

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA,
SEDE CUENCA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**“MANTENIMIENTO, MONITOREO Y MEJORAS DE UNA
AEROBOMBA UTILIZADA PARA IRRIGACIÓN DE AGUA EN
LA COMUNIDAD DE CHICÁN – PAUTE”**

AUTORES: Santiago Fernando Álvarez Sanango
Carlos Guillermo Togra Pesántez

DIRECTOR: Ing. John Calle, MSc.

Cuenca, Octubre de 2014

DEDICATORIA

Dedico esta tesis con todo mi cariño y amor a Dios, por haberme guiado por el buen camino, a mis padres Rosa y Jaime por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional, haciendo todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.

CARLOS

DEDICATORIA

Esta tesis dedico con mucho amor a mi Dios quien me dio la sabiduría y el amor para terminar mi querida carrera, a mis padres Santiago Álvarez y Fany Sanango quienes fueron el pilar fundamental para apoyarme a terminar mi gran sueño anhelado a mi esposa y a mi hijo querido quienes estuvieron siempre brindándome su amor y cariño.

SANTIAGO

AGRADECIMIENTO

El desarrollo de este proyecto es el resultado del esfuerzo conjunto de todos los que formamos el grupo de trabajo, por esto agradezco:

A la Universidad Politécnica Salesiana por darnos la oportunidad de estudiar y ser profesionales, además del financiamiento brindado para la elaboración del proyecto de tesis.

A nuestro director de tesis Ing. John Calle S. por su dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, y su motivación ha logrado que podamos concluir con éxito el trabajo de investigación.

De igual manera agradecer a los docentes de la carrera de Ingeniería Mecánica, quienes mediante su apoyo y enseñanzas han aportado para nuestra formación académica.

CERTIFICADO

Yo, John Calle, docente de la Universidad Politécnica Salesiana de la carrera de Ingeniería Mecánica CERTIFICO, haber dirigido y revisado prolijamente cada uno de los capítulos de la Tesis intitulada: "Mantenimiento, monitoreo y mejoras de una aerobomba utilizada para irrigación de a agua en la comunidad de Chicán-Paute realizado por los estudiantes: Carlos Guillermo Togra Pesantez, y Santiago Fernando Alvarez Sanango por haber cumplido con todos los requisitos necesarios autorizo su presentación.

Cuenca, 22 de octubre del 2014



Ing. John Calle Sigüencia, M.Sc.

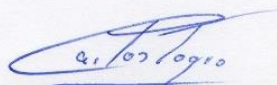
DIRECTOR DE TESIS

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Los autores declaramos que los conceptos desarrollados, análisis realizados y las conclusiones del presente trabajo, son de nuestra exclusiva responsabilidad y autorizamos a la Universidad Politécnica Salesiana el uso de la misma con fines académicos.

A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Cuenca, 22 de octubre del 2014



Carlos Guillermo Togra Pesantez

CI. 0104198361



Santiago Fernando Álvarez S.

CI. 0301828463

ÍNDICE

CAPÍTULO I	1
Diagnóstico del estado actual de la Aerobomba	1
1.1 Introducción	1
1.2 Diagnóstico del sistema	1
1.3 Estado de los elementos constitutivos:	2
1.3.1 Rotor	3
1.3.2 Torre	3
1.3.3 Reductor de velocidad	4
1.3.3.1 Carcasa	5
1.3.3.2 Cubierta del reductor de velocidad	6
1.3.3.3 Eje	6
1.3.3.4 Piñón	7
1.3.3.5 Rueda dentada	7
1.3.3.6 Polea motriz	8
1.3.3.7 Sistema manivela corredera	9
1.3.3.8 Manivela	9
1.3.3.9 Eje de la polea guía y polea	10
1.3.3.10 Rodamientos	10
1.3.3.11 Chumacera	11
1.3.4 Vástago	11
1.3.5 Veta	12
1.3.6 Bomba	12
1.4 Tabla de resumen	13
CAPÍTULO II	15
Estado del arte en los sistemas eólicos utilizados para bombeo de agua.	15
2.1 Introducción	15
2.2 Historia de la energía eólica	16
2.3 Máquinas eólicas.	17
Clasificación de las máquinas eólicas	17
2.4 Aerobomba	19
2.5 Funcionamiento de la Aerobomba	21
2.6 Elementos de un sistema de Aero bombeo	21
2.7 Tipos de Aerobomba.	24
2.8 Características y evolución de un molino múltipala americano	25
2.8.1 Primera Aerobomba múltipala Americana	26

2.8.2 Sistema de Captación	27
Rotores Eólicos	27
Materiales	28
Diseño	28
Aspas Planas	29
Aspas Curvadas	29
Aspas del diseño CITA Steere	30
2.8.3 Sistemas de transmisión	31
Caja reductora de velocidad	31
2.8.4 Sistema de bombeo	32
Bombas de pistón	32
Bombas roto-dinámicas	33
CAPÍTULO III	35
Mantenimiento correctivo e implementación de mejoras	35
3.1 Introducción	35
3.1 Mantenimiento Preventivo	36
Aspas	36
La estructura del rotor	36
La carcasa del reductor	37
Soporte y guías del sistema manivela corredera	37
Disco de acople rotor – reductor de velocidad	38
Estructura de la Torre	38
La veleta orientadora	39
3.2 Propuestas de mejoras para la Aerobomba	39
Reductor de velocidad	40
Potencia del molino múltipala	42
Revoluciones por minuto del rotor	44
Relación de transmisión en los engranajes	44
Velocidad angular en los engranajes	45
3.3 Mantenimiento correctivo	45
3.3.1.1 Eje de transmisión	45
Cálculo de esfuerzos en el eje	46
3.3.1.2 Piñón	54
3.3.1.3 Rueda dentada	54
3.3.1.4 Manivelas	55
3.3.1.5 Chumaceras	58
3.3.1.6 Vástago	58

Fuerzas aplicadas en el vástago	59
Fuerza estática del agua.....	59
Fuerza de aceleración de la columna de agua	59
Fuerza en el vástago	60
Peso del vástago	60
Esfuerzos máximos en el vástago	61
Velocidad de la bomba	63
Fuerza máxima en el vástago (F_{mv}) [26].....	63
3.3.1.7 Accionamiento de la bomba	65
3.3.1.8 Empaques de la bomba	66
CAPÍTULO IV	68
Monitoreo y análisis de eficiencia	68
4.1 Introducción	68
4.2 Velocidad de viento	68
4.3 Estimación de la velocidad del viento	70
4.4 Potencia de la Aerobomba	72
4.5 Volumen o cilindrada unitaria de la bomba.....	74
4.6 Velocidad de funcionamiento la bomba.....	75
4.7 Cálculo del funcionamiento del sistema de bombeo.....	75
Características de la Aerobomba:.....	76
Altura dinámica total o carga de bombeo	77
Pérdida de carga en tuberías a través de la fórmula de Hazem Williams:	77
Velocidad del agua en la tubería de descarga	78
Pérdidas en accesorios hfa	78
4.8 Caudal y potencia útil de la bomba.....	79
4.9 Relación entre Potencia – Caudal - Altura	80
4.10 Energía hidráulica.....	81
4.11 Pruebas de funcionamiento	82
CAPÍTULO V	85
Análisis técnico financiero	85
5.1 Introducción	85
5.2 Costo de mantenimiento del sistema.....	85
5.2.1 Costo del reductor de velocidad.	86
5.2.2 Costo de desmontaje y montaje del sistema.....	87
5.2.2.1 Desmontaje del sistema y traslado al área de mantenimiento	87
5.2.2.2 Montaje del sistema y traslado a la zona de emplazamiento	87
5.2.3 Costo de mantenimiento del rotor, torre y sistema de orientación.	87

5.2.4 Costo del sistema de bombeo	88
5.3 Costo total del mantenimiento.....	89
5.4 Costo total de la Aerobomba con todos sus elementos.....	89
5.3.1 Costo del rotor	90
5.3.2 Costo de la torre.	90
5.3.3 Sistema de orientación.	91
5.4 Costo total del sistema de la Aerobomba.....	92
CONCLUSIONES.....	93
RECOMENDACIONES.....	95
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Rotor.....	3
Fig. 1.2 Torre.....	4
Fig. 1.3 Reductor de velocidad.....	5
Fig. 1.4 Carcasa.....	5
Fig. 1.5 Cubierta del reductor de velocidad.....	6
Fig. 1.6 Eje.....	7
Fig. 1.7 Piñón.....	7
Fig. 1.8 Rueda dentada.....	8
Fig. 1.9 Polea Motriz.....	8
Fig. 1.10 Sistema manivela-corredera.....	9
Fig. 1.11 Manivela.....	9
Fig. 1.12 Eje de la polea guía y polea.....	10
Fig. 1.13 Rodamiento.....	11
Fig. 1.14 Chumaceras.....	11
Fig. 1.15 Vástago.....	12
Fig. 1.16 Veleta.....	12
Fig. 1.17 Bomba.....	13
Fig. 2.1 Aerogenerador.....	18
Fig. 2.2 Aerobombas.....	18
Fig. 2.3 Molino de viento.....	19
Fig. 2.4 Extractores eólicos.....	19
Fig. 2.5 Aero bombeo directo.....	20
Fig. 2.6 Aero bombeo remoto.....	20
Fig. 2.7 Torre de acero.....	21
Fig. 2.8 Rotor.....	22
Fig. 2.9 Veleta.....	22
Fig. 2.10 Caja de transmisión.....	23
Fig. 2.11 Piscina de almacenamiento.....	23
Fig. 2.12 Bomba.....	24
Fig. 2.13 Primer molino de viento de acero “Wind Engine & Pump Co.”...	26
Fig. 2.14 Rotor múltipala.....	27
Fig. 2.15 Efectos del viento sobre un aspa.....	28
Fig. 2.16 Aerobomba aspas planas.....	29
Fig. 2.17 Perfil situado en el seno de una corriente fluida.....	30
Fig. 2.18 Aspas CITA Steere.....	30
Fig. 2.19 Caja reductora.....	32
Fig. 2.20 Bomba de pistón.....	33
Fig. 2.21 Carcasa e impulsor de una bomba centrifuga.....	34
Fig. 3.1 Aspas.....	36
Fig. 3.2 Estructura del rotor.....	36

Fig. 3.3 Carcasa del reductor.....	37
Fig. 3.4 Soporte y guías del sistema manivela-corredera.....	37
Fig. 3.5 Disco acople rotor-reductor.....	38
Fig. 3.6 Estructura de la torre.....	38
Fig. 3.7 La veleta orientadora.....	39
Fig. 3.10 Reductor de velocidad.....	40
Fig. 3.11 Sistema manivela corredera.....	41
Fig. 3.12 Sistema de transmisión manivela corredera.....	41
Fig. 3.13 Eje de transmisión.....	46
Fig. 3.14 Piñón.....	54
Fig. 3.15 Rueda dentada.....	54
Fig. 3.16 Manivelas.....	55
Fig. 3.17 Chumaceras.....	58
Fig. 3.18 Vástago instalado en Aerobomba.....	58
Fig. 3.19 Desplazamiento por fuerza normal de funcionamiento aplicada...	64
Fig. 3.20 Desplazamiento por fuerza máxima aplicada.....	64
Fig. 3.21. Fugas en la bomba de agua.....	65
Fig. 3.22 Accionamiento de la bomba.....	65
Fig. 3.23 Accionamiento, émbolo de succión y expulsión.....	66
Fig. 3.17 Empaques.....	67
Fig. 4.1 Anemómetro digital.....	68
Fig. 4.2 Velocidad máxima diaria.....	70
Fig. 4.3 Descripción de las variaciones del viento.....	71
Fig. 4.4 Curva de potencias.....	73
Fig. 4.5 Bomba de pistón.....	74
Fig. 4.6 Relación Potencia – Caudal – Altura.....	81
Fig. 4.7 Rangos de utilización viable de la energía eólica para bombeo de agua	82

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1.4 Tabla de resumen.....	13
Tabla 2.1 Características de los tipos de Aerobombas.....	25
Tabla 2.2 Comparación entre diferentes tipos de aspas.....	31
Tabla 3.1 Velocidad específica de diseño TSR.....	43
Tabla 3.2 Coeficiente de potencia para molinos de viento.....	43
Tabla 3.3 Fórmulas para el área y centros de gravedad.....	49
Tabla 3.4 Teorema de tres momentos.....	50
Tabla 3.5 Catálogo Acermet Acero ASSAB 705.....	52
Tabla 3.6 Catálogo Acermet Acero inoxidable.....	61
Tabla 3.7 Fuerza aplicada en el vástago.....	63
Tabla 3.8 Fuerza máxima aplicada en el vástago.....	64
Tabla 3.9 Porcentajes de expansión de separadores de empaques.....	67
Tabla 4.1 Velocidad medias diarias de viento.....	69
Tabla 4.2 Potencia a diferentes velocidades de viento.....	72
Tabla 4.3 Velocidades de la bomba.....	75
Tabla 4.4 Caudal de salida de la bomba.....	79
Tabla 4.5 Relación Potencia – Caudal – Altura.....	80
Tabla 4.6 Volumen de agua obtenida en funcionamiento.....	82
Tabla 4.7 Comparación caudal real-teórico.....	83
Tabla 5.1 Costo del reductor de velocidad.....	86
Tabla 5.2 Costo de desmontaje.....	87
Tabla 5.3 Costo del montaje.....	87
Tabla 5.4 Costo de mantenimiento del rotor, torre y sistema de orientación.....	88
Tabla 5.5 Costo del sistema de bombeo.....	89
Tabla 5.6 Costo total de mantenimiento.....	89
Tabla 5.7 Costo del rotor.....	90
Tabla 5.8 Costo de la torre.....	91
Tabla 5.9 Costo de sistema de orientación.....	92
Tabla 5.10 Costo de mantenimiento y reparación de la Aerobomba.....	92

INTRODUCCIÓN

La energía del viento ha sido utilizada desde hace cientos de años en aplicaciones mecánicas, lo que ha permitido el desarrollo agrícola en diferentes lugares del mundo gracias al empleo de molinos de viento. Desde el siglo XII hasta finales del siglo XIX. Estas máquinas eólicas fueron utilizadas para el bombeo de agua y la molienda de granos. [1]

En la actualidad gracias a los avances tecnológicos se ha logrado diseñar máquinas eólicas más eficientes con el fin de aprovechar de mejor manera las fuentes de energía logrando así un ahorro de dinero, y disminuir los daños al ambiente ocasionados por el uso de combustibles fósiles.

La Universidad Politécnica Salesiana se encuentra investigando los diferentes tipos de energías limpias y renovables, con el propósito de conocer, mejorar e implementar su uso en varios sectores del país.

Mediante este proyecto se busca dar mantenimiento, diseñar y evaluar el funcionamiento de la Aerobomba múltipala Americana que actualmente se encuentra emplazada en el sector de Chicán-Paute, la que se encontraba en desuso debido a daños en el mecanismo, además de obtener datos que aporten con bases técnicas – científicas para continuar con la investigación de esta tecnología.

La Aerobomba múltipala son máquinas de eje horizontal lenta, las cuales pueden funcionar con velocidades menores a 3 m/s, Se caracterizan porque su velocidad de rotación es baja, por lo que tienen un gran número de palas, entre 12 y 24, que cubren casi toda la superficie del rotor. [2]

Debido a que esta Aerobomba fue diseñada, y desarrollada en proyectos de tesis anteriores, se han omitido los cálculos de diseño para la estructura, el rotor y el reductor de velocidad, por lo cual este trabajo está direccionado para el mantenimiento, y mejoramiento de elementos que permitan un mejor funcionamiento de la Aerobomba, se procedió a implementar un sistema de seguridad, el cual protege a los elementos de la transmisión de fuertes cargas de viento, impidiendo que estos colapsen en un momento determinado, asimismo se cambió el diseño del reductor de velocidad el cual

nos permite obtener mayor fuerza para el bombeo de agua además de lograr una mayor estabilidad durante el giro del rotor. En lo que concierne al sistema de bombeo, se consideró que el modelo de bomba diferencial usado anteriormente no es el más adecuado para este sistema ya que con ella se buscó obtener un flujo constante de líquido, pero al ser un sistema que funciona con las velocidades de viento variable no se obtiene el máximo rendimiento de la bomba, por lo tanto se pensó que es mejor descargar un mayor volumen de agua en un ciclo de la bomba, es por esto que se procedió a cambiar el diseño a una bomba de simple efecto consiguiendo trasladar el líquido desde una fuente de agua, hasta el reservorio ubicado a unos 20 m de altura sobre esta.

La construcción de los elementos rediseñados, y la modificación de la bomba diferencial a una de simple efecto se lo realizó mediante los procesos de mecanizado, de acuerdo al diseño previamente realizado en AutoCAD.

Posterior al emplazamiento se procedió a realizar las pruebas de funcionamiento, obteniendo varios de datos de caudal, potencia, rendimiento que genera la Aerobomba en condiciones reales de trabajo, destacando que puede funcionar a velocidades de viento bajas desde los 2 m/s, y enviando el fluido a 20 metros de altura sin ningún problema.

CAPÍTULO I

Diagnóstico del estado actual de la Aerobomba

1.1 Introducción

En un estudio previo se diseñó y construyó el prototipo de un sistema de Aerobomba que servía para suministrar agua a las partes altas de la zona de Chicán, perteneciente al cantón Paute, precisamente en los predios de la Unidad Educativa Manuel J. Calle¹.

Éste trabajo fue realizado en el marco de la ejecución de un proyecto como parte del desarrollo de una tesis de grado, cuya intención fue dotar de agua para el riego a zonas de mayor altitud. Sin embargo, en la actualidad esta obra no está en funcionamiento por el deterioro de algunas de sus partes y principalmente por la falta de mantenimiento del sistema de la Aerobomba.

La Aerobomba está ubicada en una zona de ladera, a una altura de 10 m. de la parte baja de la topografía, junto a una piscina de almacenamiento de 380 m³. El agua que abastece a la piscina proviene de los canales de riego de la zona. El mecanismo utiliza un sistema de bombeo directo, ya que el molino se encuentran junto al pozo de abastecimiento de agua, el cual tiene una profundidad de 2.2 m. Este tipo de instalación es la más común de las aplicaciones de Aero bombeo.

1.2 Diagnóstico del sistema

Para realizar el diagnóstico, en primera instancia se identificó de manera visual cada uno de los elementos constitutivos de la Aerobomba, y luego del análisis correspondiente, determinar el estado de los mismos.

Esta Aerobomba está constituida por:

- Las aspas
- El rotor

¹ Perteneciente a la comunidad salesiana.

- La caja de transmisión
- La torre
- Elemento de transmisión
- Bomba

Al realizar la inspección se pudo observar que las aspas y el rotor se encuentran en buen estado, por lo que se procede a realizar limpieza y mantenimiento, posteriormente al revisar la caja reductora se nota que ésta no transmite el movimiento necesario para un correcto funcionamiento, debido a que en el vástago no se registra ninguna reacción a pesar de que el rotor se mueve por la fuerza del viento. La torre se encuentra en buenas condiciones, por lo que nos limitaremos a dar un mantenimiento de limpieza y pintura. Por otro lado, luego de inspeccionar la bomba, se determina que la misma se encuentra trabada.

En lo que se refiere a la piscina de almacenamiento, de la cual se debería succionar el agua para la Aerobomba, también presenta problemas por la inutilidad del sistema, ya que al estar expuesta al aire libre y al no estar funcionando la bomba que permita circular el flujo de agua, ha originado que el agua se estanque desde hace ya algún tiempo, lo que es fácil percibir por la proliferación de algas que se han acumulado en las paredes de la piscina. Este es un factor importante a tomar en cuenta, ya que estas algas pueden llegar a obstruir los filtros de la bomba e incluso colapsar todo el sistema, lo que ocasionaría cuantiosos daños y generaría aún mayores inconvenientes.

Del análisis e inspección física realizada a estas instalaciones, se puede deducir que si bien el equipo no está operativo, al ser sometido a un correcto, planificado y adecuado mantenimiento, se logrará alcanzar un óptimo nivel de funcionamiento, lo que garantiza que la propuesta de reparación de la Aerobomba, sea viable y sustentable.

1.3 Estado de los elementos constitutivos:

Luego de realizar la inspección visual y física, se efectúa el desmontaje del sistema con el propósito de hacer un análisis técnico de cada uno de los elementos constitutivos del sistema.

1.3.1 Rotor

El rotor de la Aerobomba (Fig.1.1), está conformado por tres partes: los alabes, la estructura del rotor y los rodamientos. Estas piezas, luego de la evaluación pertinente, presentan las siguientes condiciones:

- Los alabes no presentan deformaciones geométricas ni desgaste, pudiendo ser utilizados nuevamente.
- Los pernos de sujeción están en buen estado y cumplen normalmente su función.
- El rotor se halla en buenas condiciones para el funcionamiento, y no presenta deformaciones. Sin embargo, se notó en su superficie se ha empezado a acumular el óxido.

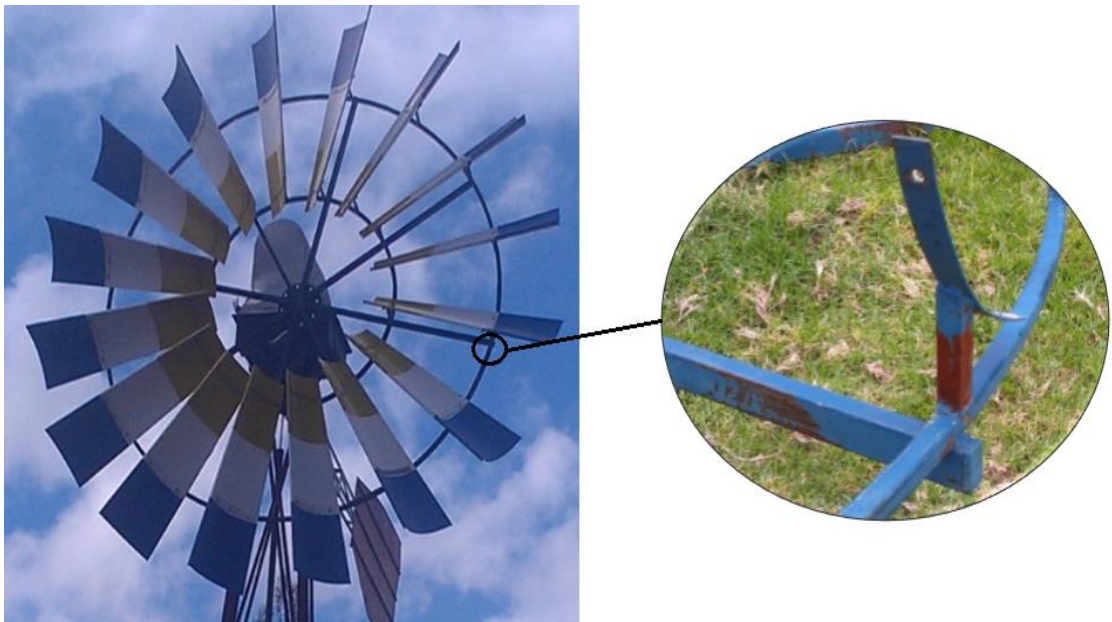


Fig. 1.1 Rotor

1.3.2 Torre

Al analizar las uniones y en sí las condiciones de la estructura metálica, se ha encontrado que la torre (Fig. 1.2), presenta todavía buenas condiciones para ser utilizada en la Aerobomba, sin corrosión, aunque se nota una leve presencia de oxidación en la superficie, la misma que debe ser tratada mediante limpieza y pintado.

