

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**DISEÑO DE UN MOLINO DE VIENTO  
PARA EXTRACCIÓN DE AGUA**

**Proyecto técnico**

**Joaquin Galarza Seidlitz**

**Ingeniería Mecánica**

Trabajo de Titulación presentado como requisito  
para la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Quito, 17 de mayo de 2016

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ  
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**DISEÑO DE UN MOLINO DE VIENTO  
PARA EXTRACCIÓN DE AGUA**

**Joaquin Galarza Seidlitz**

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Patricio Chiriboga, P.h.D.

Firma del profesor

---

Quito, 17 de mayo de 2016

## **Derechos de Autor**

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: \_\_\_\_\_

Nombres y apellidos: Joaquin Galarza Seidlitz

Código: 00102754

Cédula de Identidad: 0801804683

Lugar y fecha: Quito, 17 de mayo de 2016

## **RESUMEN**

Este trabajo de titulación tiene el objetivo de realizar el diseño de un molino de viento aplicado en la extracción de agua para la zona de la costa ecuatoriana. El objetivo principal es proveer con acceso de agua dulce a las comunidades campesinas utilizando energía renovable y fomentar así la agricultura, ganadería y auto sustentación. El molino se diseña utilizando materiales que se puedan obtener en el mercado local intentando reducir al máximo su costo. Además, se simplifica a sus componentes más básicos para que la construcción sea lo más sencilla posible. Finalmente se realiza un manual de construcción que detalla todas las dimensiones y cantidades de los componentes requeridos para el ensamble del sistema. El manual de construcción incluye instrucciones muy fáciles de entender que detallan todos los pasos a seguir para que el ensamble y la instalación resulten lo más simple posible.

## **ABSTRACT**

This final degree obtaining project objective is to design a windmill for the extraction of fresh water in the coast of Ecuador. The main objective is to provide the rural communities of the area with access to fresh water using renewable energy to promote agriculture, animal farming and self-sustainability. The windmill is designed to use materials available in the local market to achieve the lowest cost as possible. Another objective, is to simplify the design to its basic components to make the construction easy enough for any person to able to build. In addition a construction manual is created that details the dimensions and quantity of all the components that are used in the windmill, so that any person can obtain them and build the windmill. The manual includes very simple instructions that explain every single step to follow for the assembly and installation of the water extraction windmill.

## TABLA DE CONTENIDO

Resumen .....	3
Abstract.....	4
Abreviaturas y simbología.....	10
Introducción:.....	12
Capítulo 1: Marco teórico.....	13
1.1. Definiciones.....	13
1.2. Parámetros característicos de molinos.....	14
1.3 Tipos de molinos .....	15
1.5. Comparación de parámetros característicos para los distintos tipos .....	16
Capítulo 2: Diseño del molino de viento y la bomba .....	18
2.1 Evaluación de recursos eólicos.....	18
2.2 Parámetros energéticos .....	21
2.3 Selección de los componentes del molino .....	25
2.3.1 Selección del tipo de molino. ....	25
2.3.2 Selección del material del eje. ....	26
2.3.3 Selección del tipo de torre y material. ....	26
2.3.4 Selección estructura móvil. ....	27
2.3.5 Selección del tipo de bomba. ....	28
2.3.6 Selección del sistema de accionamiento de la bomba. ....	29
2.4 Diseño de los componentes del molino .....	30
2.4.1 Diámetro del rotor. ....	30
2.4.2 Diseño del eje. ....	31
2.4.3 Selección de rodamientos. ....	36
2.4.4 Diseño de la torre.....	38
2.4.5 Diseño de las aspas del rotor. ....	43
2.4.6 Diseño de la bomba. ....	45
2.4.7 Determinación de la velocidad mínimo de funcionamiento. ....	45
2.4.8 Diseño del sistema biela manivela.....	47
Capítulo 3: Manual de construcción.....	50
3.1 La torre .....	50
3.2 Estructura móvil .....	58
3.3 El rotor.....	66
3.4 Sistema biela manivela .....	74
3.5 La bomba .....	80
3.6 Ensamble final .....	85
Capítulo 4 .....	94

4.1 Análisis de costos .....	94
4.2 Conclusiones.....	95
4.3 Recomendaciones .....	96
Bibliografía.....	97

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Tabla de clases y longitudes de rugosidad .....	20
Tabla 2.2: Requerimiento de agua para riego de alimentos .....	21
Tabla 2.3: Valores del coeficiente de pérdida, las velocidades y las pérdidas totales por componentes. ....	24
Tabla 2.4: Propiedades Mecánicas del acero AISI 1018 .....	26
Tabla 2.5: Propiedades mecánicas de la caña guadua .....	26
Tabla 2.6: Factores equivalentes para carga radial para rodamientos de bola .....	37
Tabla 2.7: Parámetros para selección de rodamientos.....	38
Tabla 2.8: resultados de las iteraciones para determinar el rodamiento .....	38
Tabla 2.9: Resumen de las fuerzas que actúan sobre la estructura.....	39
Tabla 2.10: Resultados de la simulación .....	40
Tabla 2.11: Calculo de factor de seguridad para diferentes tuberías.....	44
Tabla 4.1: Análisis de costos del sistema .....	94

## ÍNDICE DE FIGURAS .....

Figura 1.1: Tipos de molino de EH de izquierda a derecha: monopala, bipala, tripala, cretense y multipala americano. ....	15
Figura 1.2: Tipos de molinos de eje vertical tipo Savonius (izq.) y Darrieus (der.) .....	16
Figura 1.3: $C_p$ y $C_t$ en función de $\lambda$ para diferentes tipos de molinos.....	17
Figura 2.1: Velocidad del viento a una altura de 30 [m] .....	19
Figura 2.2: Diagrama del sistema de bomba .....	22
Figura 2.3: Componentes básicos de un molino de extracción de agua.....	25
Figura 2.4: Tipo de torre para el molino.....	27
Figura 2.5: Esquema de estructura móvil propuesta por Van de Ven .....	28
Figura 2.6: Funcionamiento en 4 tiempos de la bomba.....	29
Figura 2.7: Sistema biela manivela para una bomba de pistón. ....	30
Figura 2.8: Acción del momento sobre el eje.....	32

Figura 2.9: Diagrama de fuerzas del eje .....	33
Figura 2.10: (1) diagrama de fuerzas, (2) diagrama de fuerza cortante, (3) diagrama de momento flector y (4) diagrama de momento de torque. ....	34
Figura 2.11: Diagrama en 3D de las fuerzas que actúan sobre el eje .....	36
Figura 2.12: Aplicación de las fuerzas en el modelo.....	39
Figura 2.13: Esfuerzo de Von Mises .....	40
Figura 2.14: Desplazamiento de la estructura .....	41
Figura 2.15: Simplificación de la estructura para análisis de fatiga.....	42
Figura 2.16: Diagrama del efecto de la fuerza en las aspas y diagrama de fuerzas .....	44
Figura 2.17: Esquema de la bomba .....	45
Figura 2.18: Fuerzas que actúan sobre la manivela.....	46
Figura 2.19: Sistema biela manivela y el elemento crítico de la misma .....	48
Figura 3.1: Ensamble total del molino de extracción de agua.....	50
Figura 3.2: Componentes de la torre .....	51
Figura 3.3: Dimensiones vigas principales.....	52
Figura 3.4: Dimensiones superior principal (arriba) y superior secundario (abajo).....	52
Figura 3.5: Dimensiones inferior principal (arriba) e inferior secundario (abajo) .....	53
Figura 3.6 Dimensiones de la tapa con el rodamiento.....	53
Figura 3.7: Paso 1 de construcción de la torre.....	54
Figura 3.8 Detalle del corte para la viga superior principal .....	54
Figura 3.9: Paso 2 de construcción unión de superior e inferior principales con vigas principales.....	55
Figura 3.10: Detalle de la unión de las vigas con los pernos .....	55
Figura 3.11: Detalle de corte para secundarias superior e inferior.....	56
Figura 3.12: Paso 3 unir las dos mitades de la torre.....	57
Figura 3.13: Paso 4 unir tapa metálica con torre ensamblada .....	57
Figura 3.14: Estructura móvil y sujetadores que se va a utilizar .....	58
Figura 3.15: Partes EM1 (izq.) y EM2 (der.) y sus dimensiones .....	59
Figura 3.16: Parte EM3 y sus dimensiones .....	59
Figura 3.17: Parte EM4 y sus dimensiones .....	60
Figura: 3.18 Partes EM5 y EM6 (mismas dimensiones).....	60
Figura 3.19: Parte EM7 y sus dimensiones .....	60
Figura 3.20: Parte EM8 y sus dimensiones .....	61
Figura 3.21: Parte EM9 y sus dimensiones .....	61
Figura 3.22: Dimensiones de la vela direccionadora.....	61



Figura 3.23 Eje principal con rodamientos.....	62
Figura 3.24: Paso 1 de la construcción de la EM .....	62
Figura 3.25: Paso 2 de la construcción de la EM .....	63
Figura 3.26: Paso 3 de la construcción de la EM .....	63
Figura 3.27: Paso 4 de la construcción de la EM .....	64
Figura 3.28: Paso 5 de la construcción de la estructura móvil .....	64
Figura 3.29: Paso 6 de la construcción de la EM .....	65
Figura 3.30: 7 de la construcción de la EM.....	65
Figura 3.31: Rotor y los pernos que se van a utilizar .....	66
Figura 3.32: Dimensiones de las velas principales (izq.) y las arrancadoras (der.).....	67
Figura 3.33: Dimensiones de los tubos de las aspas.....	68
Figura 3.34: Descripción de los distintos tubos de las aspas.....	68
Figura 3.35: Cubo del rotor .....	69
Figura 3.36: Dimensiones de la parte Cubo1 .....	69
Figura 3.37: Dimensiones de la parte Cubo 2 .....	70
Figura 3.38: Dimensiones de la parte Cubo3 .....	70
Figura 3.39: Paso 1 de la construcción del rotor .....	70
Figura 3.40: Paso 2 de la construcción del rotor .....	71
Figura 3.41: Paso 2 de la construcción del rotor .....	71
Figura 3.42: Paso 3 de la construcción del rotor .....	72
Figura 3.43: Paso 4 de la construcción del rotor .....	72
Figura 3.44: Paso 5 de la construcción del rotor. ....	73
Figura 3.45: Detalle de la sujeción de las velas en los tubos.....	73
Figura 3.46: Paso 6 de la construcción del rotor .....	74
Figura 3.47: Paso 7 de la construcción del rotor .....	74
Figura 3.48: Sistema biela manivela y pernos que se van a utilizar.....	75
Figura 3.49: Dimensiones manivela .....	76
Figura 3.50: Dimensiones unión manivela y eje conector.....	76
Figura 3.51: Dimensiones eje conector .....	76
Figura 3.52: Dimensiones soporte eje conector.....	76
Figura 3.53: Dimensiones de Biela1 (izq.) y Biela2 (der.).....	77
Figura 3.54: Paso 1 de la construcción del sistema biela manivela.....	77
Figura 3.55: Paso 2 de la construcción del sistema biela manivela.....	78
Figura 3.56: Paso 3 de la construcción del sistema biela manivela.....	78
Figura 3.57: Paso 4 de la construcción del sistema biela manivela.....	79

Figura 3.58: Paso 5 de la construcción del sistema biela manivela.....	79
Figura 3.59: Paso 6 de la construcción del sistema biela manivela.....	79
Figura 3.60: La bomba y el pistón.....	80
Figura 3.61: Dimensiones de la cabeza del pistón y los componentes de.....	81
Figura 3.62: Dimensiones de la bomba .....	81
Figura 3.63: Componentes del pistón.....	82
Figura 3.64: Primer paso de construcción del pistón.....	82
Figura 3.65: Segundo paso de construcción del pistón .....	83
Figura 3.66: Primer paso de construcción de la bomba.....	83
Figura 3.67: Segundo paso de la construcción de la bomba.....	83
Figura 3.68: Tercer paso de la construcción de la bomba .....	84
Figura 3.69: Cuarto paso de la construcción de la bomba.....	84
Figura 3.70: Quinto paso de la construcción de la bomba.....	85
Figura 3.71: Sexto paso de la construcción de la bomba.....	85
Figura 3.72: Procedimiento de levantamiento de la torre (Van de Ven, 1977).....	86
Figura 3.73: Descripción de la instalación del tubo .....	87
Figura 3.74: Estructura móvil sobre la torre.....	88
Figura 3.75: Detalle de posición de tornillos para unión de estructura móvil y torre ....	88
Figura 3.76: Detalle de la posición del perno 3(x5 ½[in].....	88
Figura 3.77: Rotor y estructura móvil instaladas sobre la torre .....	89
Figura 3.78: Detalle de los huecos superiores del eje conector.....	90
Figura 3.79: Unión de manivela con eje principal.....	90
Figura 3.80: Detalle del eje conector unido a la biela .....	91
Figura 3.81: Detalle de los huecos en las velas y en los tubos .....	92
Figura 3.82: Instrucciones para hacer un nudo 8.....	92

## ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA

$E_c$	Energía cinética de una masa en movimiento. [ J ]
$m$	Masa de un volumen de aire dado. [ Kg ]
$V$	Velocidad instantánea del viento. [ m/s ]
$P$	Potencia teóricamente recuperable. [ W ]
$\rho$	Densidad. [ Kg/m <sup>3</sup> ]
$S$	Superficie aparente. [ m <sup>2</sup> ]
$R$	Radio del rotor. [ m ]
$F$	Fuerza. [ N ]
$\eta$	Eficiencia. [ - ]
$F_a$	Fuerza de arrastre. [ N ]
$w$	Velocidad de rotación. [ rad/s ]
$T$	Torque. [ N·m ]
$\lambda$	Velocidad típica. [ - ]
$c_p$	Rendimiento aerodinámico. [ - ]
$P_R$	Potencia mecánica a la salida del rotor. [ W ]
$C_T$	Coefficiente de torque. [ - ]
$P_{ef}$	Potencia efectiva. [ W ]
$\eta_T$	Eficiencia total. [ - ]
$\eta_{tr}$	Eficiencia de la transmisión. [ - ]
$\eta_b$	Eficiencia de la bomba. [ - ]
$z_0$	Longitud de rugosidad. [ m ]
$Q$	Caudal. [ m <sup>3</sup> /s ]
$D$	Diámetro del rotor. [ m ]
$\rho_a$	Densidad del agua. [ Kg/m <sup>3</sup> ]
$l_f$	Pérdidas por fricción. [ m ]
$l_m$	Pérdidas por componentes. [ m ]
$L$	Longitud de tubería [m].
$d$	Diámetro tubería. [ m ]
$v$	Velocidad del fluido. [ m/s ]
$K$	Coefficiente de pérdida de componente. [ - ]
$Re$	Número de Reynolds. [ - ]
$\mu$	Viscosidad dinámica. [ Kg/m·s ]
$f$	Factor de fricción. [ - ]

$h_{net}$	Altura neta de elevación. [ m ]
$P_{out}$	Potencia de salida. [ W ]
$g$	Gravedad. [ m/s <sup>2</sup> ]
$Q$	Caudal. [ Kg/m <sup>3</sup> ]
$S_e$	Límite de fatiga. [ MPa ]
$M_a$	Momento máximo. [ Nm ]
$M_m$	Momento medio. [ Nm ]
$T_a$	Torque máximo. [ Nm ]
$T_m$	Torque medio. [ Nm ]
$c_d$	Coefficiente de geometría de la vela. [ - ]
$F_e$	Fuerza equivalente. [ N ]
$S_y$	Esfuerzo de fluencia. [ MPa ]
$S_u$	Esfuerzo último. [ MPa ]
$I$	Momento de inercia. [ m <sup>4</sup> ]
$A_c$	Superficie del cilindro. [ m <sup>2</sup> ]
$a$	Longitud de la manivela. [ m ]

## INTRODUCCIÓN:

La energía eólica es la energía que se puede obtener a partir de la transformación de la energía cinética de las corrientes de aire en otras fuentes útiles de energía, como son la energía eléctrica o la energía mecánica. En la actualidad se utiliza principalmente para la generación de energía eléctrica mediante aerogeneradores en parques eólicos. Los primeros molinos de viento fueron utilizados para moler granos y para la extracción de agua (Saliba, G. 1988). Esta segunda aplicación es la que se planea explotar en este trabajo de titulación. Los molinos de bombeo fueron desarrollados en Estados Unidos y permitieron la explotación agrícola y ganadera en zonas donde la obtención de agua dulce resultaba complicada.

Actualmente en la costa ecuatoriana se cuenta con múltiples fuentes de agua dulces como son ríos o pozos subterráneos, sin embargo la extracción del agua hacia los lugares donde se requiere la utilización de la misma resultan complicados. Se puede hacer mediante canales de riego, la utilización de bombas de agua o hasta métodos más precarios como la extracción con baldes de los pozos.

La solución que se propone a este problema en este trabajo de titulación es el aprovechamiento de la energía eólica disponible mediante un molino de viento para la extracción de agua. Se propone realizar un diseño de bajo costo con un sistema simplificado que permita la instalación con conocimientos básicos de construcción. Además del diseño se va a realizar un manual de construcción del mismo molino para su instalación sin necesitar de un especialista en energía eólica.

Esta solución tiene la intención de proveer agua dulce asequible en lugares como la costa para fomentar la agricultura o brindar un acceso simplificado en lugares donde la obtención de la misma sea complejo. A la vez también se presenta como una solución ecológica para utilizar energía renovable en lugar de consumir combustibles fósiles para la obtención de agua.

En el primer capítulo se habla del marco teórico, es decir toda los conceptos teóricos que rodean a los molinos de vientos, que se deben utilizar para la aplicación de extracción de agua. En la segunda sección se realiza la selección y diseño de los componentes del sistema de extracción de agua. El tercer capítulo es un manual de construcción que explica todos los pasos a seguir para el ensamble del molino. Finalmente, en el cuarto capítulo se presenta el costo de construcción del molino y las conclusiones y recomendaciones.

# CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

En el capítulo 1 se van a revisar los fundamentos teóricos que se aplican en la energía eólica y algunos principios de la aerodinámica. Dentro de esta sección se va a encontrar las ecuaciones que ayudan a definir el proyecto y la teoría más básica de lo que se va a aplicar.

## 1.1. Definiciones

Energía Cinética:

La energía que se utiliza en los molinos de vientos es la energía cinética que se encuentra en las corrientes de aire, esta se transforma en energía mecánica. La energía cinética se define como:

$$Ec = \frac{1}{2}mV^2 \quad (1.1)$$

donde  $Ec$  es la energía cinética [J],  $m$  es la masa de un volumen de viento [Kg] y  $V$  es la velocidad instantánea del viento [m/s].

Potencia:

Cuando se quiere obtener la potencia teórica que se puede extraer con un sistema que aprovecha la energía cinética se asume que el viento que atraviesa una superficie  $S$  es constante por lo que la potencia se puede definir como:

$$P = \frac{1}{2}\rho SV^3 \quad (1.2)$$

donde  $P$  es la potencia [W],  $\rho$  es la densidad del aire [Kg/m<sup>3</sup>],  $S$  es la superficie aparente [m<sup>2</sup>] y  $V$  es la velocidad instantánea del viento [m/s].

La superficie aparente  $S$  se define como:

$$S = \pi R^2 \quad (1.3)$$

donde  $S$  es la superficie aparente [m<sup>2</sup>] y  $R$  es el radio del rotor [m].

Sin embargo, debido a que el viento se frena al pasar por el rotor no se puede aprovechar toda la potencia del viento y el límite de Betz demuestra que se puede aprovechar el 59,26% como máximo de la potencia de la energía cinética. Por lo que la potencia que se puede aprovechar se define como (Galarza, 1987):

$$P = \frac{16}{27} \left( \frac{1}{2} \rho SV^3 \right) \quad (1.4)$$

donde  $P$  es la potencia [W],  $\rho$  es la densidad del aire [Kg/m<sup>3</sup>],  $S$  es la superficie aparente [m<sup>2</sup>] y  $V$  es la velocidad instantánea del viento [m/s].

