda agrícola total Q (m <sup>3</sup> /h)	carga estática de bombeo (m.c.a.)	descenso del manto freático (m.c.a.)	perdidas hidráulicas (m.c.a.)	Carga total de bombeo (m.c.a.) H	PVC (m <sup>3</sup> .m.)
Enero	53.32	2.22	0.28	2	6	20.28	1081.23
Febrero	54.52	2.27	0.28	2	6	20.28	1105.56
Marzo	50.12	2.09	0.22	2	6	20.22	1013.40
Abril	47.22	1.97	0.22	2	6	20.22	954.76
Mayo	39.92	1.66	0.17	1.5	3	16.67	665.40
Junio	34.62	1.44	0.12	1.5	3	16.62	575.49
Julio	32.32	1.35	0.12	1.5	3	16.62	537.26
Agosto	35.72	1.49	0.12	1.5	3	16.62	593.77
Setiembre	37.92	1.58	0.17	1.5	3	16.67	632.06
Octubre	43.12	1.80	0.17	1.5	3	16.67	718.73
Noviembre	43.32	1.81	0.17	2	6	20.17	873.70
Diciembre	48.42	2.02	0.22	2	6	20.22	979.02

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.4. Dimensionamiento y factibilidad técnica del sistema

En los sistemas de accionamiento directo, la potencia de entrada presenta fluctuaciones continuas de acuerdo con las variaciones de velocidad del viento. Esto afecta la velocidad de rotación de la electrobomba, de modo que no permanece en un solo punto de operación como en el caso de voltaje y frecuencia constantes.



Consecuentemente, una electrobomba para un sistema de energía eólica de accionamiento directo como es nuestro caso, no se puede seleccionar mediante el método de intersección entre las curvas H-Q; por lo tanto, se deben definir nuevos criterios de selección para estas condiciones de operación variables.

El dimensionamiento de los sistemas de bombeo con respecto al aerogenerador es una cuestión clave para el correcto funcionamiento de un sistema de bombeo de accionamiento directo con el fin de aprovechar una amplia gama de velocidades del viento.

#### 4.3.4.1. Dimensionamiento del rotor del aerogenerador.

El cálculo del diámetro del rotor requerido para las condiciones de diseño y según los valores estadísticos de viento, se realiza por medio de la ecuación 1.26.

$$D_r = \sqrt{\frac{C H Q}{(\bar{v})^3 FPE}}$$

$$D_r = \sqrt{\frac{2 \times 1013.40}{(4.57)^3 \times 1.91}} = 3.34 \text{ m}$$

Considerando que C es una constante, con un valor de 2 para el bombeo eléctrico.

El resultado es 3.34 m de diámetro del rotor del aerogenerador.

El aerogenerador comercial más cercano por exceso es 3.8 m. por tanto, se escoge un aerogenerador **E30PRO de 3Kw** de potencia nominal y 220 V. (ver ficha técnica en el anexo) de la empresa ENAIR. En este caso un solo aerogenerador cubre la demanda.

#### 4.3.4.2. Dimensionamiento de la bomba.

En los sistemas de accionamiento directo, la potencia de entrada presenta fluctuaciones continuas de acuerdo con las variaciones de velocidad del viento. Esto afecta la velocidad de rotación de la electrobomba, de modo que no permanece en un solo punto de operación como en el caso de voltaje y frecuencia constantes.

Por lo tanto, una electrobomba para un sistema de energía eólica de accionamiento directo como es nuestro caso, no se puede seleccionar mediante el método de intersección entre las curvas H-Q. Por lo tanto, se deben definir nuevos criterios de selección para estas condiciones de operación variables.

El dimensionamiento de los sistemas de bombeo con respecto al aerogenerador es una cuestión clave para el correcto funcionamiento de un sistema de bombeo de accionamiento directo con el fin de aprovechar una amplia gama de velocidades del viento.

Se obtiene la potencia requerida para bombear **54.52m<sup>3</sup>/día** a una presión de 20.28m (mes de febrero), ya que nuestra tecnología solo funciona con velocidades de viento mínimas, se decide tener en consideración una duración de **seis horas diarias** promedio de funcionamiento (dato obtenido del sistema de energía eólica existente en la parcela) utilizando la fórmula 1.22 siguiente:

$$P = \rho_{agua} gHQ/\eta_b$$

Donde:

$$\eta_b = \eta_v \eta_m = \text{Eficiencia total de la bomba.}$$

La eficiencia de la bomba ( $\eta_b$ ) variará a lo largo del día conforme cambien las condiciones de insolación y velocidad del viento. Esta variación se da en el rango de 60-80% para una bomba sumergible trabajando en corriente alterna como la que se utilizará en el presente Proyecto.

Para efectos de cálculo se considera la eficiencia más baja. Por lo tanto:

$$P = \frac{1000 \times 9.81 \times 20.28 \times 2.524 \times 10^{-3}}{0.60}$$

$$P=836.077 \text{ W.}$$

Tabla 22

Bomba Nastec		Potencia Watts (W)	Caudal Mínimo (m3/H)	Caudal Máximo (m3/H)	Altura Mínima (m)	Altura Máxima (m)
4HS	05-04MP	1100	0.76	7.6	18	64
4HS	05/08MP	2200	0.76	7.6	36	128
4HS	08/03MP	1100	1.12	11.2	16.8	49.5
4HS	08/05MP	2200	1.12	11.2	28	82.5
4HS	02/02H MP	825	0.5	2.97	0	100

Fuente: Catalogo de NASTEC 4HS MultiPower.

Al tener que estar supeditada a la cantidad de energía proporcionada por el aerogenerador la cual encontramos en los catálogos con diferentes consumos de energía.

Consultando las especificaciones del catálogo de bombas NASTEC tipo 4HS 08/03 MP (anexos) observamos que, debido a la potencia generadora, tendremos que emplear una electrobomba vertical del tipo vertical con motor de 1.8 kW (descarga 2") y voltaje de 90-265 VAC.

Tabla. 23

Modelo	Voltaje	Max. corriente absorbida	Factor de potencia	Max. potencia absorbida	Dimensiones	Descarga	Peso	Diametro Max.	Embalaje	Peso total
4HS		[A]		P1 [W]	[mm]		[kg]	[mm]	[cm]	[Kg]
08/03 MP	90 - 340 VDC 90 - 265 VAC	16 (113 VDC) 16 (113 VAC)	1	1800	858	1 1/2 " 2"	19,4	101 *	120x20x29	20
08/05 MP	90 - 340 VDC 90 - 265 VAC	16 (187 VDC) 16 (187 VAC)	1	3000	950	1 1/2 " 2"	21	101 *	120x20x29	22

\* Dimensiones máximas incluyendo el cubrecable.

Fuente: Catalogo de NASTEC 4HS MultiPower.

#### 4.3.4.3. Bombeo de agua extraída con el sistema de bombeo directo

Con el dimensionamiento de la turbina, la bomba sumergible con variador de frecuencia integrado y el tanque de almacenamiento procedemos a determinar la cantidad total bombeada en un día. Partimos entonces con la curva de rendimiento de la bomba, donde tenemos la potencia de entrada de la bomba (en nuestro caso es de 0 a 1.8 Kw) y el rendimiento hidráulico, es decir el caudal que bombea a cada hora y eso debe ser determinado para una determinada altura de descarga, en nuestro caso trabajaremos con la altura de 20.26 m, es decir la bomba está depositando el agua a una altura de 20.26 m.

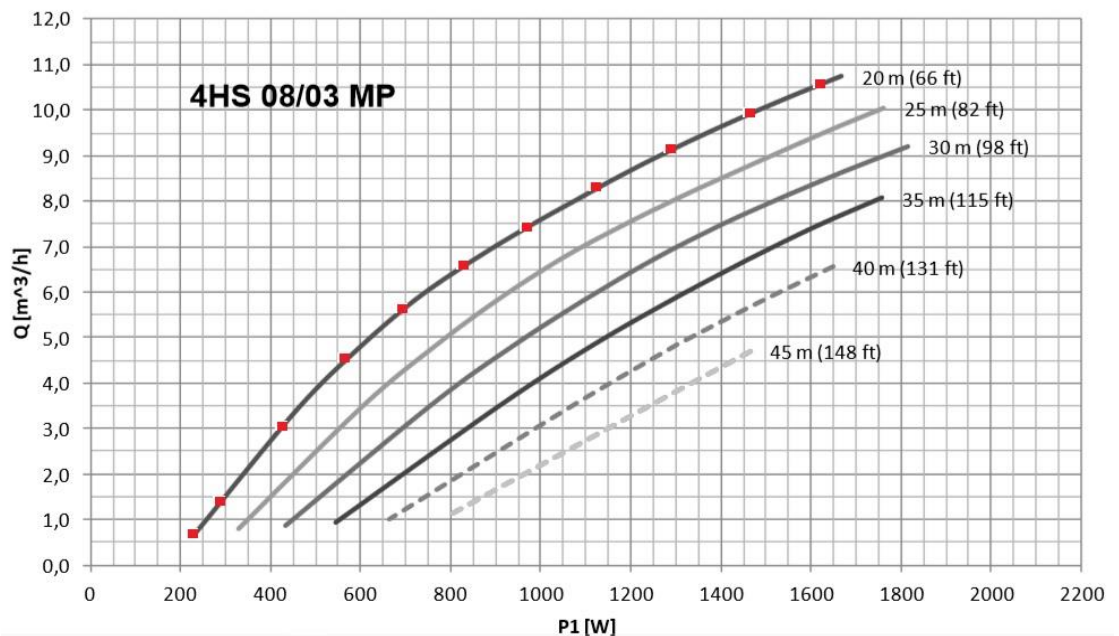


Figura 30: Curvas características de bomba  
Fuente: Catalogo de NASTEC 4HS MultiPower.

En nuestro caso se ha seleccionado el aerogenerador ENAIR modelo 30PRO cuya curva de potencia se presenta en la figura 31.