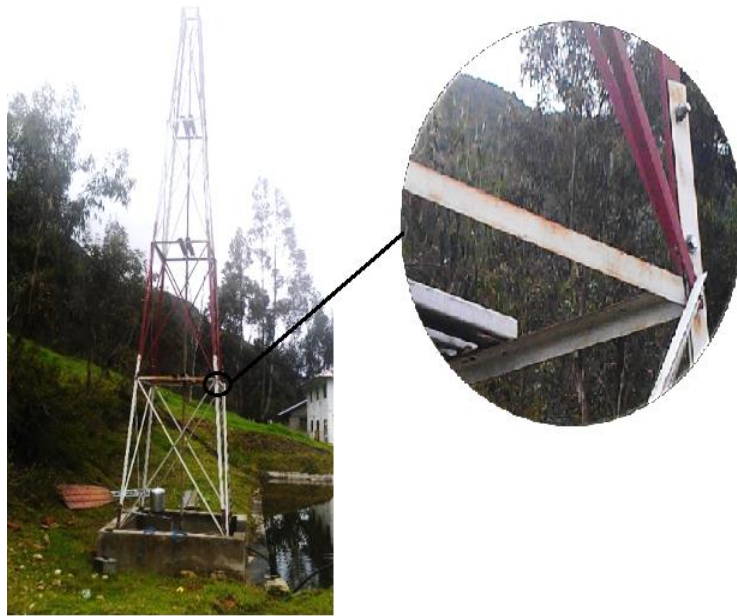


Fig. 1.2 Torre

1.3.3 Reductor de velocidad

A diferencia de las otras partes mencionadas, que no presentaron mayor daño, se ha encontrado al reductor de velocidad (Fig. 1.3) prácticamente deteriorado, ya que se encuentran elementos destruidos y otros desacoplados. Esta es la razón por la que no se realiza la función de transmisión de movimiento.

La caja de trasmisión está conformado por:

- 1 Carcasa
- 1 Cubierta del reductor
- 2 Ejes (Principal – Secundario)
- 1 Piñón
- 1 Rueda dentada
- 1 Polea Motriz
- 2 Manivelas
- 3 Chumaceras de piso
- 4 Rodamientos

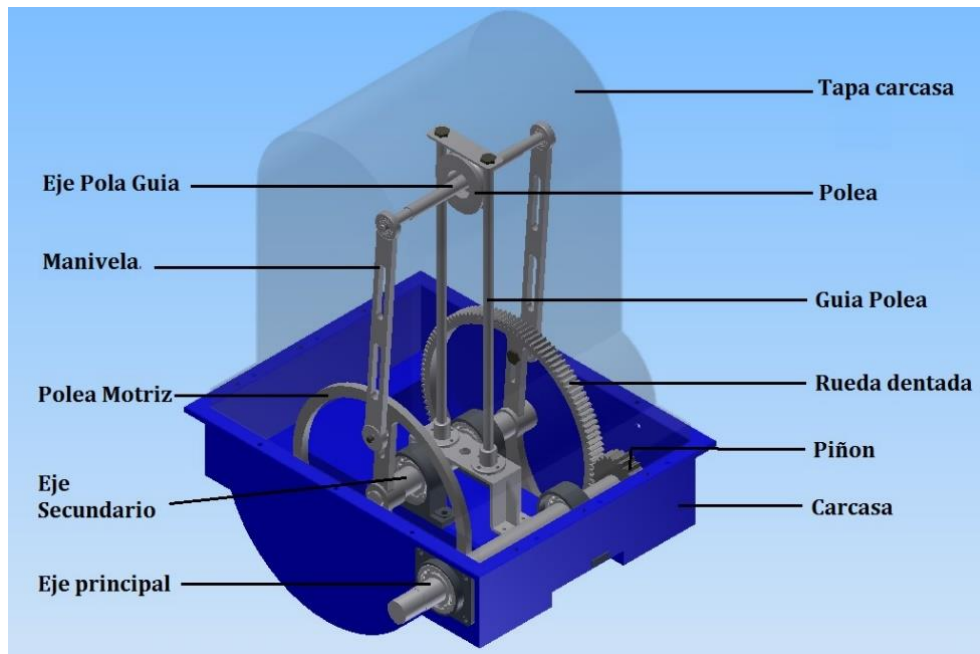


Fig. 1.3 Reductor de velocidad

1.3.3.1 Carcasa

La carcasa (Fig. 1.4), se encuentra en buenas condiciones, por lo que se realizará un mantenimiento de limpieza y pintura.



Fig. 1.4 Carcasa

1.3.3.2 Cubierta del reductor de velocidad

Otra pieza que presenta un grave daño es la cubierta del reductor de velocidad (Fig. 1.5), debido a que los elementos del reductor se llegaron a desacoplar, estas partes chocaron contra la cubierta, provocando la rotura de la misma y dejando expuesto el reductor de velocidad al aire libre, lo cual implica entre otras cosas, el paso de agua lluvia. Esto genera, al no haber ningún tipo de mantenimiento, un grave daño a los elementos internos del sistema de transmisión. Es necesario reemplazar este elemento, ya que se encuentra destruido.



Fig. 1.5 Cubierta del reductor de velocidad

1.3.3.3 Eje

El eje (Fig. 1.6) es otra de las piezas que no permiten un correcto funcionamiento de la Aerobomba, ya que presenta serias deformaciones geométricas. Esto se debe en teoría al esfuerzo excesivo del eje al no estar bien integradas las otras partes de todo el sistema. En este caso, dentro del ejercicio de la restauración de la Aerobomba, evidentemente se procederá a la reconstrucción de esta pieza, ya que en las condiciones que se encuentra prácticamente está inservible.



Fig. 1.6 Eje

1.3.3.4 Piñón

El piñón (Fig. 1.7) se encuentra con rotura de los dientes y desgaste de las paredes de los mismos, esto debido a la desalineación con la rueda dentada. Por lo tanto se procederá a la construcción de un nuevo elemento.



Fig. 1.7 Piñón

1.3.3.5 Rueda dentada

La rueda dentada (Fig. 1.8), en conexión con el piñón, ha sufrido un grave desgaste y rotura de los dientes, debido principalmente a la desalineación con el piñón. Es necesario la construcción y reemplazo del elemento.



Fig. 1.8 Rueda dentada

1.3.3.6 Polea motriz

La polea motriz (Fig. 1.9), luego del análisis de su estructura, presenta una leve deformación geométrica, lo que sin embargo repercute de gran manera en el funcionamiento del todo el sistema. Este elemento ya no se lo va a utilizar en el nuevo mecanismo, será remplazado por otra rueda dentada.



Fig. 1.9 Polea Motriz

1.3.3.7 Sistema manivela corredera

Este elemento en la Aerobomba se encuentra totalmente deteriorado, debido a que al trabarse la bomba se detuvo el movimiento alternativo ascendente-descendente, y al no existir un componente de seguridad que impida el movimiento giratorio proveniente del rotor, ocasionó que el sistema manivela-corredera (Fig. 1.10) se deformen y desacoplen, dejando que las demás piezas de la caja de transmisión colapsen. Se procederá a realizar un mantenimiento correctivo de este sistema.



Fig. 1.10 Sistema manivela-corredera

1.3.3.8 Manivela

La manivela (Fig. 1.11), se encuentra totalmente deformada y desacoplada de la rueda dentada, al ser el elemento que transforma el movimiento giratorio en lineal, estuvo sometido a un gran esfuerzo por lo que se dobló y dejó al sistema inservible. Esta pieza será reconstruida.



Fig. 1.11 Manivela

1.3.3.9 Eje de la polea guía y polea

Al analizar el estado de estos elementos, nos encontramos que estos presentan los siguientes daños:

- La polea presenta una oxidación superficial
- El rodamiento de la polea se encuentra en mal estado debido al óxido y a la falta de mantenimiento.

Se realizará un mantenimiento de limpieza y pintura al elemento.



Fig. 1.12 Eje de la polea guía y polea

1.3.3.10 Rodamientos

Luego de una inspección de los rodamientos, se notan que estos están deteriorados. El anillo exterior se encuentra rayado, y presenta deformaciones. Esto se debe principalmente a que esta pieza ha estado por mucho tiempo en contacto con el agua y otras impurezas, generando que estos se deterioren con el tiempo. Estos rodamientos se han considerado inservibles, por lo que se procederá a reemplazarlos.



Fig. 1.13 Rodamiento

1.3.3.11 Chumacera

Las chumaceras (Fig. 1.14) serán reemplazadas, ya que al sacar el eje, se dañan la superficie interior de sus paredes.



Fig. 1.14 Chumaceras

1.3.4 Vástago

El vástago (Fig. 1.14), se encuentra oxidado superficialmente. Debido a que este elemento ocasionó el fallo del mecanismo, se procederá a sustituirlo.



Fig. 1.15 Vástago

1.3.5 Veleta

La veleta (Fig. 1.16), muestra oxidación superficial, y no presenta deformaciones. Por lo que se procederá a realizar una limpieza y pintado de la superficie.



Fig. 1.16 Veleta

1.3.6 Bomba

La bomba (Fig. 1.17), se encuentra trabada, ya que existía una excesiva fricción entre el cilindro de la bomba y los separadores de empaques, ocasionando que se necesite una mayor fuerza para el desplazamiento del vástago, esto debido a que el material al

estar en contacto con agua, tiende a absorberla y aumentar su tamaño, por lo que se procederá a cambiar los empaques de la bomba, y adicional a esto, se realizará el respectivo mantenimiento de la misma.



Fig. 1.17 Bomba

1.4 Tabla de resumen

Descripción	Cantidad	Elementos	Estado	Intervención
ROTOR	16	Alabes	En buenas condiciones no ha sufrido alteraciones.	limpieza y pintura
	1	Eje	No se encuentra deformado.	limpieza y lubricación
	1	Rodamiento	Están en correcto estado no presentan cambios de diseño	Cambio
TORRE	1	Estructura	Presenta indicios de oxidación en las uniones	limpieza y pintura
REDUCTOR DE VELOCIDAD	1	Carcasa	Presenta óptimas condiciones de trabajo	limpieza y pintura

REDUCTOR DE VELOCIDAD	1	Cubierta del reductor de velocidad	Presenta roturas considerables en su estructura de protección	Construir una nueva cubierta
	1	Ejes (Principal-Secundario)	Poseen deformaciones geométricas considerables	Construcción del eje principal y Secundario
	2	Piñón	Rotura de los dientes y desgaste de las paredes	Construcción del piñón
	2	Rueda dentada	Rotura de dientes y deformación estructural	Construcción de la rueda dentada
	1	Polea motriz	Deformación estructural	Reemplazada por una rueda dentada
	2	Manivelas	Deformación estructural	Reconstrucción de los elementos
	1	Polea	Presenta oxidación	Limpieza y lubricación
	4	Rodamientos	Presentan deformaciones	Sustituirlos por nuevos elementos
	3	Chumaceras	No presentan alteraciones estructurales	Serán sustituidos por nuevos elementos
VÁSTAGO	1	Vástago	Presenta oxidación en su estructura	Limpieza y lubricación
VELETA	1	Estructura	Presenta oxidación	Limpieza y pintura
BOMBA	1	Empaques	Se encuentra trabada	Mantenimiento correctivo

CAPÍTULO II

Estado del arte en los sistemas eólicos utilizados para bombeo de agua.

En este capítulo se desarrollará un estudio simplificado de los diferentes sistemas eólicos y de bombeo de agua, el mismo que nos permitirá obtener una información base de conceptos para el desarrollo del proyecto, además de ampliar nuestros horizontes en el conocimiento de los avances tecnológicos que se han generado en los últimos años, investigación que propiciará el desarrollo de destrezas en cada uno de los temas objeto de nuestro estudio.

2.1 Introducción

La energía eólica es obtenida del viento, gracias a las corrientes del aire que generan energía cinética, la misma que es aprovechada para producir diversas formas útiles de energía. La energía eólica está relacionada con el movimiento de las masas de aire, las cuales están en constante cambio, por lo que se necesita conocer las variaciones diurnas y nocturnas de los vientos. Para aprovechar este constante agitar del viento, se usan aeromotores, los cuales transforman la energía eólica en energía mecánica. [1]

En la actualidad la energía cinética producida por el viento, es usada para obtener principalmente electricidad mediante aerogeneradores, este tipo de energía ha ido en ascenso en los últimos años, generando alrededor del 3% del consumo de energía a nivel mundial.

La energía eólica es un recurso renovable, abundante y limpio que ayuda a combatir la contaminación ambiental, gracias a la disminución de gases de efecto invernadero debido a la sustitución de los combustibles fósiles por la energía del viento, para producir energía de trabajo. [1]

Los usos más comunes de la energía eólica son:

- ❖ Aerogeneradores: Para producción de energía eléctrica.
- ❖ Aerobombas: Para el bombeo de agua
- ❖ Extractor: Para recirculación de aire.
- ❖ Molino: Para la molienda de granos.

2.2 Historia de la energía eólica.

La energía eólica es una de las fuentes de energía más antiguas utilizadas por la humanidad, existen evidencias que indican que su uso se remonta al año 3000 A.C., siendo utilizada principalmente para la navegación.

Diferentes pueblos, desde los egipcios pasando por los fenicios, romanos y muchos otros utilizaron esta forma de impulsión.

La utilización del viento para aprovechar su energía mediante artefactos se remonta al año 200 A.C. en Persia, los cuales usaban para la molienda de granos, Se cree que en siglo XIII estas máquinas fueron introducidas en Europa por quienes retornaban de las cruzadas. [3]

Durante el transcurso de la edad Media, se amplió la gama de usos, empleándose para mover la maquinaria de naciotes industrias como la textil, maderera, metalúrgica, estos primeros molinos eran muy rudimentarios, basaban su diseño en la rotación de un eje colocado en forma vertical. Los holandeses modificaron esa tecnología y a partir del año 1.350 comenzaron a utilizarse máquinas de eje horizontal y de cuatro palas, muy similares en aspecto a los que acostumbramos ver hoy en día en los típicos paisajes de ese país. A partir de entonces se las empezó a utilizar principalmente para desecar pantanos y lagos, en la implementación de aserraderos para la fabricación de papel y en procesos para extraer aceites. [1]

Con la invención de las máquinas de vapor durante la revolución industrial, el uso de la energía eólica quedó relegada, debido a que eran máquinas lentas, pesadas y de bajo rendimiento.

A mediados del siglo XX se desarrolló un molino capaz de convertir energía mecánica de forma muy eficiente, mismo que se lo utiliza en muchos países, ya que tiene unas características muy superiores a la de sus antecesores. Llamado comúnmente molino americano, se lo destina casi exclusivamente para el bombeo de agua. [3]

Posteriormente debido a la primera crisis del petróleo en los años 70, los gobiernos e industrias se vieron obligados a investigar nuevas formas de energías alternativas,

obteniendo a finales de esta década los primeros aerogeneradores comerciales, los cuales generaron cerca de 55 KW, dando el primer paso para que la investigación y uso de la energía eólica, comience a crecer de forma imparable, obteniendo grandes avances que hicieron de ésta fuente energética, una alternativa viable a las tradicionales. [1]

A partir de estos avances científicos tecnológicos, se empezó a incursionar en el campo de energías limpias y renovables, haciendo de éstas una fuente más competitiva de producción de energía a lo largo de los años. Hoy en día es destacable la explotación de este tipo de energía que efectúan países como Estados Unidos, Dinamarca, Alemania, Holanda, España, India y China entre muchos otros.

2.3 Máquinas eólicas.

Se llama máquinas eólicas a los sistemas accionados por la fuerza del viento. Si utilizamos directamente la energía mecánica será un aeromotor, y si se acciona un generador eléctrico, se trata de aerogenerador. [4]

Clasificación de las máquinas eólicas.

Las máquinas eólicas han sido utilizadas, estudiadas y mejoradas a lo largo de los años, en la actualidad existen varios tipos que van desde pequeñas a grandes máquinas con la capacidad de producir una gran fuerza de trabajo. [5]

Por lo tanto debido a la función que desempeñan cada una de estas, se puede clasificar en cuatro grupos:

- Aerogeneradores
- Aerobombas
- Molinos de viento
- Extractores

Aerogeneradores: Son generadores de energía eléctrica de potencias entre 3 a más de 100 KW. Este tipo de generadores se utiliza para cargar baterías, las cuales proporcionan energía eléctrica generalmente en áreas aisladas. [4]

- Baja Potencia < 3 KW (equivalente eléctrico).
- Media Potencia < 30 kW (equivalente eléctrico).
- Alta potencia >100 kW (equivalente eléctrico).



Fig. 2.1 Aerogenerador [6]

Aerobomba: Es un mecanismo de bombeo que funciona accionado por la fuerza del viento. Existen diferentes tipos, pero la más difundida es la tipo múltipala que trabaja con regímenes de giro entre 5 y 15 rpm. Con un elevado par de arranques, el cual puede mover de forma óptima bombas alternativas. [4]



Fig. 2.2 Aerobombas [7]

Molinos de viento: Los molinos de viento (Fig. 2.3), son mecanismos sencillos que se han fabricado desde tiempos remotos. Son utilizados para moler el grano y convertirlo en harina mediante la captura de la energía del viento. [3]



Fig. 2.3 Molino de viento [8]

Extractores: Son equipos que accionados por el viento renuevan el aire de una habitación sin consumir ningún tipo de energía eléctrica o combustible. [3]



Fig. 2.4 Extractores eólicos [9]

2.4 Aerobomba

Un mecanismo de bombeo que funciona accionado por la fuerza del viento es una Aerobomba, esta son utilizadas para abastecer de agua en pequeñas redes. Este sistema es la manera más económica y sencilla de transportar agua en terrenos agrarios, esto depende de la disponibilidad del recurso hídrico, para elegir la forma de bombeo más adecuada.

En este sentido se diferencian dos situaciones prácticas, a saber: Aero bombeo directo y Aero bombeo remoto.

Aero bombeo directo (Fig. 2.5), ocurre cuando la fuente de agua es un pozo o un reservorio, en el cual el molino se coloca directamente sobre la fuente de agua [10]. Este tipo de instalación es la más común de las aplicaciones de Aero bombeo.

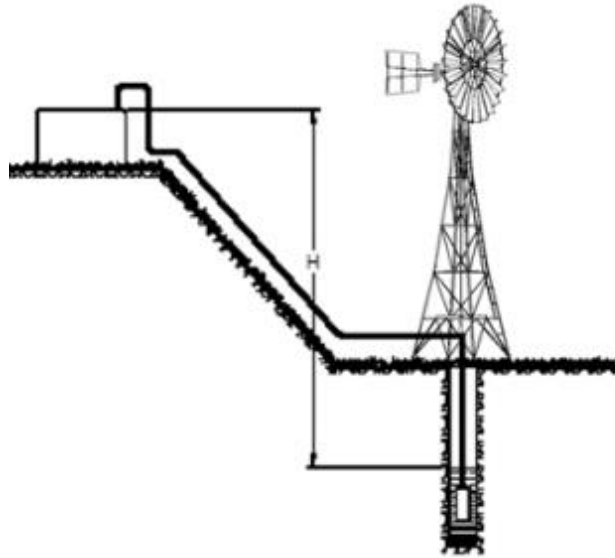


Fig. 2.5 Aero bombeo directo [10]

Aero bombeo remoto (Fig. 2.6), consiste en que la fuente de agua se encuentra apartada de la localización de la torre de la Aerobomba. Esta situación se da generalmente en regiones montañosas en las cuales el recurso eólico tiene mayor intensidad en la cima de las montañas y la fuente de agua es un río, un pozo o aljibe que se encuentra a gran distancia, tanto lateral como vertical. [11]

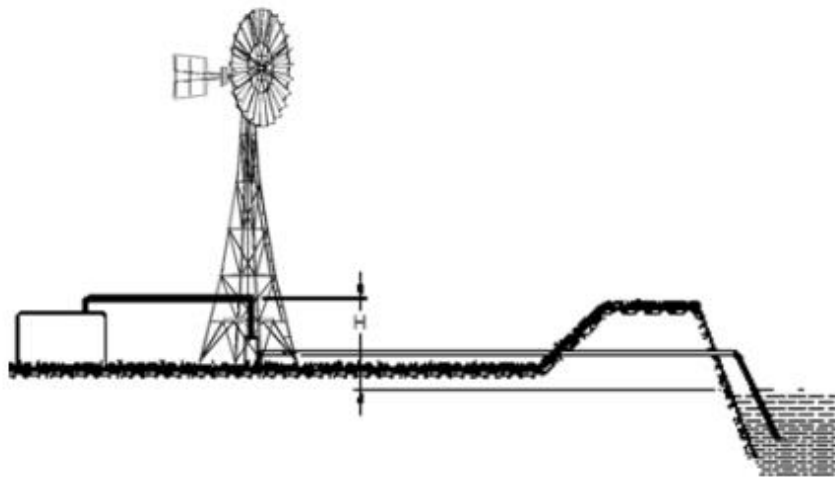


Fig. 2.6 Aero bombeo remoto [11]

2.5 Funcionamiento de la Aerobomba

Este sistema funciona con ráfagas de viento desde 3 m/s, el viento choca con el rotor y proporciona la fuerza necesaria para empezar el movimiento giratorio en el eje principal, el giro es transmitido al sistema de engranajes, los cuales convierten el movimiento rotacional horizontal a oscilatorio vertical, ascendente a descendente, este movimiento es transmitido, por medio del vástago de actuación, accionando la bomba de simple efecto (situada en el fondo del pozo) dispone de un pistón y un sistema de válvulas que de forma sincronizada con el movimiento transmitido por los vástagos, van impulsando el agua por el interior de los tubos hasta la superficie y de allí hasta desembocar en un depósito. [4]

2.6 Elementos de un sistema de Aero bombeo

Una Aerobomba múltipala, básicamente consta de los siguientes elementos: rotor, torre, veleta, caja de transmisión, bomba, tanque de almacenamiento y el sistema de tuberías.