## 1.2. Parámetros característicos de molinos

Rendimiento Aerodinámico  $C_p$ :

El rendimiento aerodinámico  $C_p$  se asocia con la eficiencia de la turbina de viento y nos sirve para comparar los diferentes tipos de turbinas que existen sin tomar en cuenta los factores dimensionales de cada una. El coeficiente de rendimiento aerodinámico expresa la porción de energía contenida en el viento que se puede convertir en energía mecánica. Este parámetro se calcula con la ecuación (1.5) (Gleick P.).

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho S V^3} \quad (1.5)$$

donde  $C_p$  es el rendimiento aerodinámico,  $P$  es la potencia [W],  $\rho$  es la densidad del aire [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ],  $S$  es la superficie del rotor [ $\text{m}^2$ ] y  $V$  es la velocidad instantánea del viento [m/s] (Fraenkel, 1986).

Coeficiente de Torque  $C_t$ :

El coeficiente de torque relaciona el torque en el rotor y un torque de referencia que esta en función de la presión dinámica, la superficie del rotor y el radio del rotor.

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho S r V^2} \quad (1.6)$$

donde  $C_t$  es el coeficiente de Torque,  $T$  es el torque generado en el rotor [ $\text{N}\cdot\text{m}$ ],  $\rho$  es la densidad del aire [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ],  $S$  es la superficie del rotor [ $\text{m}^2$ ],  $r$  es el radio del rotor [m] y  $V$  es la velocidad instantánea del viento [m/s] (Fraenkel, 1986).

Relación entre  $C_t$  y  $C_p$ :

El coeficientes de torque y el rendimiento aerodinámico se pueden relacionar entre si utilizando la velocidad típica, con la ecuación (1.7).

$$C_p = C_t \lambda \quad (1.7)$$

donde  $C_p$  es rendimiento aerodinámico,  $C_t$  es el coeficiente de torque y  $\lambda$  es la velocidad típica.

Velocidad Típica  $\lambda$ :

La velocidad típica relaciona la velocidad de rotación del molino con la velocidad del viento. Esta se calcula con la ecuación (1.8).

$$\lambda = \frac{\omega r}{V} \quad (1.8)$$

donde  $\lambda$  es la velocidad típica,  $\omega$  es la velocidad de rotación [rad/s],  $r$  es el radio del rotor [m] y  $V$  es la velocidad instantánea del viento [m/s] (Fraenkel, 1986).

Potencia Efectiva  $P_{ef}$ :

La potencia efectiva es la potencia que se puede obtener finalmente del sistema tomando en cuenta las pérdidas y las eficiencias. Esta se obtiene con la ecuación (1.9)(Galarza, 1987).

$$P_{ef} = \eta_t \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (1.9)$$

donde  $P_{ef}$  es la potencia efectiva [W],  $\eta_t$  es la eficiencia total,  $\rho$  es la densidad del aire [Kg/m<sup>3</sup>],  $S$  es la superficie del rotor [m<sup>2</sup>] y  $V$  es la velocidad instantánea del viento

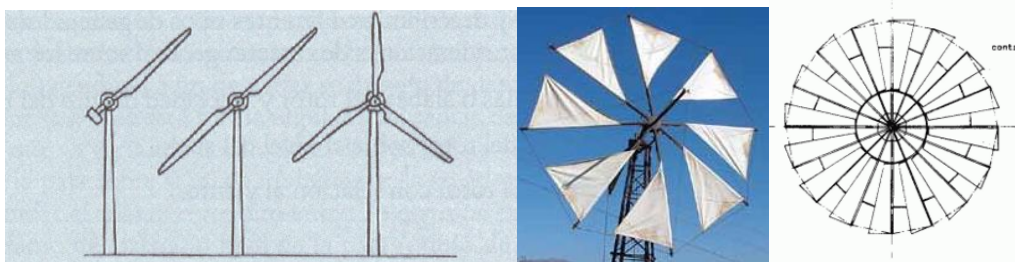
La eficiencia total  $\eta_t$  se obtiene tomando en cuenta la eficiencia de la bomba, la eficiencia de transmisión y el rendimiento aerodinámico. Se calcula con la ecuación (1.10).

$$\eta_t = \eta_b \cdot \eta_{tr} \cdot C_p \quad (1.10)$$

donde  $\eta_t$  es la eficiencia total,  $\eta_b$  es la eficiencia de la bomba,  $\eta_{tr}$  es la eficiencia de transmisión y  $C_p$  es el rendimiento aerodinámico.

### 1.3 Tipos de molinos

Los molinos de viento se dividen en dos subtipos los de eje vertical (EV) y los de eje horizontal (EH). Dentro de los principales molinos de eje horizontal se encuentran los monopala, bipala y los tripala. En la [figura 1.1](#) se presentan los diferentes tipos de molinos de EH (Giordano, 2015). Generalmente estos molinos de eje horizontal son utilizados para producción de energía eléctrica debido a su alta eficiencia y velocidad típica. Los multipala americanos y los molinos cretenses son utilizados para extracción de agua debido a su alto coeficiente de torque con una baja velocidad típica.



**FIGURA 1.1: TIPOS DE MOLINO DE EH DE IZQUIERDA A DERECHA: MONOPALA, BIPALA, TRIPALA, CRETENSE Y MULTIPALA AMERICANO.**

Los molinos de eje vertical se dividen en dos tipos: los Darrius y los Savonius. Este tipo de molino tiene la ventaja de no necesitar ser direccionado hacia el sentido del viento como los molinos de eje horizontal. Sin embargo, son más susceptibles a la fatiga. En la [figura 1.2](#) (Quaschnig, 2009) se presentan los diferentes tipos de molinos de EV.



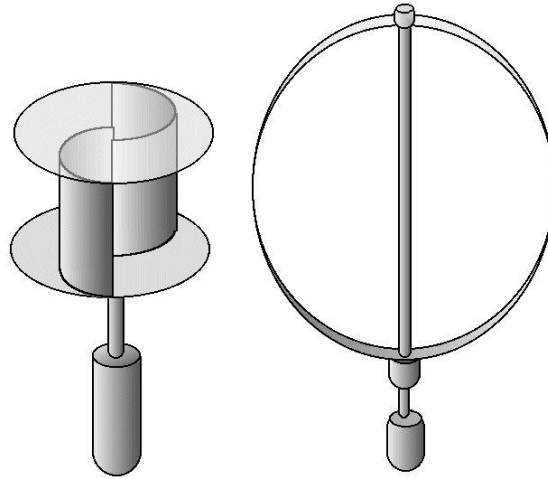


FIGURA 1.2: TIPOS DE MOLINOS DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS (IZQ.) Y DARRIEUS (DER.)

### 1.5. Comparación de parámetros característicos para los distintos tipos

Los parámetros  $C_p$  y  $C_t$  nos ayudan a definir cuál es la aplicación más adecuada para cada tipo de molino. Como se dijo anteriormente para producción de energía eléctrica se requiere altas eficiencias con altas velocidades típicas, mientras que para extracción de agua se necesita un coeficiente de torque mayor y una velocidad típica inferior. En la extracción de agua lo fundamental es la generación de un torque mayor mas no un molino eficiente, ya que se pierde más de lo que se beneficia aumentando la eficiencia y no se logra una diferencia muy grande.

En la figura 1.3 se presentan gráficos de los parámetros  $C_p$  y  $C_t$  en función de la velocidad típica para los distintos tipos de molinos (Fraenkel, 1986). En estas gráficas se van a comparar los parámetros característicos  $C_p$  y  $C_t$  para los molinos Savonius (A), Multipala americano (B), Cretense (C), de cuatro palas metálicas (D), Tripala ( $E_1$ ), Darrieus ( $E_2$ ) y Bipala (F).

En la gráfica del coeficiente de torque se puede ver que el coeficiente de torque es mucho mayor para el multipala americano lo que le hace ideal para la extracción de agua. El resto de molinos tienen coeficientes de torque relativamente bajos.

Al contrario en el diagrama del rendimiento aerodinámico el multipala solo tiene buen rendimiento con velocidades típicas muy bajas. Los bipala y tripala tienen rendimientos aerodinámicos bastante altos cuando se trabaja con velocidades típicas elevadas.

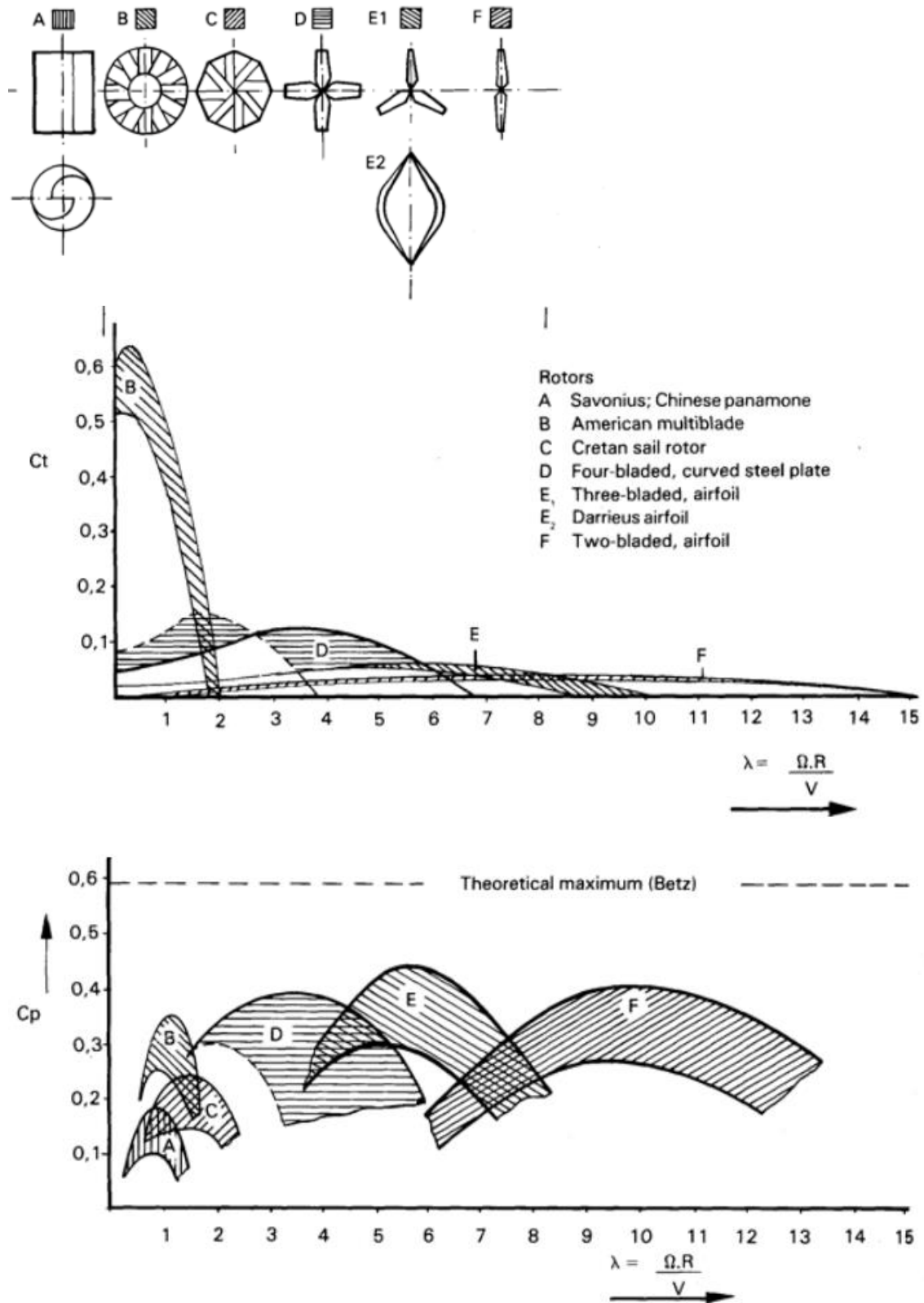


FIGURA 1.3:  $C_p$  Y  $C_t$  EN FUNCIÓN DE  $\lambda$  PARA DIFERENTES TIPOS DE MOLINOS

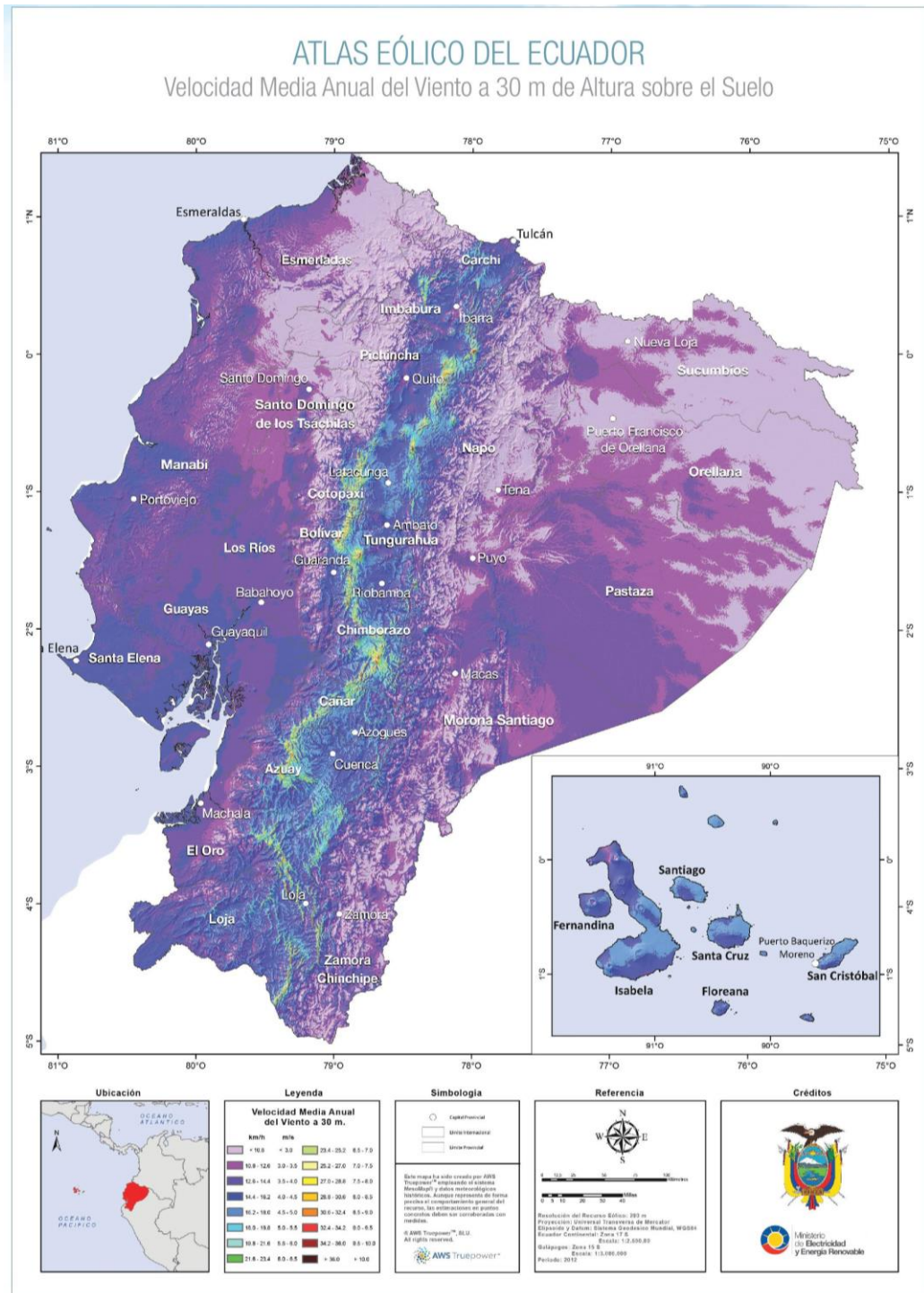
## CAPÍTULO 2: DISEÑO DEL MOLINO DE VIENTO Y LA BOMBA

En el segundo capítulo se realiza tanto el diseño de la bomba como del molino de viento. Los pasos que se siguen en el diseño del molino y la bomba son los siguientes: primero se inicia evaluando los recursos eólicos disponibles en la zona y simultáneamente se define los parámetros energéticos requeridos para el sistema. A continuación se selecciona el tipo de molino de viento más óptimo para esta aplicación. Posteriormente, se calcula el tamaño del molino de viento y después se seleccionan los componentes del sistema. Con los componentes definidos se puede avanzar hacia la evaluación de costos del sistema. Se continúa con la evaluación del sistema total y por último se realiza un diseño final del sistema.

### 2.1 Evaluación de recursos eólicos

En el Ecuador en el año 2013 se realizó un atlas eólico que contiene información sobre la disponibilidad de recursos eólicos en todo el país. A partir de este documento se puede obtener información sobre la velocidad de viento en todas las regiones del país. Este trabajo está enfocado en la región costera del país donde se cuenta con velocidades promedio relativamente bajas como se puede ver en la [figura 2.1](#).

En las imágenes de la velocidad de viento se puede ver que la velocidad en la zona de la costa está en el rango de 3-4,5 [m/s] (10,8-16,2 [km/h]). Se va a utilizar finalmente una velocidad promedio  $v=4$ [m/s] que es el color predominante como se observa en la [figura 2.1](#).



**FIGURA 2.1: VELOCIDAD DEL VIENTO A UNA ALTURA DE 30 [M]**

La información se da para la velocidad de viento a una altura de 30 metros, por lo que se utiliza la ecuación (2.1) para calcular la velocidad a una elevación de 6 metros, que es la de la torre del molino.

$$v' = v \left( \frac{z'}{z} \right)^\alpha \quad (2.1)$$

donde  $v'$  y  $v$  son las velocidades a las alturas  $z'$  y  $z$  respectivamente y  $\alpha$  se calcula utilizando la ecuación (2.2). (Villarubia M. 2015)

$$\alpha = 0,24 + 0,04 \ln z_0 + 0,003 (\ln z_0)^2 \quad (2.2)$$

donde  $\alpha$  es un coeficiente que depende de  $z_0$  que es la longitud de rugosidad [m]. Este valor depende de los alrededores es decir si se tiene edificaciones, árboles o si se tiene un área despejada en las cercanías este valor se puede leer de la [tabla 2.1](#) que se encuentra a continuación (Cueva L. 2015).

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad ( $z_0$ ) (m)	Índice de energía (%)	Tipo de terreno
0	0,0002	100	Superficie de agua, terreno abierto, superficie lisa
0,5	0,0024	73	Pistas de hormigón (aeropuertos), césped
1	0,03	52	Campos abiertos sin cercados, edificios muy dispersos, colinas suavemente redondeadas
1,5	0,055	45	Campo con algunas casas y arbolado de hasta 8 m situado como mínimo a 1250 m
2	0,1	39	Campo con algunas casas y arbolado de hasta 8 m situado como mínimo a 500 m
2,5	0,2	31	Campo con algunas casas y arbolado de hasta 8 m situado como mínimo a 250 m
3	0,4	24	Pueblos, bosques y terreno accidentado y desigual
3,5	0,8	18	Ciudades con edificios altos
4	1,6	13	Grandes ciudades con edificios elevados

Tabla 2.1: Tabla de clases y longitudes de rugosidad

En el área donde se está aplicando este trabajo se tiene campos abiertos, pocas casas y colinas suavemente redondeadas por lo que se va a utilizar la clase de rugosidad 1 con lo cual el valor de  $z_0$  es de 0,03 [m]. Este valor se utiliza para calcular  $\alpha$  y posteriormente la velocidad de viento a la altura  $z'=6$ [m].

$$\alpha = 0,24 + 0,04 \ln(0,03) + 0,003 (\ln 0,03)^2$$

$$\alpha = 0,13663$$

Con el valor de  $\alpha$  se puede calcular  $v'$ .

$$v' = 4 \left( \frac{6}{30} \right)^{0,13663} = 3,21 [m/s]$$

La velocidad promedio de 3,21 [m/s] a la altura de 6 [m] es la que se va a utilizar para el desarrollo del molino.