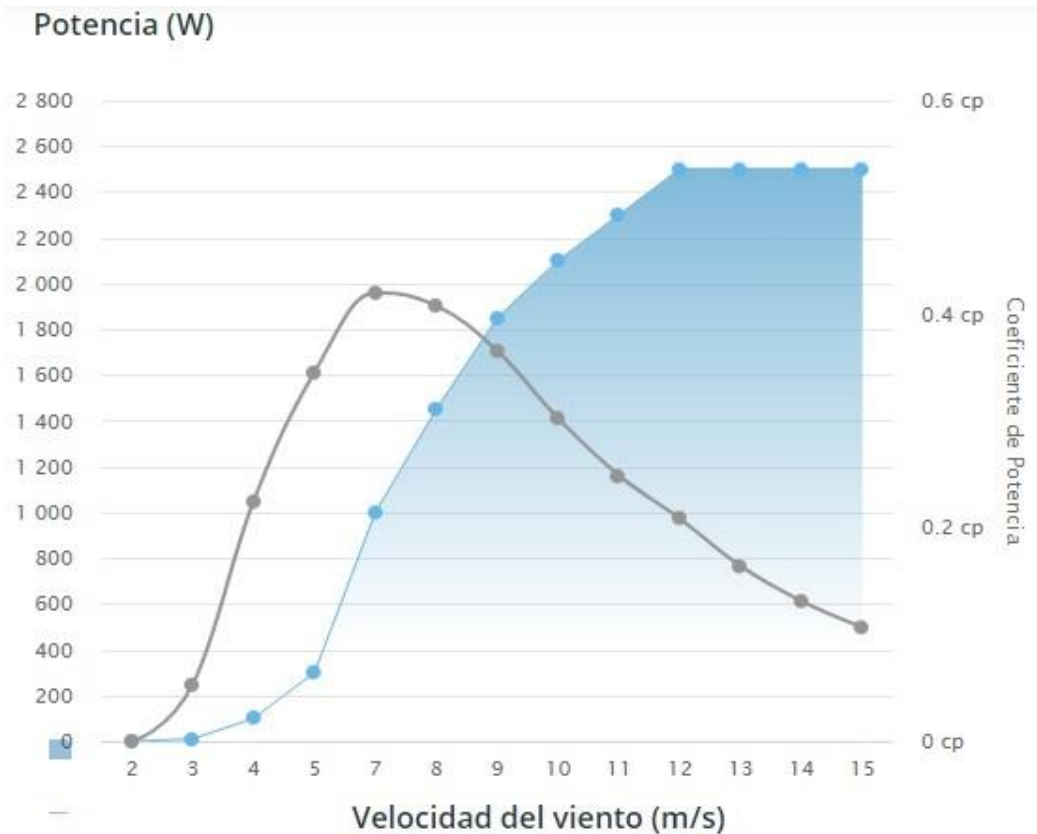


Figura 31: Curva de potencia del aerogenerador  
Fuente: <https://www.enair.es/es/aerogeneradores/e30pro>.

- Si observamos la curva, el rango de velocidad de viento es de 2 m/s hasta 11 m/s y la potencia nominal de esta turbina es de 1900 w.
- Con la información de la curva de rendimiento hidráulico y la curva de potencia del aerogenerador se obtendrá la cantidad de agua bombeada en el año, mes o día.
- Relacionando la potencia que entrega la turbina con el caudal que entrega la bomba en m<sup>3</sup>/h (figura 30).
- Finalmente determinaremos la cantidad de agua bombeada y la cantidad de energía, multiplicando la frecuencia relativa por el caudal y por el periodo total el cual nos da el volumen bombeado (tabla 1.24).

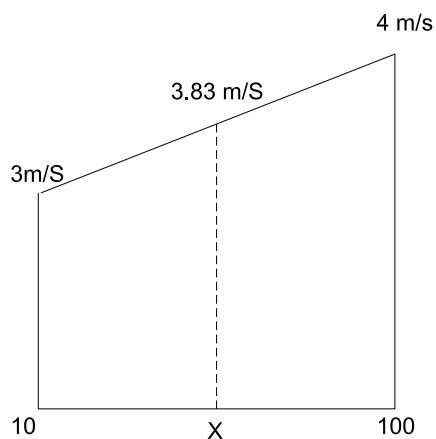
Cálculo de la potencia del intervalo (curva de ENAIR 30 PRO)

Tabla 24

Vel. Media V(m/s)	ENAIR30PRO P (W)
0	0.00
1	0.00
2	0.00
3	10.00
4	100.00
5	300.00
6	650.00
7	1000.00
8	1450.00
9	1850.00
10	2100.00
11	2300.00
12	2500.00
13	2500.00
14	2500.00
15	2500.00

Fuente: Elaboración propia

Interpolando:



$$\left[ \frac{3 - 4}{3 - 3.83} \right] = \left[ \frac{10 - 100}{10 - X} \right]$$

$$X = 84.70 \text{ W}$$

Tabla 25

Vel. Media	De curva bomba	Horas	h Frec. Relativa	Vol.=h*Q*T	E=h*Q*T
V(m/s)	CURVA POTENCIA A P(w)	Q(m3/h)	n(Eventos)	Vol.(m3)	(KWh)
2.30	3.00	0	175	0.00	0.53
2.68	6.80	0	88	0.00	0.60
3.06	15.40	0	175	0.00	2.70
3.45	50.50	0	175	0.00	8.84
3.83	<b>84.70</b>	0	263	0.00	22.28
4.21	142.00	0	350	0.00	49.70
4.60	220.00	0.6	438	262.80	96.36
4.98	296.00	1.4	526	736.40	155.70
5.36	426.00	3.1	526	1630.60	224.08
5.75	562.50	4.6	613	2819.80	344.81
6.13	695.50	5.6	613	3432.80	426.34
6.51	828.50	6.6	701	4626.60	580.78
6.90	965.00	7.4	613	4536.20	591.55
7.28	1126.00	8.3	613	5087.90	690.24
7.66	1297.00	9.10	613	5578.30	795.06
8.04	1466.00	9.9	526	5207.40	771.12
8.43	1622.00	10.6	438	4642.80	710.44
8.81	1774.00	0	350	0.00	620.90
9.19	1897.50	0	263	0.00	499.04
9.58	1995.00	0	175	0.00	349.13
9.96	2090.00	0	88	0.00	183.92
10.34	2168.00	0	88	0.00	190.78
10.73	2246.00	0	0	0.00	0.00
11.11	2322.00	0	0	0.00	0.00
11.49	2398.00	0	0	0.00	0.00
				<b>AÑO</b>	<b>38561.60</b>
				<b>MES</b>	<b>3213.47</b>
				<b>DIA</b>	<b>105.65</b>

Fuente: Elaboración propia

Donde:

h = frecuencia relativa (indica la duración de la velocidad del viento)

Q = caudal que bombea a cada hora.

T = Periodo total.

#### 4.4. Comprobación del gasto entregado por el sistema de bombeo diseñado.

Como se observa en la tabla 26, despejando de la ecuación 1.26 para el cálculo del gasto entregado, con el nuevo diámetro de 3.8 m el sistema diseñado cubre la demanda de todos los meses del año, tal como se ha pronosticado. El mes de más beneficiado es el mes de **agosto**, donde el suministro alcanza el máximo, y el peor es el del mes de **marzo**, donde el gasto entregado es todavía superior a la demanda.

Tabla 26: Gasto entregado por el sistema de bombeo.

Mes	Demanda total futura (m3/día) Qdemandado	carga total de bombeo (m.c.a.)	Velocidad del viento a la altura del buje (m/s)	Gasto entregado (m3/día) Qentregado	Diferencia entre gastos (m3/día) Qent.- Qdem.	Relación entre gastos Qent./Qdem.
<b>Enero</b>	53.32	20.28	4.78	74.37	21.05	1.39
<b>Febrero</b>	54.52	20.28	4.84	76.89	22.37	1.41
<b>Marzo</b>	50.12	20.22	4.57	65.01	14.89	1.30
<b>Abril</b>	47.22	20.22	4.60	66.39	19.17	1.41
<b>Mayo</b>	39.92	16.67	5.32	124.36	84.44	3.12
<b>Junio</b>	34.62	16.62	5.66	150.37	115.75	4.34
<b>Julio</b>	32.32	16.62	5.86	167.16	134.84	5.17
<b>Agosto</b>	35.72	16.62	6.14	192.10	156.38	5.38
<b>Setiembre</b>	37.92	16.67	5.83	163.98	126.06	4.32
<b>Octubre</b>	43.12	16.67	5.36	127.39	84.26	2.95
<b>Noviembre</b>	43.32	20.17	5.28	100.93	57.61	2.33
<b>Diciembre</b>	48.42	20.22	5.48	112.08	63.66	2.31

Fuente: Elaboración propia

##### 4.4.1. Cálculo de la capacidad del tanque de almacenamiento.

Conociendo la demanda diaria de agua del mes con mayor requerimiento, que es febrero con **54.52 m3/día**, y dando por buena una estimación del periodo de calma más largo de tres días, resulta:

$$\text{Capacidad del tanque} = 54.52\text{m}^3 \times 3 = 163.53\text{m}^3$$



Cuando las variaciones estacionales son tales que el período de máxima demanda de agua corresponde al de la velocidad media mínima del viento, bombear agua durante la temporada de viento y almacenarla en recipientes de membrana de plástico, también conocidos como bolsas flexibles o tanques flexibles, o vejigas de agua, se vuelve económicamente interesante. Dicha solución no requiere obras civiles ni permisos de construcción.

Por lo tanto, bombear agua durante la temporada de viento y almacenarla en contenedores cerrados adecuados, como los tanques flexibles, para evitar pérdidas por evaporación, no solo requerirá menos energía debido al mayor nivel de la capa freática, sino que proporcionará una mejor calidad del agua y una mayor confiabilidad del suministro también (M. Alejandro R. 2018).

Por tanto, se debe elegir dos cisternas flexibles de 80 m<sup>3</sup> de **7.40 x 10.25 x 1.50 m.**

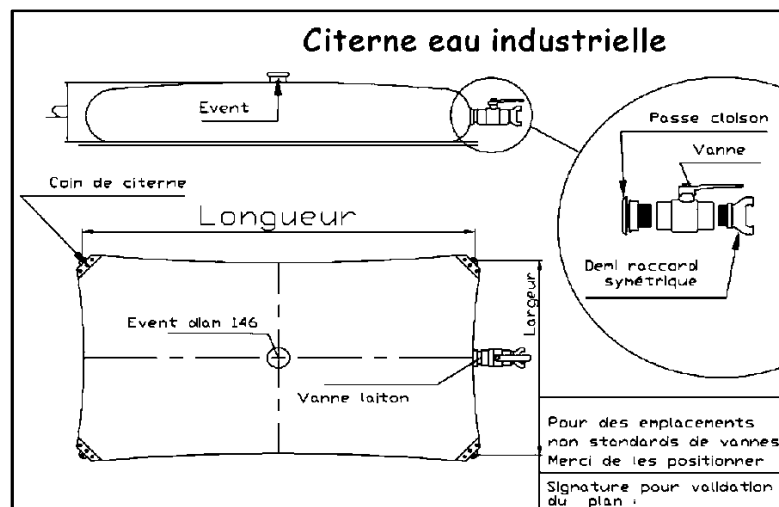


Figura 32: Cisterna flexible (detalle)  
Fuente: Catalogo Conterol



Figura 33: Cisterna (fotografía)

Fuente: <https://www.google.com/search?q=cisternas+flexibles+de+agua>

Para la tubería se utilizará tubo de polietileno negro cedula 40 de 2" de diámetro debido a su flexibilidad, resistencia, precio y disponibilidad.