2.6.1 Torre: Es la estructura que soporta todos los componentes del sistema, está diseñada de forma que resista las condiciones de viento más desfavorables, construida con perfiles de ángulo de acero estructural sobre bases de hormigón. La altura de la torre puede variar entre los seis y quince metros, esto va en relación al viento y los obstáculos que existan en la zona. [2]

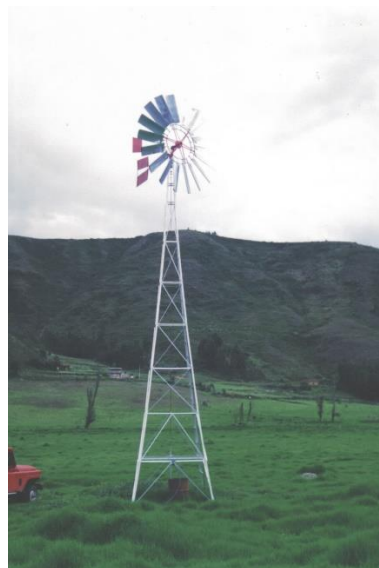


Fig. 2.7 Torre de acero [12]

2.6.2 Rotor: Es el equipo encargado de captar la energía del viento, y transmitirla al reductor de velocidad, consta de varias palas debido a que trabajan a bajas velocidades y suministran gran fuerza para realizar la función de bombeo, estas pueden tener entre 12 a 36 palas, dependiendo de la velocidad del viento en la zona. [2]



Fig. 2.8 Rotor [5]

2.6.3 Veleta: Esta pieza es la encargada de orientar y alinear el rotor para un mejor aprovechamiento de las corrientes del viento, es recomendable usar una veleta de área equivalente a $1/8$ de área barrida del rotor y ubicado a una distancia de $2/3$ del diámetro del rotor, con respecto al punto de giro sobre la torre. [2]



Fig. 2.9 Veleta [12]

2.6.4 Trasmisión: Es la parte que toma el movimiento giratorio del rotor y lo convierte en movimiento lineal de ascenso y descenso para el funcionamiento de la bomba. Consta de un sistema reductor de velocidad generalmente 3 a 1, el cual es sumergido en aceite para lograr una lubricación continua y adecuada. [4]

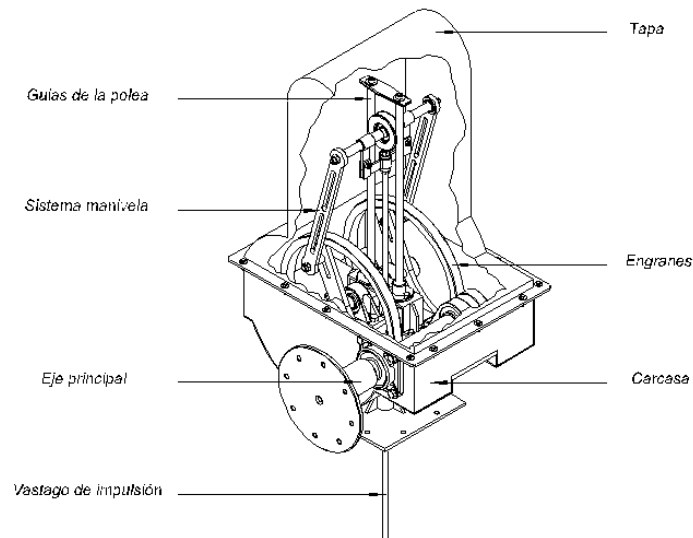


Fig. 2.10 Caja de transmisión [13]

2.6.5 Piscina de almacenamiento: En la piscina se procede a almacenar y suministrar agua para el funcionamiento de la Aerobomba.



Fig. 2.11 Piscina de almacenamiento

2.6.6 Bomba: Es el elemento que aprovecha la fuerza mecánica suministrada por el vástago para mover agua a una altura determinada, aumentando la presión y velocidad del líquido.

En un molino de viento, la bomba es utilizada para bombear pequeños caudales, a distancias y alturas también pequeñas. [2]



Fig. 2.12 Bomba [14]

2.7 Tipos de Aerobomba.

Las Aerobombas más comunes se las clasifica según la posición del eje del rotor, ya que ésta es la pieza fundamental para la captación de la energía eólica.

Estos sistemas son producidos principalmente en países como: Estados Unidos, Australia, Holanda, España y Francia, en donde la tecnología ha sido el pilar fundamental para el desarrollo de este tipo de mecanismos, en la actualidad los países en vías de desarrollo, están incursionando en este tipo de tecnología, construyendo máquinas artesanales con diseños propios que se adaptan a las características de la zona. [4]

Por lo cual podemos clasificar a las Aerobombas en 3 tipos básicos:

- Primera Generación
- Segunda Generación
- Aerobombas Artesanales

Las características y diferencias principales de este tipo de Sistemas las observamos en la siguiente tabla:

TIPO	CARACTERÍSTICAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS	COSTO
Primera Generación	<ul style="list-style-type: none"> • Multípala • Baja velocidad • Caja de transmisión 	larga vida útil, muy confiable, poco mantenimiento	muy pesada, instalación compleja	alto
Segunda Generación	<ul style="list-style-type: none"> • Menos aspas • Velocidad alta • Transmisión directa 	producción “simple”, construcción liviana, buena relación capacidad-precio	tecnología no siempre comprobada	mediano
Artesanales	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño sencillo • Materiales locales y Baratos 	producción local, participación del usuario, baja inversión inicial	corta vida útil, mucho mantenimiento, alto costo por unidad de agua	inversión: baja mantenimiento: alto

Tabla 2.1 Características de los tipos de Aerobombas [15]

2.8 Características y evolución de un molino múltipala americano

El molino múltipala americano ha tenido poco desarrollo en los últimos años, desde su aparición a mediados del siglo XIX, han demostrado su eficiencia y viabilidad en el uso de energías alternativas, cambiando muy poco con el pasar de los años pero siendo la base para nuevos modelos que se utilizan en la actualidad. [5]

El mayor inconveniente con estos modelos es la robustez de los diferentes elementos que lo conforman, ya que son equipos de baja velocidad y requieren de gran fuerza para realizar la función de bombeo.

El uso de nuevos materiales para la construcción de los molinos múltipala, es el avance más significativo en este tipo de máquinas. No obstante también encontramos algunas

variaciones en los diferentes componentes que la conforman como en los sistemas de captación, sistemas de transmisión y sistemas de bombeo. Actualmente se están estudiando máquinas con acoplamiento directo a bombas centrífugas [4], salto tecnológico importante que podría permitir la extracción de mayores volúmenes de agua y alcanzar mayores profundidades que las permitidas por las bombas de pistón.

2.8.1 Primera Aerobomba múltipala Americana

Este fue el primer molino de viento fabricado de acero, producida en los Estados Unidos² (Fig. 2.13), con una altura de ocho pies, ésta máquina era capaz de bombear una mayor cantidad de agua que el molino de madera, por lo que empezó a masificarse su uso a lo largo del país.

Estaba provisto de un sistema de transmisión protegido únicamente por pintura, el cual estaba compuesto por un eje principal que recibía el movimiento del rotor, un piñón y una rueda dentada que conformaban el sistema de reducción de velocidad; un eje secundario que movía la polea, la cual hacía las veces del sistema biela manivela con lo que funcionaba la bomba. [16]

Estos sistemas contaban con cojinetes de grafito o aceiteras que podían ser operadas desde el piso, con el fin de lubricar los elementos.

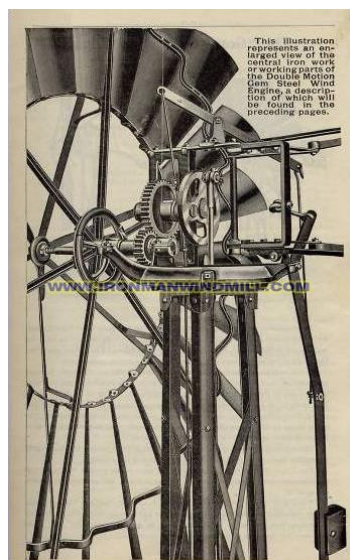


Fig. 2.13 Primer molino de viento de acero “Wind Engine & Pump Co.” [16]

² Wind Engine & Pump Co

Con la aparición de Aerobombas con caja reductora cerrada, estos modelos dejaron de fabricarse.

2.8.2 Sistema de Captación

El rotor es la pieza fundamental para captación de la energía eólica mediante las aspas, en las Aerobombas múltipala se usan dos tipos de aspas planas y curvadas, las cuales casi no se han modificado con el pasar de los años.

Rotores Eólicos

Los rotores eólicos usados en las Aerobombas múltipala, pueden llegar a tener entre 12 a 36 alabes (Fig.2.14). Estos rotores se conocen técnicamente como rotor eólico de alta solidez, baja velocidad y alto momento par en el eje. [2]



Fig. 2.14 Rotor múltipala [17]

La solidez de un rotor se define como la relación entre el área ocupada por las palas del rotor y el área circular del rotor barrida en un giro. El rotor múltipala americano puede alcanzar una solidez cercana al 85%, por lo que se lo considera un rotor de alta solidez. [17]

Dado el bajo valor de la velocidad específica (λ), del orden de la unidad, son máquinas eólicas lentas, el diámetro del rotor alcanza como máximo 10 m, ya que el peso de los rotores de mayor tamaño dificultaría el arranque y operatividad de la máquina, su

rendimiento está alrededor del 30% [18]. Puede arrancar a bajas velocidades de viento, entre 2 a 3 m/s, con un elevado par de arranque.

Materiales

Tradicionalmente los materiales usados han sido la madera, el acero, el aluminio, pero con el desarrollo de los materiales se ha implementado una nueva generación de materiales compuestos como son el poliéster o resina epoxica, reforzado con fibra de vidrio o fibra de carbono [18], logrando así un menor peso de los elementos y un comportamiento mecánico adecuado durante su vida útil.

Diseño

Debido a que la captación de la energía eólica se realiza mediante la acción del viento sobre las palas, se busca favorecer la circulación del aire sobre la superficie de las mismas, (fig.2.15), evitar la formación de torbellinos y maximizar la diferencia de presiones. El rotor está formado por palas de sección constante con formas de chapas, planas o curvadas, debidamente orientadas para optimizar la acción del viento, que provoca una fuerza de arrastre que a su vez origina el par en el eje del rotor. [19]

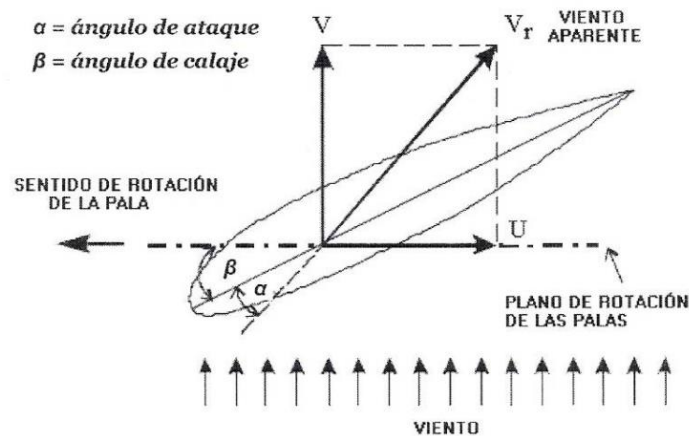


Fig. 2.15 Efectos del viento sobre un asa [19]

Existen varios diseños de aspas dependiendo del fabricante. Cada asa tiene su geometría particular y difieren unas de otras, con el propósito de lograr mejores rendimientos de sus equipos.

Aspas Planas

Este modelo de aspas, fueron las primeras en utilizarse en una Aerobomba, construidas de madera y posteriormente de acero, tenían una alta resistencia al aire, generando una fuerza de arrastre que permitía obtener el par de arranques necesarios para que funcione el sistema. [16]

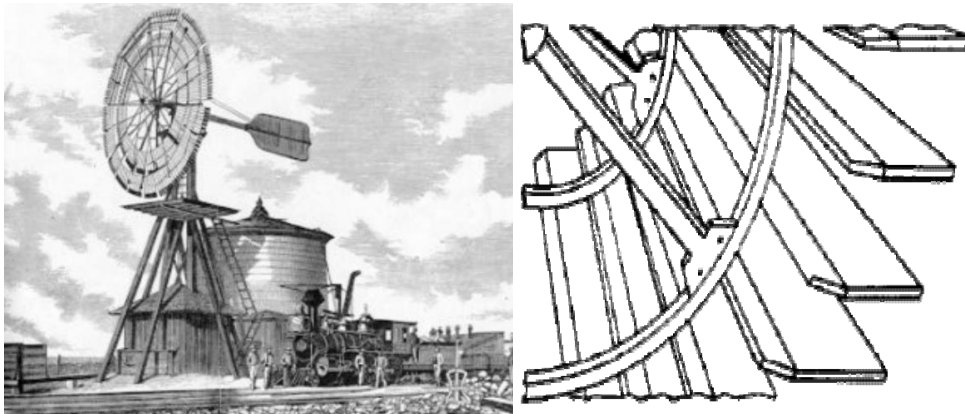


Fig. 2.16 Aerobomba aspas planas [16]

Aspas Curvadas

Durante las primeras décadas del siglo XX se desarrolló la teoría de la aerodinámica, permitiendo comprender la naturaleza y el comportamiento de las fuerzas que actúan alrededor de las palas en la Aerobomba [20], estableciéndose criterios para el diseño de la nueva generación de máquinas eólicas.

En estos perfiles se disminuye la resistencia al aire, y se incrementa la sustentación con lo cual aumenta la velocidad de giro.

Para un perfil diseñado en forma aerodinámica se definen dos zonas que son:

- a) **El extradós**, que es la parte del perfil en donde los filetes de aire están en depresión.
- b) **El intradós**, que es la parte del perfil en donde los filetes de aire están en sobrepresión.

Si la placa no está perfilada convenientemente, las turbulencias originadas sobre el extradós, disminuyen la energía cinética del aire. Si se permite que la placa se desplace bajo el efecto de la fuerza ejercida por el viento, producirá un cierto trabajo recuperable

en forma de energía mecánica; cuanto menor sea la turbulencia, mayor será este trabajo. (fig. 2.17) [19]

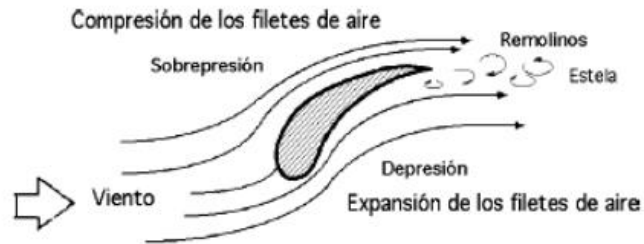


Fig. 2.17 Perfil situado en el seno de una corriente fluida [19]

Aspas del diseño CITA Steere

El rotor (Fig. 2.18), tiene un diámetro de 2,44 m (8 pies) y está conformado por veinticuatro palas en forma de delta, ubicadas en el perímetro del rotor. Estas piezas están construidas de chapa de acero galvanizado de 1 mm de espesor, y van dispuestas entre dos aros construidos de planchuela de 3 x 32 mm, divididas en tres secciones. Los diámetros se han previsto de acuerdo con la altura de las palas, de forma que el aro exterior tenga el diámetro nominal del rotor, y el aro interior tenga un diámetro que permita su montaje [21]. Estas particularidades permiten mayor aprovechamiento de la energía del viento (mayor eficiencia energética) y facilitan el arranque con una velocidad del viento menor (2 m/s).



Fig. 2.18 Aspas CITA Steere [21]

Además del diseño de las aspas, un aspecto que ha evolucionado y se está tomando en cuenta es la posición de los alabes en el rotor, puede ser una pieza rígida o poseer articulaciones, pudiendo en algunos casos cambiar el ángulo de ataque para captar de mejor manera la energía del viento, aunque este sistema no es muy utilizado.

Tipo	Rendimiento característico	Fabricación	Cp	TSR
Aspas Planas	Par de arranque media y baja velocidad	Simple	0,05 – 0,15	1,5 – 2
Aspas Curvas	Alto par de arranque y baja velocidad	Moderado	0,15 – 0,30	1 – 1,5
Aerodinámica 1	Bajo par de arranque y velocidad moderada	Moderado con precisión	0,20 – 0,35	3 - 5
Aerodinámica 2	Bajo par de arranque y alta velocidad	Preciso	0,30 – 0,45	5 - 10

Tabla 2. 4 Comparación entre diferentes tipos de aspas [4]

2.8.3 Sistemas de transmisión

Los sistemas de transmisión con caja cerrada comenzaron a fabricarse a finales del siglo XIX, construidos en su totalidad de metal, llegaron a convertirse en mecanismos muy utilizados a lo largo del país.

Caja reductora de velocidad

Este sistema es lo que caracteriza al molino múltipala americano (Fig. 2.19), esta fabricado con 2 piñones y 2 engranajes reforzados, también posee 2 ejes y 2 bielas para balancear la carga y así lograr una operación eficiente. Además su lubricación positiva permite que los bujes, engranes y piezas móviles estén constantemente bañados con aceite, lo que asegura un 100% de lubricación continua. [22]

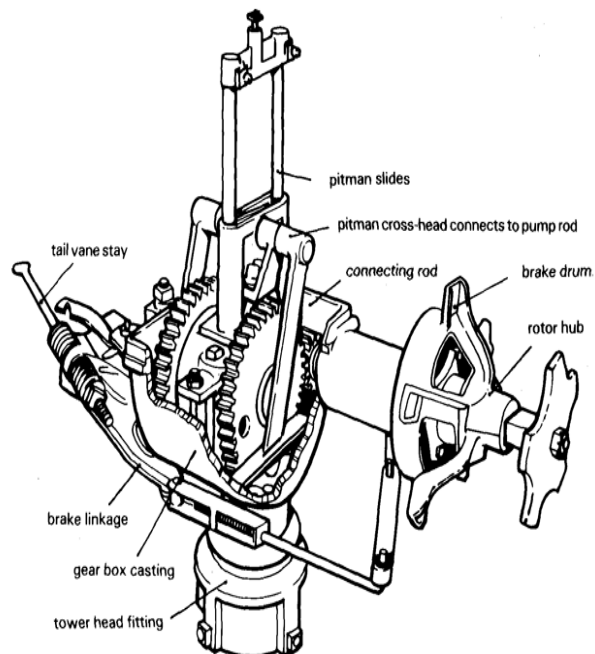


Fig. 2.19 Caja reductora [22]

La reducción de velocidad típica es de 3 a 1. Dependiendo de las dimensiones del rotor, es posible extraer agua hasta una profundidad de 100 metros. Si bien el caudal de bombeo depende directamente de la intensidad del viento, se puede lograr un rendimiento de hasta 2.000 litros/hora. Con un bajo mantenimiento tiene una vida útil de aproximadamente 20 años. [23]

2.8.4 Sistema de bombeo

Con la evolución de la tecnología, existen algunas alternativas de equipos de bombeo, las cuales pueden adaptarse al sistema de Aerobomba múltipala, dependiendo de algunos factores en especial del recurso eólico.

Bombas de pistón

Este tipo de bomba (fig. 2.20), es la más utilizada desde los primeros modelos por ser la más adecuada para las Aerobombas múltipala de rotor lento.

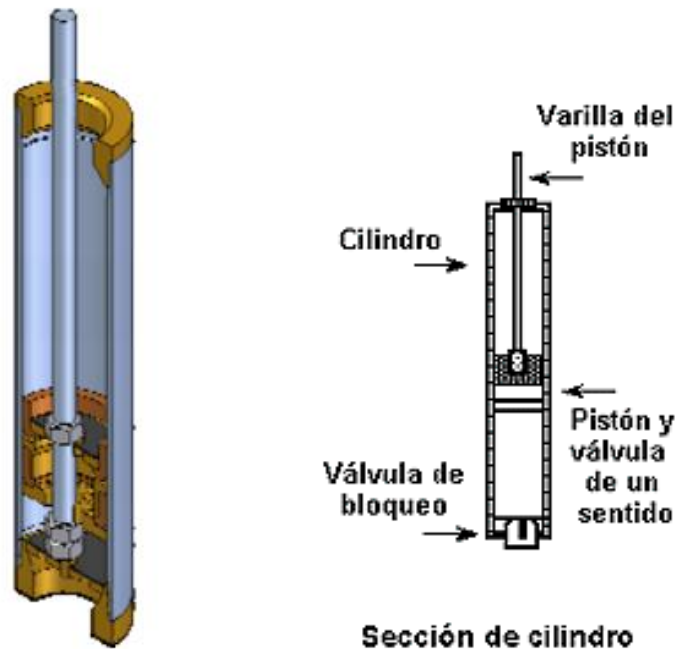


Fig. 2.20 Bomba de pistón [10]

Tiene un diámetro nominal de 2, 2.5”, 3” o 4” y desplazamiento de émbolo de 50mm a 90mm (según las necesidades de bombeo); con una longitud total de la camisa de 300mm, permitiendo ubicar el émbolo en varias posiciones, éste lleva dos empaques de cuero tratado, montados sobre una armadura de bronce compuesta que permite el reemplazo fácil en el mantenimiento [10], válvulas de obturación en Neopreno reforzado en matriz de nylon. El mayor diámetro de la bomba permite tener un gran caudal de bombeo aprovechando la energía del viento. Cuenta con una cámara que se llena cíclicamente, desplazando “paquetes” de flujo a intervalos regulares desde la succión hasta la descarga.

Bombas roto-dinámicas

El rotor eólico transmite su energía rotacional a través de la caja de trasmisión, para acoplarse a una bomba roto-dinámica (una bomba centrífuga o axial) o de desplazamiento rotatoria. [24]

Este esquema de Aero bombeo, generalmente es usado para aplicaciones de volúmenes grandes y para desniveles pequeños.