## 2.2 Parámetros energéticos

El sistema de extracción de agua no tiene un uso específico ya sea de consumo humano, consumo de ganado o de riego por lo que el parámetro del caudal a requerido se va a ser tomando en cuenta que se pueda aplicar para las tres aplicaciones simultáneamente a una escala pequeña. Para estimar los requerimientos se toma en cuenta una comunidad de 25 personas, con 10 cabezas de ganado y con un cultivo de aproximadamente 100 m<sup>2</sup>. Este último valor se utiliza ya que se estima que para autoabastecerse de alimentos sembrados se necesita 4 m<sup>2</sup> por persona para cultivos.

Según un estudio de P. Gleick, del Instituto Pacífico para estudios en desarrollo, medio ambiente y seguridad, el requerimiento necesario por persona es de 50 litros diarios (P. Gleick, 2003). Sin embargo este es un requerimiento mínimo para condiciones extremas donde el agua es muy escasa. Para este sistema se calcula con un consumo diario de 75 litros por persona por día, para que no haga falta agua. El consumo en Quito por persona-día es de aproximadamente de 150 litros pero este sistema se va a realizar para la zona rural donde el consumo de agua es mucho menor.

Para el consumo de agua de ganado se estima utilizando la información propinada por R. Sager en el paper Agua Para Bebida de Bovinos, donde se informa que el consumo diario de agua para ganados es de 40 litros de agua al día. Este es el valor que se toma en cuenta para el cálculo del requerimiento de agua para ganado.

Para el agua de riego se utiliza la estimación que los alimentos que más se producen en estas zonas del Ecuador son tomate, sandía, melón, pepino y pimiento. En base a los requerimientos de consumo de agua para riego de estos alimentos se basa la cantidad de agua requerida para riego. En la [tabla 2.2](#) se presenta la cantidad de agua que se requiere para el cultivo de los alimentos mencionados anteriormente (Cajamar, 2005).

Alimento	Requerimiento de agua [L/m <sup>2</sup> día]
Tomate	2
Pimiento	2,5
Sandía	4
Melón	3
Pepino	1,6

Tabla 2.2: Requerimiento de agua para riego de alimentos

Para asegurar que se puedan cultivar todos los alimentos se utiliza el valor más alto requerido que es el de la sandía de 4 L/m<sup>2</sup>día.

Tomando en cuenta todos los valores de requerimiento de consumo se hace el siguiente cálculo del caudal requerido.

$$Q = 75 \times Np + 40 \times Cg + 4 \times A \quad (2.3)$$

donde  $Q$  es el caudal [L/día],  $Np$  es el número de personas,  $Cg$  es el número de cabezas de ganado y  $A$  es el área [m<sup>2</sup>].

Remplazando los valores ya definidos se obtiene un caudal de 2675 [L/día] diarios. Esto es equivalente a 2,675 [m<sup>3</sup>/día] y con este valor se calcula la potencia que se requiere para obtener este caudal de agua (Galarza, 1987).

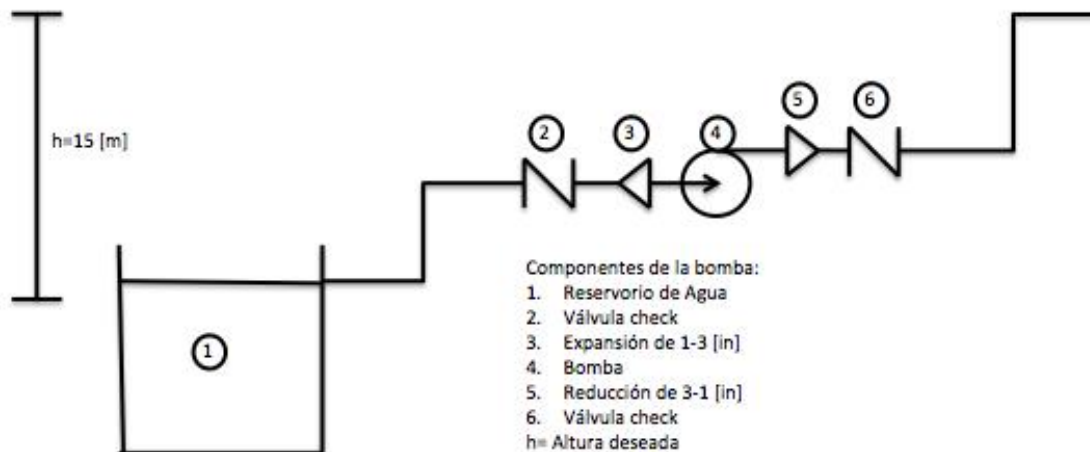
$$P = Q\rho_a hg \quad (2.4)$$

donde  $P$  es la potencia requerida [W],  $Q$  es el caudal total de agua [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  $\rho_a$  es la densidad del agua [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ],  $h$  es la altura neta de elevación [m] y  $g$  es la gravedad [ $\text{m}/\text{s}^2$ ].

Para asegurar que el requerimiento de agua sea suficiente para las características descritas se utiliza un caudal de 3 [ $\text{m}^3/\text{día}$ ]. Además de esto se toma en cuenta que no se tiene viento durante todo el día por lo que se calcula con un uso de 4 horas al día del molino. Se toma solamente 4 horas de viento diarias ya que no existe información del número de horas de viento que existe al día y para asegurar que se obtenga el caudal que se desea, se toma un valor relativamente bajo para las horas de viento. El caudal es preferible tener en unidades de metros cúbicos por segundo por lo que se hace la siguiente transformación:

$$Q = 3 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \frac{\text{día}}{4 \text{ horas}} \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ s}} = 2,0833 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Otro factor que se tiene que definir antes de poder calcular la potencia es la altura que se va a levantar el agua. Al tratarse de un sistema que se puede aplicar tanto en un pozo así como un río se tiene que tomar en cuenta que sí puede existir un cambio de altura relativamente alto. Por esto se define una altura máxima de extracción de 15 [m] desde la fuente. Al nivel del mar la diferencia de altura desde la fuente hasta la entrada de la bomba es de 6,7 [m] máximo (Galarza,1987) por lo que se utilizan 15 [m] para poder llevar el agua a lugares con diferencias de alturas significativas.



**FIGURA 2.2: DIAGRAMA DEL SISTEMA DE BOMBA**

A este valor se adicionan las pérdidas que se van a tener por fricción y componentes para eso se presenta en la [figura 2.2](#) un esquema del sistema de la bomba. A partir del diagrama de la bomba se calcula las pérdidas que se tiene por fricción y por componentes. Para las pérdidas por fricción se utiliza la ecuación (2.5) y para las pérdidas por componentes la ecuación (2.6).

$$l_f = \sum \left( f \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g} \right) \quad (2.5)$$

$$l_m = \sum \left( K_i \frac{v_i^2}{2g} \right) \quad (2.6)$$

donde  $l_f$  son las pérdidas por fricción [m],  $l_m$  son las pérdidas por componentes [m],  $f$  el factor de fricción [m],  $L$  es la longitud de la tubería [m],  $v$  es la velocidad del fluido [m/s],  $d$  el diámetro de la tubería [m],  $g$  es la constante gravitatoria [m/s<sup>2</sup>], y  $K$  es el coeficiente de pérdida de los componentes.

Se calcula el factor de fricción utilizando la correlación de Swamee-Jaine que se presenta en la ecuación (2.8). Para poder calcular esta correlación es necesario encontrar el número de Reynolds que se calcula con la ecuación (2.7) (White, 1986).

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (2.7)$$

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{\varepsilon/d}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (2.8)$$

donde  $Re$  es el número de Reynolds,  $\rho$  es la densidad del fluido [Kg/m<sup>3</sup>],  $v$  es la velocidad del fluido [m/s],  $d$  el diámetro de la tubería [m],  $\mu$  es la viscosidad dinámica [Kg/m·s],  $f$  es el factor de fricción y  $\varepsilon$  es la rugosidad de la tubería [m] (White, 1986).

El diámetro de la tubería es de 25,04 [mm] (1 [in]) de PVC con una longitud de 30 [m]. Con estos valores definidos se calcula las pérdidas por fricción. Se encuentra la velocidad del fluido en función del caudal y el diámetro para obtener el número de Reynolds utilizando la ecuación (2.7).

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4(2,083 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s})}{\pi(0,0254 \text{ m})^2} = 0,411 [\text{m/s}]$$

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{\rho Q d}{\mu A} = \frac{4\rho Q}{\mu \pi d}$$

$$Re = \frac{4 \left( 998,16 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left( 2,083 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)}{\left( 1,0016 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}} \right) \pi(0,0254 \text{ m})}$$

$$Re = 10405$$

Con el número de Reynolds se calcula el factor de fricción con la ecuación (2.8).

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{0,0015 \text{ mm}/25,4 \text{ mm}}{3,7} + \frac{5,74}{10405^{0,9}} \right) \right]^2}$$



$$f = 0,0307$$

A continuación se calculan las pérdidas por fricción en la tubería utilizando la ecuación (2.5).

$$l_f = 0,037 \left( \frac{30 \text{ m}}{0,0254 \text{ m}} \frac{(0,411 \text{ m/s})^2}{2(9,8 \text{ m/s}^2)} \right)$$

$$l_f = 0,3766[m]$$

Las pérdidas por los componentes se calculan individualmente para cada uno de los componentes. El coeficiente de pérdida  $K$  para las dos válvulas check es el mismo  $K_{check}=2,5$ , este valor se obtiene en tablas en función al tipo de válvula (White, 1986). Para la expansión y la reducción se utiliza dos ecuaciones diferentes, la (2.9) y la (2.10) respectivamente.

$$K_{exp} = \left( \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^2 - 1 \right)^2 \quad (2.9)$$

$$K_{red} = 0,5 \left( 1 - \frac{d_1^2}{d_2^2} \right) \quad (2.10)$$

donde  $K_{exp}$ , es el coeficiente debido a expansión,  $K_{red}$  es el coeficiente debido a reducción,  $d_2$  es el diámetro mayor [m] y  $d_1$  es el diámetro menor [m].

Se tiene dos expansiones y contracciones, ya que se pasa de 1-2 [in] y luego de 2-3[in] y viceversa. Para cada una de estas se tiene diferentes velocidades, al tener un caudal constante las velocidades se pueden calcular variando el área. Se calculan los factores  $K$  y con estos se calcula las pérdidas por componentes. En la tabla 2.3 se presentan los resultados de los cálculos de los factores, las velocidades y finalmente las pérdidas totales por componentes.

Transición [in]	K	v[m/s]	$l_m$ [m]
1-2	9,000	0,411	0,07757
2-3	1,563	0,102	$8,29 \times 10^{-4}$
3-2	0,277	0,045	$2,86 \times 10^{-5}$
2-1	0,375	0,102	$1,99 \times 10^{-4}$
Válvula check	2,500	0,411	0,02155
Total	-	-	0,10018

Tabla 2.3: Valores del coeficiente de pérdida, las velocidades y las pérdidas totales por componentes.

Finalmente se suman tanto las pérdidas por fricción y las pérdidas por componentes para calcular la altura requerida para poder calcular la potencia que va a necesitar el molino.

$$h_{net} = h + l_f + l_m = 15m + 0,3766m + 0,10018m$$

$$h_{net} = 15,59 [m]$$

$$P = \left( 2,0833 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s} \right) \left( 1000 \frac{kg}{m^3} \right) (15,59 m) \left( 9,8 \frac{m}{s^2} \right)$$

$$P = 33,438 [W]$$

## 2.3 Selección de los componentes del molino

Un molino de viento tiene cuatro componentes básicos que se deben seleccionar, estos son el tipo de rotor o molino que hace girar a un eje principal, la torre que sostiene al sistema, el sistema de transferencia del movimiento rotacional y la estructura móvil que direcciona al rotor en dirección del viento. Al ser este un molino para extracción de agua se agrega un componente adicional que se debe seleccionar y es la bomba. En la [figura 2.3](#) se presenta un esquema básico de un molino de extracción de agua.

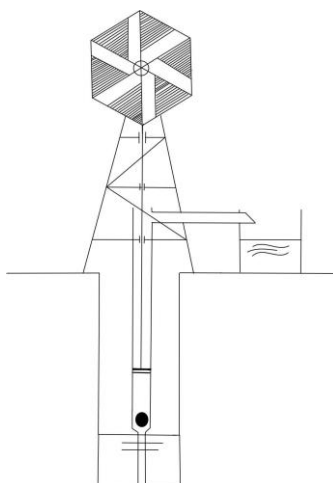


FIGURA 2.3: COMPONENTES BÁSICOS DE UN MOLINO DE EXTRACCIÓN DE AGUA

### 2.3.1 Selección del tipo de molino.

Como se pudo observar en la sección (1.7) el molino con las mejores propiedades para extracción de agua es el multipala de eje horizontal. Este tipo de molino genera alto torque de arranque con velocidades bajas del viento. Estas propiedades son ideales para accionar una bomba de extracción de agua, ya que es capaz de generar un torque elevado con velocidades bajas. De no poder lograr esto nunca se accionaría ya que no lograría llegar a su velocidad óptima de funcionamiento.

Otra ventaja de este tipo de molino es que sus aspas son de diseño simple que permiten su construcción con materiales económicos. A diferencia de los molinos mono-, bi- y tripala que tienen aspas de fibra de vidrio con una construcción compleja, los multipala utilizan materiales más económicos y de un diseño simple. El multipala americano utiliza aspas curvas de acero mientras el molino tipo cretense utiliza aspas triangulares de tela. Por esto se va a escoger el molino de eje horizontal multipala.

Uno de los principales objetivos de este trabajo es lograr diseñar un molino de bajo costo capaz de satisfacer los requerimientos de consumo de agua ya expuestos en la sección (2.2). Además de esto, el sistema debe ser simple para que la construcción del mismo no requiera la utilización de maquinaria o equipos complejos para la instalación. Es por esto que se debe escoger materiales de bajo costo y disponibilidad en el mercado.

### 2.3.2 Selección del material del eje.

El material que se seleccionó para el eje es acero de transmisión AISI 1018. Se selecciona este material ya que tiene un buen equilibrio de dureza y resistencia. Este material se utiliza generalmente para ejes de motores y bombas por lo que es ideal para esta aplicación. Otra de las ventajas es que se puede conseguir fácilmente en el mercado ya que se puede obtener de la empresa Dishierro Ecuador. Las propiedades del material se presentan a continuación (Beer, 2010).

<b>Propiedades Mecánicas</b>	
Esfuerzo Ultimo	440 [MPa]
Esfuerzo de Fluencia	370 [MPa]
Módulo de Elasticidad	205 [GPa]
Coefficiente de Poisson	0,290
Módulo de Elasticidad Transversal	80 [GPa]

Tabla 2.4: Propiedades Mecánicas del acero AISI 1018

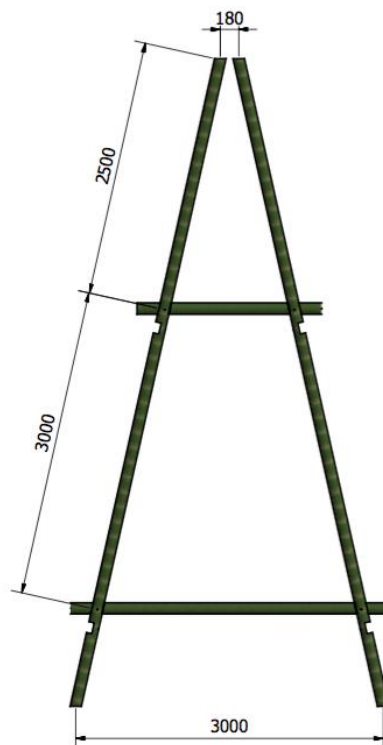
### 2.3.3 Selección del tipo de torre y material.

La construcción de la torre para los molinos de extracción de agua del estilo multipala americano generalmente utilizan estructuras de acero. Sin embargo, al ser un trabajo que trata reducir los costos al máximo se utiliza un recurso que está disponible en la zona. El bambú, conocido como caña guadua, se utiliza en la costa ecuatoriana para la construcción de casas. Este material se ha utilizado durante muchos años para la construcción de viviendas en la región.

Estudios recientes sobre las propiedades mecánicas de la caña guadua han demostrado que sus propiedades son idóneas para la construcción. La caña guddua tiene una longitud promedio de 20 [m] y un diámetro externo de 110 [mm] con un espesor de pared promedio de 12 [mm]. El Instituto Alemán de Prueba de Materiales de Construcción Civil de Stuttgart realizó ensayo sobre la caña guadua en el año 1999 y encontró las siguientes propiedades mecánicas del material. El esfuerzo de fluencia no se tiene para este material por lo que se utiliza el esfuerzo de fluencia de un material similar, el bambú. (Rea Lozano V, 2012)

	Esfuerzo de fluencia [MPa]	Esfuerzo Ultimo [MPa]
Valor	109	310

Tabla 2.5: Propiedades mecánicas de la caña guadua

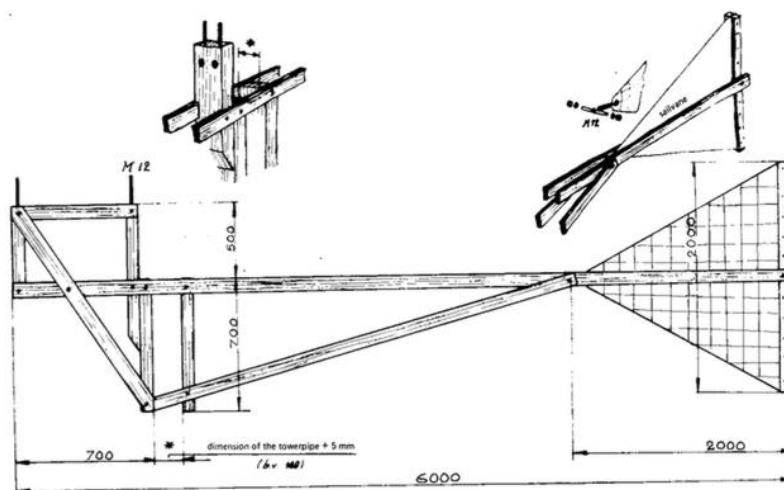


**FIGURA 2.4: TIPO DE TORRE PARA EL MOLINO**

El modelo de la torre se basó en el modelo diseñado por N. J. Van de Ven en su manual de construcción de un molino de viento cretense (Van de Ven, 1977). El modelo se presenta en la [figura 2.4](#), es un diseño hecho en el software inventor ya escalado para la aplicación del trabajo de titulación. La diferencia es que para el sistema se va a utilizar caña guadua en vez de madera, que es utilizado por Van de Ven. La construcción de la torre se describe en el tercer capítulo.

### **2.3.4 Selección estructura móvil.**

La estructura móvil en un sistema de molino con estas características cumple dos funciones. Por un lado, funciona como guía para direccionar al rotor en el sentido del viento para aprovechar al máximo el viento si este cambia de dirección. La segunda función es la de aguantar el peso del rotor, el eje y el componente de transferencia de movimiento rotacional. En la [figura 2.5](#) se presenta el modelo que se escogió para el molino del trabajo de titulación.