#### **4.5. ¿Por qué se ha escogido la dupla: Aerogenerador ENAIR E30PRO & BOMBA NASTEC 4HS?**

La dupla escogida, se ha tomado como la mejor alternativa porque:

*El aerogenerador de ENAIR E30PRO*, está diseñado para cubrir la demanda energética de cualquier situación agrícola de magnitud media y vivienda habitual, incluso con viento bajo. Su eficiencia de generación y diseño, son propias para soportar de la mejor forma la acción de fuertes vientos. Actualmente se han desarrollado en estos equipos, técnicas innovadoras como la Dinámica Computacional de Fluidos, que inicialmente fueron propias de la industria aeroespacial con la finalidad de incrementar la eficiencia en generación a bajo ruido.

Como fortaleza principal de estos aerogeneradores se ha visto que a una velocidad de viento muy baja, tal como 1,8 m/s, la turbina eólica comienza su trabajo y es eficiente. Su sistema de control es bastante sencillo y actúa de manera muy fácil, pues el Aerogenerador Enair E30 PRO está provisto de una caja de cambios "direct drive" y, como material apropiado en la construcción de la torre, se utiliza "Lattice. clip. tubular"; factores

preponderantes en la seguridad operativa de la primera y conservación climática de la segunda.

*Las bombas 4HS* tienen como fortaleza científica la versatilidad de operación, pues su velocidad variable permite cubrir, con un único modelo de bomba, una amplia gama de caudales y alturas de elevación.

La elección de la bomba también se ha realizado teniendo en cuenta las bondades en su funcionamiento uniforme ya que, para mantener una presión constante, cuando la demanda hídrica disminuye, la bomba 4HS responden disminuyendo la velocidad de rotación o frecuencia. Esta disminución de la velocidad se debe a que el diseño contempla una reducción significativa de la potencia absorbida por la bomba. Otro parámetro importante constituye la inclusión de un módulo de control, especialmente útil para limitar la corriente máxima absorbida por la bomba; una vez superado este umbral, la bomba 4HS limitará automáticamente la velocidad de rotación, pero siempre ga4rantizando el servicio. También es rescatable en la elección de esta bomba, la cualidad de ser susceptibles de ser alimentadas por energías renovables y además pueden ser alimentadas por AC o DC con una amplia gama de voltajes (90 - 265 VAC / 90 - 400 VDC) y pueden conectarse directamente a paneles fotovoltaicos, baterías, aerogeneradores y grupos electrógenos. Como parte adicional podemos sustentar su idoneidad para este caso porque en su sistema de control electrónico, está provista de un algoritmo especial en el software que permite ajustar el rendimiento hidráulico para cada fuente de energía a la potencia máxima disponible maximizando el caudal de agua bombeada y el máximo aprovechamiento de la energía recibida.

#### 4.6. Determinación de costos y beneficios económicos de la implementación del diseño del sistema eólico propuesto.

##### 4.6.1. Características del equipo de bombeo tradicional:

Tabla 27: Características de equipo de bombeo

<b>Marca Bomba/Motor</b>	Motobomba Autocebante MEBA
<b>Modelo Bomba/Motor</b>	80ZB20-3-1Q
<b>Tipo Acople Bomba-Motor</b>	Directo-rígido
<b>Tipo de succión</b>	Negativa
<b>Diámetro de la succión</b>	80 mm.
<b>Diámetro de la impulsión</b>	80 mm.
<b>Altura de elevación</b>	20 m.
<b>Altura de succión</b>	6 m.
<b>Caudal</b>	60 m <sup>3</sup> /h
<b>Potencia</b>	6.5 Hp
<b>Tipo de energía</b>	Energía de combustible (gasolina)

#### 4.6.2. Costos del equipo de bombeo tradicional:

<b>RESUMEN DE COSTOS - SISTEMA A GASOLINA</b>						
	<b>Und</b>	<b>Metrado</b>	<b>Precio (S/.)</b>	<b>Parcial (S/.)</b>	<b>Vida útil (Años)</b>	<b>Anualidades</b>
<b>Costos de inversión</b>						
Motobomba autocebante MEBA MOD. 80ZB20-3-1Q	Und	1	1200	1200	3	400.00
Manguera de succión corrugada Ø3"	m	6	68	408	3	181.67
Canastilla para impurezas	Gbl	1	140	140	10	28.97
Tubería de PVC - SAP Ø3"de 3m.	m	4	40	160	10	33.10
Transporte	Gbl	1	100	100	3	44.53
Materiales para instalación	Gbl	1	50	50	10	10.35
Instalación	Gbl	1	3000	3000	3	1335.77
<b>Total</b>						<b>1901.53</b>
<b>Costos de operación y mantenimiento</b>						
Combustible (1.14 l/h, 2.5 h/día), 2.85 l/día	L	1040.25	3.567			3710.57
Mantención (15% costo bomba)	Und	1	180			2160.00
Transporte de combustible por mes	Gbl	12	3000			36000.00
Operación diaria						
<b>Total</b>						<b>40790.57</b>
<b>Total costo anual</b>						<b>43771.53</b>
<b>Producción anual de agua (54.52 m3/día)</b>	m3/día	54.52				19899.80
<b>Costo específico (S./m3)</b>						<b>2.20</b>

#### 4.6.3. Costos de sistema eólico-eléctrico diseñado:

<b>RESUMEN DE COSTOS - SISTEMA EÓLICO-ELÉCTRICO</b>						
	<b>Und</b>	<b>Metrado</b>	<b>Precio (€)</b>	<b>Parcial (S/.)</b>	<b>Vida útil (Años)</b>	<b>Anualidades (S/.)</b>
<b>Costos de inversión</b>						
Aero-generador ENAIR E30 PRO de 3 KW.	Und.	1	6460	23773	25	950.91
Bomba NASTEC 4HS 08/03 MP de 1.8 KW.	Und.	1	2282	8398	25	335.92
02 Cisternas flexibles de 80 m3. (CITERNEO)	Und.	1	5135	18897	25	755.88
Instalación	Und.	1	800	3128	5	625.60
<b>Total</b>			<b>14677</b>	<b>54011.36</b>		<b>2668.31</b>
*) Los precios de equipos incluyen accesorios y repuestos de recambio.						
<b>Costos de operación y mantenimiento</b>						
Mantenimiento (10% del costo equipos)	Und	1	874	3217		<b>38604.67</b>
Operación diaria						
<b>Costo Total anual</b>						<b>41272.98</b>
<b>Producción anual de agua (56.00 m3/día)</b>	m3/día	56.00				20440.00
<b>Costo específico (S./m3)</b>						<b>2.02</b>

Por lo tanto, la diferencia de costo:

$$2.20 - 2.02 = 0.18 \frac{S/}{m^3}$$

$$0.18 \frac{S/}{m^3} * 56 \frac{m^3}{día} * 365 \frac{días}{año} = 3679.20 \frac{S/}{año}$$

#### 4.6.4. Beneficio Útil:

$$2.02 \frac{S/}{m^3} * 56 \frac{m^3}{día} * 365 \frac{días}{año} = 41288.80 \frac{S/}{año}$$

#### 4.6.5. Retorno operacional de la inversión:

$$R.O.I. = \frac{Inversión Inicial}{Beneficio Útil}$$

$$R.O.I. = \frac{54011.36 S/}{41288.80 S/./año}$$

$$R.O.I. = 1.3081 \text{ años} = 15.7 \text{ meses.}$$

## V. DISCUSIONES

En el desarrollo de la investigación, podemos decir que se ha producido el diseño y selección de un sistema eólico-eléctrico para mejorar el proceso de bombeo de agua con fines de riego en el sector El Palomar-Rázuri y se ha presentado la metodología, cálculos e implementación de componentes para el sistema indicado.

Como referencia a nuestra tesis, y a fin de debatir los resultados obtenidos, tomaremos comparativamente el debate con nuestros antecedentes o trabajos previos:

La investigación de Medina Noguero (2011), trata de un diseño aerodinámico de palas de una turbina de viento, a partir del rediseño de un rotor empleando el método de Rankine-Froude, pero realizándolo mediante simulación con un software de dinámica de fluidos en el cual pudo realizar varias iteraciones para llegar a un acercamiento de exactitud, la misma que no fue experimentada; en cambio, nuestra investigación se ha cimentado en cálculos, tablas, catálogos y selecciones de componentes garantizados y probados, dándole un perfil experimental propiamente dicho.

En cambio, en la tesis de Andrade Naccha y Quispe Conde (2016), se desarrolla un diseño y selección de un sistema eólico solar para la generación de energía eléctrica que mejore el sistema de bombeo de agua con fines de riego en el Centro poblado de Chinumani-Yunguyo, muy similar al nuestro, pero en mayor dimensión, ya que la demanda es bastante alta. En contrastación con nuestra investigación podemos señalar que existe diferencia en el sistema de generación, pues mientras este antecedente trata un aspecto eólico-solar, la nuestra trata un sistema eólico-eléctrico; sin embargo, ambos desarrollan la investigación teórica y práctica, contemplando primero el estudio de todos los elementos que conforman un sistema de riego, un sistema hidráulico para el bombeo de agua y un sistema eólico para la generación de energía eléctrica.