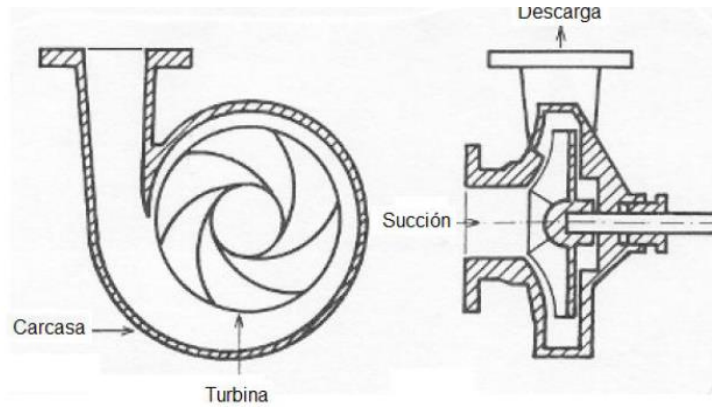


Fig. 2.21 Carcasa e impulsor de una bomba centrífuga [24]

Las bombas centrífugas (fig. 2.21), tienen un rotor de paletas giratorio sumergido en el líquido. El líquido entra en la bomba cerca del eje del rotor, y las paletas lo arrastran hacia sus extremos a alta presión. El rotor también proporciona al líquido una velocidad relativamente alta, que puede transformarse en presión en una parte estacionaria de la bomba, conocida como difusor.

La eficiencia de este tipo de bombas, varía fuertemente en la tasa de salida para una determinada cabeza. Las bombas centrífugas están diseñadas para un funcionamiento óptimo en su punto de diseño, es decir, en una determinada carga de presión y caudal específico. Lejos de este punto de diseño, su eficiencia disminuye rápidamente. [24]

En Aerobombas, las bombas de pistón son mucho más utilizadas que las bombas centrífugas, ya que su eficiencia es menos sensible a las fluctuaciones de presión y velocidad.

CAPÍTULO III

Mantenimiento correctivo e implementación de mejoras

3.1 Introducción

Al realizar el análisis técnico de la Aerobomba, se considera que ésta tiene fallas en el diseño, motivo por el cual se ha deteriorado en muy corto tiempo desde su emplazamiento, razón por lo que se procede a efectuar mantenimiento preventivo y correctivo de los diferentes elementos que conforman el sistema, así como mejorar el diseño del mecanismo.

En el mantenimiento se corrigen los defectos observados en el equipo, identificando las piezas útiles para en ellas realizar un mantenimiento preventivo, además de analizar los elementos destruidos para someterlos al debido proceso de mantenimiento correctivo e implementar mejoras en el sistema, garantizando de esta manera un buen funcionamiento del equipo.

Elementos sobre los cuales se realizará mantenimiento preventivo:

- Las aspas
- La estructura del rotor
- La carcasa del reductor
- Soporte y guías del sistema manivela corredera
- Disco de acople rotor – reductor de velocidad
- Estructura de la Torre
- La veleta orientadora

Elementos que serán sometidos a mantenimiento correctivo y mejoras:

- El reductor de velocidad
- El vástago
- La bomba

3.1 Mantenimiento Preventivo

En el mantenimiento preventivo se procede a limpiar y repintar la superficie de las piezas en buen estado, con el propósito de alargar su vida útil.

Aspas

Las aspas (fig. 3.1), del rotor están fabricadas de plancha metálica galvanizada.



Fig. 3.1 Aspas

La estructura del rotor

La estructura del rotor (fig. 3.2), está construida de tubo estructural.



Fig. 3.2 Estructura del rotor

La carcasa del reductor

La carcasa (fig. 3.3), está fabricada de plancha negra



Fig. 3.3 Carcasa del reductor

Soporte y guías del sistema manivela corredera

El soporte de las guías del sistema manivela corredera (fig. 3.4), está construido de plancha negra, y forma parte del reductor de velocidad.



Fig. 3.4 Soporte y guías del sistema manivela-corredera

Disco de acople rotor – reductor de velocidad

El disco de acople rotor - reductor de velocidad (fig. 3.5), es construido de plancha negra y mecanizado en el torno y fresadora.

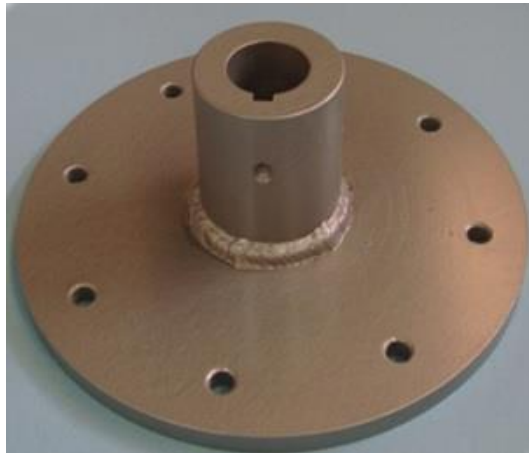


Fig. 3.5 Disco acople rotor-reductor

Estructura de la Torre

La estructura de la torre (fig. 3.6), tiene forma piramidal conformada por perfiles de acero estructural.



Fig. 3.6 Estructura de la torre

La veleta orientadora

La veleta orientadora (Fig. 3.7), está construida de plancha negra mientras que el vástago es de tubo estructural.



Fig. 3.7 La veleta orientadora

3.2 Propuestas de mejoras para la Aerobomba

De acuerdo a los datos obtenidos de moradores del sector Chicán - Paute, podemos considerar que la Aerobomba emplazada inicialmente, presentó problemas de bombeo, ya que mientras se encontraba en funcionamiento no logro satisfacer las necesidades para la que fue instalada, razón por la cual se busca realizar un nuevo diseño de los diferentes elementos que conforman el mecanismo, como son:

- El reductor de velocidad
- El vástago de conexión
- Accionamiento de la bomba

Reductor de velocidad

Este mecanismo fue el más afectado por el mal funcionamiento de la bomba, lo que ocasionó que los elementos que lo conforman se destruyan, quedando el equipo inservible.

El nuevo diseño (Fig. 3.10) está constituido por:

- 2 Eje de transmisión
- 2 Piñones
- 2 Ruedas dentadas
- 2 Manivelas
- 5 chumaceras



Fig. 3.10 Reductor de velocidad

Los elementos en buen estado son reutilizados, de acuerdo a las necesidades del sistema.

Inicialmente el sistema de transmisión estaba compuesto por un piñón conectado a un engranaje, el cual hacía las veces del sistema manivela corredera (Fig. 3.11), para convertir el movimiento giratorio en movimiento lineal.



Fig. 3.11 Sistema manivela corredera [11]

El nuevo diseño se lo realiza con dos piñones y dos ruedas dentadas (Fig. 3.12), con el propósito de disminuir las cargas en el sistema de transmisión, logrando hacer más fiable el mecanismo, además de conseguir una mejor estabilidad de trabajo, cuando se someta a las diferentes variaciones de velocidad del viento.

También se modificó algunos elementos para la adición de las nuevas ruedas dentadas.

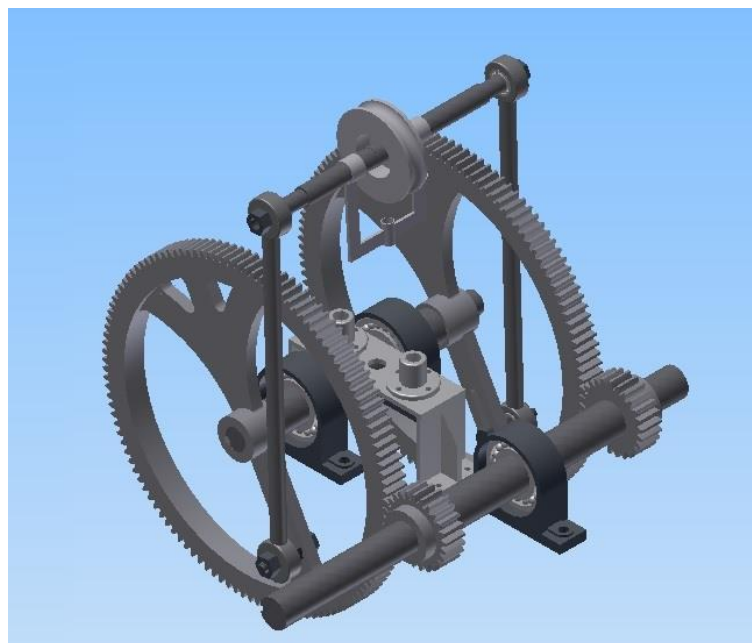


Fig. 3.12 Sistema de transmisión manivela corredera

Potencia del molino múltipala

Para calcular la potencia en watts, del viento que sopla a una velocidad de 3,5 m/s, usamos la expresión 3.1 [25].

$$P_M = 0,5 * \rho_a * V_D^3 * A_R * C_p \quad \text{Ec 3.1}$$

Donde:

P_M = Potencia del molino

ρ_a = densidad del aire a $T = 15^\circ$

V_D = Velocidad de diseño = 3,5 m/s

A_R = Área del rotor

C_p = Coeficiente de potencia del molino múltipala

Debido a que la densidad del aire, depende de las condiciones a las que éste se encuentre sometido: temperatura, altitud y presión, se la calcula con la expresión 3.2, [26]

$$\rho_a = \left(\frac{P_o}{R*T} \right) \exp \left(\frac{-g*z}{R*T} \right) \quad \text{Ec 3.2}$$

Donde:

P_o = Presión atmosférica = 101325 Pa

R = Constante del aire 286,9 J/Kg*°K

T = Temperatura [°K]

Z = Altura sobre el nivel del mar [m]

G = Aceleración de gravedad = 9,8 m/s²

$$\rho_a = \left(\frac{101,325 \text{ Pa}}{286,9 \frac{\text{J}}{\text{Kg} * \text{K}} * 288,15 \text{ K}} \right) \exp \left(\frac{-9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 2489 \text{ m}}{286,9 \frac{\text{J}}{\text{Kg} * \text{K}} * 288,15 \text{ K}} \right)$$

$$\rho_a = 0,942 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Puesto que el diámetro del rotor es igual a 3,5 m, se calcula el área del mismo con la fórmula 3.3, [25]

$$A_R = \pi * r^2 \quad \text{Ec 3.3}$$

$$A_R = \pi * 1,75m^2 = 9,62 m^2$$

Para conocer el coeficiente de potencia Cp, este se lo relaciona con la velocidad específica la cual se obtiene de la tabla 3.1, para máquinas eolicas.

Tipo de máquina	TSR de diseño	Tipo de pala	C _y /C _x
Bombeo de agua	1	Placa plana	10
	1	Placa curvada	20-40
	1	Ala de tela	10-25
Generadores eólicos pequeños	3-4	Perfil simple	10-50
	4-6	Perfil alabeado	20-100
	3-5	Ala de tela	20-30
Generadores eólicos grandes	5-15	Perfil alabeado	20-100

Tabla. 3.1 Velocidad específica de diseño TSR [27]

Luego de encontrar la velocidad específica TSR para bombeo de agua igual a 1, se obtiene el coeficiente de potencia Cp de la tabla 3.2, con un valor aproximado de 0,30.



Tabla 3.2 Coeficiente de potencia para molinos de viento [27]

Al tener todos los datos se procede a calcular la potencia del molino múltipala.

$$P_M = 0,5 * 0,942 \frac{Kg}{m^3} * (3,5 \frac{m}{s})^3 * 9,62m^2 * 0,30$$

$$P_M = 58,28 W = 0,078 Hp$$

Revoluciones por minuto del rotor

Para obtener las rpm se considera una velocidad de viento de 7 m/s, que es una carga de viento crítica para la zona, mediante la ecuación 3.4, [28]:

$$N = \frac{60 * TSR * V_m}{\pi * D_R} \quad \text{Ec 3.4}$$

Donde:

N_R = Velocidad de giro del rotor

TSR = Velocidad específica del molino = 1

V_m = Velocidad máxima de viento = 7 m/s

D_R = Diámetro del rotor = 3,5 m

$$N = \frac{60 * 1 * 7 m/s}{\pi * 3,5m}$$

$$N = 38,19 rpm$$

Ya que para los cálculos se requiere el numero de revoluciones por segundo (n), entonces.

$$n = \frac{N}{60} = \frac{38,19}{60} = 0,637 \text{ revoluciones por segundo}$$

Relación de transmisión en los engranajes

La relación de transmisión (r_t) es una relación entre las velocidades de rotación de dos engranajes conectados entre sí: [28]

$$r_t = \frac{Z_2}{Z_1}$$

Donde:

r_t = Relación de transmisión

Z_1 = Número de dientes del piñón conductor = 25

Z_2 = Número de dientes del engranaje conducido = 121

$$r_t = \frac{121}{25} = 4.84$$

Lo que nos indica que el piñón conductor debe dar 4,84 vueltas para que el engranaje conducido gire 1.

Velocidad angular en los engranajes

Para calcular la velocidad angular en el piñón tomamos el dato de revoluciones por segundo del rotor que es igual a 0,637 rps. Y aplicamos la fórmula 3.5, [28]:

$$\omega_1 = n * 2\pi \quad \text{Ec 3.5}$$

$$\omega_1 = 0,637 * 2\pi = 4 \text{ rad/s}$$

Al aplicar la relación de transmisión de engranajes obtenemos la velocidad angular ω_2 del engranaje.

$$r_t = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

$$\omega_2 = \frac{\omega_1}{r_t} = \frac{4}{4,84} = 0,8264 \text{ rad/s}$$

3.3 Mantenimiento correctivo

Los elementos que no se pueden utilizar, son construidos y cambiados. Para garantizar el buen funcionamiento del mecanismo.

3.3.1.1 Eje de transmisión

El eje primario de transmisión (Fig. 3.13) se lo reconstruyó, debido a que presentaba deformación geométrica, además de realizar un alargamiento del mismo y poder

asegurarle a la pared de la carcasa por medio de una chumacera de pared, con el fin de lograr una mayor estabilidad para ejecutar su función, el material utilizado es el acero de transmisión el cual nos brinda dureza y es apto para la transmisión de potencias.

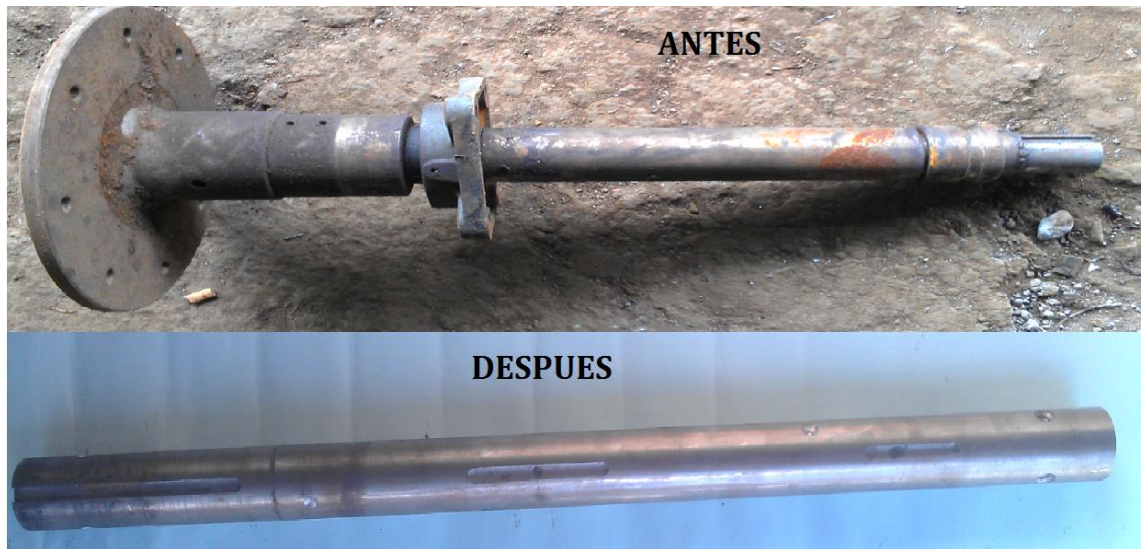
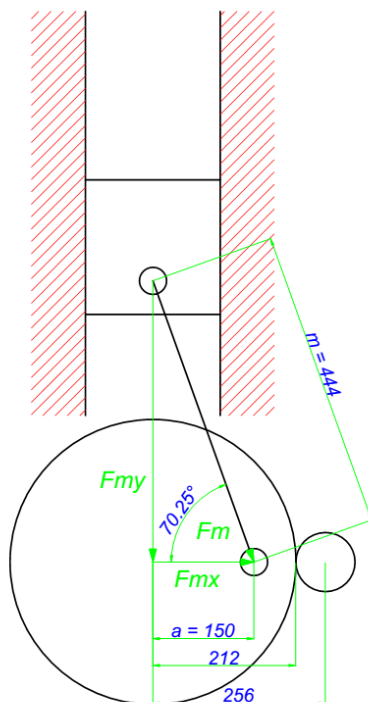


Fig. 3.13 Eje de transmisión

Cálculo de esfuerzos en el eje

Para el cálculo necesitamos conocer la fuerza tangencial ejercida en los engranajes.



Con los datos de $z_1=121$, $z_2=25$ y $m=3.5$ de los engranajes, se puede dibujar el esquema siguiente, además conociendo la longitud de la manivela y el punto de mayor fuerza transmitida a la misma, mediante la ecuación 3.6 [29] se obtiene:

$$F_{my} = F_m * \text{sen}(70.25) \quad \text{Ec 3.6}$$

$$F_{my} = 9395 * \text{sen}(70.25) = 8842N$$

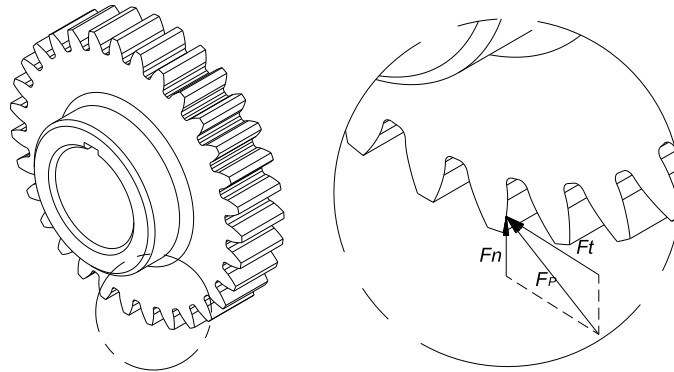
Haciendo sumatoria de momentos con respecto al eje del engrane grande tenemos:

$$F_{my} * 150 = F_t * 212$$

$$F_t = 6256N$$

Esta Fuerza tangencial corresponde a la mostrada en el siguiente esquema, pero la fuerza que realmente va a actuar en el eje es de:

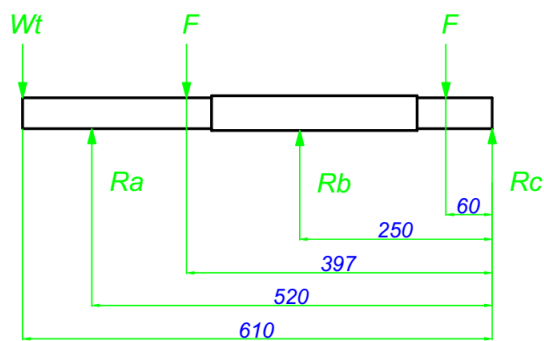
$$F = \frac{F_t}{\cos 20}$$



El coseno de 20 se debe a la configuración propia de los piñones, entonces:

$$F = \frac{6256}{\cos 20} = 6658N$$

A continuación podemos ver el diagrama con las fuerzas actuantes en el eje.



Aquí tenemos lo siguiente:

W_t = Peso de la turbina = 80Kg aproximadamente 800N

F = Fuerza en la transmisión de movimientos = 6658N

R_a , R_b y R_c = Reacciones en los apoyos.

Con la sumatoria de momentos y fuerzas iguales a cero tendremos dos ecuaciones y tres incógnitas, con lo que el sistema se vuelve incalculable. Por lo que recurrimos a la siguiente solución:

Aplicando el teorema de los tres momentos tenemos la ecuación 3.7 [30]:

$$M_{k-1}L_k + 2M_k(L_k + L_{k+1}) + M_{k+1}L_{k+1} = -6 \left(\frac{\Omega_k D_k}{L_k} + \frac{\Omega_{k+1} d_{k+1}}{L_{k+1}} \right) \quad \text{Ec 3.7}$$

Donde

M_k = Momento flector en el apoyo central

M_{k-1} = Momento flector en el apoyo a la izquierda

M_{k+1} = Momento flector en el apoyo a la derecha.