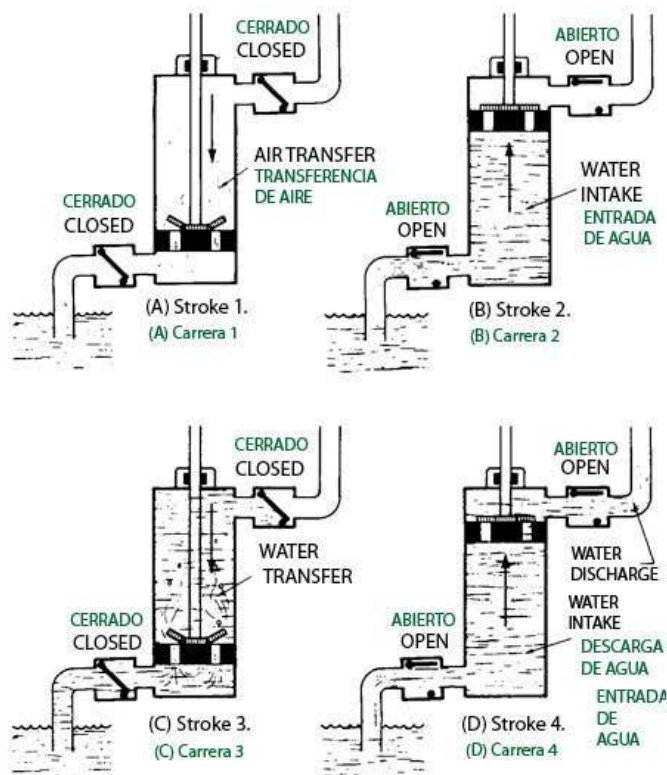
**FIGURA 2.5: ESQUEMA DE ESTRUCTURA MÓVIL PROPUESTA POR VAN DE VEN**

Para la estructura móvil se utiliza nuevamente el diseño propuesto por Van de Ven, ya que este tiene la ventaja de ser construido en madera. El modelo de Van de Ven es una buena solución para el proyecto ya que al ser construido de madera se pueden reducir los costos y el peso de la estructura. Otra ventaja de realizar el diseño de esta pieza de madera es que si existe alguna falla en una de las piezas de la estructura, puede ser sustituida fácilmente. Al tener acceso a la materia prima en el sector solo se requiere de un carpintero para sustituir la pieza. Si se realizaría el diseño de metal se requeriría de un taller mecánico y un soldador para reparar la falla.

En el manual de construcción se van a detallar las medidas de la estructura y el procedimiento para su construcción. Las medidas que se detallan en este sistema no se toman en cuenta ya que se escalan para el diámetro calculado del eje.

### **2.3.5 Selección del tipo de bomba.**

Para el proyecto del molino se necesita una bomba que se pueda construir fácilmente y que no sea costosa. Se encontró un modelo bastante simple de una bomba de pistón que funciona en 4 tiempos como se puede ver en la [figura 2.6](#) (Ayuji.com. 2016).



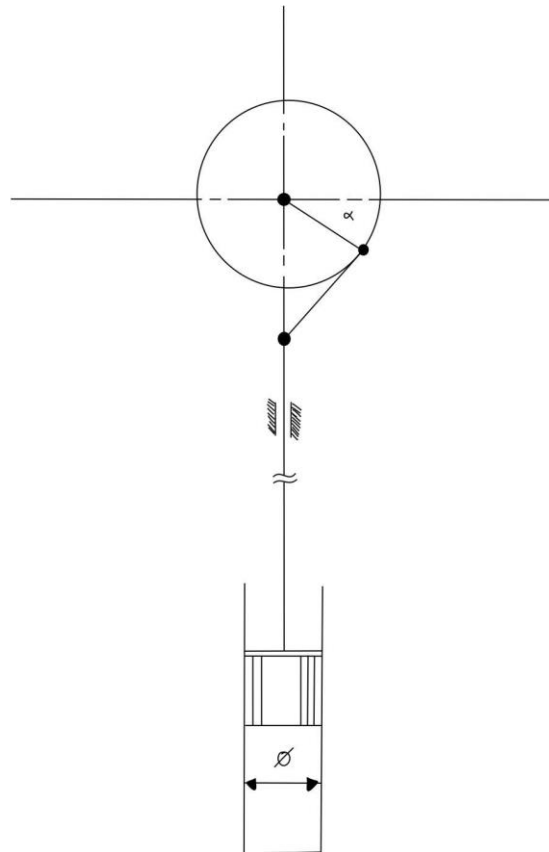
**FIGURA 2.6: FUNCIONAMIENTO EN 4 TIEMPOS DE LA BOMBA**

En la primera carrera baja el pistón con las dos válvulas check cerradas, esto no genera transferencia de fluido ya que la solapa del pistón esta levantada permitiendo el flujo del agua. En la segunda carrera esta solapa se cierra generando vacío en la parte debajo del pistón y desplazando el aire que se encuentra en la parte superior de la cabeza del pistón. El vacío que se genera abre la válvula check de la parte inferior haciendo ingresar agua mientras que en la parte superior el desplazamiento de aire abre la válvula check. En la tercera carrera se repite lo sucedido en la primera, al abrirse la solapa del pistón la presión del agua cierra las dos válvulas check dejando que el pistón se desplace en el cuerpo de la bomba libremente. En la cuarta y última carrera el pistón sube con la solapa cerrada y se repite lo sucedido en la segunda carrera.

El cuerpo de la bomba se va a construir con tuberías de PVC que se pueden comprar en cualquier ferreterías, el pistón va a ser maquinado en duralon con una solapa de caucho en la parte superior y una que lo envuelve, y el tubo conector es un tubo de acero de transmisión de 10 [mm] de diámetro.

### 2.3.6 Selección del sistema de accionamiento de la bomba.

Se debe seleccionar un mecanismo para transferir el movimiento rotacional generado por el rotor en el eje principal hacia la bomba. Este sistema debe convertir un movimiento rotacional en un movimiento de vaivén, lo que se hace generalmente con un sistema biela manivela. Un sistema biela manivela general es ideal para esta aplicación ya que es relativamente simple y se puede construir con materiales económicos. En la [figura 2.7](#) se presenta un sistema biela manivela que se puede aplicar para una bomba.



**FIGURA 2.7: SISTEMA BIELA MANIVELA PARA UNA BOMBA DE PISTÓN.**

El sistema funciona con una manivela que va conectada a un extremo al eje rotacional y con el otro extremo a un brazo conector. El brazo conector se une a una biela que restringe el movimiento en un solo eje, es decir en un movimiento de vaivén como se necesita. Este es el sistema de transferencia de movimiento ideal para el molino de extracción de agua.

## 2.4 Diseño de los componentes del molino

Los componentes del sistema se van a someter a una serie de esfuerzos por lo que se debe realizar un diseño de las distintas piezas para asegurar que no vaya a fallar bajo las condiciones de trabajo a las que van a funcionar. Prácticamente todos los componentes del sistema se deben diseñar para que resistan las fuerzas ya que si uno falla, todo el sistema colapsa. Se debe hacer diseño del rotor y sus aspas, del eje conector, de la torre, del sistema biela manivela, de la bomba y una selección de los rodamientos.

### 2.4.1 Diámetro del rotor.

Con los requerimientos energéticos definidos y conociendo la disponibilidad de recursos eólicos en la zona se calcula el diámetro del rotor. La potencia de salida de un sistema eólico se calcula con la ecuación (2.5) (Galarza, 1987):

$$P_{out} \cong (0,135 - 0,045)D^2V^3$$

$$P_{out} = (0,09)D^2V^3 \quad (2.5)$$

donde  $P_{out}$  es la potencia de salida [W],  $D$  es el diámetro [m] y  $V$  es la velocidad del viento [m/s].

Remplazando el valor calculado para la potencia y la velocidad de viento se despeja el diámetro necesario del rotor:

$$D = \sqrt{\left(\frac{P_{out}}{v^3 0,09}\right)}$$

$$D = \sqrt{\left(\frac{33,438W}{(3,21m/s)^3 0,09}\right)} = 3,35[m]$$

A partir de estos cálculos se define que el diámetro del rotor debe ser de 3,35 [m].

#### 2.4.2 Diseño del eje.

Para el cálculo del diámetro del eje se aplica la ecuación (2.11) que se presenta en el libro de Shigley para el diseño de ejes.

$$d = \left( \frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[ 4(k_f \cdot M_a)^2 + 3(k_{fs} \cdot T_a)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} \left[ 4(k_f \cdot M_m)^2 + 3(k_{fs} \cdot T_m)^2 \right]^{1/2} \right\} \right)^{1/3}$$

(2.11)

donde  $d$  es el diámetro [m],  $n$  es el factor de seguridad,  $S_e$  es el límite de fatiga [MPa],  $k_f$  y  $k_{fs}$  son factores que dependen de la geometría del eje,  $M_a$  y  $M_m$  son los momentos amplitud y medios respectivamente [Nm],  $T_a$  y  $T_m$  son los torques amplitud y medios respectivamente, y  $S_{ut}$  es el esfuerzo último. Lo primero que se calcula para determinar el diámetro del eje es el límite de fatiga  $S_e$  mediante la ecuación (2.12).

$$S_e = S_e' k_a k_b k_c k_d k_e k_f \quad (2.12)$$

donde  $S_e$  es el límite de resistencia [MPa],  $S_e'$  es el límite de resistencia de una muestra de prueba [MPa] y  $k_a, k_b, k_c, k_d, k_e$  y  $k_f$  son factores de modificación.

$S_e'$  se calcula utilizando la ecuación (2.13).

$$S_e' = 0,5 S_{ut} \quad (2.13)$$

donde  $S_e'$  es el límite de resistencia de una muestra de prueba y  $S_{ut}$  es el esfuerzo último [MPa].

$$S_e' = 0,5 \cdot 440[MPa] = 220[MPa]$$



$k_a$  es el factor de modificación de la condición de la superficie y se calcula con la ecuación (2.14).

$$k_a = aS_{ut}^b \quad (2.14)$$

$$k_a = 4,51 \cdot 440^{-0,265} = 0,8988$$

donde  $a$  y  $b$  son constantes que dependen del acabado superficial del eje, en este caso el material es maquinado por lo que  $a=4,51$  y  $b=-0,265$ , y  $S_{ut}$  es el esfuerzo último.

$k_b$  es el factor de tamaño y depende del diámetro del eje, sin embargo no se tiene este valor aun por lo que se asume  $k_b=1$ .  $k_c$  es el factor de carga que depende que tipo de carga se aplica, en este caso se tiene flexión y  $k_c=1$ .  $k_d$  es el factor de temperatura y como se va a trabajar a temperatura ambiente  $k_d=1$ .  $k_e$  es el factor de la confiabilidad, en este caso se está utilizando una confiabilidad de 99% por lo que  $k_e = 0,814$ .  $k_f$  es el factor de efectos misceláneos, que en este caso no existen por lo que es igual a 1.

Con todos los factores definido se puede calcular  $S_e$ .

$$S_e = 220[MPa] \cdot 0,8988 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,814 \cdot 1 \cdot 1$$

$$S_e = 160,96[MPa]$$

El siguiente valor que se necesita para la ecuación (2.11) es el factor de seguridad el cuál se elige como  $n=1,5$ . Este es un valor que se usa comúnmente para el diseño de ejes. A continuación se encuentran los valores de las constantes  $k_f$  y  $k_{fs}$  de la ecuación (2.11). Estos son factores que dependen de las reducciones de área que suelen hacerse en un eje donde van los rodamientos. Al ser este un eje que tiene una sección transversal constante sin ninguna reducción estos valores son igual a 1.

Después, se encuentran los valores del momento amplitud  $M_a$  y el momento medio  $M_m$ . El momento que sufre un eje sigue la forma de una curva sinusoidal como la que se puede ver en la [figura 2.8](#). Tiene un valor máximo de momento y un mínimo que son equivalentes pero con el signo cambiando. El valor medio del momento es igual a cero.

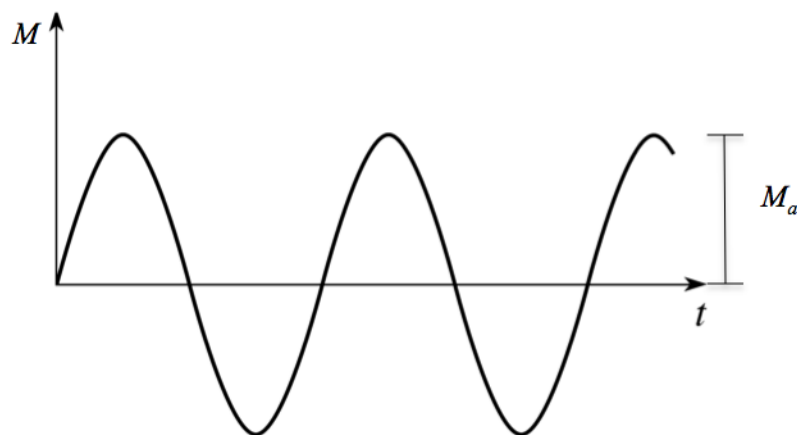
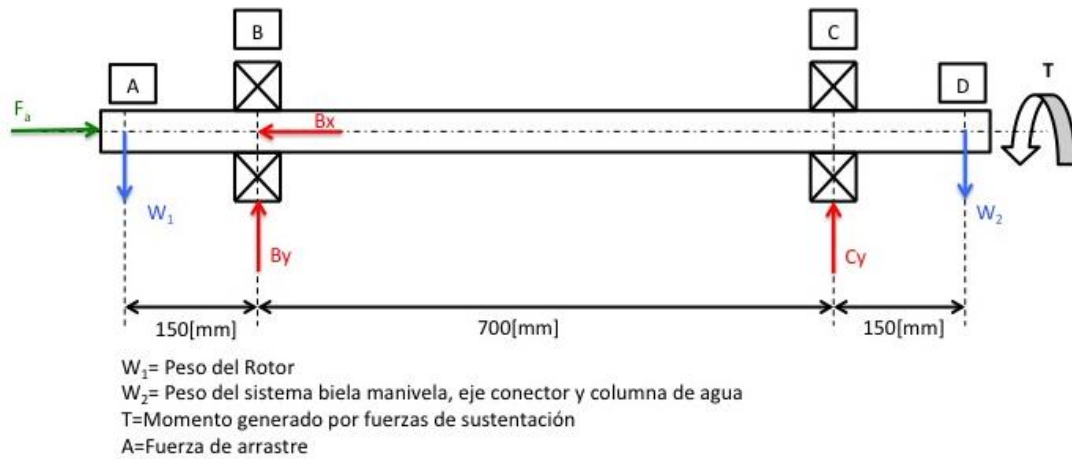


FIGURA 2.8: ACCIÓN DEL MOMENTO SOBRE EL EJE

Para saber cuáles son las fuerzas que están actuando sobre el eje se hace un diagrama de fuerzas del eje, se calculan las reacciones y finalmente se realiza el diagrama de fuerza cortante, de momento y de momento de torque. Estos diagramas se presentan en la figuras 2.9 y 2.10.



**FIGURA 2.9: DIAGRAMA DE FUERZAS DEL EJE**

Para poder calcular los valores de las fuerzas que están actuando sobre el eje y sus reacciones se asume que el valor del peso del rotor  $W_1$  y el peso del sistema biela manivela, eje conector y la columna de agua  $W_2$  son iguales con una magnitud de  $W_1 = W_2 = W = 150$  [N]. Con esta suposición se calcula las reacciones en los rodamientos B y C.

$$\sum M_{B,z} = 0$$

$$W \cdot 0,15 + C_y \cdot 0,7 - W \cdot 0,85 = 0$$

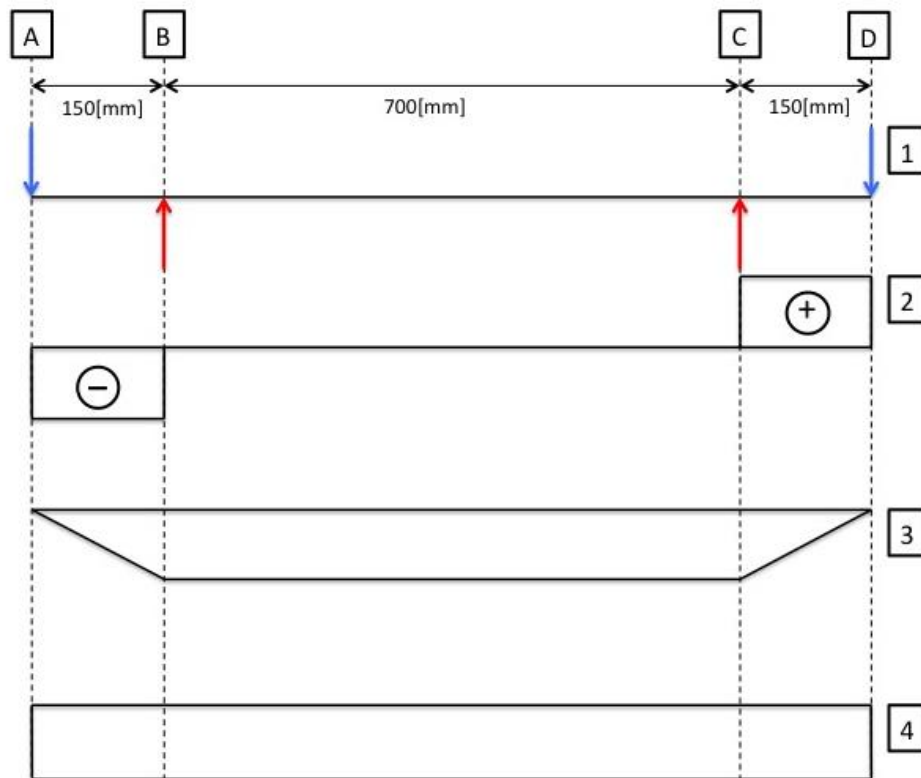
$$C_y = W = 150 \text{ [N]}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$C_y + B_y - 2W = 0$$

$$B_y = 2W - C_y = 150 \text{ [N]}$$

Con las reacciones se hacen los diagramas de fuerza cortante, de momento y de momento de torque a partir de las reacciones, estos diagramas se presentan en la figura 2.10:



**FIGURA 2.10: (1) DIAGRAMA DE FUERZAS, (2) DIAGRAMA DE FUERZA CORTANTE, (3) DIAGRAMA DE MOMENTO FLECTOR Y (4) DIAGRAMA DE MOMENTO DE TORQUE.**

Cuando se observa el diagrama de momento se puede apreciar que el momento en la [figura 2.10](#) máximo se da en el punto (B) por lo que en este punto se hace un cálculo de la sumatoria de momentos.

$$\sum M_b = 0$$

$$w_1 \cdot x = M_a = 150[N] \cdot 0,15[M]$$

$$M_a = 22,5[Nm]$$

Los valores obtenidos del momento amplitud  $M_a$  y el momento medio  $M_m$  respectivamente son de 22,5 [N·m] y 0 [N·m]. Finalmente el último valor que se calcula es el valor del torque amplitud  $T_a$  y el torque medio  $T_m$ . El torque que genera el sistema eólico su puede calcular utilizando la ecuación (1.5) del coeficiente de torque despejando el torque de la ecuación y obteniendo la ecuación (2.15).

$$T = C_T \left( \frac{1}{2} \rho v^2 \pi R^3 \right) \quad (2.15)$$

donde T es el torque,  $C_T$  es el coeficiente de torque,  $\rho$  es la densidad del aire,  $v$  es la velocidad del viento, y R es el radio del rotor. El coeficiente de torque es una propiedad del tipo de convertidor eólico y se sabe que para un molino del tipo cretense el coeficiente de torque máximo es de  $C_{Tmax}=1$  para una velocidad típica  $\lambda=1$  (Galarza, 1987). La velocidad del viento que se utiliza para este cálculo es la velocidad máxima registrada en

la zona que según los datos del INHAMI es de 12 [m/s]. Con estos valores definidos se calcula el torque medio.

$$T_m = 0,3 \left( \frac{1}{2} (1,15 \frac{kg}{m^3}) (12 \frac{m}{s})^2 \pi (1,675)^3 \right)$$

$$T_m = 218,94 [N \cdot m]$$

El valor de torque medio  $T_m=218,94 [N \cdot m]$  y ya que el valor del torque es constante a esta velocidad del viento el torque amplitud  $T_a=0$ . Finalmente con todos los valores necesarios se puede resolver la ecuación (2.11) para encontrar el diámetro requerido del eje.

$$d = \left( \frac{16 \cdot 1,5}{\pi} \left\{ \frac{1}{160,96 MPa} [4(1 \cdot 22,5 Nm)^2 + 3(1 \cdot 0)^2]^{1/2} + \frac{1}{440 MPa} [4(1 \cdot 0)^2 + 3(1 \cdot 218,94)^2]^{1/2} \right\} \right)^{1/3}$$

$$d = 0,02058 [m] = 20,58 [mm]$$

El diámetro que debe tener el eje es de 20,58 [mm], en el mercado el eje con diámetro más cercano a este es de 25 [mm] de acero de transmisión AISI 1018. Con el diámetro seleccionado se regresa a calcular el factor de seguridad real con la ecuación (2.16).