Asimismo, la investigación de Sandoval Chero (2018), desarrolla un estudio referente al diseño de una Aero-bomba para riego tecnificado de 10 Ha. de terreno de sembrío de papaya, con un tanque de almacenamiento de 20 m<sup>3</sup> y utilizando como fuente de abastecimiento un río con constante flujo, lo cual hace que esta propuesta sea interesante, pero aún quedó como proyecto. Nuestra investigación ha desarrollado toda la metodología teórico-práctica para implementar el diseño del sistema eólico para generación de energía y riego tecnificado de terrenos de sembríos de espárrago, con demanda de 68.7 m<sup>3</sup>/día/Ha, por lo que el tanque de almacenamiento debe ser de 163.3 m<sup>3</sup>, por lo tanto, se debe elegir dos cisternas flexibles de 80 m<sup>3</sup> de **7.40m. x 10.25m. x 1.50m.**

También, frente a la investigación de Auccacusi Montejo (2014), que trata sobre un Análisis Técnico Económico para la selección del equipo óptimo de bombeo en Muskarumi - Pucyura – Cuzco, utilizando fuentes renovables de energía, el cual selecciona un equipo óptimo de bombeo para un volumen de 282 m<sup>3</sup> al día, determinándose el caudal para 3 hectáreas de cultivo. Este diseño fue realizado tomando como referencia una población real, con problemática de falta de agua y desarrollado en condiciones macro, pues ameritaba la atención urgente del poblado Pucyura-Cuzco, por lo tanto, fue muy tecnificado al utilizar incluso aspersores para optimizar riego de la parcela en mención; el análisis económico y estudio de rentabilidad fueron factibles porque además del problema social a resolver, se obtuvo una tasa interna de retorno del 58%. Nuestra investigación, guardando las distancias de envergadura de diseño, también ha alcanzado niveles económicos satisfactorios que aprueban la factibilidad del desarrollo, al obtener un retorno operacional de la inversión (ROI) de **1.3081 años = 15.7 meses.**

Finalmente, frente a la investigación de Cornejo y Gayoso (2010) la cual trata de una evaluación técnica económica para la generación de energía eléctrica híbrida eólica-solar para una comunidad, incide sobremanera en la parte ecológica de energías renovables, proyectando la demanda eléctrica para 10 años con generación de 14. Kwh/día, dimensionada para 1997.68 Wh/día, a un costo total de inversión de S/. 49,571.03; mientras que nuestra

investigación persigue fines mayormente agrícolas, aprovechamiento de transformación de energía eólica en eléctrica, para bombear agua hacia la parcela de terreno de sembríos de espárrago para luego ser industrializados, uso de servicios tanto de vivienda, así como de crianza de animales; y, asimismo, en el aspecto técnico-económico, nuestra inversión asciende a S/. 54,011.36, pero proyectada para 20 años de servicio y con un retorno operacional de la inversión de 15.7 meses, largamente más eficiente que nuestro antecedente.

## VI. CONCLUSIONES

- Hemos iniciado nuestra investigación, realizando la evaluación del escenario original y condiciones actuales de bombeo de agua y los requerimientos de riego en el sector El Palomar-Rázuri, determinando que el área de estudio cuenta con un pozo zanja, el cual alimenta a una red de distribución haciendo uso de una Motobomba a gasolina, la misma que sirve para suministrar del líquido elemento a consumo de vivienda agraria y una finca que cuenta con una plantación de dos hectáreas de esparrago verde, la cual se encuentra implementada con un sistema de riego por goteo, cuya demanda asciende a 68.7 m<sup>3</sup>/día/Ha. Habida cuenta que la actual población de plantas se extiende en 2 hectáreas, se realizó el cálculo de requerimiento de bombeo de agua actual, el cual asciende a 56 m<sup>3</sup>/h/Ha., lo que significa que se requiere como caudal para 2 horas de riego al día (típico, de 112 m<sup>3</sup>/h).
- Se determinó, mediante el análisis correspondiente, el dimensionamiento y factibilidad técnica del mejoramiento del sistema, identificando primero la fuente de abastecimiento de agua que constituye un pozo zanja de 8.02 m. de ancho por 41.20 m. de longitud y 9.00 m. de profundidad; para la evaluación del recurso eólico se tuvieron en consideración la base de datos de la Nasa año 2018 que estima como velocidad promedio mensual del viento en 5.14 m/seg, que cubre nuestras expectativas del mes de marzo que se escogió como referente por tener velocidad de diseño de 4.57 m/seg y tener la menor relación de potencia del viento vs. altura del rotor; se identificaron a continuación, los activos principales que conforman la línea mediante un estudio de criticidad, el mismo que arroja una clasificación de 8 componentes críticos y 2 semi-críticos en el comportamiento operacional de un sistema eólico eléctrico (aerogenerador), esto como parte de prevención en la operatividad del nuevo sistema propuesto y su mantenimiento correspondiente.
- Se ha efectuado el diseño y selección de los componentes del sistema de bombeo y equipos complementarios, en base a los consumos

proyectados que influirán sobre la demanda total de la parcela, lo cual mediante el cálculo correspondiente, se determinó establecer como carga de bombeo y producto volumen-carga (PVC), **20.28 m.c.a. y 1013.40 m<sup>3</sup>.m.**, respectivamente; asimismo, de acuerdo al dimensionamiento de rotor realizado, cuyo diámetro es 3.34 m., se seleccionó un aerogenerador **E30PRO de 3Kw** de potencia nominal y 220 V y una bomba **Nastec 4HS 08/03MP**, de 1100 W, 1.12–11.2 m<sup>3</sup>/H de caudal mínimo-máximo y 16.8-49.5 m. de altura mínima-máxima, por lo que el proveedor recomienda una electrobomba vertical con motor de 1.8 kW y descarga 2" y voltaje de 90-265 VAC.

- Se efectuó la comprobación del gasto entregado por el sistema de bombeo diseñado, post-mejora y calculado la capacidad del tanque de almacenamiento, determinándose que existe una polarización entre los meses de marzo y agosto, donde naturalmente existe suministros mínimo y máximo, respectivamente, por lo cual el gasto entregado obedece a las cifras de **14.89 m<sup>3</sup>/día** y **156.38 m<sup>3</sup>/día**. La capacidad del tanque, conociendo la demanda diaria de agua del mes con mayor requerimiento resultó ser **163.3 m<sup>3</sup>**. Por tanto, se debe elegir dos cisternas flexibles de 80 m<sup>3</sup> de 7.40 x 10.25 x 1.50 m.
- En la Determinación de costos y beneficios económicos de la implementación del diseño del sistema eólico propuesto, se ha tenido en cuenta dos escenarios: el sistema de bombeo tradicional a gasolina, cuyo costo específico es 2.20 S./m<sup>3</sup> vs. el nuevo sistema eólico-eléctrico diseñado, cuyo costo específico es 2.02 S./m<sup>3</sup>; siendo la diferencia total del costo de **3679.20  $\frac{S.}{año}$** , lo cual representa un beneficio útil de **41288.80  $\frac{S.}{año}$**  y un retorno operacional de la inversión (ROI) de **1.3081 años = 15.7 meses**.

## **VII. RECOMENDACIONES.**

Las personas encargadas de operar el sistema eólico-eléctrico de bombeo de agua con fines de riego, deberá ser capacitado e instruido en el correcto manejo de los equipos, así como también en las labores de mantenimiento, a fin de identificar las posibles fallas que se presenten y determinar los puntos críticos que se han mencionado en la presente tesis.

Se recomienda elaborar e implementar un Plan de Mantenimiento, basado en la confiabilidad, una vez instalado completamente el sistema eólico eléctrico, a fin de preservar todo el conjunto operacional y determinar siempre la mejora continua, por lo cual se realizará seguimiento permanente a las labores programadas para tal fin.

Se recomienda, asimismo, el manejo y control especificados para los rangos de caudal promedios, evitando trabajar en el límite tanto mínimo como máximo, así como mantener el nivel del tanque en un aproximado superior al 50% para evitar arrastre de sólidos propios de la precipitación en agua.

Finalmente, se recomienda para el seguimiento de la implementación del diseño, materia de la presente investigación, elaborar un diagrama de Gantt especificando las diferentes labores y tareas para la correcta operatividad y mantenimiento del sistema.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Herrera, R., Foresi, P. D., Gómez, U. D., & Sequi, J. R.** (2005). *Sistema comunitario de agua potable con bombeo*. **Revista del CIZAS**, 6(1 y 2). Obtenido de [http://editorial.unca.edu.ar/Publicacione%20on%20line/CIZAS/imagenes/pdf/V6/6.Sistema\\_comunitario\\_de\\_bombeo.pdf](http://editorial.unca.edu.ar/Publicacione%20on%20line/CIZAS/imagenes/pdf/V6/6.Sistema_comunitario_de_bombeo.pdf)
- S. Mathew.** (2006). *“Wind Energy-Fundamentals, Resource Analysis and Economics”*, Springer.
- James & James.** (2004). “Wind Power”, P. Gipe.
- ICAO.** (1993), *“Manual of the Standard Atmosphere (extended to 80 kilometers)”*, Doc 7488-CD, Third Edition.
- M. Villarubias L.** (2012). *“Ingeniería de la energía eólica”*.
- Edward Charles Lemmer.** (2009). *“Wind-Electric Pump System Design”*.
- M. castro, A. Colmenar, R. P. Fiffe, M. Pérez, O. Perpiñán y J. M. Perulero** (2011). *Sistemas de Bombeo Eólico y Fotovoltaico*.
- E. García C., R. Cuba R.** (2005). *“Manual teórico practico de capacitación en energía eólica”*.
- M.A. Navas M.** (2008). *“Riego tecnificado con energía eólica en el norte de Chile”*.
- M. Alejandro R.** (2018). *“Small Wind Turbines for Electricity and Irrigation: Design and Construction”*.

## ANEXOS:

### ANEXO 1:

#### DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD DEL AUTOR

Yo: MARCOS CEBOJÍN CASTILLO SOLES, alumno de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura y Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad César Vallejo de Trujillo, declaro bajo juramento que todos los datos e información que acompañan al Trabajo de Investigación titulado “Diseño y selección de un sistema eólico-eléctrico para mejorar el proceso de bombeo de agua con fines de riego en el sector El Palomar-Rázuri” son:

1. De mi autoría.
2. El presente trabajo de investigación no ha sido plagiado ni total, ni parcialmente.
3. El trabajo de investigación no ha sido publicado ni presentado anteriormente.
4. Los resultados presentados en el presente trabajo de investigación, no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Trujillo, diciembre de 2020.



Marcos Cebojín Castillo Soles

## ANEXO 2

### DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD DEL ASESOR

Yo MSc. Ing. Martín Sifuentes Inostroza, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura y Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad César Vallejo de Trujillo, revisor del trabajo de investigación titulado: “Diseño y selección de un sistema eólico-eléctrico para mejorar el proceso de bombeo de agua con fines de riego en el sector El Palomar-Razuri” del estudiante Marcos Cebojín Castillo Soles, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 24% verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. en tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Trujillo, diciembre de 2020

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Martín Sifuentes Inostroza', with a large circular flourish above the name.