L_k = Longitud del tramo de viga entre el apoyo izquierdo y el apoyo central

L_{k+1} = Longitud del tramo de viga entre el apoyo central y el apoyo derecho

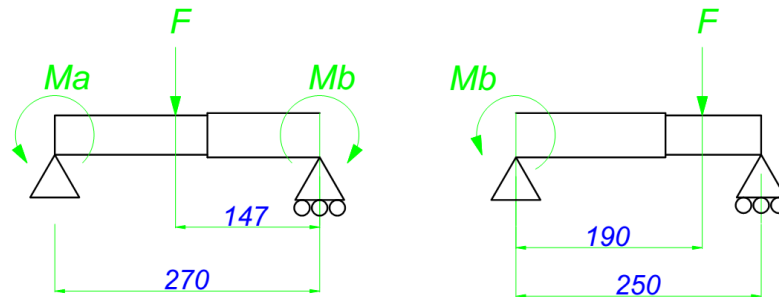
Ω_k, Ω_{k+1} = Área de los momentos flectores isostáticos en los tramos L_k y L_{k+1}

$$\Omega_k = \int_0^{L_k} \mathcal{M}_{iso}^{(k)}(x) dx, \quad \Omega_{k+1} = \int_0^{L_{k+1}} \mathcal{M}_{iso}^{(k+1)}(x) dx$$

D_k, d_k son las distancias a los centros de gravedad de los diagramas de momentos flectores por la derecha y por la izquierda, el producto de estos por las áreas respectivas se puede calcular como:

$$D_k = \frac{1}{\Omega_k} \int_0^{L_k} x \mathcal{M}_{iso}^{(k)}(x) dx, \quad d_k = \frac{1}{\Omega_{k+1}} \int_0^{L_{k+1}} (L_{k+1} - x) \mathcal{M}_{iso}^{(k+1)}(x) dx$$

Teorema de tres momentos [30]



$$Ma * 270 + 2Mb * 520 + Mc * 250 = -6 \left(\frac{\Omega_{ab} * D}{270} + \frac{\Omega_{bc} * d}{250} \right) \quad \text{Ec 3.8}$$

El momento M_c es cero, por lo que:

$$270Ma + 1040Mb = -6 \left(\frac{\Omega_{ab} * D}{270} + \frac{\Omega_{bc} * d}{250} \right)$$

El M_a se puede calcular como:

$$Ma = 90 * Wt = 90 * 800 = 72000$$

Considerando que este momento es negativo y reemplazando en la ecuación de 3.8 momentos:

$$-19'440.000 + 1040Mb = -6 \left(\frac{\Omega_{ab} * D}{270} + \frac{\Omega_{bc} * d}{250} \right)$$

Para obtener los valores de las áreas de momentos y las distancias a sus centros de gravedad, se pueden calcular isostáticamente como sigue:

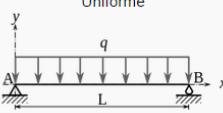
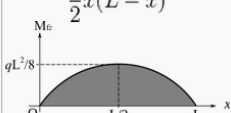
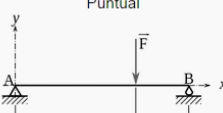
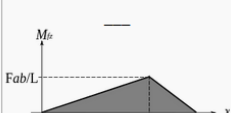
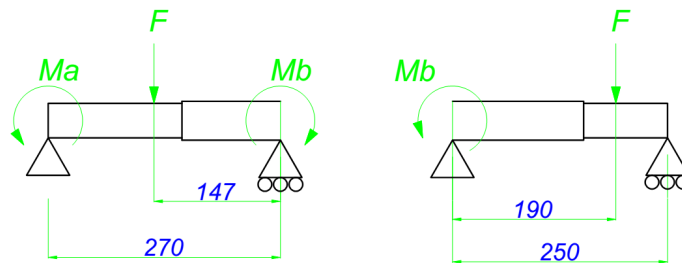
Fórmulas para el área y los centros de gravedad					
Tipo de carga	$q_i(x)$	$M_{iso}^i(x)$	Ω_i	D_i	d_i
Uniforme 	q	$\frac{q}{2}x(L-x)$ 	$\frac{qL^3}{12}$	$\frac{L}{2}$	$\frac{L}{2}$
Puntual 	$P\delta(x-a), 0 \leq a \leq L$	$\frac{Fab}{L}$ 	$\frac{Pa(L-a)}{2}$	$\frac{L+a}{3}$	$\frac{2L-a}{3}$

Tabla 3.3 Fórmulas para el área y centros de gravedad [28]



$$\Omega_{ab} * D = \frac{F * 123 - 147}{2} * \frac{270 + 123}{3} = 7885'106.019$$

$$\Omega_{bc} * d = \frac{F * 190 - 60}{2} * \frac{2 * 250 - 190}{3} = 3921'562.000$$

Por lo que el Momento en b queda:

$$M_b = -240290 \text{ Nmm}$$

Luego procedemos a calcular las reacciones con la ecuación 3.9 [30]:

$$R_k = \overbrace{\left(\frac{M_{k-1} - M_k}{L_k} + \mathcal{R}_{iso}^{(k)+} \right)}^{\text{izquierda}(V_k^-)} + \overbrace{\left(\frac{M_{k+1} - M_k}{L_{k+1}} + \mathcal{R}_{iso}^{(k+1)-} \right)}^{\text{derecha}(V_k^+)} \quad (5)$$

Donde alguno de los términos anteriores debe tomarse igual a cero en el caso de los apoyos extremos por ser inexistente. Y donde:

$\mathcal{R}_{iso}^{(k)-}$ es la reacción isostática en el apoyo de la izquierda del k-ésimo vano,

$\mathcal{R}_{iso}^{(k)+}$ es la reacción isostática en el apoyo de la derecha del k-ésimo vano.

Obviamente:

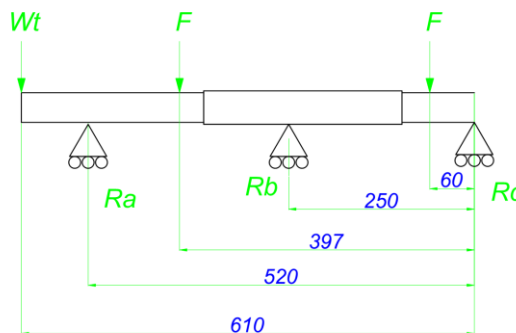
$$\mathcal{R}_{iso}^{(k)-} = \left(\frac{dM_{iso}^{(k)}}{dx} \right)_{x=0}, \quad \mathcal{R}_{iso}^{(k)+} = \left(\frac{dM_{iso}^{(k)}}{dx} \right)_{x=L_{k+1}}$$

Tabla 3.4 Teorema de tres momentos [30]

$$R_b = \left(\frac{-72000 + 240290}{270} + 6658 * 123/270 \right) + \left(\frac{240290}{250} + 6658 * 60/250 \right)$$

$$\mathbf{R_b = 6216N}$$

Obtenido este dato, podemos aplicar las sumatorias de fuerzas y momentos del sistema global, los momentos los sumaremos con respecto a C.



$$\sum F = R_a + R_b + R_c - W_t - 2 * F = 0 = R_a + 6216 + R_c - 800 - 2 * 6658$$

$$\mathbf{R_a + R_c = 7900}$$

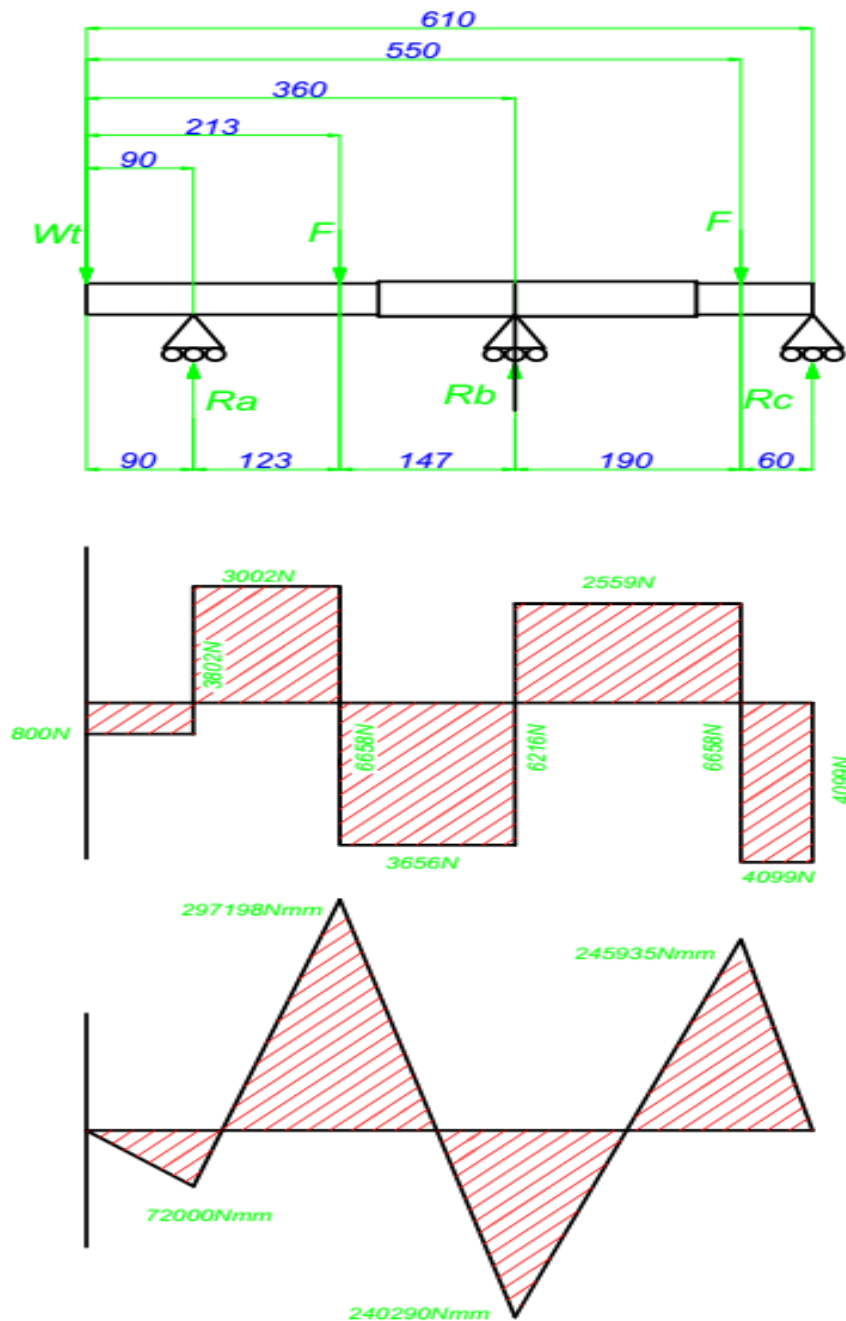
$$\sum M = F * 60 + F * 397 + Wt * 610 - Ra * 520 - Rb * 250 = 0$$

$$6658 * 457 + 800 * 610 - 6216 * 250 = 520Ra$$

$$Ra = 3802N$$

$$Rc = 4099N$$

Con estos datos podemos armar nuestro diagrama de cortantes y flectores.



El momento flector de mayor magnitud se provoca en la posición del primer engranaje y su valor es de:

$$M_{max} = 297Nm$$

El material del eje es de acero ASSAB 705, sus propiedades se muestran a continuación:

PROPIEDADES MECÁNICAS EN CONDICIÓN DE SUMINISTRO	
Resistencia a la Tracción	90-110kg/mm ²
Esfuerzo de cedencia	70kg/mm ²
Resistencia al impacto, kU	aprox. 20 J
Elongación, A5	min 12%
Reducción de área, Z	min 45%
Dureza	270-330HB

Tabla 3.5 Catálogo Acermet Acero ASSAB 705

Según recomendaciones del libro de “Diseño de Ingeniería Mecánica” de Shigley, se puede aproximar el límite de esfuerzo a la fatiga a 0.5 del esfuerzo último a la tensión.

$$\sigma_f = 0.5 * 900Mpa$$

$$\sigma_f = 450N/mm^2$$

El esfuerzo para vigas sometidas a flexión, asumiendo que se trata de una sección circular, se determina a partir de la ecuación 3.10 [29]:

$$\sigma = \frac{32Ma}{\pi * d^3} \quad \text{Ec 3.10}$$

M_a : Momento alternante, en este caso es de 297000Nmm, reemplazando tenemos:

$$450N/mm^2 = \frac{32 * 297000Nmm}{\pi * d^3}$$

$$d = 18.9$$

La sección con este diámetro soportará los esfuerzos alternantes producidos en el funcionamiento normal del sistema.

Para calcular la sección que soportará la torsión del eje tenemos la ecuación 3. 11 [29]

$$\tau = \frac{16T_a}{\pi * d^3} \quad \text{Ec 3.11}$$

Donde T_a es el torque, este corresponde a la sumatoria de las dos torques involucrados en la transmisión del movimiento. Así se tiene:

Fuerza Normal transmitida del piñón al engranaje que ya fue calculada: 6256N

El diámetro primitivo del piñón es: $Z * m = 25 * 3.5 = 87.5 \text{mm}$

El torque ejercido es:

$$T = \frac{87.5 * 6256}{2} = 273700$$

Por lo tanto el T_a será dos veces este torque recién calculado.

Por el tipo de carga el esfuerzo a la fatiga para la torsión se puede calcular.

$$\tau_a = 0.59\sigma = 0.59 * 900 = 531 \text{Mpa}$$

Reemplazando en la fórmula de esfuerzos por torsión, tenemos:

$$\tau = \frac{16T_a}{\pi * d^3}$$

$$531 = \frac{16 * 547400}{\pi * d^3}$$

$$d = 17.4 \text{mm}$$

El sistema de Aerobomba diseñado, resistirá todas sus cargas según la consideración de esfuerzo máximo en la bomba.

3.3.1.2 Piñón

Los piñones están fabricados de fundición gris, constan de 25 dientes con un diámetro exterior de 110 mm. (Fig. 3.14), el nuevo diseño del mecanismo se lo realizó con dos piñones.

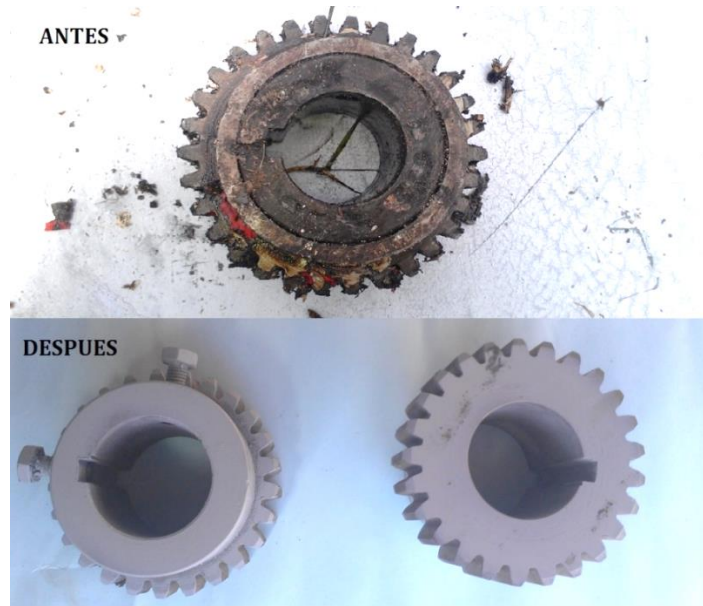


Fig. 3 .14 Piñón

3.3.1.3 Rueda dentada

Las Ruedas dentadas (Fig. 3.15) están fabricadas de fundición gris mediante operaciones de mecanizado realizadas en la fresadora, su diámetro exterior es de 410 mm., consta de 121 dientes, para alcanzar una relación de transmisión de 4,85:1

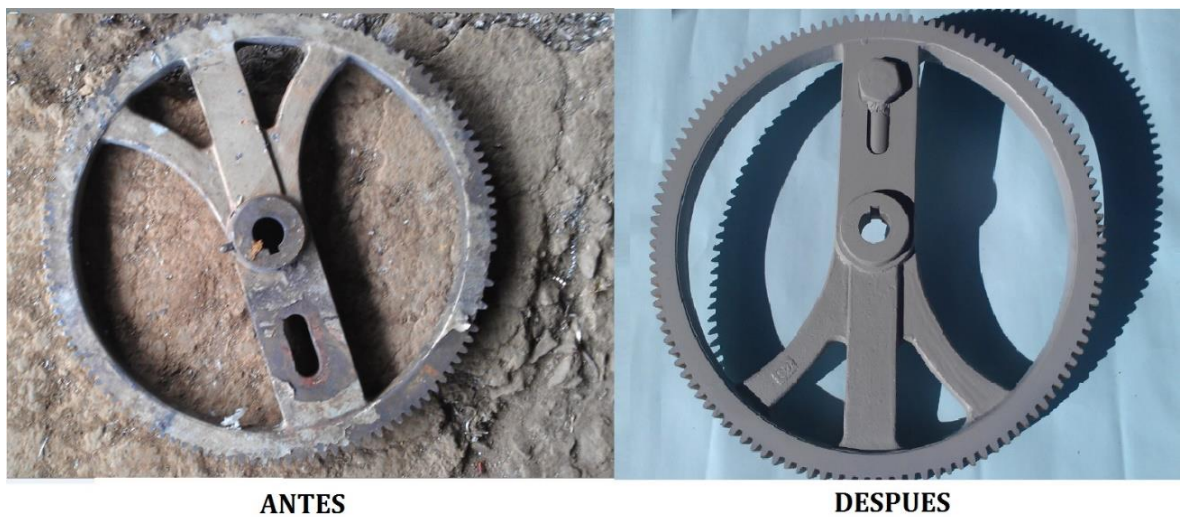


Fig. 3.15 Rueda dentada

3.3.1.4 Manivelas

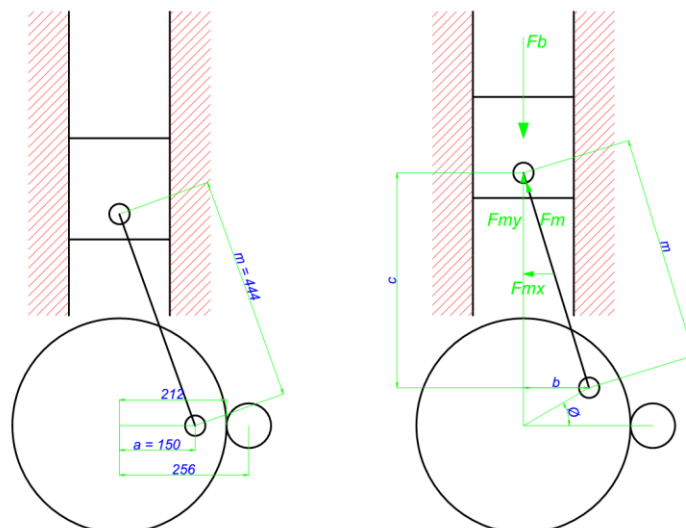
Fabricado de tubo de $\frac{3}{4}$ el cual resiste de mejor manera los esfuerzos de tracción y compresión, se cambió el diseño debido a que la placa al estar sometido a esfuerzos de compresión se dobló lateralmente sin giro ni cambios en su sección transversal, generándose un pandeo flexional [28] (fig. 3.16).



Fig. 3.16 Manivelas

Esfuerzo en manivelas:

Para conocer el esfuerzo máximo en las manivelas debemos calcular el punto donde se desarrolla la mayor fuerza involucrada. Usando las ecuaciones 3.12, [29]



$$b = a \cdot \text{sen}\phi$$

$$Fb = Fmy$$

$$c = \sqrt{m^2 - b^2} \quad \text{Ec. 3.12}$$

Por ley de semejanzas de triángulos:

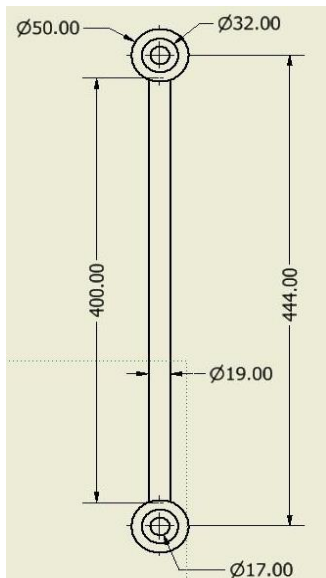
$$\frac{Fm}{Fmy} = \frac{m}{c}$$

$$Fm = m \cdot Fb \cdot (m^2 - b^2)^{-1/2}$$

$$Fm = m \cdot Fb \cdot (m^2 - a^2 \text{sen}^2\phi)^{-1/2}$$

Derivamos la función para determinar el punto donde la fuerza en la manivela se hace máxima.

$$\frac{d(Fm)}{d\phi} = -\frac{1}{2} m \cdot Fb \cdot (m^2 - a^2 \text{sen}^2\phi)^{-3/2} \cdot (-2a^2 \text{sen}\phi \cdot \text{cos}\phi)$$



Se determina que la fuerza máxima se da en 0 y 180°

$$Fm = m \cdot Fb \cdot (m^2 - a^2 \text{sen}^2\phi)^{-1/2}$$

$$m = 444\text{mm}$$

$$Fb \text{ max} = 8845\text{N}$$

$$a = 150\text{mm}$$

$$\phi = 0$$

$$Fm = 9395\text{N}$$

Esta fuerza se aplicará a la manivela en dos sentidos. Tracción y compresión. Dada la longitud del elemento la carga crítica se presentará en compresión por el fenómeno físico de pandeo. Para calcular el esfuerzo admisible se debe conocer:

Se considera al elemento como articulado en sus dos extremos, por lo tanto se puede utilizar la fórmula de Euler para calcular la carga crítica.

$$F_{crit} = \pi^2 * \frac{EI_{min}}{L^2} = \pi^2 * \frac{EA}{\lambda^2} \quad \text{Ec 3.13}$$

$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$L = 400 \text{ mm}$$

Despejamos la inercia necesaria para soportar la carga con la longitud dada.

$$I_{min} = \frac{F_{crit} \cdot L^2}{\pi^2 \cdot E} = \frac{9395 \text{ N} \cdot (400 \text{ mm})^2}{\pi^2 \cdot 210000 \text{ N/mm}^2}$$

$$I_{min} = 725.27 \text{ mm}^2$$

Luego se obtiene el espesor necesario para esta inercia mínima.

$$I_{min} = \frac{\pi^2 \cdot (De^4 - Di^4)}{64}$$

$$19^4 - Di^4 = \frac{726 \cdot 64}{\pi^2}$$

$$Di = 18.8$$

Con esto se conoce que el espesor de pared mínimo debe ser de 0.1 mm para soportar el pandeo.

El esfuerzo a la fluencia es de 250 MPa, como lo que podemos conocer el área mínima para soportarlo.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$A = \frac{9395 \text{ N}}{250 \text{ N/mm}^2} * n$$

Donde n es el factor de seguridad, el cual se considera de 1.5

$$A = 56.37 \text{ mm}^2 = \frac{\pi \cdot (De^2 - Di^2)}{4} n$$

$$Di = 17$$

Con lo que podemos decir que el espesor mínimo para que el sistema funcione con un factor de seguridad de 1.5, es de 2 mm.

3.3.1.5 Chumaceras

Estos elementos son reemplazados, el reductor consta de 3 chumaceras de piso y 2 de pared. (fig. 3.17)



Fig. 3.17 Chumaceras

3.3.1.6 Vástago

Considerando que el vástago fue el elemento principal que ocasionó los daños de la Aerobomba, ya que fue diseñado para soportar mayores cargas que el reductor de velocidad, se buscó una solución para que el vástago actué como un sistema de seguridad, en caso de que se produzca daño de algún elemento de la Aerobomba.

Luego de un minucioso análisis, se eligió cambiar la sección del vástago (Fig. 3.18), para que éste, al alcanzar una fuerza mayor a la de funcionamiento, se fracture protegiendo de esta forma los demás elementos de la Aerobomba.



Fig. 3.18 Vástago instalado en Aerobomba

El vástago tiene una longitud de 9 m. que es la distancia que existe entre la bomba y el reductor de velocidad, para alcanzar esta dimensión se utilizaron uniones en un espacio de 3 m cada una.