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{1/2} \right\} \quad (2.16)$$

donde  $d$  es el diámetro [m],  $n$  es el factor de seguridad,  $S_e$  es el límite de fatiga [MPa],  $k_f$  y  $k_{fs}$  son factores que dependen de la geometría del eje,  $M_a$  y  $M_m$  son los momentos amplitud y medios respectivamente [Nm],  $T_a$  y  $T_m$  son los torques amplitud y medios respectivamente, y  $S_{ut}$  es el esfuerzo de fluencia mínimo.

El valor de  $S_e$  va a cambiar ya que al tener diámetro se calcula el valor de  $k_b$  utilizando la ecuación (2.17).

$$k_b = 1,24d^{-0,107} = 1,24(25)^{-0,107} = 0,8787 \quad (2.17)$$

Con el valor de  $k_b$  se vuelve a calcular  $S_e$  utilizando la ecuación (2.12)

$$S_e = 220 [MPa] \cdot 0,8988 \cdot 0,8787 \cdot 1 \cdot 0,814 \cdot 1 \cdot 1$$

$$S_e = 141,43 [MPa]$$

Una vez realizada la corrección en el factor  $S_e$  se calcula el factor de seguridad utilizando la ecuación (2.16).

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi (0,025m)^3} \left\{ \frac{1}{141,43 MPa} [4(1 \cdot 22,5 Nm)^2 + 3(1 \cdot 0)^2]^{1/2} + \frac{1}{440 MPa} [4(1 \cdot 0)^2 + 3(1 \cdot 218,94 Nm)^2]^{1/2} \right\}$$

$$n = 2,6$$

Al tener un factor de seguridad  $n=2,6$  se sabe que el eje no va a fallar y el diámetro que se escogió de 25 [mm] es suficiente para aguantar el momento y el torque al que va a ser sometido el eje principal.

### 2.4.3 Selección de rodamientos.

Lo primero que se hace para el diseño de los rodamientos es un diagrama en tres dimensiones para ver cuáles son las fuerzas que actúan sobre los rodamientos. El diagrama en tres dimensiones se presenta en la [figura 2.11](#). En color rojo se puede ver las cargas el rotor y del sistema biela manivela, el eje conector y la columna de agua. En color verde con el nombre  $F_a$  se aprecia la fuerza de arrastre y del mismo color con el nombre  $B_x$  se ve la reacción en el punto B en el eje x. De color azul con los nombre  $B_y$  y  $C_y$  se ven las reacciones en los rodamientos B y C en el eje y.

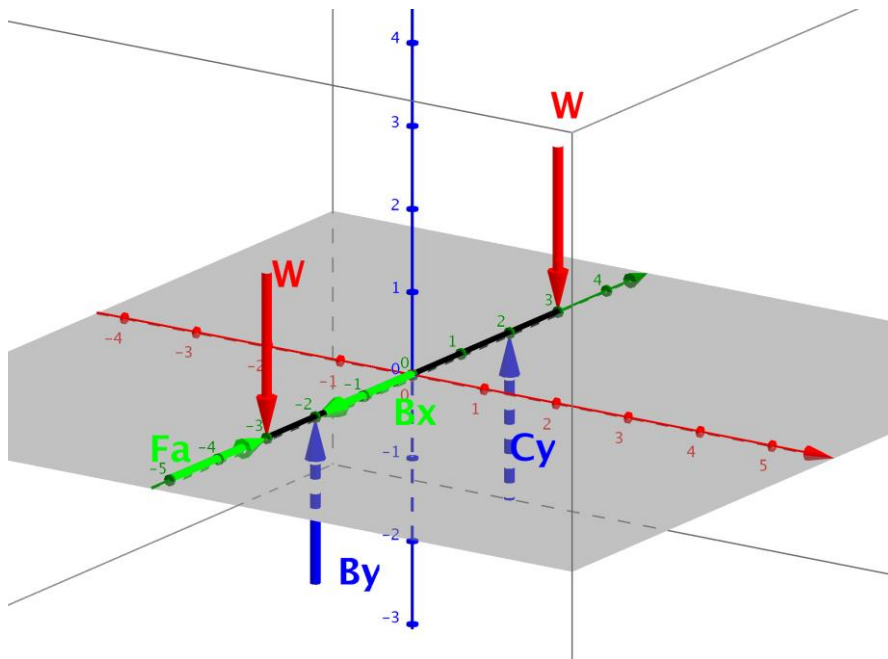


FIGURA 2.11: DIAGRAMA EN 3D DE LAS FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE EL EJE

La única fuerza desconocida es la fuerza de arrastre, y  $B_x$  que es la resultante de la fuerza de arrastre por ende es igual pero con signo opuesto. La fuerza de arrastre se calcula sabiendo el radio del rotor y la velocidad del viento, los dos factores ya son conocidos de la sección (2.3) y de la información del INHAMI. Este cálculo se hace con la ecuación (2.18) (Villarubia 2015).

$$F_a = \frac{c_d \rho v^2 \pi R^2}{2} \quad (2.18)$$

donde  $F_a$  es la fuerza de arrastre [N],  $c_d$  es un coeficiente que depende de la geometría de la vela,  $\rho$  es la densidad del aire [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ],  $v$  es la velocidad del viento [m/s],  $R$  es el radio del rotor [m].

$$F_a = \frac{0,5(1,15\text{kg/m}^3)(12\text{m/s})^2\pi(1,675\text{m})^2}{2} = 364,91[\text{N}]$$

Con todas las fuerzas definidas se empieza el proceso de selección de los rodamientos que es un proceso iterativo y inicia con la [tabla 2.6](#) (Shigley, 1989) que se presenta a continuación para poder resolver la ecuación (2.19).

$F_a/C_0$	$e$	$F_a/(VF_r) \leq e$		$F_a/(VF_r) > e$	
		$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$
0.014*	0.19	1.00	0	0.56	2.30
0.021	0.21	1.00	0	0.56	2.15
0.028	0.22	1.00	0	0.56	1.99
0.042	0.24	1.00	0	0.56	1.85
0.056	0.26	1.00	0	0.56	1.71
0.070	0.27	1.00	0	0.56	1.63
0.084	0.28	1.00	0	0.56	1.55
0.110	0.30	1.00	0	0.56	1.45
0.17	0.34	1.00	0	0.56	1.31
0.28	0.38	1.00	0	0.56	1.15
0.42	0.42	1.00	0	0.56	1.04
0.56	0.44	1.00	0	0.56	1.00

\*Use 0.014 if  $F_a/C_0 < 0.014$ .

**Tabla 2.6: Factores equivalentes para carga radial para rodamientos de bola**

$$F_e = X_i VF_r + Y_i F_a \quad (2.19)$$

donde  $F_e$  es la fuerza equivalente [N],  $X_i$  y  $Y_i$  son los factores de la [tabla 2.6](#),  $V$  es un factor igual a 1 ya que el anillo interior es el que gira,  $F_r$  es la fuerza radial [N] y  $F_a$  es la fuerza axial [N].

El valor de la fuerza equivalente se requiere para encontrar el valor de  $C_{10}$  de la ecuación (2.20).

$$C_{10} = a_f F_e \left[ \frac{x_D}{x_0 + (\theta - x_0)(1 - R_D)^{1/b}} \right]^{1/a} \quad (2.20)$$

donde  $a_f$  es el factor de aplicación de la carga,  $F_e$  es la fuerza equivalente,  $x_D$  es un múltiplo de la duración de vida,  $x_0$ ,  $(\theta - x_0)$  y  $b$  son parámetros de Weibull,  $R_D$  es la confiabilidad y  $a$  es una constante que depende del tipo de rodamiento.

Cada uno de estos factores se presentan en la [tabla 2.7](#) para la selección de rodamientos de este sistema. El factor  $a$  es igual 3 ya que es un rodamiento de bolas de contacto angular. El factor  $a_f=1,2$  es para maquinaria sin impacto. Los parámetros de Weibull se toman según ejemplos revisados del texto de Shigley. El factor  $x_D$  esta en función del número de ciclos que va a funcionar, el sistema está diseñado para funcionar como máximo 10 años y se calcula con la ecuación (2.21).

$$x_a = \frac{60\mathcal{L}_D\eta_D}{10^6} \quad (2.21)$$

donde  $\mathcal{L}_D$  es el numero de horas de vida del equipo y  $\eta_D$  es la velocidad de rotación [rpm].

Se mencionó en la sección (2.2) que el molino va a funcionar 4 horas diarias y si se toma en cuenta que los rodamientos se están diseñando para mínimo 10 años  $\mathcal{L}_D = 14600 [h]$ . La velocidad de rotación se obtiene despejando la ecuación (1.8) para la velocidad radial.

$$\eta_d = \omega = \frac{\lambda v}{r} = \frac{1 \cdot 12m/s}{1,675m} = 7,16 \frac{rad}{s} = 68,41 [rpm]$$

$$x_d = \frac{60(68,41rpm)(14600h)}{10^6} = 59,93$$

	$a_f$	$x_D$	$x_0$	$(\theta - x_0)$	$R_D$	$b$	$a$
Valor	1,2	59,93	0,02	4,439	0,99	1,483	3

Tabla 2.7: Parámetros para selección de rodamientos

Con estos valores se empieza a hacer iteraciones siguiendo los siguientes pasos:

1. Calcular  $F_e$  con la ecuación (2.19)
2. Calcular  $C_{10}$  con ecuación (2.20)
3. Encontrar algún rodamiento de contacto angular con un diámetro de 25mm que soporte la carga  $C_{10}$  comparando con el valor  $C_r$  y se elige el rodamiento.
4. Se encuentra  $F_d/C_o$  y un valor de  $e$  que corresponda
5. Se toma nuevos valores para  $X_i$  y  $Y_i$  y se vuelve a iterar.

Iteración	$X_i/Y_i$	$F_e [N]$	$C_{10} [kN]$	Rodamiento	$C_{10(tabla)} [kN]$	$F_d/C_o$	$e$
1	0,56/1,62	675,154	5,26	7005	11,3	0,04931	0.24
2	0,56/1,85	759,084	5,91	7005	11,3	-	-

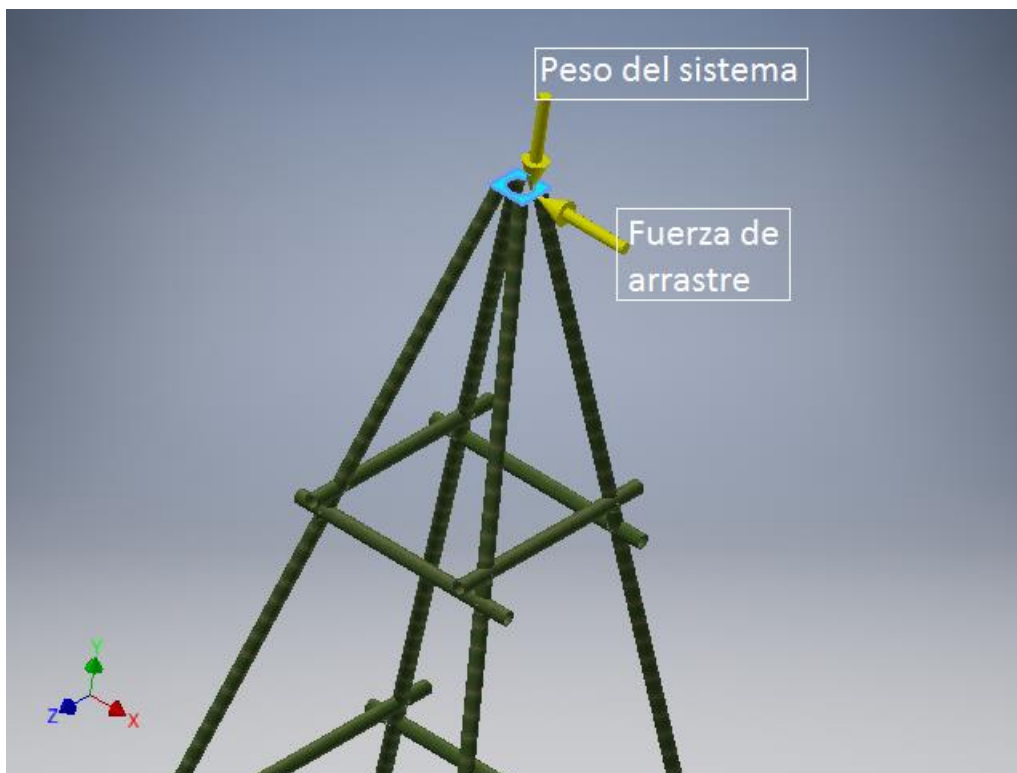
Tabla 2.8: resultados de las iteraciones para determinar el rodamiento

En la primera iteración se obtiene el mismo rodamiento por lo que se elige el rodamiento de bola de contacto angular con diámetro interior de 25 [mm] de la marca Koyo con el número 7005.

#### **2.4.4 Diseño de la torre.**

Como se mencionó anteriormente, al igual que la mayoría de las piezas del molino, se utiliza la estructura propuesta por Van de Ven en su instructivo de construcción del molino para la torre. La diferencia es que en este caso el material es caña guadua, por lo que se hace un análisis de fuerzas estáticas y un análisis de fatiga para determinar si el material es capaz de soportar los diferentes esfuerzos a los que se va a someter.

El primer análisis que se realiza es el de cargas estáticas utilizando el software Autodesk Inventor Professional. Se modela la torre utilizando este programa con las características del diseño de Van de Ven pero con unas medidas más pequeñas. El diseño se hace por piezas individuales de la misma manera que se realizaría el momento de construcción. A continuación, se une las piezas dando restricciones a cada pieza, es decir se limitan sus grados de libertad para evitar que las piezas salgan de su posición. Finalmente, acabado el modelo se realiza la simulación de cargas estáticas.



**FIGURA 2.12: APLICACIÓN DE LAS FUERZAS EN EL MODELO**

En la [figura 2.12](#) se puede observar los lugares donde se aplican las fuerzas que simulan, por un lado la fuerza generada por el peso de todo el sistema del molino con una magnitud de 600 [N] y por otro lado la fuerza de arrastre que genera el viento sobre las aspas del molino con una magnitud de 283 [N]. El valor de la fuerza de arrastre que se presenta es la que se calculó en la sección 2.4.3 La magnitud y sus ejes de acción se resumen en la [tabla 2.9](#):

Nombre	Tipo de carga	Magnitud [N]	Vector X	Vector Y	Vector Z
Peso del sistema	Fuerza	600	0	-600	0
Fuerza de arrastre	Fuerza	365	365	0	0

**Tabla 2.9: Resumen de las fuerzas que actúan sobre la estructura.**

La estructura cuenta con dos componentes principales, el primero es la torre que como ya se mencionó está hecha de caña guadua y el segundo componente es una “tapa” de acero que sirve para que las puntas de la estructura no se abran y como guía para el tubo del pistón que se va a detallar más adelante, en el manual de construcción. Cada uno de estos materiales tiene características y comportamientos mecánicos completamente diferentes, por lo que se tiene que especificar las propiedades mecánicas de cada uno.

El programa ya incluye las propiedades del acero por lo que no es necesario ninguna configuración para la tapa. La caña guadua, en cambio, es un material que no consta en las librerías del programa. Es por esto que es necesario crear un material nuevo y guardar todas las propiedades mecánicas de este material. Estas son las mismas propiedades que se presentaron en la sección (2.5) en la tabla 3.



Con las propiedades mecánicas definidas y las fuerzas aplicadas solo falta aplicar las restricciones de movimiento de la torre. Esto se hizo restringiendo el movimiento de las bases de las cuatro vigas principales de la torre. Esto simula como si estuviera empotrada en el suelo, restringiendo todos los desplazamientos y las rotaciones, que es como se une la torre al piso, esto se describe en el capítulo 3. Después de este último paso se realiza la simulación.

<b>Volumen</b>	0,16 [m <sup>3</sup> ]	-
<b>Masa</b>	131,74 [Kg]	-
	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>Esfuerzo de Von Mises</b>	0 [MPa]	44,71 [MPa]
<b>Desplazamiento X</b>	-0,80 [mm]	0,00 [mm]
<b>Desplazamiento Y</b>	-0,13 [mm]	0,10 [mm]
<b>Desplazamiento Z</b>	-0,06 [mm]	0,08 [mm]

Tabla 2.10: Resultados de la simulación

En la [tabla 2.10](#) se puede ver los resultados de esfuerzos de Von Mises y los desplazamientos, sin embargo, se aprecian los resultados de una manera más visual revisando las imágenes de la simulación, las cuales se presentan a continuación.