MSc.Ing. Martín Sifuentes Inostroza

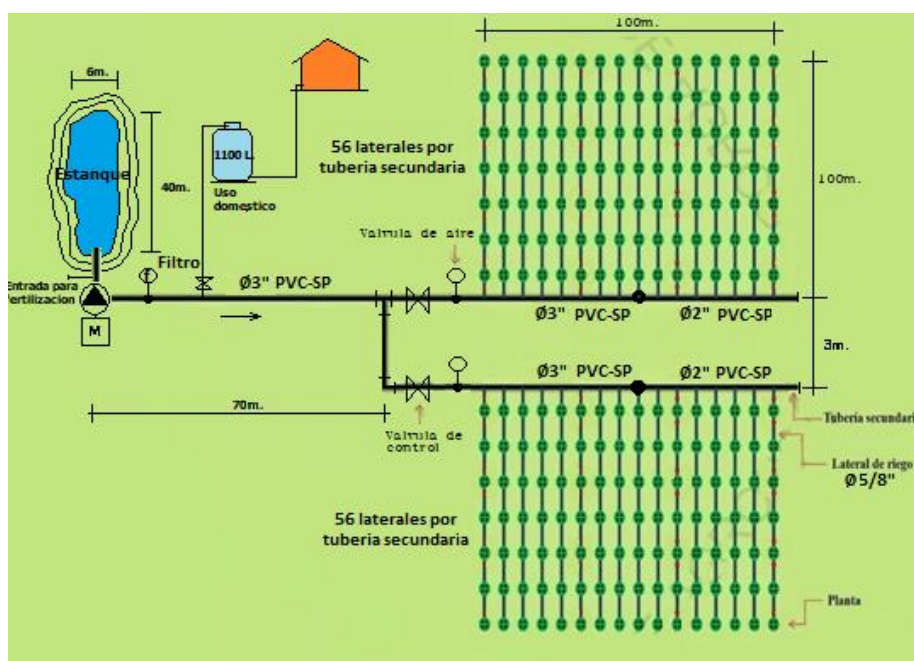


## ANEXO 3

### VALIDACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS

#### EVALUACION DE LAS CONDICIONES ACTUALES DE BOMBEO Y RIEGO

##### 1. Condiciones actuales de bombeo y riego



Esquema del sistema de riego existente.

##### 2. Pauta de diagnóstico y evaluación de riego localizado

###### Identificación del proyecto y características del sistema

<i>-Identificación</i>	
Nombre del Propietario	Nancy Hebert Escobedo Pulido
Nombre predio	Wichay
Ubicación	Distrito de Rázuri, Provincia de Ascope, Región La Libertad
Superficie total	27.5 has.
Calidad del agua de riego	PH=8.67, C.E.=3.75, análisis químico, análisis físico: clara
Acumulador de agua	Tanque PVC 1100 Litros
Necesidad de desarenador	No necesario

Superficie tecnificada	2.0 has.
-Fecha de evaluación	23/08/2019
<i>-Características de instalación</i>	
Quién confeccionó el proyecto	----
Año de la instalación	2016
Tipo de riego localizado	Riego por goteo en superficie
Empresa que instaló	Propio agricultor
Proveedor del equipo	Rivulis Irrigación - Perú
Como se financió el proyecto	Recursos propios
Subsidio recibido (%)	---

Características del sector de riego

Cultivo (s)	Esparrago Verde
Marco (s) de plantación	1.50 x 0.30 m
Edad de las plantas	2 Años
% de sombreadamiento	0.13
Tipo (s) de emisor	Ro Drip, acción de flujo en vórtice y resistente a obturaciones
Caudal del emisor	500 lph/100 m.
N° emisores por planta	2
Distancia entre emisores	20 Cm.
N° de laterales por hilera	56
Diámetro laterales	16 mm. (5/8")
Longitud máx. de laterales (m)	100 m.
N° de sectores de riego	2
Criterios de programación	----

Características de los aparatos de control

VALVULAS							
	Volumé trica	Regula_ dores de P°	De Aire	Eléctricas	Compuerta	Bola	Despiches
Marca			Desconocida PVC			Desconocida PVC	
Diámetro			1"			3"	
Estado			bueno			bueno	
Cantidad			2			2	

Características del sistema de filtrado

FILTRO			
	Gravas	Anillas	Malla
Marca		Azud	

Modelo		PP 3" M-NPT 3SA	
Capacidad (Ø)			
Característica	Tipo de grava:	Nº Mesh:120	Nº Mesh:
Presión entrada			
Presión salida			
Calidad de la arena			
Calidad de malla/anillas			
Otros		Grados de filtrado desde 5 a 400 micrón	

#### Características del equipo de bombeo

Marca Bomba/Motor	Motobomba Autocebante MEBA
Modelo Bomba/Motor	80ZB20-3-1Q
Tipo Acople Bomba-Motor	Directo-rígido
Tipo de succión	Negativa
Diámetro de la succión	80 mm.
Diámetro de la impulsión	80 mm.
Altura de elevación	20 m.
Altura de succión	6 m.
Caudal	60 m3/h
Potencia	6.5 Hp
Tipo de energía	Energía de combustible (gasolina)
Verificar ruidos extraños o vibraciones	ninguno
Cebado de la bomba (cada cuanto)	Autocebado
Consumo de energía mes	25 litros de combustible (gasolina)

#### Características del manejo de riego

Tipo de automatismo	Ninguno
Unidades operacionales de riego	1 con dos sectores
Frecuencia de riego (días)	cada 2
Duración de riego (horas)	3
Disponibilidad de estanque (m3)	Riego directo
Tipo de estanque	Pozo Zanja
Tipo de revestimiento	Zanja a tajo abierto sin revestimiento
Consumo de agua día (m3)	112
Programa de fertirrigación:	Dos por campaña

Existencia de medidores de caudal?	En sistema de riego y sistema de inyección de fertilizantes (no existen)
------------------------------------	--

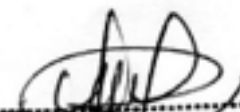
#### Características de la mantención del equipo

Tipo de despiches	--
Frecuencia de limpieza de filtros	Cada riego
Frecuencia de limpieza en laterales	Cada riego
Frecuencia de limpieza en terciarias	Cada riego
Frecuencia de limpieza en emisores (reposición)	En pleno riego(manual lateral por lateral)
Tratamiento químico en el sistema	ninguno
Cantidades de ácido e hipoclorito utilizado	Sin uso
ácido e hipoclorito utilizado	Sin uso

## CONSTANCIA DE VALIDACION

**Petronila Paredes Aredo** Ing. Agrónomo conocedora de los sistemas de riego agrícola; mediante la presente hago constar que el instrumento utilizado para la evaluación de las condiciones actuales de bombeo y riego del trabajo de tesis titulado: "**Diseño y selección de un sistema eólico-eléctrico para mejorar el proceso de bombeo de agua con fines de riego en el sector El Palomar-Rázuri**", elaborado por el señor Marcos Cebojín Castillo Soles, aspirante al título de ingeniero Mecánico Eléctrico, reúne los requisitos suficientes para ser considerado válidos y confiables; por tanto, aptos para ser aplicados en el logro de los objetivos que se plantean en la investigación.

Trujillo, diciembre 2020.



Ing. PETRONILA PAREDES AREDO  
Reg. CIP. N° 24878

## ANEXO 4

### MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Indicadores	Escala de medición
V.I. Sistema eólico eléctrico de bombeo de agua.	Aerogenerador acoplado a electrobomba para transvase de líquidos, el cual permitirá el mejoramiento del sistema de bombeo de agua con sistemas convencionales de combustible fósil.	El sistema eólico eléctrico será accionado por el recurso eólico el cual convierte la energía mecánica en energía eléctrica, para accionar una electrobomba de agua.	Demanda energética requerida por la bomba	Numérica
V.D. Riego agrícola en parcela del sector El Palomar – Rázuri.	Permite practicar la agricultura y diversifica las cosechas así como también contribuye al incremento de los ingresos económicos de los agricultores.	La necesidad de agua de la parcela estará cubierta por la electrobomba accionada con el aerogenerador.	Demanda de agua del cultivo existente en la parcela	Numérica

**COMPONENTES DEL AEROGENERADOR ENAIR 30PRO 3KW.**



**1.-Palas del aerogenerador**

Fabricadas con una nueva generación de telas de fibra de vidrio, con un núcleo de poliuretano de alta densidad y con un refuerzo de la raíz que le proporciona un factor de seguridad 9.

**2.-Sistema de control**

Sistema patentado que permite controlar de forma pasiva el ángulo de las palas. Este innovador sistema cuenta con 2 velocidades de actuación. Los primeros 30

grados absorben rachas de viento y los siguientes 15 grados actúan en caso de vientos muy fuertes mantenidos.

### **3.- Generador**

Cuenta con un nuevo diseño que optimiza la producción ya que mantiene la totalidad de los conductores de cobre dentro del campo magnético. Junto a sus 30 polos y unos imanes de neodimio N50, incrementan la generación de energía en el 15%.

### **4.-Timón de orientación**

Un núcleo de acero embebido en poliuretano de alta densidad y recubierto con fibra de vidrio.

### **5.-Cuerpo**

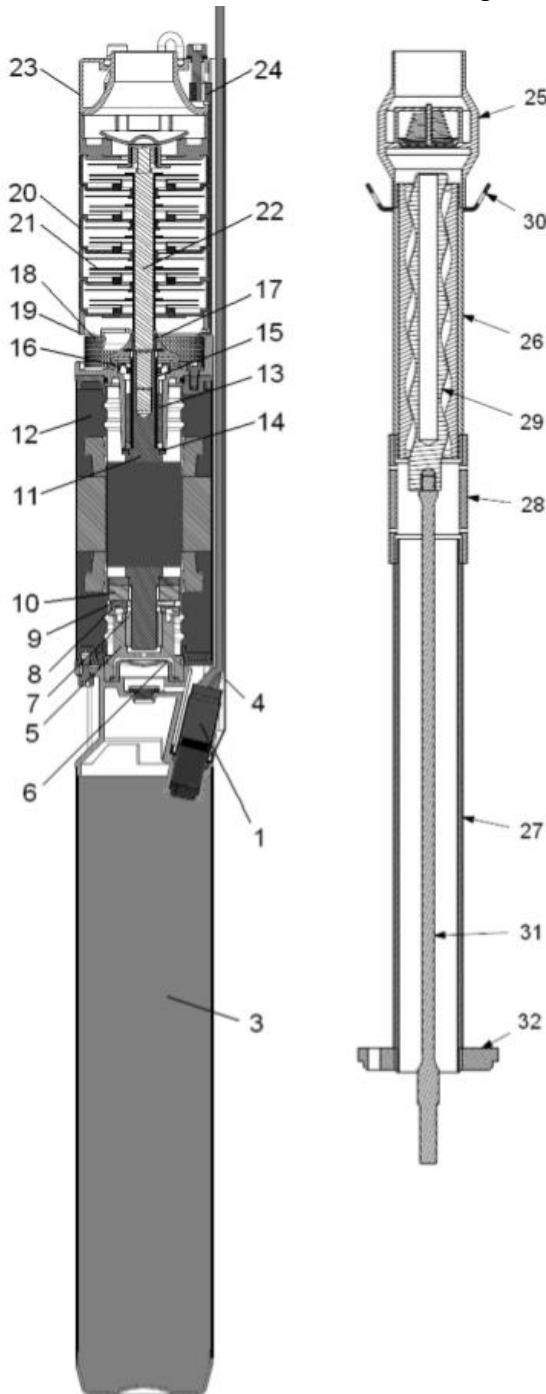
En la nueva serie PRO, el cuerpo ha sido rediseñado para distribuir todo el peso del Aerogenerador justo en el centro de gravedad, convirtiéndose en un sistema mucho más estable y robusto.