Fuerzas aplicadas en el vástago

Al calcular las fuerzas con las que funciona el sistema, se puede obtener el punto y la fuerza en el que el vástago se romperá.

Fuerza estática del agua

La fuerza ejercida por la presión del agua en la cara del pistón sumergido, se calcula mediante la expresión 3.8, [32]

$$F_{est} = \rho_a * g * H * A_p \quad \text{Ec. 3.14}$$

Donde:

F_{est} = Fuerza estática del agua

ρ_a = Densidad del agua a $T=10^\circ\text{C}$ = 1000 Kg/m^3

g = Gravedad = $9,81 \text{ m/s}^2$

H = Altura de bombeo de 20 m

A_p = Área del pistón

$$A_p = \pi * r^2 = \pi * 0,05125m^2$$

$$A_p = 8,252 \times 10^{-3} m^2$$

$$F_{est} = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 20m * 0,008252m^2$$

$$F_{est.agua} = 1618,99 N$$

Fuerza de aceleración de la columna de agua

Es la fuerza necesaria para que el pistón desplace el agua a través de la tubería de impulsión, con la ecuación 3.15 [32]:

$$F_{ac} = \frac{1}{2} * s * \omega^2 * \rho_a * L_{t.imp} * A_p^2 / A_{t.imp} \quad \text{Ec. 3.15}$$

Donde:

F_{ac} = Fuerza de aceleración del agua

S = Carrera del pistón = 0.32 m

ω = Velocidad angular en ciclos por segundo = 2.084 rad/s

$L_{t.imp}$ = Longitud tubería de impulsión = 1.6 m

$A_{t. Imp}$ = Área tubería de impulsión 1 in = 0.002027 m²

$$F_{ac.agua} = \frac{1}{2} * 0,32 \text{ m} * (2,084 \frac{\text{rad}}{\text{s}})^2 * 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 1,6\text{m} * \frac{(0.008252\text{m})^2}{0,002027\text{m}^2}$$

$$F_{ac.agua} = 39,68 \text{ N}$$

Fuerza en el vástago

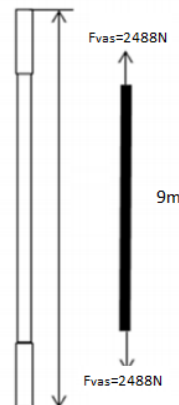
El vástago al ser el elemento que permite la transmisión de movimiento desde el reductor hacia la bomba, sufre esfuerzos de fatiga ya que está sometido a varias fuerzas de tracción y compresión.

Datos del vástago:

$H = 9 \text{ m}$

$D = 1/2 \text{ in}$

Acero inoxidable



Peso del vástago

$$F_{vast} = \rho_{acero} * V_{vast} * g \quad \text{Ec 3.16}$$

$$F_{vast} = 7850 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 1,123 \times 10^{-4} \text{ m}^3 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$F_{vast} = 8,648 \text{ N}$$

$$F_{total.vast} = K(F_{est} + F_{ac} + F_{vast})$$

Donde:

$F_{total.vast}$ = Fuerza total en el vástago

$V_{vastago}$ = Volumen del vástago

K = Coeficiente de seguridad = 1,4

$$F_{total.vast} = 1,4(1618,99 + 39,68 + 8,648)$$

$$F_{total.vast} = 2334,24 \text{ N}$$

Esfuerzos máximos en el vástago

Considerando la fuerza del vástago como la fuerza total de accionamiento, se procede a calcular el esfuerzo máximo soportado por el vástago con una varilla circular de 1/2 in, este elemento es la conexión entre el reductor y la bomba con una longitud total de 9 m.

BARRAS REDONDAS INOXIDABLES

Medidas y Pesos teóricos				CONSIDERACIONES TÉCNICAS NORMA ASTM A276 Barras Redondas Calidad : AISI 304 : AISI 316 Diámetros : De 3.0 mm a 5" Largo tira : 6 mts
Diámetro		Pesos Teóricos		
pulgadas	mm	(kgs/mt)	(kgs/tira)	
--	3,00	0,05	0,30	
1/8	3,18	0,07	0,42	
5/32	3,97	0,10	0,60	
--	4,00	0,11	0,66	
3/16	4,76	0,15	0,90	
--	5,00	0,16	0,96	
1/4	6,35	0,25	1,50	
5/16	7,94	0,40	2,40	
3/8	9,53	0,55	3,30	
7/16	11,11	0,75	4,50	
1/2	12,70	1,00	6,00	
9/16	14,29	1,25	7,50	
5/8	15,88	1,55	9,30	

Tabla 3.6 Catálogo Acermet Acero inoxidable

Tensión por tracción

$$\sigma_{max} = \frac{F_{total}}{A_{vast}} \quad \text{Ec 3.17}$$

Donde:

σ = Tensión por tracción (MPa).

F = Tensión o fuerza aplicada (N).

$$A_{vast} = \frac{\pi * 0,0127^2}{4} = 0.0000126 \text{ m}^2$$

$$\sigma_{max} = \frac{2334,24N}{0.000126\text{m}^2} = 18,525 \text{ MPa}$$

Deformación debido a la carga axial de tracción:

$$\delta = \frac{\sigma * L}{E} \quad \text{Ec 3.18}$$

Donde:

δ = Deformación (m).

L = Longitud de la varilla (m).

E = Módulo de elasticidad (GPa.).

$$\delta = \frac{18,005 * 10^6 * 9m}{207 * 10^9 \text{ N/m}^2}$$

$$\delta = 0,78 \text{ mm}$$

Carga permisible o tolerable:

$$F = (0,6 * F_y) * V_{vast}$$

$$F = 0,6 * 25x10^6 \frac{Kg}{m^2} * 1,123x10^{-4} \text{ m}^3$$

$$F = 1704,71 \text{ Kg} = 16723,24 \text{ N}$$

La carga permisible es mayor a la carga real aplicada al elemento:

$$F = 16723,24 \text{ N} > F_{total.vas} = 2334,24 \text{ N}$$

Lo que nos indica que el vástago puede soportar la carga de trabajo a la que estará sometido.

Velocidad de la bomba

Debido a que el pistón de la bomba está conectada por un vástago al sistema biela manivela del reductor de velocidad, podemos obtener la velocidad de desplazamiento del pistón con la ecuación 3.19 [28]

$$V_B = \omega_2 * r_m \quad \text{Ec 3.19}$$

Donde:

V_B = Velocidad lineal de la bomba

ω_2 = Velocidad angular del engranaje

r_m = Radio de la manivela

$$V_B = 0,826 * 0,32 \text{ m} = 0,26 \text{ m/s}$$

Fuerza máxima en el vástago (F_{mv}) [26]

$$F_{mv} = 2 * F_{est} * \left(1 + \frac{1}{2} * \frac{s}{g} * (3 * \lambda_d * \omega_2)^2 * \left(\frac{A_p}{A_{timp}}\right)\right) \quad \text{Ec 3.20}$$

$$F_{mv} = 2 * 1618,99 \text{ N} * \left(1 + 0,5 * \frac{0,32 \text{ m}}{9,81 \text{ m/s}} * (3 * 2 * 0,826)^2 * \frac{0,008252 \text{ m}^2}{0,002027 \text{ m}^2}\right)$$

$$F_{mv} = 8848,74 \text{ N}$$

Con este valor se procede a realizar el análisis de fuerzas aplicadas a la barra de ½ in, con la ayuda del software de diseño mecánico Autodesk Inventor 2012, obteniendo los informes adjuntos en los anexos, e identificando los valores de desplazamiento máximos que sufrirá el vástago aplicando las fuerzas de funcionamiento y fuerza máxima.

Fuerza de funcionamiento	2334,24 N
Material	Acero inoxidable
Dimensión (in)	½ in
Longitud (m)	9 m

Tabla 3.7 Fuerza aplicada en el vástago

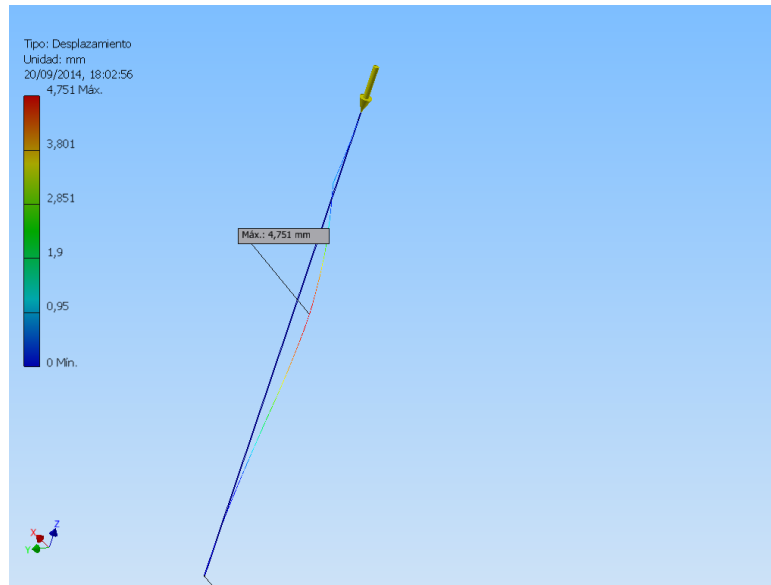


Fig. 3.19 Desplazamiento por fuerza normal de funcionamiento aplicada

Al aplicar la fuerza anteriormente calculada de 2334,24 N, el vástago alcanza un desplazamiento máximo de 4,751 mm,

Fuerza estática	8848,74 N
Material	Acero inoxidable
Dimensión (in)	½ in
Longitud (m)	9 m

Tabla 3.8 Fuerza máxima aplicada en el vástago

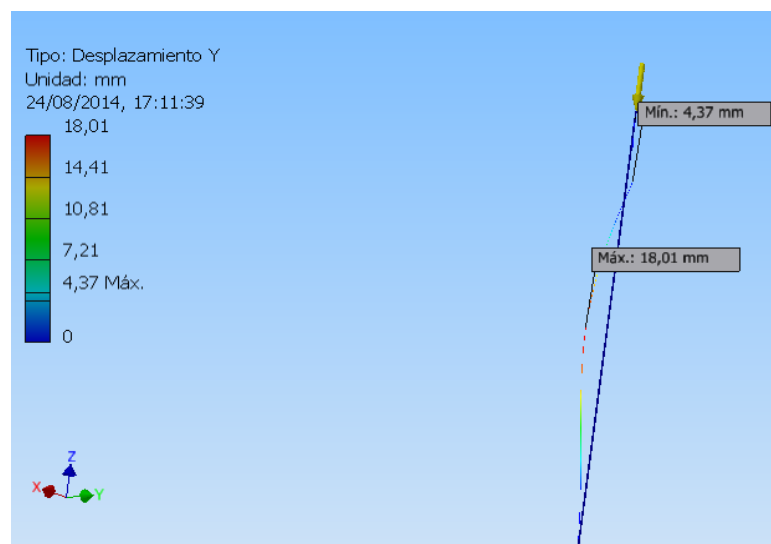


Fig. 3.20 Desplazamiento por fuerza máxima aplicada

La Fig. 3.20 indica que al aplicar la fuerza de 8848,74 N, existe un desplazamiento máximo de 18,01 mm, aproximadamente a 5m de altura con respecto a la base, lo que hace suponer que en este punto puede llegar a fracturarse el vástago.

3.3.1.7 Accionamiento de la bomba

En la actualidad la bomba se encuentra con fugas en el sistema de accionamiento por lo cual esta pierde presión al momento de realizar el bombeo de agua (Fig. 3.21).



Fig. 3.21. Fugas en la bomba de agua

Debido a este problema la Aerobomba es incapaz de expulsar agua con la suficiente presión para llegar a zonas elevadas, por lo que se necesita cambiar el modo de accionamiento de la bomba (fig. 3.22), lo que nos permite corregir el problema.



Fig. 3.22 Accionamiento de la bomba

Al colocar un tapón se elimina la fuga del diseño anterior y al modificar la forma de accionar el émbolo para succión y expulsión (Fig. 3.23), se logra aprovechar de mejor manera la energía mecánica obtenida del reductor y a su vez transformarla en energía cinética para dar presión y velocidad al agua a ser bombeada.

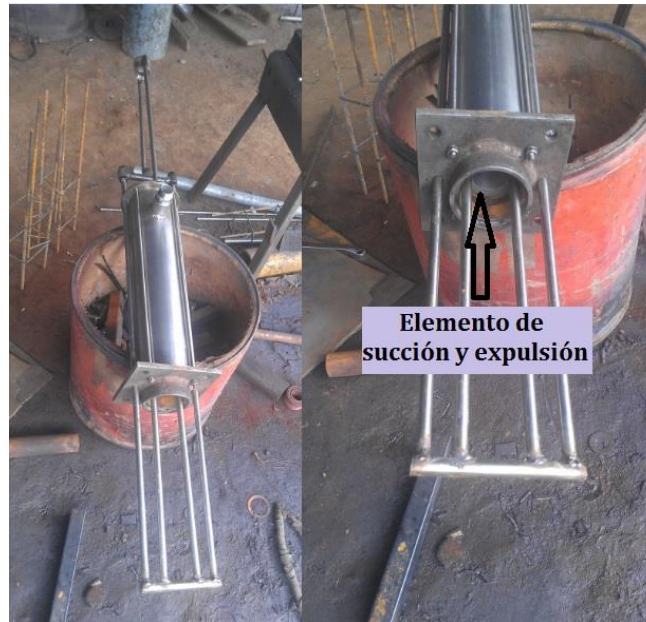


Fig. 3.23 Accionamiento, émbolo de succión y expulsión

3.3.1.8 Empaques de la bomba

Al momento de realizar el mantenimiento de la bomba se encontró que los empaques utilizados, se trabaron en el cilindro de bombeo, lo que ocasionó que la bomba dejara de funcionar.

Luego de analizar los empaques se observó que estos presentaban un diámetro mayor que el del cilindro, determinando que el material utilizado al estar en contacto permanente con el agua, absorbió el líquido aumentando su tamaño original y el consecuente colapso del sistema.

En la tabla 3.5 se observa el porcentaje de expansión de los empaques utilizados en la bomba, y el nuevo diámetro que se utilizará. Según los planos empleados para la construcción inicial de los empaques, observamos que se usó un diámetro de 102 mm,

Diámetro de los separadores de empaque (mm)	Porcentaje de expansión	Nuevo diámetro de separadores de empaques (mm)
103,5	1,471%	101
103,2	1,176%	101
102,8	0,784%	101

Tabla 3.9 Porcentajes de expansión de separadores de empaques

Con estos datos se obtiene un promedio de expansión del material, el cual es de 1,144%, lo que proporciona una base para elegir el nuevo diámetro de los empaques.

En los separadores de empaques fabricados en grilón en buen estado, se redujo el diámetro para así poder ser utilizados nuevamente, mientras que los empaques se fabricaron de suela de poliuretano, ya que ofrecen baja absorción de agua, además de tener un bajo coeficiente de fricción.



Fig. 3.17 Empaques

CAPÍTULO IV

Monitoreo y análisis de eficiencia

4.1 Introducción

Se pretende calcular el caudal y la altura de bombeo que es capaz de suministrar la Aerobomba luego de realizar las mejoras en el mecanismo, con el propósito de hacer una evaluación de su funcionamiento.

La energía eólica es una forma indirecta de energía solar ya que depende de las diferencias de temperatura y presión que se inducen en la atmosfera (por la absorción de la radiación solar) y que consigue poner en movimiento los vientos [1], por eso se trata de una fuente de energía inagotable.

Aproximadamente el 2% de la energía solar recibida por la tierra es convertida en energía cinética de los vientos.

4.2 Velocidad de viento

Este es el factor que dará energía al rotor de la Aerobomba, por esto, durante los meses de Marzo a Julio de 2014 se efectúa mediciones de viento en el sector de emplazamiento (Chicán – Paute), con la ayuda de un anemómetro digital (Fig. 4.1).



Fig. 4.1 anemómetro digital

El monitoreo del recurso eólico realizado en la zona de emplazamiento de la Aerobomba, se lo realizo por 5 meses, estos valores se los recogió 3 veces por semanas a diferentes horas del día, con los cuales se calculó un promedio para obtener los valores de viento mensuales, y así establecer las variaciones a las que estará sometido el mecanismo.

VELOCIDAD MÁXIMA DE VIENTO m/s						
Hora	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	PROMEDIO
1	0,8	0,9	1,4	0,4	1,3	1,0
2	1,0	0,9	1,0	0,8	1,6	1,1
3	1,4	1,0	1,2	1,0	1,4	1,2
4	1,6	0,7	1,3	0,7	1,3	1,1
5	1,2	1,6	1,0	1,2	1,2	1,2
6	0,9	1,3	0,8	0,9	1,6	1,1
7	0,9	1,8	2,0	1,2	2,0	1,6
8	2,7	2,7	1,8	2,1	2,3	2,3
9	2,1	2,7	1,4	1,8	3,8	2,3
10	2,1	2,4	2,6	2,1	2,3	2,3
11	3,3	2,1	4,2	2,9	2,9	3,1
12	3,5	2,3	2,9	3,3	2,6	2,9
13	2,9	3,5	4,7	2,9	3,9	3,5
14	3,5	2,6	3,8	3,0	3,5	3,2
15	3,9	4,8	4,7	2,4	2,9	3,7
16	4,7	3,3	4,5	3,6	5,1	4,1
17	3,3	3,5	3,6	4,2	3,6	3,6
18	3,2	3,0	3,2	2,7	3,9	3,2
19	2,3	2,6	3,0	1,8	2,9	2,5
20	2,4	2,9	3,5	3,6	2,4	2,9
21	2,7	3,0	2,6	2,3	2,1	2,5
22	2,0	2,3	2,9	2,1	2,7	2,4
23	2,0	1,7	1,7	1,6	2,0	1,8
Velocidad promedio	2,37	2,33	2,60	2,11	2,60	2,38

Tabla 4.1 velocidades máximas de viento

En la tabla 4.1 se muestra las velocidades de vientos en (m/s), alcanzadas durante el periodo de estudio, obteniendo valores promedio.

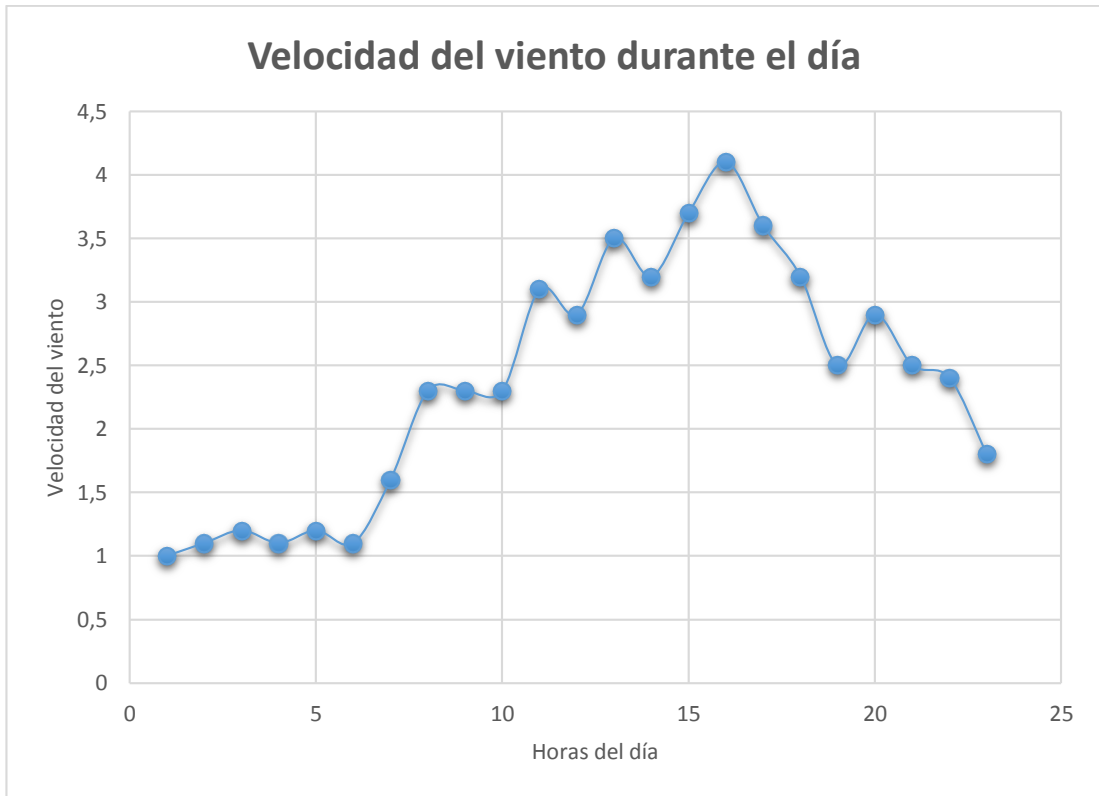


Fig. 4. 2 Velocidad máxima diaria

Al observar el fig. 4.2, se obtiene una curva de velocidades máximas de viento a lo largo del día, destacando los valores más altos entre las 11H00 y 16H00.

4.3 Estimación de la velocidad del viento

La velocidad del viento es un fenómeno aleatorio y su intensidad muy variable es por eso que se han desarrollado modelos estadísticos para conocer la velocidad media del viento, a partir de datos históricos y distribuciones probabilísticas.

La distribución de Weibull es utilizada en múltiples aplicaciones, siendo una de ellas la distribución de la velocidad del viento. Esta describe con bastante confiabilidad la distribución de la velocidad del viento para un intervalo de tiempo aproximado, mediante la siguiente ecuación 4.1, [25]:

$$f_u = \left(\frac{K}{c}\right) * \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} * e^{\left(-\frac{u}{c}\right)^K} \quad \text{Ec 4.1}$$

Donde

f_u = Probabilidad de velocidad

c = Factor de escala (m/s)

K = Factor de forma

u = Velocidad del viento m/s

Los parámetros de factor de escala y factor de forma provienen del Atlas eólico del Ecuador (Anexo 3) [32].