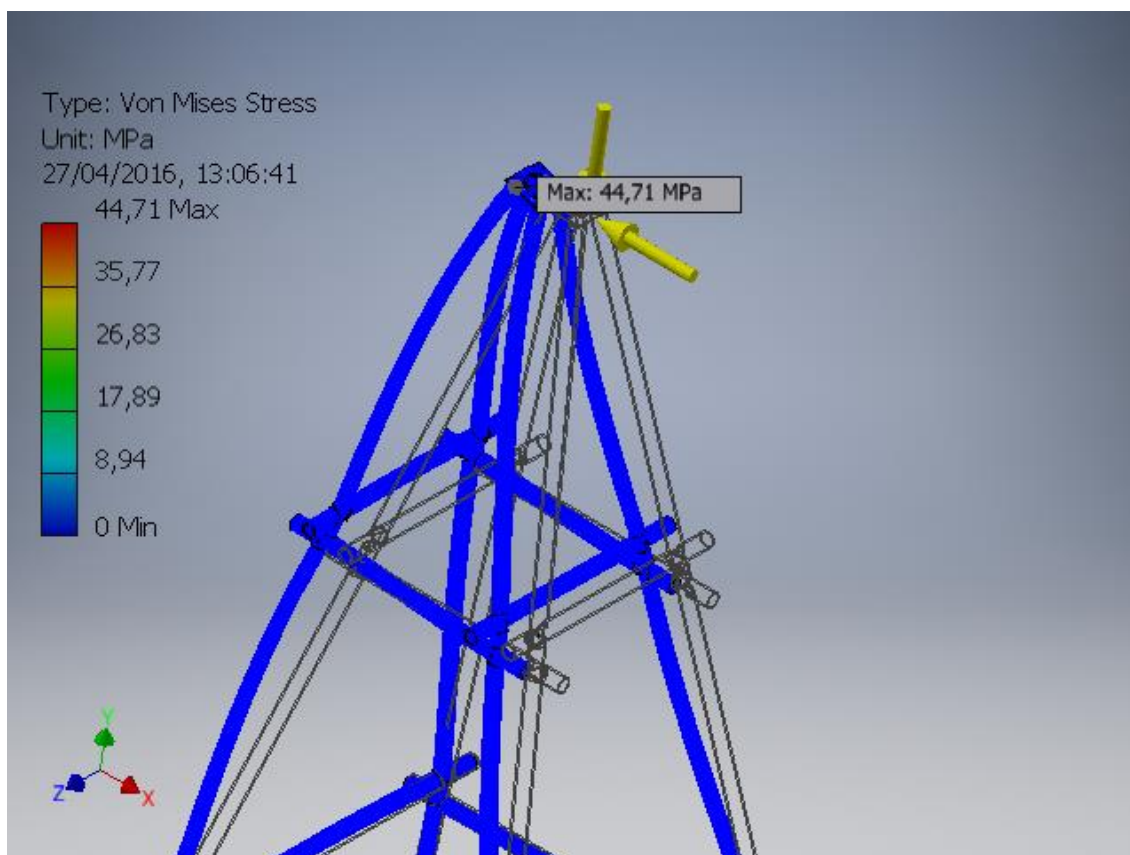


FIGURA 2.13: ESFUERZO DE VON MISES

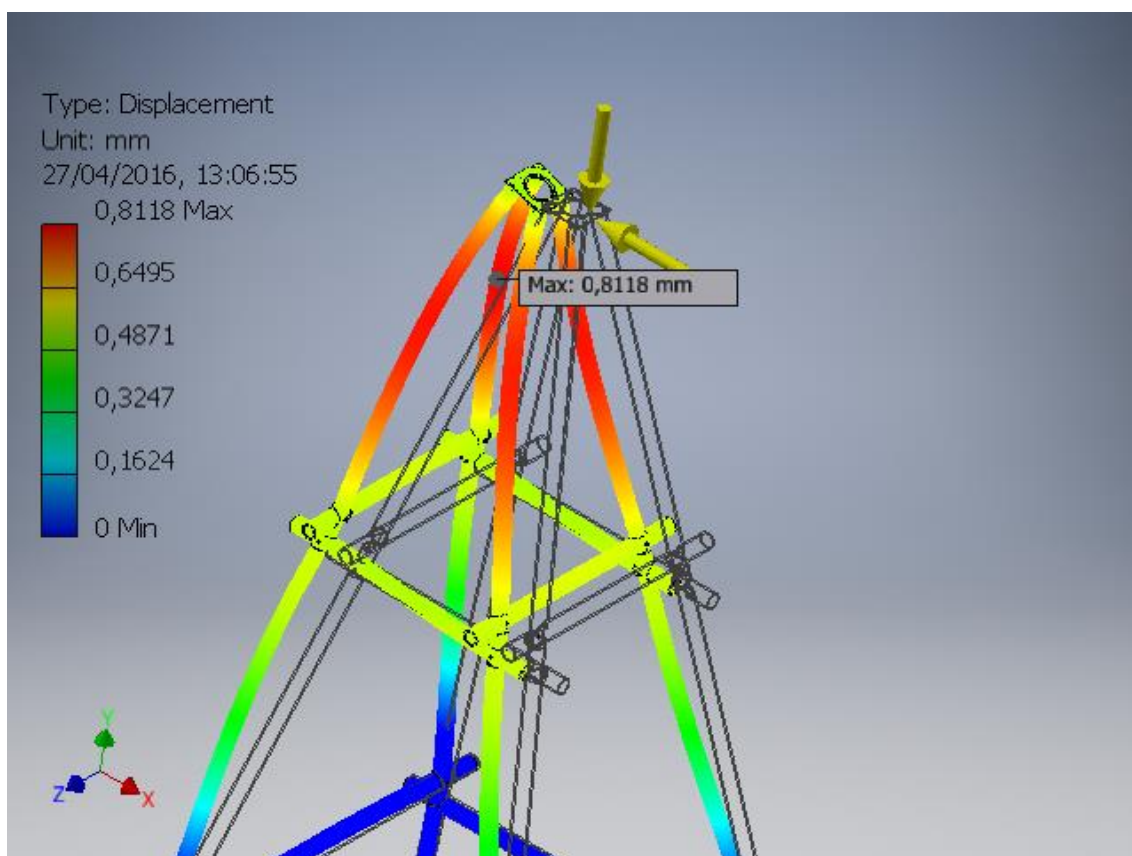
En la [figura 2.13](#) se puede observar el esfuerzo de Von Mises, que es uno de los criterios de falla que más se toma en cuenta en el diseño. De forma simplificada se puede decir, si el esfuerzo de Von Mises es menor al de fluencia no se va a producir una falla. En este caso el esfuerzo máximo de Von Mises es de 44,71 [MPa], que es menor al esfuerzo de fluencia del material que es de 109 [MPa] por lo que se puede concluir que el material no sale de la zona plástica y no va a fallar. El punto crítico se puede observar

donde el material se ve más deformado, es decir en la viga trasera a la izquierda de la figura frontal justo debajo de la tapa.

Con el esfuerzo de Von Mises se puede calcular el factor de seguridad utilizando la ecuación (2.19)

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma'} = \frac{109}{44,71} = 2,43 \quad (2.19)$$

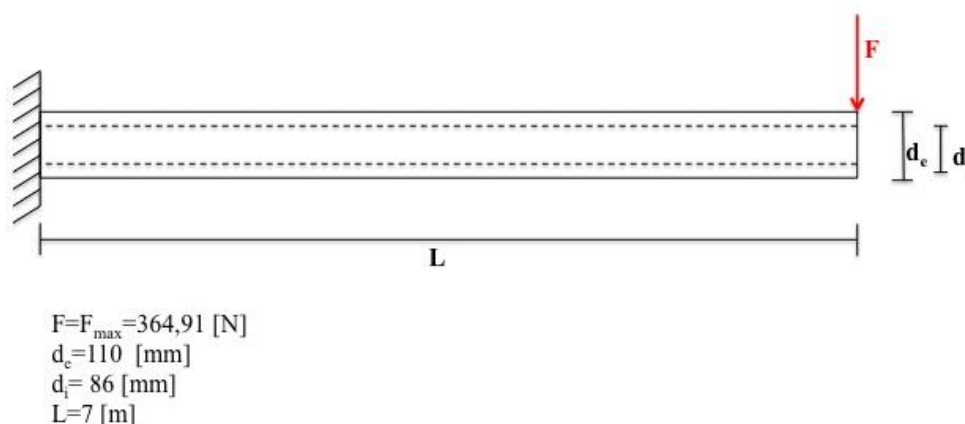
Este factor demuestra que no va a existir ninguna falla por la aplicación de las dos cargas estáticas en el sistema.



**FIGURA 2.14: DESPLAZAMIENTO DE LA ESTRUCTURA**

En la figura 2.14 se puede observar el desplazamiento máximo al cual es sometida la estructura diseñada. Hay que tomar en cuenta que visualmente ese desplazamiento no es el real ya que el software realiza un desplazamiento con una escala aumentada para que se pueda apreciar hacia donde se desplazaría la estructura cuando se somete a la fuerza. Cuando se toma en cuenta que el valor del desplazamiento es menor a 0,8118 [mm] es evidente que este valor es prácticamente insignificante. La caña guadua es un material sumamente flexible y un desplazamiento de esta magnitud no presenta ninguna amenaza para la estructura.

Este análisis solo comprueba que no va a existir falla por cargas estáticas y al ser este un sistema que tiene rotación y fuerzas que fluctúan. Es por esto que se realiza también un análisis de fatiga de la estructura en el punto crítico mencionado anteriormente. Para esto se hace una simplificación del sistema como si esta fuera un tubo empotrado con una carga axial en su lado más alejado del empotramiento como se señala en la figura 2.15.



**FIGURA 2.15: SIMPLIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA PARA ANÁLISIS DE FATIGA**

En la [figura 2.15](#) se detallan las dimensiones de la viga de la torre que se tiene y que se utiliza para el cálculo de fatiga. El análisis de fatiga se realiza en función de los momentos que actúan sobre la pieza y al encontrar el factor de seguridad con la ecuación (2.20), del criterio de Goodman, se puede determinar si la estructura va a fallar (Shigley, 1989).

$$n = \frac{1}{\left(\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right)} \quad (2.20)$$

donde  $n$  es el factor de seguridad,  $\sigma_a$  es el esfuerzo amplitud [MPa],  $\sigma_m$  es el esfuerzo medio [MPa],  $S_e$  es el límite de resistencia de la ecuación (2.12) [MPa] y  $S_{ut}$  es el esfuerzo último del material [MPa].

Lo primero que se encuentra es el límite de resistencia de muestra  $S_e'$  pero al no tener esta información de la caña guadua se utiliza el mismo procedimiento que en los metales y se asume que  $S_e' = 0,5S_{ut}$ . Se encuentran todos los valores de los coeficientes de la ecuación (2.12) y se calcula el límite de resistencia.

$$S_e' = 0,5S_{ut} = 0,5(400 \text{ MPa}) = 200 \text{ [MPa]}$$

$$k_a = aS_{ut}^b = 272 \cdot (400)^{-0,995} = 0,7$$

$$k_b = 1,51(d)^{-0,157} = 1,51(110)^{-0,157} = 0,7219$$

$k_c = 1$  ya que es flexión,  $k_d = 1$  ya que es a temperatura ambiente,  $k_e = 0,868$  para una confiabilidad de 95 %,  $k_f = 1$  no existe ningún factor misceláneo.

$$S_e = (0,7)(0,7219)1 \cdot 1(0,868) \cdot 1 \cdot 200 \text{ MPa} = 87,72 \text{ [MPa]}$$

Se calcula, a continuación los esfuerzos utilizando la ecuación (2.21).

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (2.21)$$

$$I = \frac{\pi}{64} (d_e^4 - d_i^4)$$

donde  $\sigma$  es el esfuerzo [MPa],  $M$  es el momento [Nm],  $c$  es la distancia al centro e  $I$  es el momento de inercia [m<sup>4</sup>],  $d_e$  es el diámetro externo y  $d_i$  es el diámetro interno [m].

El momento se obtiene multiplicando la fuerza  $F$  por la longitud  $L$ , y existen dos valores uno máximo cuando  $F=364,91$  [N] y un valor mínimo cuando  $F=0$  [N], que se da cuando no hay viento. De la misma forma existe un valor mínimo y uno máximo del esfuerzo respecto a cada una de estas fuerzas, con los valores de  $\sigma_{max} = 24,78$  [MPa] y  $\sigma_{min} = 0$  [MPa], que representa nuevamente el esfuerzo cuando no hay viento. Los valores de  $\sigma_a$  y  $\sigma_m$  se calculan con la ecuaciones (2.22).

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}; \sigma_m = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.22)$$

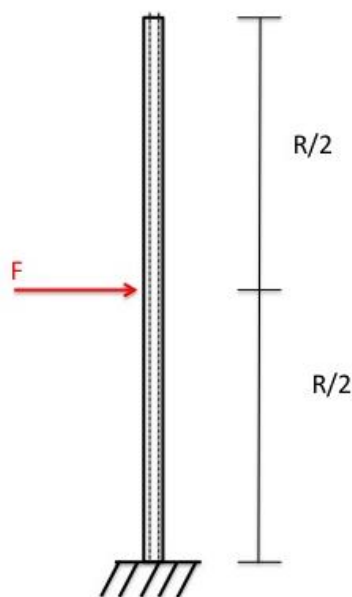
En este caso:

$$\sigma_a = \sigma_m = 12,39[\text{MPa}]$$

Con todos los valores se puede calcular el valor del factor de seguridad y en este caso se obtiene que  $n=5,8$  por lo que se puede concluir que no va a existir ningún tipo de falla por fatiga. Esto nos demuestra que la torre si va resistir todo tipo de esfuerzo al que va a ser sometido tanto de fatiga como de cargas puntuales por lo que no existe problema alguno es construir la torre con este diseño y estos materiales.

#### 2.4.5 Diseño de las aspas del rotor.

Para las aspas del rotor se utilizando tuberías de acero al carbón de la norma ASTM A500 fabricados pos Dishierro y tela de uso para embarcaciones. Las aspas, al igual que la torre se someten a fatiga, por las variaciones en la velocidad del viento. Es por esto que se hace un análisis de fatiga similar al de la sección 2.4.3 del diseño de la torre. La diferencia es que para este análisis se requiere encontrar el diámetro de la tubería que de un factor de seguridad mayor a 1 para saber qué tipo de tubería utilizar. En la [figura 2.16](#) se presenta el diagrama de las fuerzas que actúan en este sistema. Como se ve en la figura la única fuerza que actúa sobre el rotor es la de arrastre que actúa en el centro del eje.



**FIGURA 2.16: DIAGRAMA DEL EFECTO DE LA FUERZA EN LAS ASPAS Y DIAGRAMA DE FUERZAS**

Existen dos tipos de tuberías de esta marca que pueden servir para esta función que son la tubería mecánica (Tm) y la tubería estructural (Te). Las dos son tuberías redondas del mismo material pero con diferentes diámetros y espesores por lo que se hace el análisis para elegir el diámetro que mejor se ajuste a esta aplicación.

Las propiedades mecánicas de este material son las mismas con  $S_y=230$  [MPa] y  $S_{ut}=310$  [MPa], estas propiedades se encuentran en los manuales de la norma ASTM. Al no saber que diámetro es el que se va a utilizar se hace los cálculos con los tubos mecánicos de diámetros 1/2, 5/8, 3/4 y 1 [in] y los tubos estructurales de 5/8, 3/4 y 1 [in]. En la [tabla 2.11](#) se presenta las dimensiones de los diferentes tubos que se van a utilizar para los cálculos y los resultados de aplicar estos valores en las ecuaciones (2.20),(2.21) y (2.22).

Nombre	$d_e$ [m]	$d_i$ [m]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_m=\sigma_a$ [MPa]	n
Tm 1/2	0.0127	0.0109	830.61	415.30	0.25
Tm5/8	0.01588	0.01368	432.55	216.27	0.48
Tm 3/4	0.01905	0.01685	290.19	145.09	0.72
Tm 1	0.0254	0.0232	156.22	78.110	1.33
Te 5/8	0.01588	0.01288	342.59	171.29	0.61
Te 3/4	0.01905	0.01605	226.88	113.44	0.92
Te 1	0.0254	0.0224	120.18	60.09	1.73

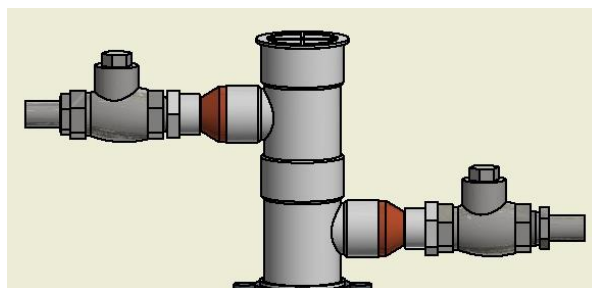
**Tabla 2.11: Calculo de factor de seguridad para diferentes tuberías**

Con los resultados de la [tabla 2.11](#) se ve que las únicas tuberías que se obtiene con un factor de seguridad mayor a 1 son las tuberías de 1 [in] tanto en tubería mecánica como en tubería estructural por lo que se utiliza el criterio del costo para tomar esta decisión.

La tubería mecánica tiene un costo de \$ 4,11 por un tubo de seis metros mientras que la tubería estructural tiene un costo de \$4,64 por un tubo de la misma longitud. Es por esto que para las aspas del rotor se elige la tubería mecánica de una pulgada de la marca Dishierro.

#### 2.4.6 Diseño de la bomba.

El cuerpo de la bomba se va a construir con dos tees de PVC de diámetro de 75 [mm] ya que este es un diámetro que se consigue fácilmente en ferreterías, pero se requiere saber la altura necesaria, es decir la carrera del pistón para que se obtenga el caudal deseado para el sistema. En la [figura 2.17](#) se presenta el modelo que se va a utilizar para la bomba.



**FIGURA 2.17: ESQUEMA DE LA BOMBA**

Se sabe que el caudal que se tiene es  $Q=2,083 \times 10^{-4}$  [m<sup>3</sup>/s] y se obtiene la velocidad de rotación del eje despejando  $\omega$  de la ecuación (1.8) de la velocidad típica. Cada revolución equivale a dos carreras de la bomba por lo que con estos valores se obtiene el volumen que debe tener el cuerpo de la bomba.

$$V = \frac{Q}{w} = \frac{Qr}{\lambda v} = 6,525 \times 10^{-4} \text{ [m}^3\text{]}$$

donde  $V$  es el volumen del cuerpo de la bomba [m<sup>3</sup>],  $Q$  es el caudal [m<sup>3</sup>/s],  $r$  es el radio del rotor,  $\lambda$  es la velocidad típica y  $v$  es la velocidad del viento [m/s].

Ya que se sabe el diámetro del cuerpo de la bomba y se sabe que es un cilindro se puede despejar la altura que debe tener, es decir la carrera de la bomba.

$$h = \frac{4V}{\pi d^2} = 0,147 \text{ [m]} \approx 148 \text{ [mm]}$$

De esta forma se determina el volumen y la altura que debe tener el cuerpo de la bomba al igual que la carrera del pistón esto nos sirve para el diseño de la biela manivela.

#### 2.4.7 Determinación de la velocidad mínimo de funcionamiento.

La altura de la bomba determina también las dimensiones de la manivela. Esto se debe a que la carrera que debe recorrer la bomba es igual a dos veces la distancia desde el centro de la manivela hasta el lugar a donde se conecta con el eje conector. Con este valor se calcula el torque mínimo que requiere el eje para arrancar la bomba y la velocidad mínima del viento que se requiere. En la [figura 2.18](#) se puede ver las fuerzas que actúan en este punto.

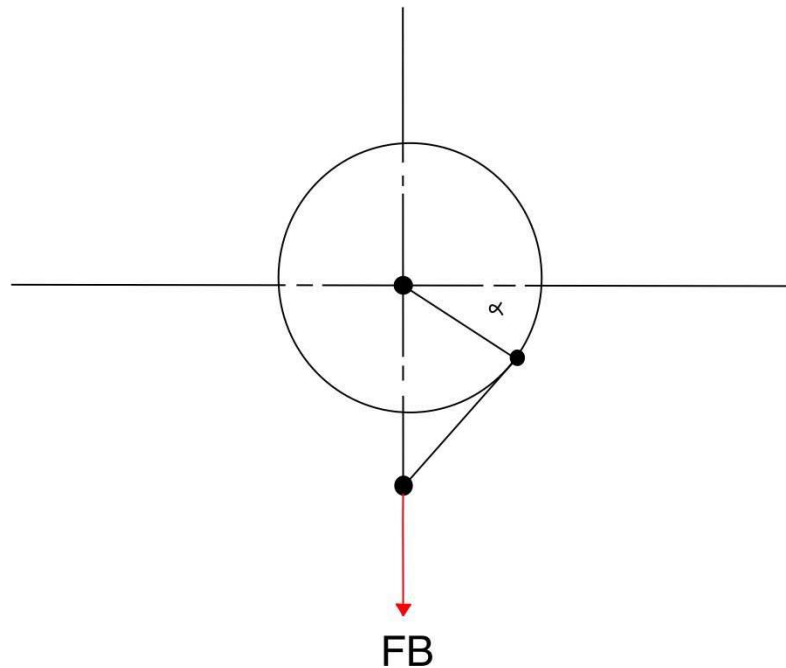


FIGURA 2.18: FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE LA MANIVELA

Sobre la manivela la principal fuerza que se debe superar para accionar la bomba es la fuerza que hace el pistón, la cual depende de la presión que se debe generar en la bomba para elevar el agua hasta la entrada de la bomba. Como se describió en la sección (2.2), la diferencia máxima de altura hasta la entrada de la bomba es de 6,7 [m] y esta es la altura con la cual se va a calcular el cambio de presión. Con la ecuación 2.23 se puede calcular esta presión, tomando en cuenta de todas formas las pérdidas.

$$\Delta P = \rho g(\Delta z + l)$$

donde  $\Delta P$  es el cambio de presión [Pa],  $\rho$  es la densidad del agua [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $g$  es la constante gravitacional [ $\text{m}/\text{s}^2$ ],  $\Delta z$  es el cambio de altura [m] y  $l$  son las pérdidas [m].

$$\Delta P = (998,16)(9,8)(6,7 + 0,47)$$

$$\Delta P = 70,14 \text{ kPa}$$

La presión es equivalente a fuerza sobre área así que la presión de la bomba multiplicada por el área del pistón nos da la fuerza que actúa sobre la manivela.

$$F_b = P \cdot A = (70,14 \times 10^3 \text{ Pa}) \left( \frac{\pi(0,069 \text{ m})^2}{4} \right) = 262,26 \text{ N}$$

donde  $F_b$  es la fuerza ejercida por el cambio de presión en la bomba [N],  $P$  es el cambio de presión en la bomba [Pa] y  $A$  es el área del pistón [ $\text{m}^2$ ].

Con la fuerza que actúa sobre la manivela se puede calcular el torque que requiere generar el eje para accionar la bomba, el torque es equivalente a la fuerza  $F_b$  multiplicada por la distancia entre el centro del eje principal y la unión con el eje conector.

$$T = F_b x = 262,2 \left( \frac{0,148}{2} \right) = 19,41 \text{ [Nm]}$$

donde  $T$  es el torque [Nm],  $F_b$  es la fuerza ejercida por el cambio de presión en la bomba [N] y  $x$  es la distancia entre el centro del eje principal y la unión con el eje conector [m].