## Anexo 6: COMPONENTES DE LA BOMBA

### BOMBA SUMERGIBLE NASTEC TIPO 4HS 08/03 MP.

Las bombas 4HS MP pueden ser alimentadas por AC o DC con una amplia gama de voltajes (90 - 265 VAC / 90 - 340 VDC). Estas pueden conectarse directamente a paneles fotovoltaicos, baterías, aerogeneradores y grupos electrógenos, como

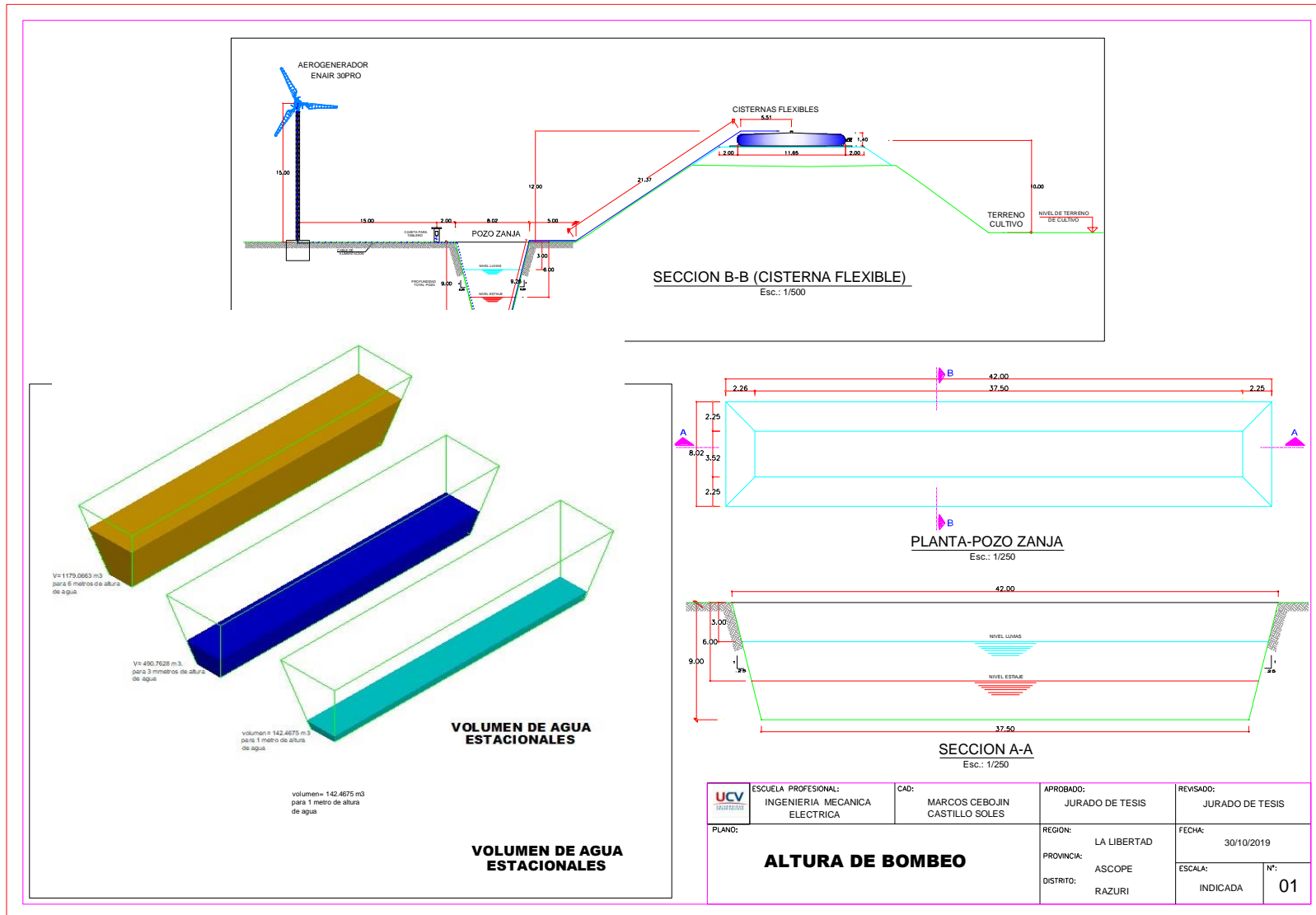


Item	DESCRIPCION	MATERIAL
1	Conector de alimentación con cable para aplicaciones de agua potable	AISI 304 + cable según ACS-KTM-WRAS
3	MINT: Módulo electrónico integrado	
4	Protector de cable	AISI 304
5	Cojinete de empuje inferior	AISI 304
6	Diafragma de goma	EPDM
7	Casquillo inferior de carbón	CTI25
8	Disco inclinable	AISI 304
9	Soportes	AISI420j
10	Disco de carbón	CTI25
11	Eje con rotor	AISI 431
12	Estátor resinado	AISI 304
13	Cojinete superior de carbón	CTI25
14	Cojinete de empuje superior	Teflon
15	Camisa cerámica	AISI 304 + Ceramic
16	Retén	FKM
17	Protector de arena	NBR
18	Filtro de bomba	AISI 304
19	Soporte de bomba	AISI 304
<b>Bomba centrífuga</b>		
20	Difusores	AISI 304
21	Turbinas	AISI 304
22	Eje de bomba	AISI 304
23	Cuerpo de impulsión	AISI 304
24	Tirantes	AISI 304
<b>Rotor helicoidal</b>		
25	Válvula antiretorno	AISI 304
26	Estátor helicoidal	EPDM + AISI 304
27	Soporte de tubo	AISI 304
28	Conector	AISI 304
29	Rotor helicoidal	AISI 316 cromed
30	Gancho de seguridad	AISI 304
31	Eje flexible	AISI 316
32	Adaptador de bomba	AISI 304

## CARACTERISTICAS GENERALES:

<b>4HS MultiPower</b>	
Temperatura máxima del líquido	35°C (92°F).
Velocidad mínima del líquido	0.2 m/s.
Características del líquido bombeado	Agua limpia y químicamente no agresiva, no volátil, sin sólidos ni fibras, con un máximo de 50 g/m <sup>3</sup> de contenido de arena.
Grado de protección	IP68.
Profundidad máxima de inmersión	150 m.
Materiales	Motor y bomba en acero INOX AISI 304.
Cable	Cable Plano ACS - WRAS - KTM aprobado.
<b>Módulo de Control CM MultiPower</b>	
Temperatura ambiente máxima	50°C (122°F).
Grado de protección	IP55.
Materiales	Carcasa de aluminio, etiquetas en PVC, pasacables en poliamida (PA), membrana del display en polyester (PE).
Entradas analógicas	2 entradas 4-20 mA + 2 entradas 4-20 mA o 0-10 V programables por el usuario.
Entradas digitales	4 entradas N.A o N.C programables por el usuario.
Salidas digitales	2 relés de salida de 5 A , 250 VAC, N.A. o N.C programables por el usuario
Pantalla	Display LCD retroiluminado , 16 caracteres x 2 filas, 5 pulsadores, alarma acústica por zumbador.

## ANEXO 7: PLANO – ALTURA DE BOMBEO



## ANEXO 8:

---

### CRITERIOS DE EVALUACIÓN DEL ANÁLISIS DE CRITICIDAD

<b>Frecuencia de fallas</b>	
Elevado mayor a 40 fallas/año	4
Promedio 20-40 fallas/año	3
Buena 10-20 fallas/año	2
Excelente menos de 10 fallas/año	1

<b>Impacto Operacional</b>	
Parada total del equipo	10
Parada parcial del equipo y repercute a otro equipo o subsistema	7-9
Impacta a niveles de producción o calidad	5-6
Repercute en costos operacionales asociado a disponibilidad	2-4
No genera ningún efecto significativo	1

<b>Flexibilidad Operacional</b>	
No existe opción igual o equipo similar de repuesto	4
El equipo puede seguir funcionando	2-3
Existe otro igual o disponible fuera del sistema (stand by)	1

<b>Costo de mantenimiento</b>	
Mayor o igual a US\$ 400 (incluye repuestos)	2
Inferior a US\$ 400 (incluye repuestos)	1

<b>Impacto a Seguridad Ambiente e Higiene</b>	
Accidente catastrófico	8
Accidente mayor serio	6-7
Accidente menor e incidente menor	4-5
Cuasiaccidente o incidente menor	2-3
Desvío	1
No provoca ningún tipo de riesgo	0

En la siguiente Gráfica, “Matriz de Criticidad” se muestra la intersección de la consecuencia y la frecuencia de falla ponderada dando como resultado una falla media crítica para el elemento.

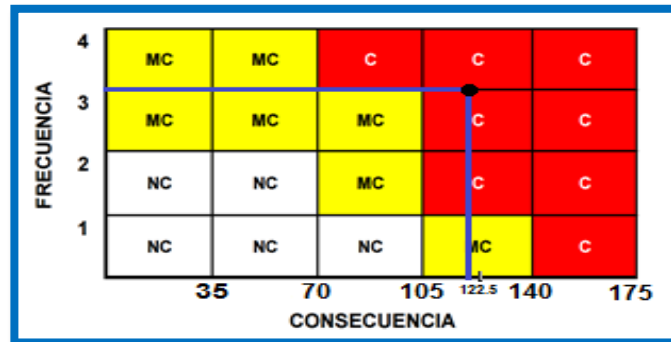


Figura - Intersección de la falla según la frecuencia y la consecuencia.