C (factor de escala) = 3.5 m/s

K (factor de forma) = 2

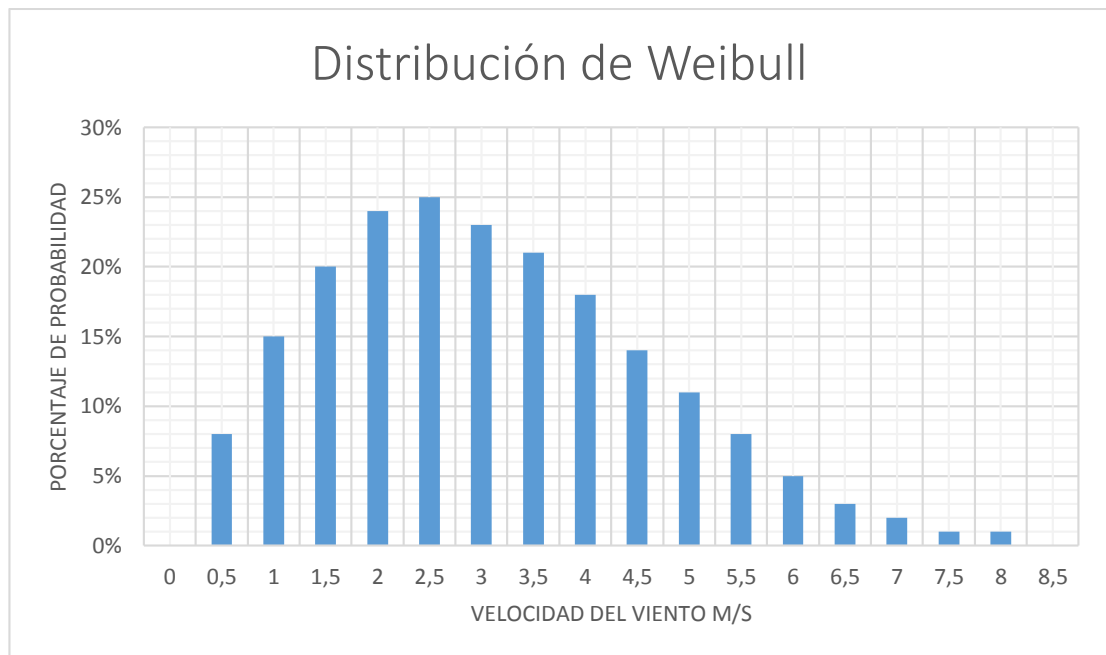


Fig. 4.3 Descripción de las variaciones del viento

En el fig. 4.3, se representa el valor de velocidad del viento entre (3 y 3,5 m/s) con el mayor porcentaje de probabilidad, además de notar que los vientos frescos y moderados son muy comunes, mientras que los fuertes vientos son raros y poco probables.

4.4 Potencia de la Aerobomba

Las Aerobombas comerciales con tamaños del rotor entre 1 y 8 metros, son capaces de generar entre 10 W y 1 KW de potencia, dependiendo de las condiciones de régimen de viento donde se encuentra la instalación [2].

Luego de conocer las probabilidades de viento en la zona de emplazamiento, se procede a calcular la potencia que es capaz de generar la Aerobomba a diferentes velocidades de viento mediante la siguiente expresión:

$$P_M = 0,5 * \rho_a * V_D^3 * A_R * C_p$$

VELOCIDAD DE VIENTO (m/s)	POTENCIA (W)	VELOCIDAD DE VIENTO (m/s)	POTENCIA (W)
0	0,0	4,5	123,9
0,5	0,2	5	169,9
1	1,4	5,5	226,2
1,5	4,6	6	293,6
2	10,9	6,5	373,3
2,5	21,2	7	466,2
3	36,7	7,5	573,5
3,5	58,3	8	696,0
4	87,0	9	990,9

Tabla 4,2 Potencia a diferentes velocidades de viento

Al realizar las pruebas de funcionamiento de la Aerobomba, se aprecia que el rotor empieza a funcionar con una velocidad de viento de 1,8 m/s, generando una potencia de 8,9 W.

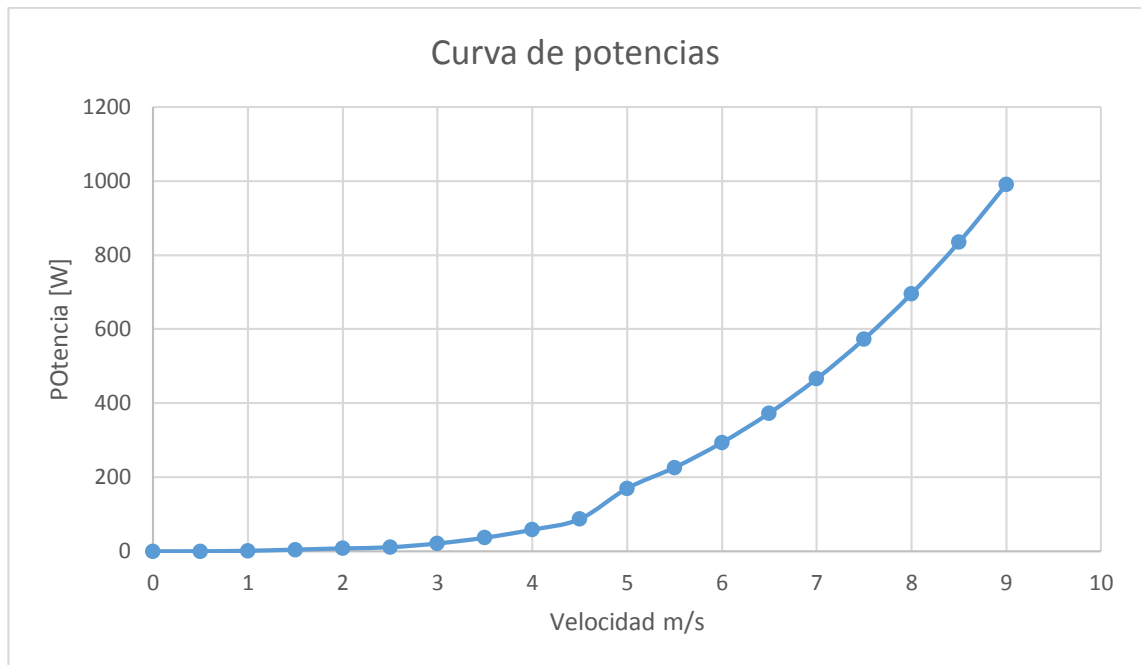


Fig. 4.4 Curva de potencias

En el fig. 4.4 se observa la curva de potencias con relación a diferentes velocidades de viento, observando que el ascenso de potencia sufre una mayor variación al alcanzar una velocidad de 4,5 m/s hacia adelante, de esta manera, un incremento pequeño en la velocidad cambiará sustancialmente la potencia de la Aerobomba.

Si se compara los datos de potencia de la tabla 4,2, veremos cómo influye el aumento de velocidad del viento en la potencia del mecanismo, tomando un incremento de 1 m/s entre velocidades de 4 y 5 m/s, con la expresión:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^3$$

Entonces

$$P_2 = P_1 * \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^3$$

$$P_2 = 1,95 P_1$$

Obteniendo como resultado de este cálculo que con un incremento de 1 m/s de velocidad, la potencia obtenida del aire aumenta un 95 %.

4.5 Volumen o cilindrada unitaria de la bomba

El recorrido que efectúa el émbolo entre el PMI y PMS (fig. 4.2), se denomina carrera, que al multiplicarlo por el área del pistón, determina el volumen de líquido que impulsa la bomba.

Esta bomba de desplazamiento positivo entrega una cantidad fija de fluido en cada revolución de la manivela, por lo cual la entrega de líquido no se ve afectada por los cambios de presión que esta debe desarrollar al momento de impulsar el líquido.

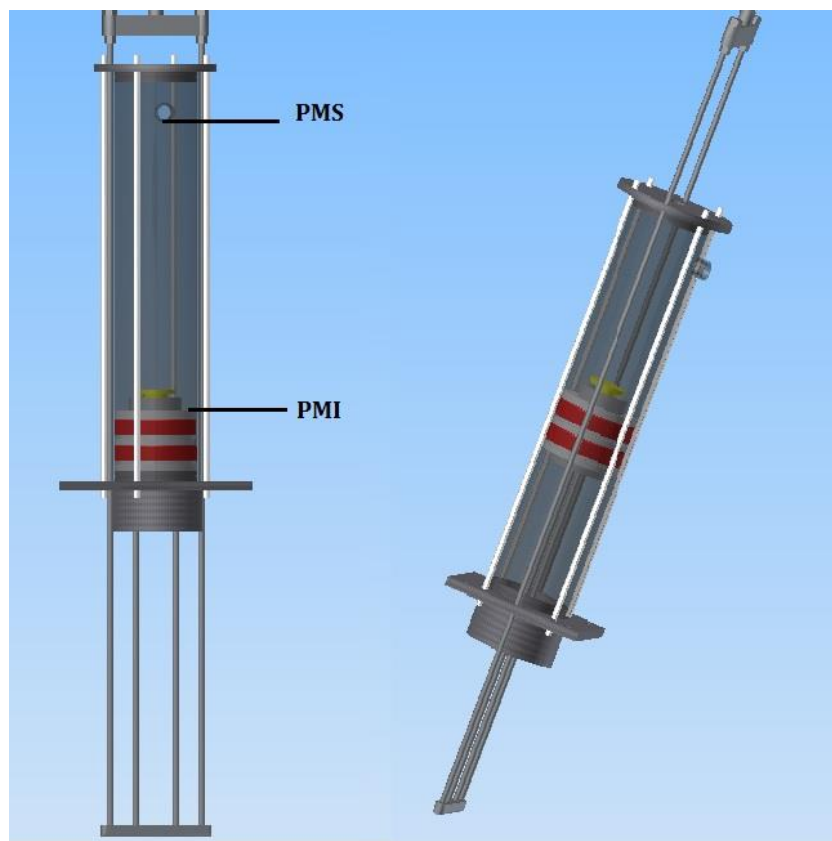


Fig. 4.5 Bomba de pistón

$$V = s * A \quad \text{Ec 4.2}$$

$$V = 0,32 \text{ m} * \frac{\pi * (0,10226 \text{ m})^2}{4} =$$

$$V = 0,00263 \text{ m}^3 = 2,63 \text{ Litros}$$

4.6 Velocidad de funcionamiento la bomba

Al contar con una caja reductora, la velocidad del viento captada por el rotor, no es la misma que sale del reductor, por lo tanto se adapta esta velocidad para el funcionamiento de la bomba, además de agregarle potencia y fuerza al mecanismo.

Velocidades de viento (m/s)	RPM del rotor	RPS de la manivela	Velocidades de desplazamiento del émbolo (m/s)
0	0,00	0,00	0,00
1	5,46	0,12	0,04
2	10,91	0,24	0,06
3	16,37	0,35	0,11
4	21,83	0,47	0,15
5	27,28	0,59	0,19
6	32,74	0,71	0,23
7	38,20	0,82	0,26
8	43,65	0,94	0,30

Tabla 4.3 Velocidades de la bomba

Utilizando las ecuaciones del Capítulo anterior. En la tabla 4.3 Se determina las diferentes velocidades de funcionamiento de la bomba, dependiendo de la velocidad de viento de la zona, considerando que el promedio de viento captado por el rotor es de 3 m/s, la velocidad de desplazamiento en este instante de la bomba será de 0,11 m/s.

4.7 Cálculo del funcionamiento del sistema de bombeo

La Aerobomba posterior a la reparación, mantenimiento y mejoras realizadas en el sistema, funciona de manera correcta, logrando satisfacer los objetivos planteados.

Se procede a calcular el funcionamiento teórico del equipo y analizar con las pruebas de campo realizadas al mismo.

Este cálculo se lo realiza con la velocidad de viento para el sistema de 3 m/s.

Características de la Aerobomba:

d_r = Diámetro del rotor = 3,5 m

H_t = Altura de la torre = 10 m

V = Velocidad del viento = 3 m/s

L_1 = Longitud de la tubería 1" de descarga = 1,6 m

Accesorios:

- 1 Válvulas check de 1"
- 2 Codos de 1"
- 1 Reducción de 1" a 3/4"
- 2 Conector de 3/4"

L_2 = Longitud tubería de 3/4" = 70 m

H_{est} = Altura estática = 20 m.c.a.

Caudal teórico

El caudal teórico de la bomba de simple efecto a una velocidad de viento de 3 m/s, se procede a calcular, mediante la ecuación.

$$Q = \eta * A_c * s * \omega \quad \text{Ec 4.3}$$

Donde

Q = Caudal de impulsión [m^3/s]

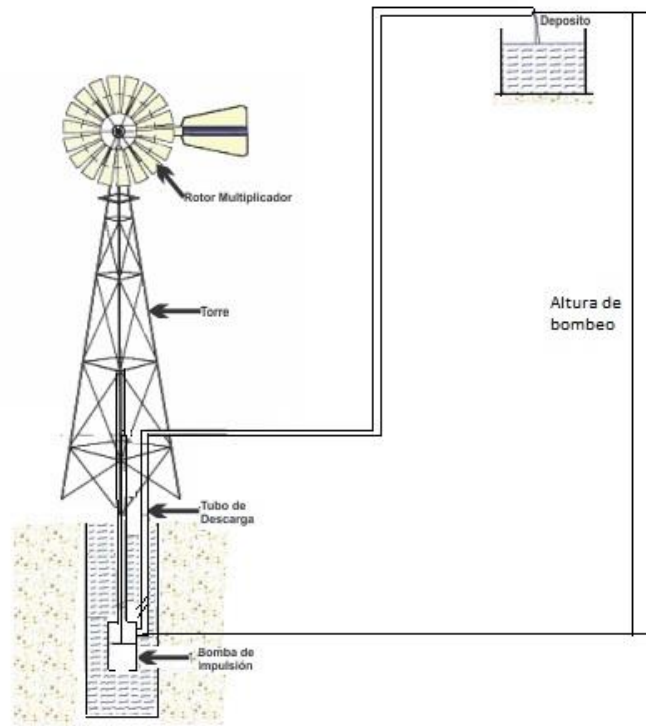
A_c = Área del cilindro = 0,008213 [m^2]

S = Carrera = 0,32 [m]

η = Rendimiento de la bomba (80 %)

ω = Número de revoluciones de la manivela [rps]

$$Q = 0,8 * 0,008213 * 0,32 * 0,35 = 0.000742 \text{ m}^3/\text{s}$$



Altura dinámica total o carga de bombeo

$$TDH = H_{est} + \sum hf \tag{Ec 4.4}$$

Donde

TDH = Altura dinámica total

H = Altura estática de bombeo = 20 m

$\sum hf$ = Perdidas en el sistema

Perdida de carga en tuberías a través de la fórmula de Hazem Williams:

$$hf = \frac{10,674 * L * Q^{1,852}}{C^{1,852} * D^{4,87}} \tag{Ec 4.5}$$

Donde

Hf = pérdidas de carga [m]

L = longitud de tubería [m]

Q = Caudal [m³/s]

D = Diámetro de tubería [m]

Velocidad del agua en la tubería de descarga

Tramo I

Con una tubería de impulsión de 1" de diámetro se obtiene:

$$V_1 = \frac{Q}{A_t} \quad \text{Ec 4.6}$$

$$V_1 = \frac{0,000742 \text{ m}^3/\text{s}}{3,81 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 1,95 \text{ m/s}$$

$$hf = 0,35 \text{ mca}$$

Tramo II

Con una tubería de descarga de 3/4" se obtiene:

$$V_2 = \frac{Q}{A_t} = \frac{0,000742 \text{ m}^3/\text{s}}{2,38 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 3,13 \text{ m/s}$$

$$hf = 55,32 \text{ mca}$$

Perdidas en accesorios hfa

Se recogen las pérdidas de carga en los accesorios con su coeficiente K propio y las tuberías a través de la expresión.

$$h_{fa} = K * \frac{v^2}{2 * g} \quad \text{Ec 4.7}$$

Accesorios	Coficiente K	hfa
1 válvulas check de 1"	1 x 0,85 = 0,85	0,31
2 codos 90° de 1"	2 X 0,7 = 1,4	0,52
1 reducción de 1" a 3/4"	1x 0,5 = 0,5	0,18
3 conector de 3/4	3 x 0,78 = 2,34	2,73
Total	5,09	3,74 m

$$TDH = 20 + 0,35 + 55,32 + 3,74 = 79,41 \text{ mca}$$

Con esto se deduce que para que el sistema funcione adecuadamente a la velocidad de 3 m/s se necesita que la bomba suministre un caudal de 0,745 l/s a una altura de 79,41 m.

4.8 Caudal y potencia útil de la bomba

Luego de obtener la altura media a la que funcionara el sistema, se procede a calcular la potencia y el caudal para las diferentes velocidades de viento.

$$P = Q * \rho_{H2O} * g * H \quad \text{Ec 4.8}$$

Donde:

P = Potencia útil [W]

ρ_{H2O} = Densidad del agua = 1000 [kg/m³]

Q = Caudal [m³/s]

H = Altura dinámica total = 79,41 [m]

Velocidades de viento (m/s)	Velocidad angular ω_2	Caudal Q (m ³ /s)	Caudal Q (l/s)	Potencia (W)	Potencia (HP)
0	0,000	0,000000	0,000	0,00	0,00
1	0,118	0,000247	0,248	193,38	0,26
2	0,200	0,000495	0,496	386,75	0,52
3	0,353	0,000742	0,745	580,13	0,78
4	0,470	0,000989	0,993	773,50	1,04
5	0,588	0,001236	1,241	966,88	1,30
6	0,706	0,001484	1,489	1160,25	1,56
7	0,823	0,001731	1,738	1353,63	1,82
8	0,941	0,001978	1,986	1547,01	2,08

Tabla 4.4 Caudal de salida de la bomba

En la tabla 4,4 se obtiene los diferentes caudales de salida de la bomba dependiendo la velocidad de desplazamiento del pistón, además de la potencia que genera la bomba.

4.9 Relación entre Potencia – Caudal - Altura

En este punto se representa la variación de la potencia necesaria para bombear agua a diferentes alturas.

Cabeza total [m]	10 m		20 m		40 m		80 m	
	Caudal [l/s]	Potencia [HP]	Caudal [l/s]	Potencia [HP]	Caudal [l/s]	Potencia [HP]	Caudal [l/s]	Potencia [HP]
1	0,248	0,03	0,248	0,07	0,248	0,13	0,248	0,26
2	0,571	0,07	0,571	0,13	0,571	0,26	0,571	0,52
3	0,745	0,10	0,745	0,20	0,745	0,39	0,745	0,78
4	0,993	0,13	0,993	0,26	0,993	0,52	0,993	1,05
5	1,241	0,16	1,241	0,33	1,241	0,65	1,241	1,31
6	1,489	0,20	1,489	0,39	1,489	0,78	1,489	1,57
7	1,738	0,23	1,738	0,46	1,738	0,92	1,738	1,83
8	1,986	0,26	1,986	0,52	1,986	1,05	1,986	2,09

Tabla 4,5 Relación Potencia – Caudal – Altura

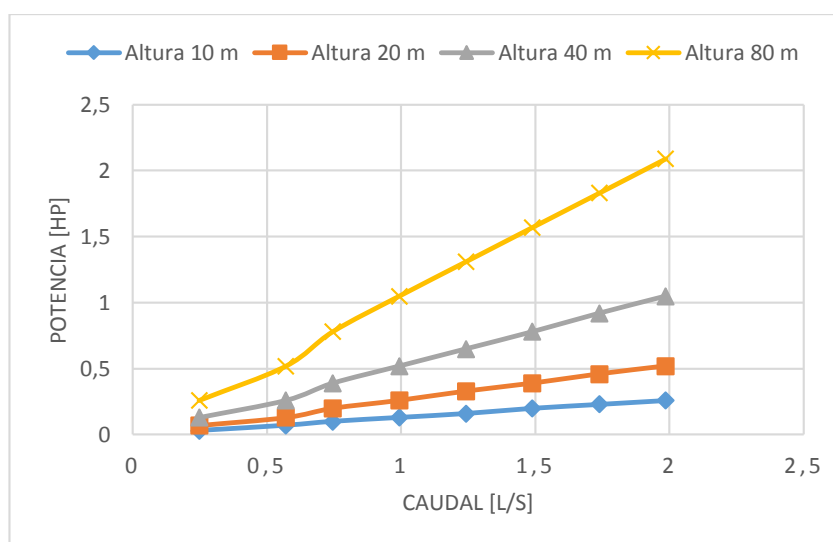


Fig. 4.6 Relación Potencia – Caudal – Altura

En la tabla 4,5 el caudal en l/s variará, de acuerdo a la velocidad de viento disponible en el momento, además si mantenemos el caudal constante para todas las alturas, se necesitara una mayor potencia para bombear dicho caudal.

4.10 Energía hidráulica

Debido a que se necesita llenar un reservorio de agua ubicado a 20 metros sobre la fuente de agua, es necesario conocer la cantidad de agua suministrada en un periodo de tiempo y la altura de bombeo incluido las pérdidas hidráulicas en el sistema. Mediante la siguiente ecuación se obtiene la demanda total de energía hidráulica en m^4 .

$$E_H = Q * H \quad [2] \quad \text{Ec 4.9}$$

Donde:

E_H = Energía hidráulica [m^4]

Q = Caudal de líquido requerido [$m^3/\text{día}$]

H = Altura [m]

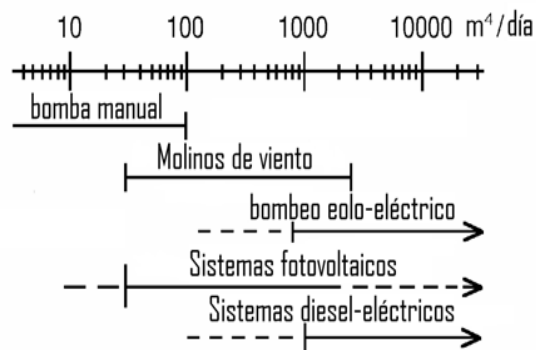


Fig. 4.2 Rangos de utilización viable de la energía eólica para bombeo de agua [2]

Tomando la velocidad de viento de 3 m/s, se tiene un caudal de 0,745 l/s, posteriormente se busca calcular un caudal de agua diario para llenar el tanque.

$$Q = 7,45 \times 10^{-4} \frac{m}{s} * \frac{86400 s}{dia} = 64,368 m^3 / dia$$

Debido a que las velocidades del viento no son constantes y existen varias horas de calma durante el día, se divide las horas del día para 6. Esto está basado con condiciones de viento que permitan a la Aerobomba funcionar el equivalente a 4 horas de capacidad por día. Naturalmente, esto varía según la localidad. [2]

Con esto obtenemos un caudal teórico más real que suministra la bomba en el día.

$$Q = 7,45 \times 10^{-4} \frac{m}{s} * \frac{14400 s}{dia} = 10,728 m^3 / dia$$

$$E_H = 10,728 m^3 / dia * 79,41 m = 851,91 m^4 / dia$$

4.11 Pruebas de funcionamiento

Con el equipo debidamente instalado y en operación se procede a tomar datos de funcionamiento a una altura de 20 m, a diferentes horas del día entre las 11 y 16 horas, estos datos se los obtuvo con la ayuda de un anemómetro, un cronómetro, y un tanque para recolectar agua.