Con el valor del torque se puede finalmente despejar la velocidad mínima de arranque de la bomba reemplazando el torque en la ecuación (1.6)

$$v = \left( \frac{2T}{\rho \pi r^3 c_t} \right)^{(1/2)}$$

$$v = \left( \frac{219,41}{(1,15)\pi(1,675)^3 0,3} \right)^{(1/2)} = 2,76 \text{ [m/s]}$$

La velocidad mínima que se necesita para arrancar la bomba es de 2,76 [m/s] y sabiendo que la velocidad promedio de la zona a la que se aplica es de 3,21 [m/s] se puede concluir que el sistema no va a tener problemas de arranque.

#### 2.4.8 Diseño del sistema biela manivela.

El sistema biela manivela va a ser con el mismo modelo del sistema de Van de Ven pero con las especificaciones que se requieren para suministrar la carrera necesaria para la bomba. La mitad de la carrera se define con la distancia desde el centro del eje en la manivela hasta el centro del eje donde se conectan la biela con el eje conector. Para saber si el sistema va a aguantar el esfuerzo se hace un análisis en el elemento crítico que es la unión entre la manivela y el eje conector. El sistema y el elemento crítico se observan en la [figura 2.19](#).

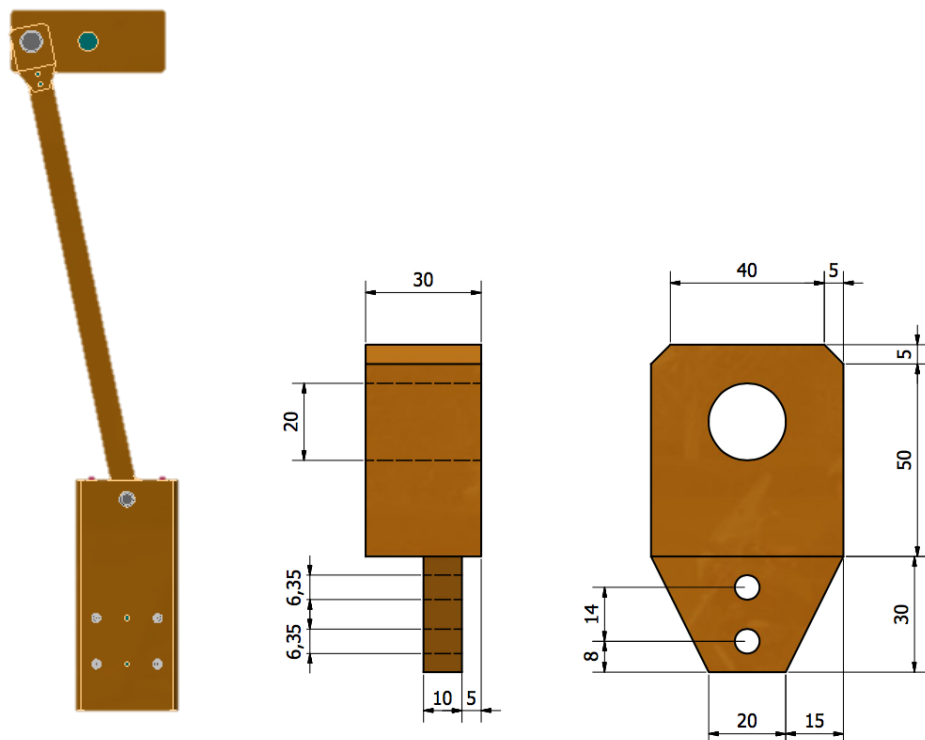




FIGURA 2.19: SISTEMA BIELA MANIVELA Y EL ELEMENTO CRÍTICO DE LA MISMA

En la unión entre la manivela y el eje conector se tiene el área menor de todo el sistema por lo que es aquí donde se calcula el factor de seguridad con la ecuación 2.23.

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma} \quad (2.23)$$

donde  $\eta$  es el factor de seguridad,  $S_y$  es el esfuerzo de fluencia [MPa] y  $\sigma$  es el esfuerzo [MPa].

El esfuerzo en este caso, ya que se trata de compresión/ tracción, se calcula con la ecuación 2.24:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.24)$$

donde  $\sigma$  es el esfuerzo [MPa],  $F$  es la fuerza [N] y  $A$  es el área transversal [m<sup>2</sup>].

La fuerza que actúa sobre el brazo conector se obtiene del cambio de presión que existe en la bomba y del peso de eje conector. La presión es equivalente a fuerza sobre área así que la presión de la bomba multiplicada por el área del pistón nos da la fuerza que actúa sobre el brazo conector del sistema biela manivela.

$$F_b = P \cdot A = (161,5 \times 10^3 \text{ Pa}) \left( \frac{\pi(0,069 \text{ m})^2}{4} \right) = 603,89 \text{ N}$$

donde  $F_b$  es la fuerza ejercida por el cambio de presión en la bomba [N],  $P$  es el cambio de presión en la bomba [Pa] y  $A$  es el área del pistón [m<sup>2</sup>].

Para calcular la fuerza total que actúa sobre el brazo conector se debe sumar a la fuerza ejercida por la bomba el peso del eje conector

$$F_T = F_b + W_e = 603,89 \text{ N} + \left( 3,7 \text{ kg} \cdot \frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2} \right) = 640,19 \text{ [N]}$$

Finalmente se calcula el esfuerzo en el elemento crítico que tiene un área mínima de  $5 \times 10^{-4}$  [m<sup>2</sup>].

$$\sigma = \frac{640,19 \text{ N}}{5 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 1,28 \text{ [MPa]}$$

La madera del sistema biela manivela es colorado que tiene un esfuerzo de fluencia menor en compresión que en tensión con un valor de  $S_y=4,2$  [MPa] (Green, 1999). Con esta propiedad del material se calcula finalmente el factor de seguridad:

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{4,2}{1,28} = 3,28$$

Este valor del factor de seguridad nos asegura que no va a existir fractura en el elemento crítico del sistema y por ende en toda la biela manivela. También, se va a tener

un esfuerzo de fatiga en este componente ya que la carga que actúa sobre el componente va a variar en tensión y compresión. Por este motivo se debe hacer un análisis de fatiga para comprobar que no falle la biela manivela.

Para hacer el análisis de fatiga de este componente se debe realizar un procedimiento similar al de la sección 2.4.4 en la cual al no tener un valor para el valor  $S_e$  de la madera se tiene que asumir que es metal y que  $S_e' = S_{ut}$ . También, se asume que el esfuerzo que sufre está variando entre tensión y compresión con los mismos valores pero con signo inverso por lo que  $\sigma_a = 1,28$  [MPa] y  $\sigma_m = 0$ . Para poder calcular el factor de seguridad, se utiliza el criterio de Goodman, con la ecuación (2.20) se debe encontrar el límite de resistencia de la ecuación (2.12). A continuación se presentan los cálculos para el factor de seguridad. El esfuerzo último del colorado es  $S_{ut} = 51$  [MPa] (Green, 1999).

$$S_e' = 0,5S_{ut} = 0,5(51\text{Mpa}) = 25,5 \text{ [MPa]}$$

$$S_e = 25,5\text{MPa} (0,868) = 22,134 \text{ [MPa]}$$

$$n = \frac{1}{\left(\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1,28}{22,134} + \frac{0}{51}\right)} = 17,29$$

El factor de seguridad para fatiga es de 17,29 por lo que por fatiga tampoco va a fallar el sistema biela manivela. Con este cálculo concluye la etapa de diseño y se puede pasar al siguiente capítulo que es el manual de construcción.

## CAPÍTULO 3: MANUAL DE CONSTRUCCIÓN

En este Capítulo del trabajo de titulación se va a describir los pasos a seguir para la construcción del molino para extracción de agua. En la figura 3.1 se presenta una vista del molino de viento con todos sus componentes ya armado.

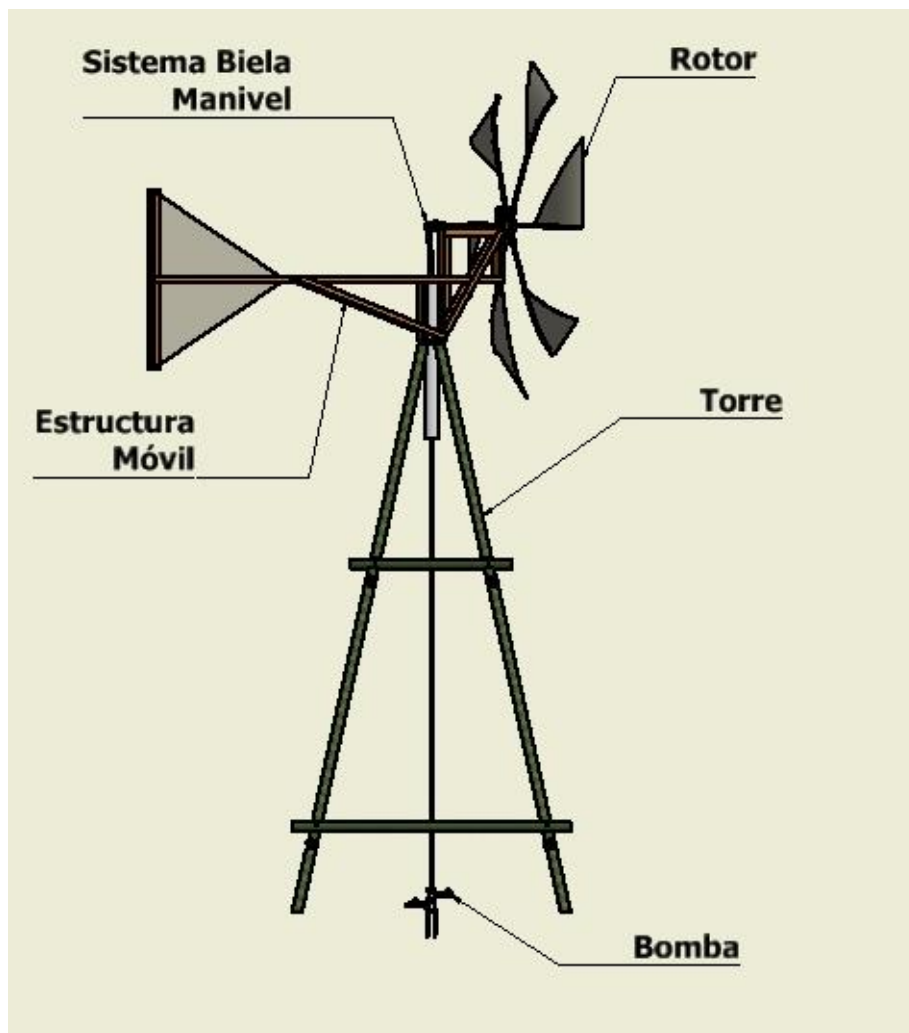


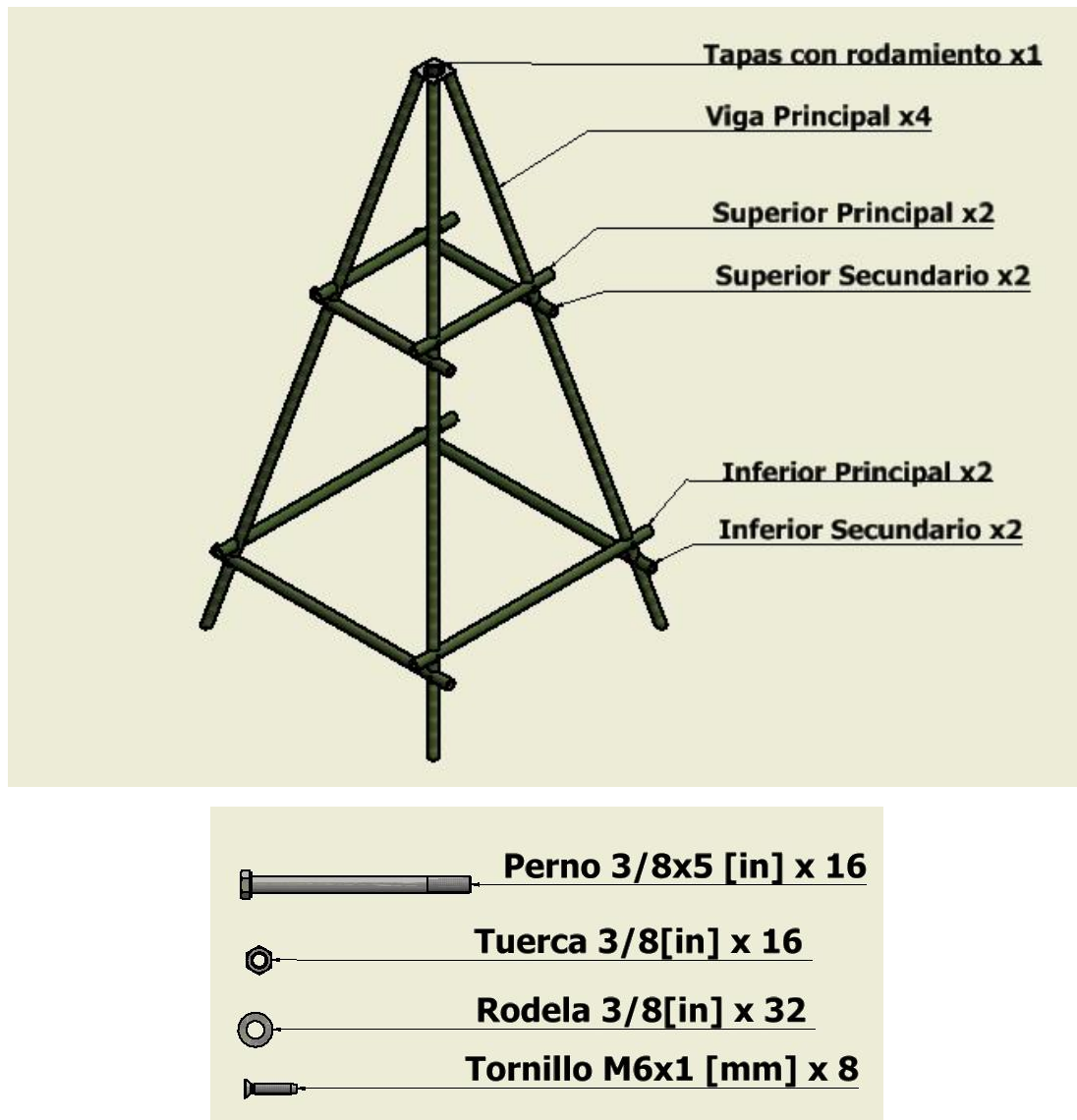
FIGURA 3.1: ENSAMBLE TOTAL DEL MOLINO DE EXTRACCIÓN DE AGUA

La construcción del sistema se hace en cinco partes. Primero se ensambla la torre, a continuación la estructura móvil, después el rotor, el sistema biela manivela y finalmente la bomba. En el capítulo 3 se describen tanto las dimensiones de cada una de las partes así como los pasos a seguir para realizar la construcción de las partes individuales del sistema y después del sistema completo.

### 3.1 La torre

La torre se construye con caña guadua y pernos 3/8x5 [in] además de la tapa que cuenta con el rodamiento y sus respectivos tornillos M6x40 [mm]. La construcción de la torre se realiza en cuatro pasos que se van a detallar a continuación. Antes de explicar los pasos a seguir se va a presentar una figura de la torre ensamblada con todos sus

componentes y las dimensiones de los mismos para una mejor comprensión del proceso en la [figura 3.2](#).



**FIGURA 3.2: COMPONENTES DE LA TORRE**

La torre consiste de 4 vigas principales, 2 superiores principales, 2 superiores secundarias, 2 inferiores principales, dos inferiores secundarias y una tapa con el rodamiento. Todas las uniones de la torre se realizan con los pernos y deben llevar rodela para proteger la madera, mientras que la tapa metálica se une con los tornillos. En las [figuras 3.3-3.8](#) se presentan las dimensiones de las piezas de la torre.