Fuente: Carlos Parra & Adolfo Márquez, 2012

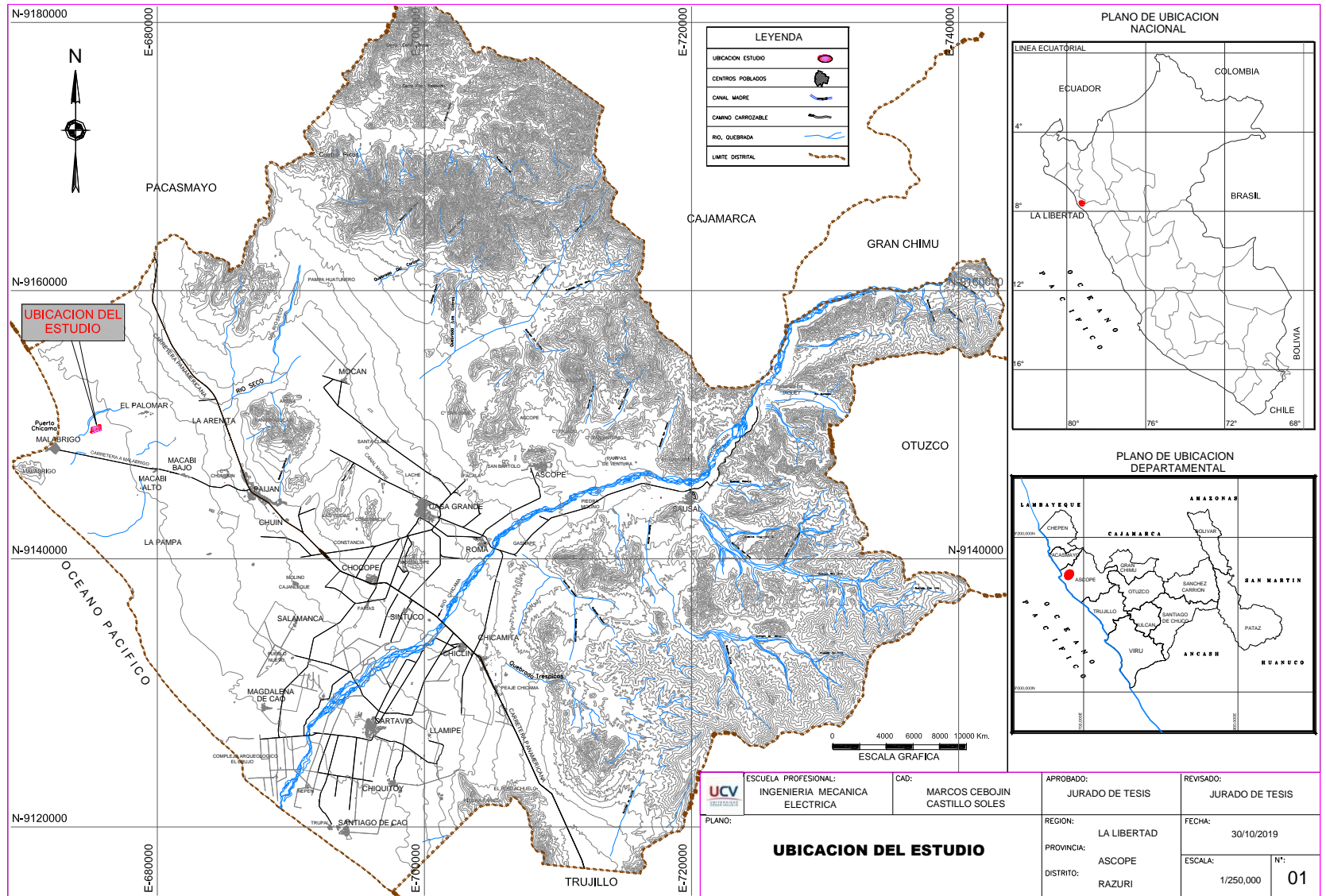
Análisis de criticidad de los activos principales que conforman la línea, según los elementos o componentes del sistema eólico-eléctrico en el sector El Palomar-Rázuri:

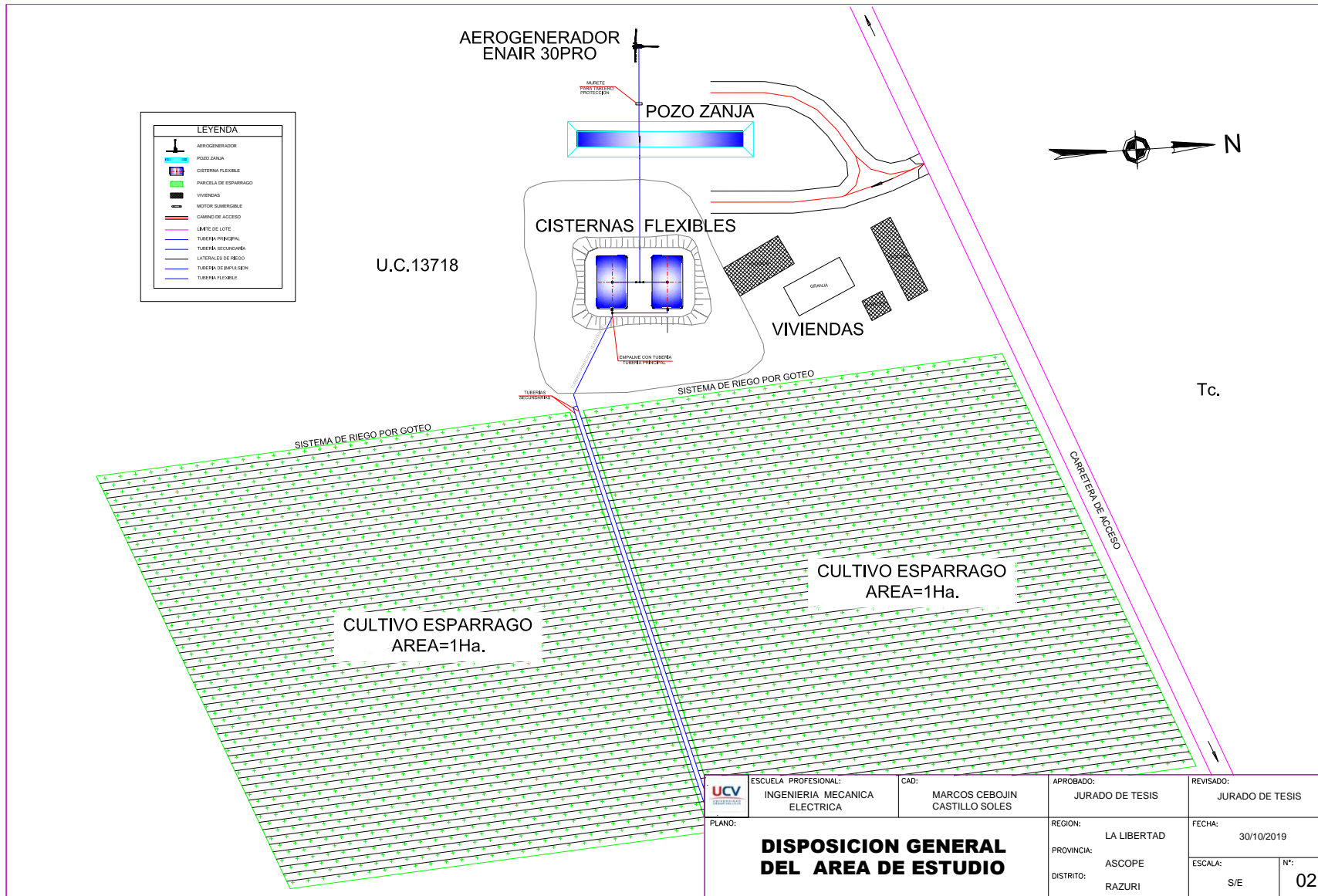
**Tabla 27.**  
**Valores críticos de las fallas según elementos.**

Item	Características	Elemento en Falla	Frecuencia de Fallas	I.O	F.O	C.M	I.S.y M.A.	CONSECUENCIA IOxFOxCMxISMA	NIVEL DE CRITICIDAD
F1	Soltura de palas, timón, eje de giro, puntera y torre del molino.	Rotor de molino	2	10	4	2	7	560	C
F2	Vibraciones anómalas de molino y/o de la torre del aerogenerador.	Contrapesos	3	8	3	2	4	192	C
F3	Ruido y/o aflojamiento de rodamientos del paso variable.	Rodamiento	3	7	3	2	2	84	MC
F4	Bloqueamiento del sistema e interruptor de frenado del molino.	Freno	2	7	3	1	6	126	C
F5	Desgaste de escobillas, anillos rozantes y cables de conexión.	Rotor	2	8	4	2	5	320	C
F6	Desconexión del regulador de carga, baterías, inversor y resistencias.	Torre	3	6	3	1	5	90	MC
F7	Ruptura del eje de transmisión de la bomba.	Eje	1	10	4	2	6	480	C
F8	Cambio de voluta por desgaste interno de la caja de la bomba.	Caja	1	10	4	2	4	320	C
F9	Desgaste de la unidad rotativa de la bomba	Impulsor	1	9	3	2	3	162	C
F10	Desgaste de acoplamiento flexible	Cople	2	10	2	2	5	200	C