Durante el periodo de 1 hora, se recolecta agua en un deposito con la finalidad de ver en qué tiempo es capaz la Aerobomba de llenar dicho tanque, mediante el anemómetro se toma datos de la velocidad de viento obteniendo velocidades máximas y medias en este espacio de tiempo, con la ayuda del cronómetro tomamos el tiempo en el que se realiza la prueba, obteniendo los siguientes resultados.

Periodo	Velocidad máxima m/s	Velocidad promedio m/s	Cantidad de agua [litros/h]	Cantidad de agua [m ³ /h]
1 hora	2,2	0,8	20	0,02
1 hora	2,3	0,9	24	0,024
1 hora	2,5	1	50	0,05
1 hora	2,5	1,1	56	0,056
1 hora	2,5	1,4	60	0,06
1 hora	2,7	1,2	66	0,066
1 hora	3	1,2	70	0,07
1 hora	3,4	1,4	90	0,09
1 hora	3,5	1,5	125	0,125
1 hora	3,1	1,7	150	0,15
1 hora	4,9	1,4	170	0,17
1 hora	4,3	1,7	220	0,22

Tabla 4.6 Volumen de agua obtenida en funcionamiento

En la tabla 4,6 se tiene un volumen promedio de agua que proporciona la bomba por hora, observando que mientras se tenga una velocidad de viento promedio mayor se puede obtener mayor cantidad de agua.

Considerando la tabla 4,6. En donde se tiene datos reales de funcionamiento, se procede a realizar un nuevo cálculo para comparar valores reales y teóricos de bombeo en periodos de una hora (como el viento no es constante, se divide los 3600 segundos entre 6), para el cálculo se toma los datos de velocidad de viento promedio de la tabla anterior entre 0,8 y 1,7 m/s, y se calcula por una parte los caudales teóricos mediante la ecuación 4.3, y se compara con los caudales medidos en funcionamiento, posteriormente mediante la ecuación 4.9 se calcula la energía hidráulica teórica y real.

Velocidad de viento [m/s]	Caudal Teórico [m³/h]	Caudal Real [m³/h]	TDH (m)	Energía hidráulica teórica [m⁴/h]	Energía hidráulica real [m⁴/h]
0,8	0,1192	0,02	23,90	2,848	0,478
0,9	0,1340	0,024	29,69	3,980	0,713
1	0,1489	0,05	30,97	4,613	1,549
1,1	0,1638	0,056	32,37	5,303	1,813
1,2	0,1787	0,06	33,88	6,055	2,033
1,3	0,1936	0,07	35,50	6,873	2,485
1,4	0,2085	0,09	37,23	7,762	3,350
1,5	0,2234	0,125	39,06	8,727	4,883
1,6	0,2383	0,15	41,01	9,773	6,151
1,7	0,2532	0,22	43,06	10,903	9,474

Tabla 4.7 Comparación caudal real-teórico

Al observar los datos obtenidos en la tabla 4.7, mientras más baja es la velocidad promedio, la diferencia entre el caudal real y el teórico es mayor, esto se debe a que el viento debe alcanzar cierta velocidad (1,8 m/s), para vencer la inercia del rotor y que el sistema empiece a funcionar y esa energía menor no es aprovechada en el bombeo, también se observa que mientras los valores de velocidad de viento son mayores la

diferencia entre el caudal teórico y el caudal real es menor, por lo que se aprovecha de mejor manera la energía del viento.

Estos valores de funcionamiento pueden cambiar debido a las variaciones de velocidades de viento y a los periodos de calma del mismo en los cuales el equipo se mantiene apagado.

CAPÍTULO V

Análisis técnico financiero

5.1 Introducción

El costo de mantenimiento del sistema es un punto muy importante a tratar, puesto que esto influye que tan factible es la inversión inicial a largo plazo, tomando en cuenta que al utilizar una energía renovable como el viento, cada uno de sus componentes van a tener un costo elevado en la construcción del sistema de bombeo puesto que sus elementos de construcción deben tener un grado de durabilidad a largo plazo.

Al implementar este sistema de energía renovable vamos a tener una inversión alta que con el paso del tiempo será recompensado comparado a otro sistema que funcione con algún tipo de combustible sea gasolina o diésel que va a generar un consumo continuo para que el sistema funcione, tomando en cuenta el daño ambiental que van a generar.

En este capítulo vamos analizar el costo de mantenimiento del sistema de Aerobomba, detallando cada una de las partes en la que realizamos la intervención y analizando que tan factible es implementar el sistema.

5.2 Costo de mantenimiento del sistema.

Al realizar la inspección total del sistema dividimos en algunos costos tomando en cuenta a que parte del sistema se va a dar el mantenimiento sea preventivo o correctivo:

- Costo del reductor de velocidad
- Costo del rotor, torre y sistema de orientación.
- Costo del sistema de bombeo

Lo dividimos en algunos grupos puesto que en algunos elementos se necesitó la reconstrucción total de los mismos.

5.2.1 Costo del reductor de velocidad.

En el diagnóstico general el reductor de velocidad tuvo un colapso en cada uno de los elementos, fue necesario la reconstrucción total de la mayoría de sus partes como detallaremos en el siguiente cuadro:

Descripción	Material [mm]	Cantidad	Precio unitario \$	Precio total \$
Eje principal	Acero ASSAB705 diámetro 80X700	1	150	150
Eje secundario	Acero ASSAB705 diámetro 45X450	1	35	35
Piñones pequeños	Fundición gris diámetro 150X100	2	120	240
Ruedas dentadas	Fundición gris diámetro 450X50	2	400	800
Guías del sistema manivela	Acero plata diámetro 25X600	2	50	100
Corredera	Acero SAE 1018 diámetro 150X60	1	20	20
Eje de la corredera	Acero ASSAB705 diámetro 32X450	1	25	25
Manivela	Tubo 3/4X600	2	85	170
Tapa de la carcasa	Plancha negra de 1200X1200X1	1	50	50
Rodamientos NTN 6205	-----	2	15	30
Rodamientos NTN 6304	-----	2	10	20
Freno	-----	1	25	25
Lubricante	-----	1	24	24
Chumacera NTN 11/4"	-----	2	20	40
Chumacera NTN 13/4"	-----	3	30	90

Tabla 5.1 Costo del reductor de velocidad

COSTO TOTAL-MATERIAL	1819
MANO DE OBRA	980
COSTO TOTAL DEL REDUCTOR	2799

5.2.2 Costo de desmontaje y montaje del sistema.

Al no tener las mismas características de desmontaje y montaje del sistema dividimos en dos partes:

- Desmontaje del sistema y traslado al área de mantenimiento
- Montaje del sistema en el lugar de emplazamiento.

5.2.2.1 Desmontaje del sistema y traslado al área de mantenimiento

Alquiler de andamios	\$ 85
Transporte	\$ 65
Mano de obra	\$ 150
TOTAL	\$ 300

Tabla 5.2 Costo de desmontaje

5.2.2.2 Montaje del sistema y traslado a la zona de emplazamiento

Alquiler de andamios	\$145
Transporte	\$65
Mano de obra	\$180
TOTAL	\$ 390

Tabla 5.3 Costo del montaje

5.2.3 Costo de mantenimiento del rotor, torre y sistema de orientación.

Luego de realizar una inspección general de cada uno de los elementos como el rotor, la torre y el sistema de orientación se observó que estos elementos necesitaban un mantenimiento preventivo puesto que no sufrieron daños en la estructura o en los cuerpos con lo que se procedió a pintar cada uno de los elementos para evitar que se forme la corrosión por el óxido que presentaba, a continuación damos a conocer el costo de los elementos que se utilizó para dar el mantenimiento.

Material	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Total
Desoxidante	1	galón	\$7,50	\$7,50
Removedor	1	galón	\$20	\$20
Pintura superior sintético blanco	2	galón	\$24	\$48
Pintura superior sintético roja	2	galón	\$25	\$50
Pintura superior sintético azul	1	galón	\$27	\$27
Pintura superior sintético amarillo	1	galón	\$24	\$24
Brochas	4	unidad	\$1.50	\$6
Lija # 5	6	unidad	\$0.80	\$4,80
Lija # 6	7	unidad	\$ 0,60	\$4,20
Cinta doble face	4	unidad	\$ 2.50	\$10
Pliego de cartulina	10	unidad	\$ 0,50	\$ 5
TOTAL				206,50

Tabla 5.4 Costo de mantenimiento del rotor, torre y sistema de orientación.

5.2.4 Costo del sistema de bombeo

Descripción	Materiales	Cantidad	Precio unitario \$	Precio total \$
Vástago	Acero inoxidable 304 1/2" x 3 mts.	3	12	48
Accionamiento	Acero inoxidable 304 1/4" x 3 mts.	1	6,60	6,60
Empaques	Grilón 4" x 70 cm.	1	63	63
Tubería de descarga	Tubo PVC 1"x 2 mts.	1	18,55	18,55
Manómetro 150 PSI		1	35	35
Codo 90°		1	3,20	3,20
Unión 3/4 in		4	1,50	6
Te		1	2,15	2,15
Manguera 3/4 x 80 mts.		1	55	55
Extras			28	28
TOTAL				298

TOTAL DE MATERIAL	298
MANO DE OBRA	100
TOTAL DEL SISTEMA DE BOMBEO	398

Tabla 5.5 Costo del sistema de bombeo

5.3 Costo total del mantenimiento

RUBRO	COSTO
COSTOS DE MANTENIMIENTO	
Costo del reductor de velocidad	\$ 2799
Desmontaje y Montaje	\$ 690
Costo de mantenimiento preventivo	\$ 206,5
Costo del sistema de bombeo	\$ 398
Costo total del sistema	\$ 4093,5

Tabla 5.6 Costo total de mantenimiento

Luego de realizar el cuadro de costo de mantenimiento y reparación de cada una de las partes en la que se intervino, podemos ver que se utilizó un valor total de **\$ 4093,50** que sirvió para solventar cada una de las partes afectadas con una garantía de vida útil del sistema de 15 a 20 años con un mantenimiento anual mínimo, por lo que el sistema es de fácil operación para los moradores del sector Paute-Chicán que podrán hacer uso de este sistema sin realizar algún gasto adicional sea este en combustible volátiles como gasolina o diésel.

5.4 Costo total de la Aerobomba con todos sus elementos.

Luego de realizar el mantenimiento general de cada una de las partes afectadas a continuación sacamos una tabla de los demás elementos de la Aerobomba, los cuales no fueron construidos, para ello vamos a estimar los costos de cada elemento para realizar una suma total e identificar el precio real de construcción en el mercado:

Lo dividimos en los siguientes elementos:

- Costo del rotor

- Torre
- Sistema de orientación

5.3.1 Costo del rotor

En la construcción del rotor tomamos en cuenta los siguientes elementos para la realización del mismo.

Designación	Material	Cantidad	Precio unitario \$	Precio total \$
Aspas	Plancha galvanizada de 1200X2400X1,5	2,5	76,46	191,15
Anillos de sujeción de aspas	Tubo estructural de 25X25X2	3	17,34	52,02
Nervios del rotor	Tubo estructural de 50X25X2	3	26,32	78,96
Acople rotor-reductor de velocidad	Plancha negra diámetro 300X15	1	49,87	49,87
Acoples rotor-aspas	Angulo L de 25X3	1	14,65	14,65
Sujetadores de las aspas	Platina de 32X3	3	11,23	33,69
Carcasa reductor	Plancha negra de 1200X1200X6	1	178,86	178,86

Precio total - Material	\$ 599,2
Mano de obra	\$ 380
Costo total - Rotor	\$ 979,2

Tabla 5.7 Costo del rotor

En la actualidad el valor real de construcción del rotor está en **\$ 979,2**

5.3.2 Costo de la torre.

Estimamos el costo de la torre con los siguientes materiales.

Designación	Material	Cantidad	Precio unitario \$	Precio total \$
Miembros principales módulo 1	Angulo L de 50X6	3	42,5	127,5
Miembros principales módulos 2-3	Angulo L de 50X4	6	27,45	164,7
Miembros principales módulos 4-5	Angulo L de 50X3	6	24,78	148,68
Miembros secundarios módulos 1,2,3,4 y 5	Angulo L de 25X3	16	11,34	181,44
Placas de sujeción torrezapatatas	Plancha negra de 300X300X12	4	16,3	65,2

Precio total – Material	\$ 687,52
Mano de obra	\$ 140
Costo total – Torre	\$ 827,52

Tabla 5.8 Costo de la torre

El precio de construcción de la torre es de **\$ 827,52**

5.3.3 Sistema de orientación.

Para la construcción del sistema necesitamos los siguientes elementos expuestos en la tabla 5.10

Designación	Material	Cantidad	Precio unitario \$	Precio total \$
Vástago de la veleta	Tubo estructural de 25X19X2	3	7,89	23,67
Veleta	Plancha negra de 1200X1700X1,2	1	33,87	33,87

Precio total – Material	\$ 57,54
Mano de obra	\$ 65
Costo total – Sistema de orientación	\$ 122,54

Tabla 5.9 Costo de sistema de orientación

5.4 Costo total del sistema de la Aerobomba

Costos Indirectos

Costos de Ingeniería.- Se refiere al costo del diseño, tomamos como referencia el 12% del costo total del sistema,

Imprevistos.- Consideramos un 5% del costo del sistema.

Costo total del sistema. Para esto se tiene en cuenta los costos directos e indirectos.

RUBRO	COSTO \$
COSTOS DIRECTOS	
Costo del reductor de velocidad	2799
Desmontaje y Montaje	690
Costo del rotor, torre y sistema de orientación	1929,26
Costo del sistema de bombeo	398
COSTOS INDIRECTOS	
Costos de Ingeniería	697,95
Imprevistos	290,81
Costo total del sistema	6805,02

Tabla 5.10 Costo de mantenimiento y reparación de la Aerobomba

Considerando los valores de toda la Aerobomba incluida las partes que no se construyó tenemos un costo de **\$ 6805,02**

CONCLUSIONES

Luego de realizar el mantenimiento correctivo y las mejoras al mecanismo, el equipo se encuentra en operación, cumpliendo la función para la que está determinado, además de garantizar la eficiencia y el buen funcionamiento de la Aerobomba emplazada en el sector de Chicán – Paute.

El sistema reductor de velocidad que se encontraba anteriormente instalado presento algunos problemas en su funcionamiento ya que el mecanismo no estaba compensado en el peso, por lo que al cambiar el diseño de la transmisión se consiguió compensar dicho peso logrando disminuir los esfuerzos y pérdidas y así el sistema funcione con más facilidad.

Con la reducción del diámetro del vástago se busca disminuir los esfuerzos de funcionamiento del reductor de velocidad, ya que el peso disminuye considerablemente, además de servir como un switch de seguridad en caso de fallo del sistema, buscando proteger a los elementos de intensidades de viento muy altas que pueden causar sobrecargas en la bomba, la transmisión y en el rotor.

La variación en el accionamiento del sistema de bombeo, nos proporciona un mayor rendimiento de la bomba, puesto que al eliminarse las fugas, se garantiza que la presión y el volumen de agua en el interior del cilindro no se pierdan, logrando alcanzar una mayor altura de bombeo.

La toma de información de las velocidades de viento en la zona de emplazamiento, es uno de los factores más importantes para el éxito o fracaso de las evaluaciones de funcionamiento realizadas en el sistema de bombeo, debido a que el recurso eólico tiene muchas variaciones tanto en dirección como en velocidad del viento.

Antes de realizar el emplazamiento de una Aerobomba, se debe considerar los obstáculos de los alrededores, ya que estos influyen en la dirección, velocidad y duración del viento en la zona, una forma de rebasar estos obstáculos será buscando un lugar lo suficientemente lejos de las obstrucciones o aumentando la altura de la torre un promedio de 4,5 m sobre los obstáculos, para que el rotor pueda aprovechar de mejor manera el recurso eólico.

Es importante considerar el diseño y la dimensión de los empaques realizando pruebas de estiramiento sometidas en el agua, puesto que de estos dependerá el trabajo neto de la bomba para que en el movimiento de trabajo estos no se tiendan a trabar en el cilindro de bombeo evitando el trabajo continuo de la bomba.

El volumen de agua que se obtiene de la Aerobomba, es muy variable debido a las velocidades de viento que existen en la zona, en días de cargas fuertes de viento se puede obtener un volumen de agua muy aproximado al teórico lo que demuestra su buen funcionamiento, pero en días en los que viento se encuentra en calma la cantidad de agua que se obtiene es muy baja comparado con el volumen de agua teórico, demostrando que este sistema necesita un estudio previo de las velocidades de viento en la zona de emplazamiento para garantizar un caudal elevado y su eficacia.

RECOMENDACIONES

El reservorio debe tener la cantidad de agua suficiente para suministrar a la Aerobomba, para que esta trabaje durante el mayor número de horas posibles y así compensar los periodos de calma.

Realizar una inspección visual periódica de elementos como la torre, el rotor, el vástago, con el fin de identificar elementos en mal estado, además de engrasar las partes móviles.

Se debe realizar el cambio de aceite de caja reductora una vez por año, el cual no debe ser mayor de ½ galón SAE 40, este debe ser realizado por personal calificado.

Los empaques de la bomba tienen una duración variable, estos deben ser reemplazados aproximadamente cada 2 años.

Pasado los 5 años se necesitara realizar un análisis completo del estado del equipo, especialmente de los elementos de transmisión, como rodamientos, engranajes, vástago, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Secretaría de Energía, “Energías Renovables - Energía Eólica”, 2008.
- [2] Ing. Carlo Enzo, “Características técnicas para la implementación de molinos de viento para bombeo de agua jober”, [Online], Disponible en: http://www.molinosjober.com/molinosjober_archivos/caracteristicas_tecnicas_para_la_implementacion_de_molinos_de_viento_para_bombeo_de_agua_jober.pdf
- [3] Fernando M. Sotelo. “Molinos de viento”, [Online], disponible en: <http://www.energiasargentinas.com.ar/hist%20eolica.htm>
- [4] “Mecanismos para el aprovechamiento eólico”, 2014, [Online], Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf2/mecanismos-aprovechamiento-eolico-maquinas/mecanismos-aprovechamiento-eolico-maquinas.pdf>
- [5] Unisolar, “Energía Eólica”, Dossier, 2014
- [6] Sunshine, “Aerogenerador”, Febrero 2010 [Online], Disponible en: <http://www.ison21.es/tag/aerogeneradores/>
- [7] EpSATA, “Aerobomba” Abril 2014, [Online], Disponible en: <http://www.actiweb.es/e-sata/>
- [8] Windmill, Abril 2014, [Online] Disponible en: http://0.tqn.com/d/vidaverde/1/0/R/1/-/-/Windmill_WikiC_PD.jpg
- [9] Gatti Ventilación, 2013, [Online], Disponible en: <http://www.sanfranciscodigital.com.ar/empresas/gatti-ventilacion/extractores-eolicos-eolicos-con-motor-10/>
- [10] Energética, U. d., “Guía para la utilización de la energía eólica para bombeo de agua”. UPME, Bogotá, Febrero 2003.
- [11] Mario Ortega Rodríguez, “Energías Renovables” Paraninfo, España 2001, pp.35-56
- [12] Merkasol, 2014, [Online], Disponible en: <http://www.merkasol.com/Torre-Aerogenerador-Autosustentada-cuatripata-P-1000>
- [13] Luis Chunchi, “Diseño construcción e implementación de un molino de bombeo eólico”, 2008, pp. 47.
- [14] Tecnología Hidráulica y Neumática Andina S.A.C., 2013, [Online], Disponible en: www.tecnologiahidraulica.com
- [15] Conrado Moreno Figueredo, “Energía Eólica”, Cubasolar, 2006
- [16] Water Pumping windmills, 2014, [Online], Disponible en: <http://www.ironmanwindmill.com/windmill-history.htm>

- [17] Rotor múltipala, 2012, [Online], Disponible en: <http://www.regsistem.com/molins.htm>
- [18] Construmatica, “Rotor eólico”, 2014, [Online], Disponible en: http://www.construmatica.com/construpedia/Rotor_E%C3%B3lico
- [19] Diana García, “Diseño de un Alabe de un rotor eólico aplicando el método de elemento finito”, 2008, [Online], Disponible en: <http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/563/1/TESIS-PDFgarciamtz.pdf>
- [20] Aermotor, “Diseño Papalotes Aermotor”, México, 2014, [Online], Disponible en: <http://www.aermotor.com.mx/papalotes/papalotes.php?info=1>
- [21] Pedro González, “Molino de viento camagüeyano CITA Steere”, 2010, [Online], Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia60/HTML/Articulo05.htm>
- [22] Alma de herrero, “Aermotor”, Enero 2012, [Online], Disponible en: <http://almadeherrero.blogspot.com/2012/01/aeromotor-aermotor.html>
- [23] P.L. Fraenkel, “Water lifting devices”, Natural resources managements and environment departamento UK, [Online], Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/010/ah810e/ah810e10.htm>
- [24] Carlos J Renedo, “Bombas hidráulicas” [Online], Disponible en: <http://personales.unican.es/renedoc/Trasparencias%20WEB/Trasp%20Sist%20Ener/02%20BOMBAS.pdf>
- [25] Miguel Villarubia López, “Aerogeneradores de eje vertical y Aerobombas”, in Ingeniería de la Energía Eólica, 1ra ed., 2012
- [26] Antonio Valiente Barderas, “Problemas de flujo de fluidos”, segunda edición, 2002.
- [27] Díez, p. f. (s.f.). “Energía eólica”, Departamento de ingeniería eléctrica y energética, Universidad de Cantabria, 2002.
- [28] Robbert L,Mott, “Diseño de elementos de máquinas”, cuarta edición, 2004.
- [29] Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett “*Diseño en ingeniería mecánica de Shingley*” Octava edición, 2008
- [30] “Teorema de los tres momentos” [Online], Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Teorema_de_los_tres_momentos
- [31] Víctor L. Streeter. “Mecánica de fluidos”, novena edición, 2000.
- [32] Ministerio de electricidad y energía renovable, “*Atlas eólico del Ecuador*”