Nivel de Criticidad	Cantidad
Críticos	8
Medio Crítico	2
No Crítico	0

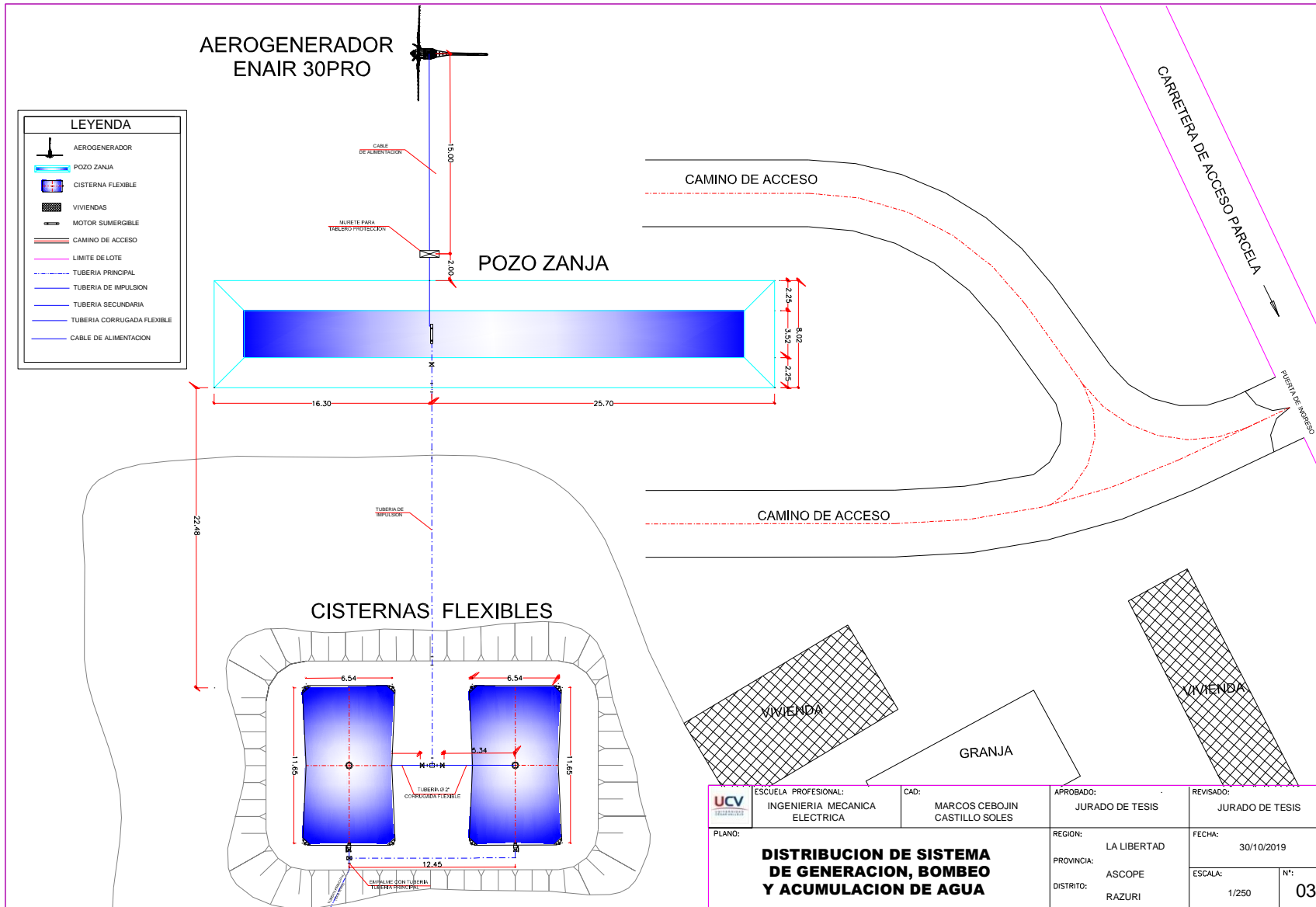
# Anexo 9: PLANOS GENERALES

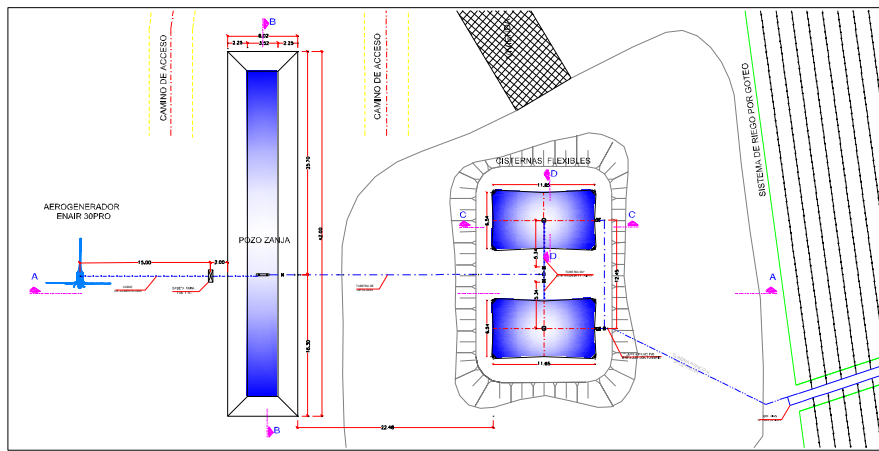




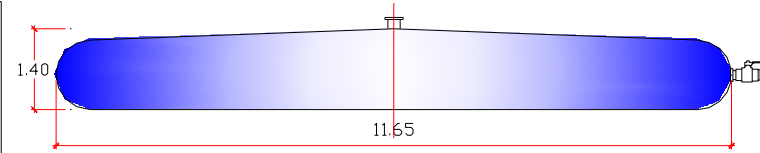
	ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERIA MECANICA ELECTRICA	CAD: MARCOS CEBOJIN CASTILLO SOLES	APROBADO: JURADO DE TESIS	REVISADO: JURADO DE TESIS
	PLANO: <b>DISPOSICION GENERAL          DEL AREA DE ESTUDIO</b>		REGION: LA LIBERTAD	FECHA: 30/10/2019
			PROVINCIA: ASCOPE	ESCALA: S/E
			DISTRITO: RAZURI	N°: <b>02</b>



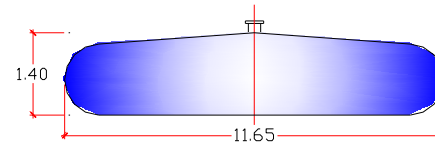




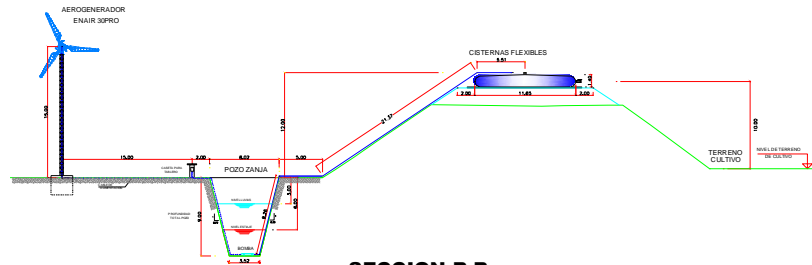
**SECCION B-B**  
ESC.: 1/250



**SECCION C-C**  
ESC.: 1/75



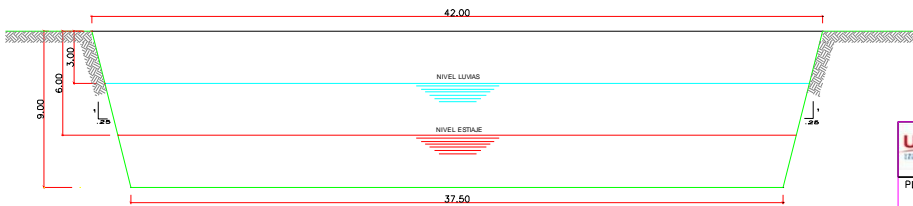
**SECCION D-D**  
ESC.: 1/75



**SECCION B-B**  
ESC.: 1/250

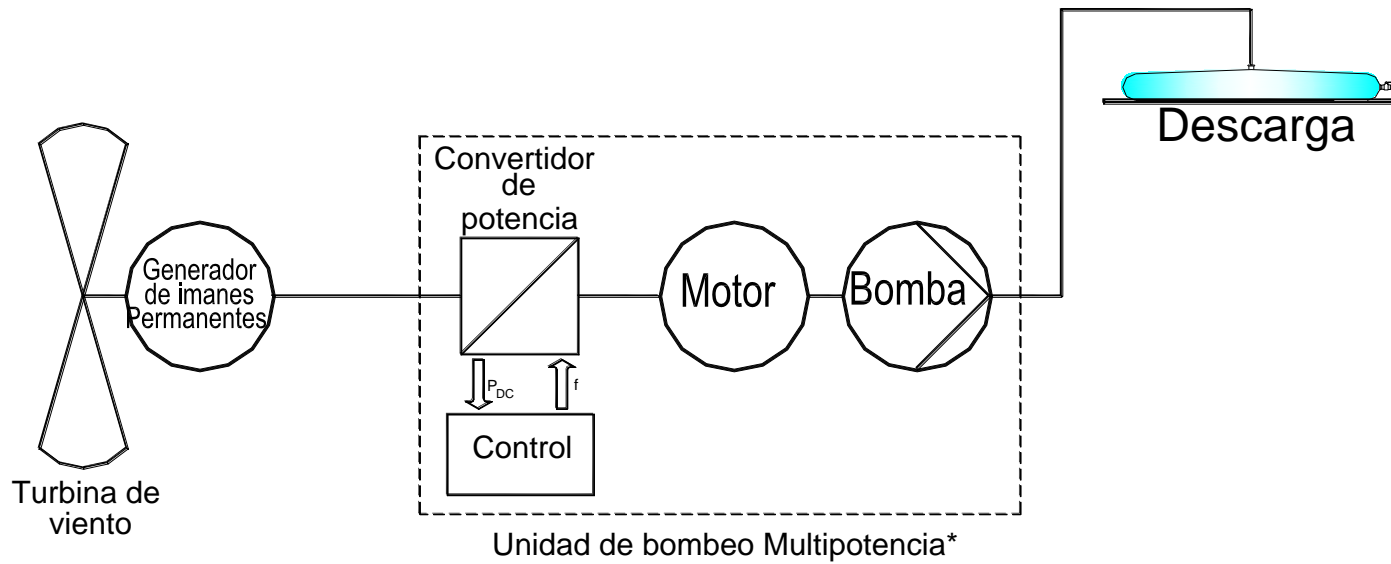
**POSICION DE INSTALACION DE LA BOMBA**  
ESC.: S/E

NOTA:  
Las bombas 4HS MP pueden instalarse en vertical o en posición horizontal.




**SECCION C-C**  
ESC.: 1/250

	ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERIA MECANICA ELECTRICA	CAD: MARCOS CEBOJIN CASTILLO SOLES	APROBADO: JURADO DE TESIS	REVISADO: JURADO DE TESIS
	<b>PLAN0: DISTRIBUCION GENERAL PLANTA Y SECCIONES</b>		REGION: LA LIBERTAD	FECHA: 30/10/2019
			PROVINCIA: ASCOPE	ESCALA: INDICADA
			DISTRITO: RAZURI	N°: 04



\* LAS BOMBAS MULTIPOTENCIA ALIMENTADAS POR ENERGIAS RENOVABLES INCORPORAN UN VARIADOR DE FRECUENCIA INTEGRADO.

	ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERIA MECANICA ELECTRICA	CAD: MARCOS CEBOJIN CASTILLO SOLES	APROBADO: JURADO DE TESIS	REVISADO: JURADO DE TESIS
	<b>ESQUEMA UNIFILAR DEL SISTEMA</b>		REGION: LA LIBERTAD	FECHA: 30/10/2019
			PROVINCIA: ASCOPE	ESCALA: S/E
			DISTRITO: RAZURI	N°: 05