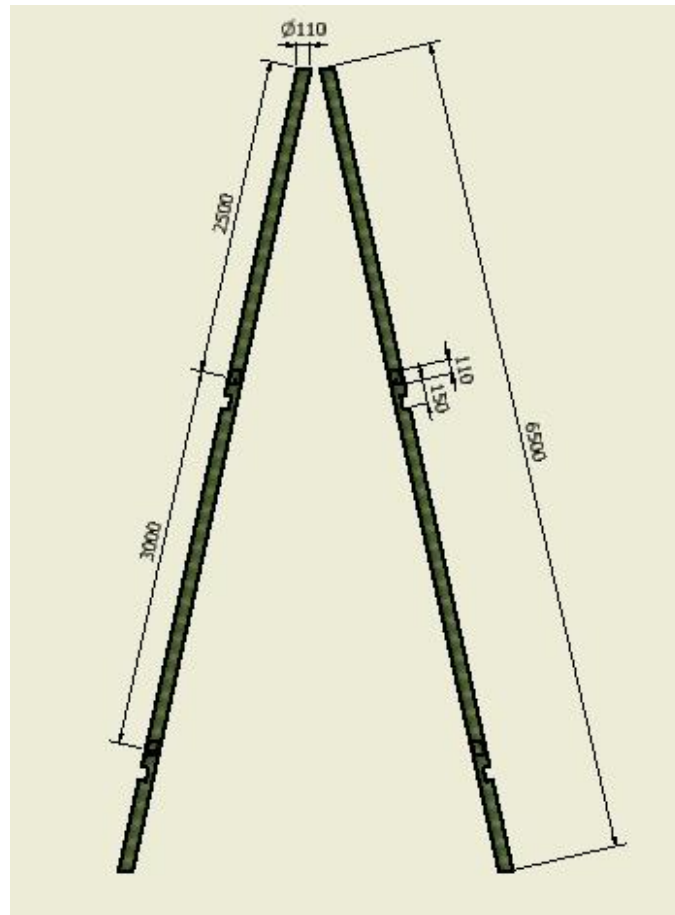


FIGURA 3.3: DIMENSIONES VIGAS PRINCIPALES

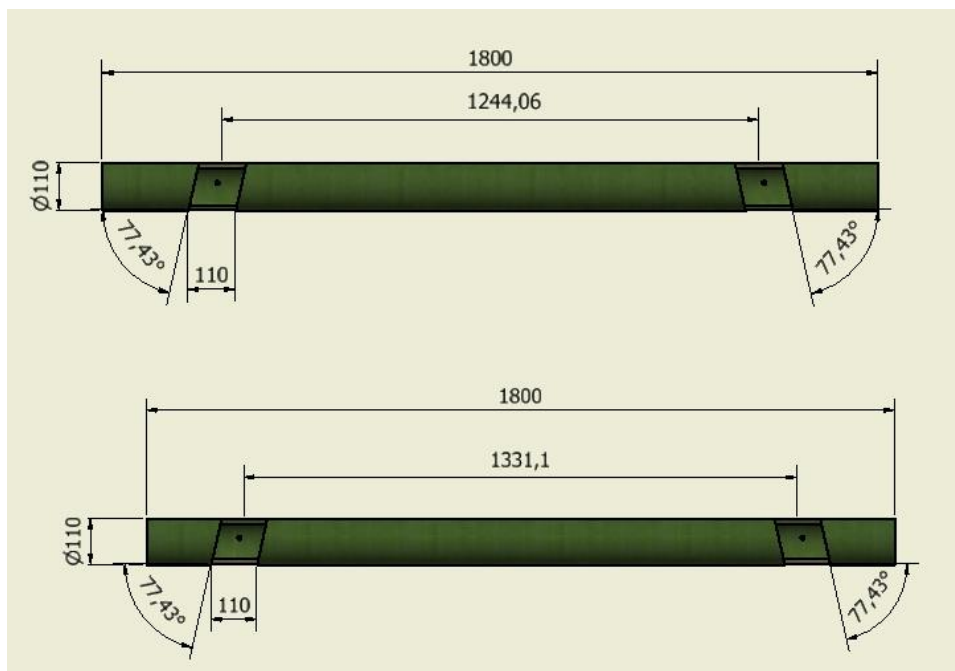
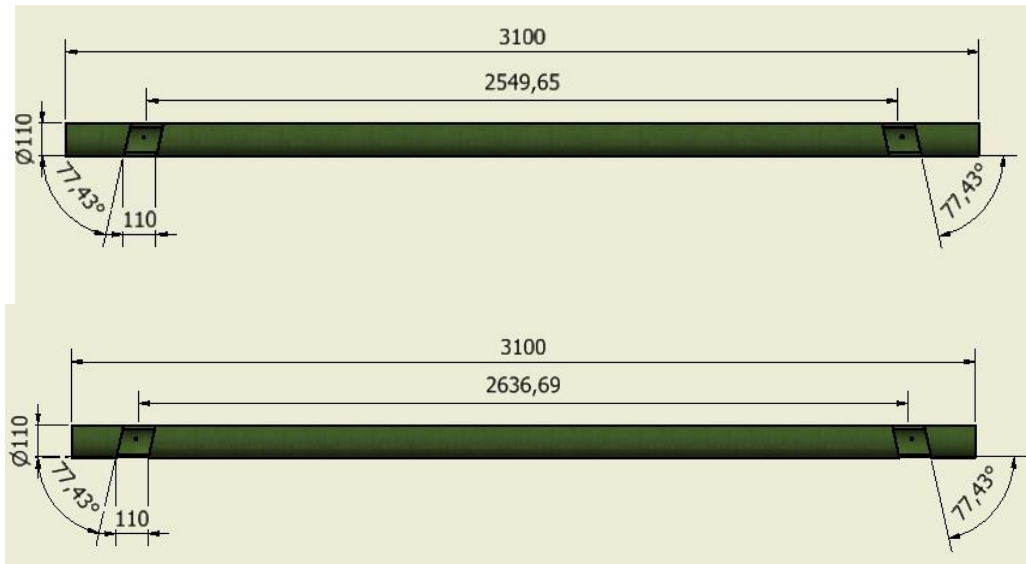
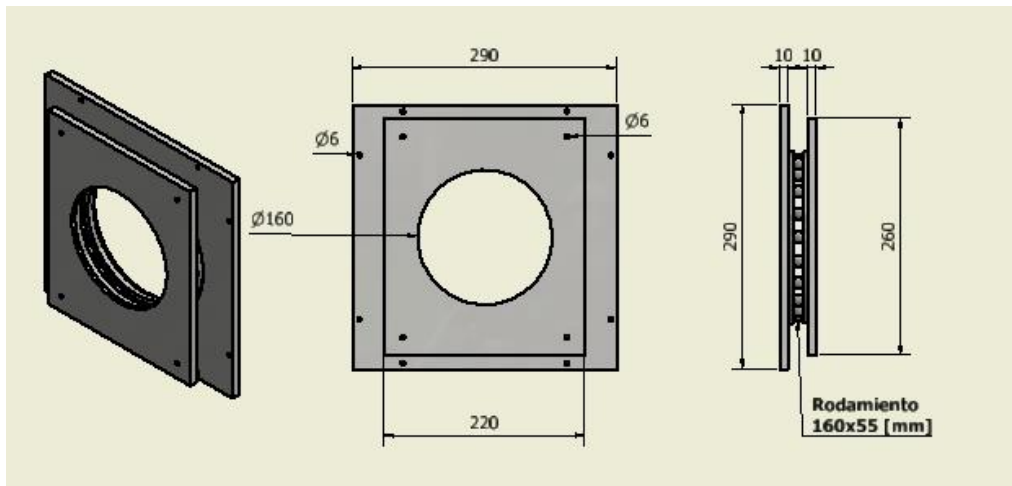


FIGURA 3.4: DIMENSIONES SUPERIOR PRINCIPAL (ARRIBA) Y SUPERIOR SECUNDARIO (ABAJO)



**FIGURA 3.5: DIMENSIONES INFERIOR PRINCIPAL (ARRIBA) E INFERIOR SECUNDARIO (ABAJO)**



**FIGURA 3.6 DIMENSIONES DE LA TAPA CON EL RODAMIENTO**

Con las dimensiones de cada una de las partes se continúa con los pasos de construcción de la torre del molino. El primer paso se grafica en la [figura 3.7](#) y se explica después de la misma.

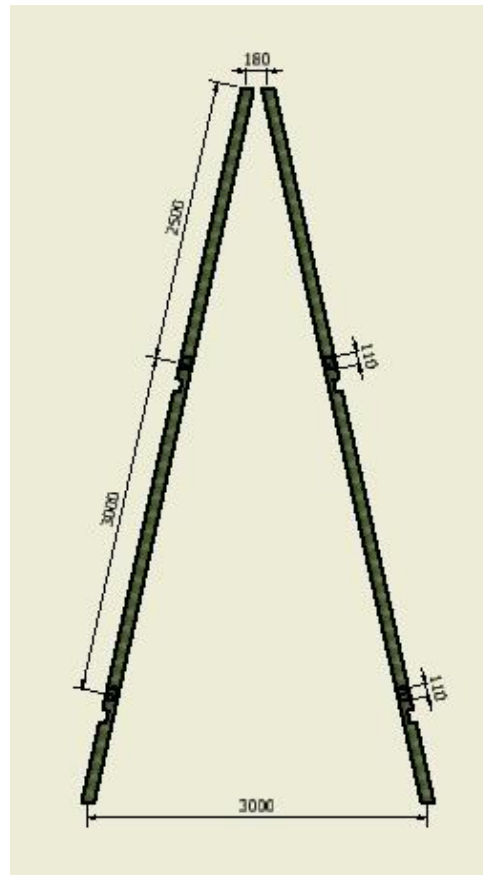


FIGURA 3.7: PASO 1 DE CONSTRUCCIÓN DE LA TORRE

Lo primero que se debe hacer es poner las dos vigas principales a una distancia entre centros en la parte inferior de 3 [m] y en la parte superior de 18 [cm]. A 2,5 [m] de la parte superior a lo largo de las vigas se deben hacer las incisiones como se detalla en la [figura 3.8](#) para la viga superior principal.

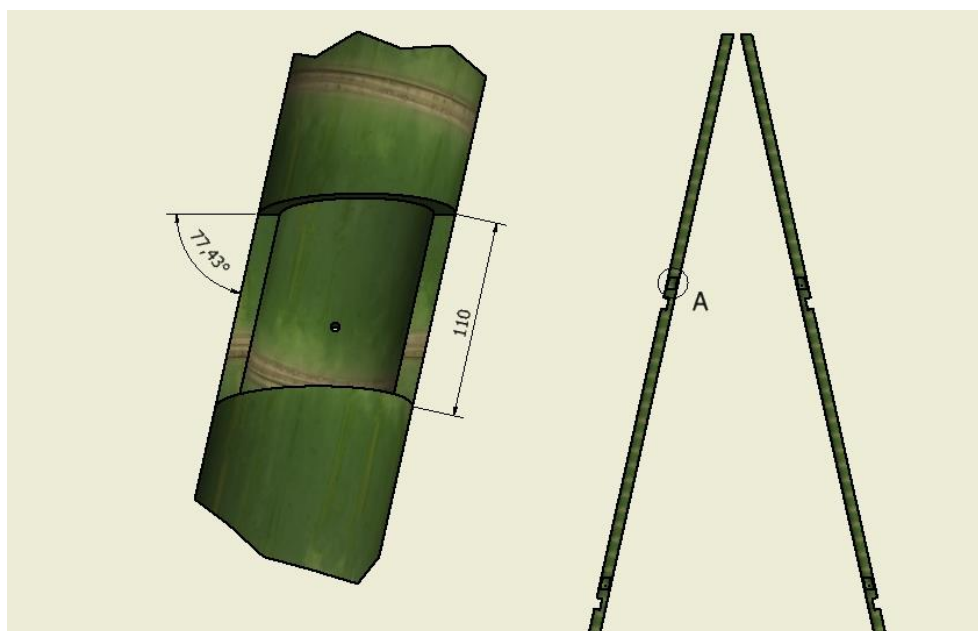
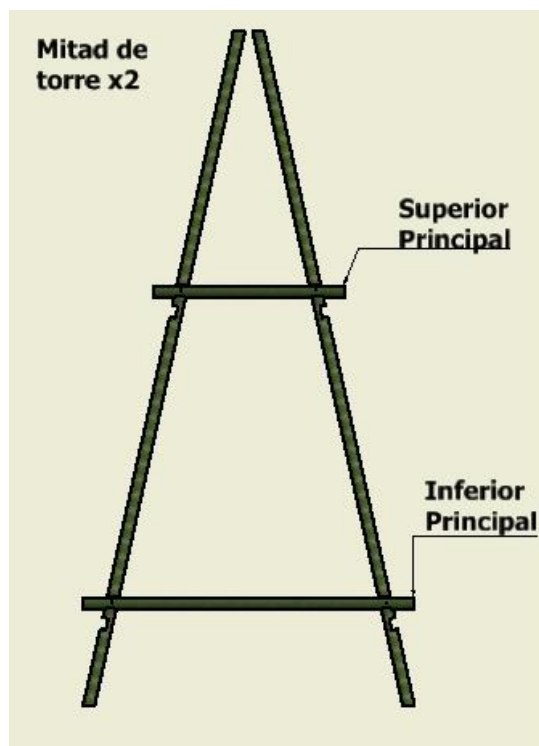


FIGURA 3.8 DETALLE DEL CORTE PARA LA VIGA SUPERIOR PRINCIPAL

De la misma forma se debe hacer un corte igual a 3 [m] del corte de la superior principal para instalar la inferior principal. Estos cortes se deben hacer en las dos vigas principales en forma de espejo, es decir contarios y se puede continuar con la instalación de la superior e inferior principales como se demuestra en la [figura 3.9](#).



**FIGURA 3.9: PASO 2 DE CONSTRUCCIÓN UNIÓN DE SUPERIOR E INFERIOR PRINCIPALES CON VIGAS PRINCIPALES**

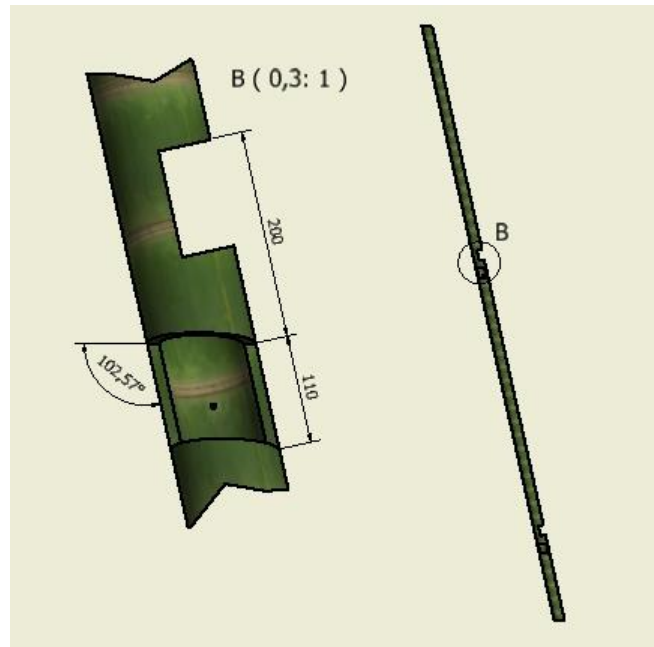
Las vigas superior e inferior se deben juntar mediante los pernos de 3/8 por lo que se tiene que hacer huecos con un taladro y una broca de 3/8 en el medio de los cortes de todas las vigas de forma que la broca atraviese las dos partes. En la [figura 3.10](#) se presenta un detalle de cómo tiene que ir el perno con las arandelas y la tuerca para sujetar las partes.



**FIGURA 3.10: DETALLE DE LA UNIÓN DE LAS VIGAS CON LOS PERNOS**

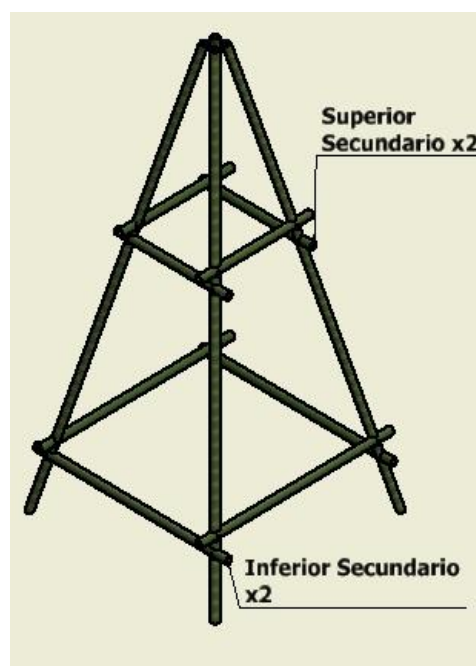


Se tiene que realizar dos mitades como las descritas en la [figura 3.8](#) con las vigas superiores e inferiores unidas a las vigas principales. De esta forma ya se han utilizado las 4 vigas principales, las 2 superiores principales y las 2 inferiores principales. El siguiente paso es unir las dos mitades utilizando las 2 superiores secundarias y las 2 inferiores secundarias. Para esto se debe hacer nuevamente cortes en las vigas principales como se detalla en la [figura 3.11](#).



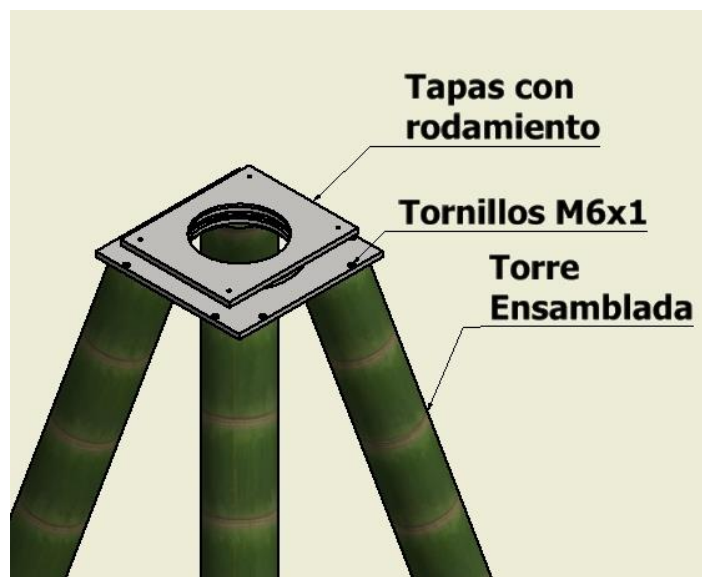
**FIGURA 3.11: DETALLE DE CORTE PARA SECUNDARIAS SUPERIOR E INFERIOR**

Este corte es similar al primero pero se deba hacer a 20 [cm] del corte de las principales y deben ser perpendiculares a los cortes anteriores. Con los cortes realizados por debajo de los 4 cortes anteriores se continúa con el tercer paso de la construcción que es unir las dos mitades para que la torre quede como se ve en la [figura 3.12](#).



**FIGURA 3.12: PASO 3 UNIR LAS DOS MITADES DE LA TORRE**

La unión de las dos mitades se hace sobre el piso sin levantar la torre ya que esto da más estabilidad y simplifica la tarea de unión. La unión se realiza por lados es decir primero se une una de las superior secundarias y una de las inferior secundarias a las torres, se hace los huecos con el taladro y se pone los pernos, rodela y tuercas, para luego de esto poner las segundas al otro lado. Al haber unido las dos mitades se deberían ver igual que en la [figura 3.12](#). El último paso es adjuntar la tapa metálica con el rodamiento como se ve en la [figura 3.13](#).

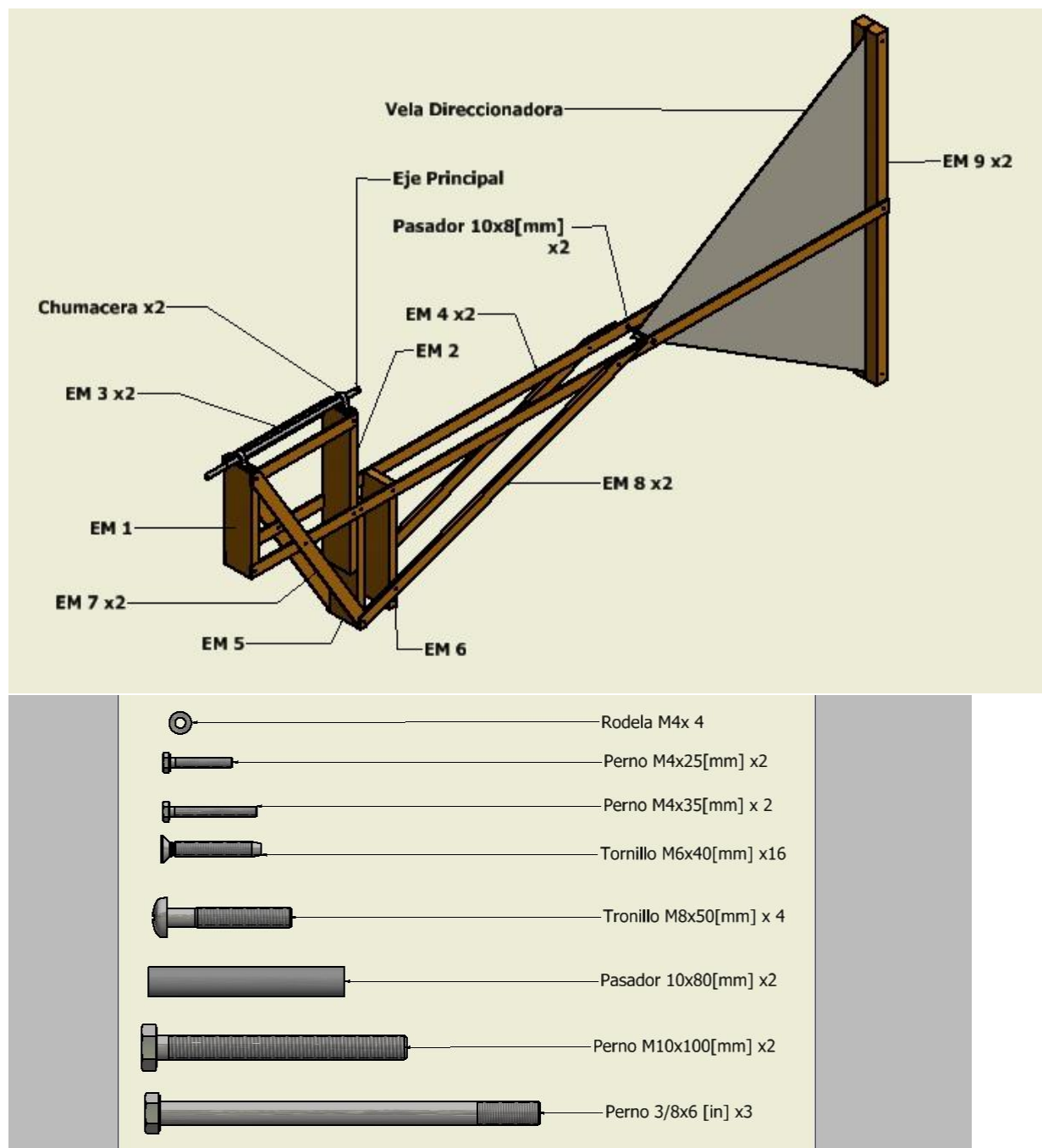


**FIGURA 3.13: PASO 4 UNIR TAPA METÁLICA CON TORRE ENSAMBLADA**

Como se puede ver en la [figura 3.13](#) o en la [figura 3.5](#) la tapa metálica consiste de dos placas unidas por un rodamiento, la más grande tiene 8 huecos mientras la más pequeña cuenta con solamente 4 huecos. La más grande debe unirse a la torre de caña como se ve en la [figura 3.12](#) utilizando los tornillos M6x1, para esto se requiere un destornillador de estrella. Este paso concluye la construcción de la torre y se continúa con la siguiente parte que es la estructura móvil.

### 3.2 Estructura móvil

La estructura móvil se posiciona sobre la torre y sirve para direccionarse en el sentido del viento y para aguantar tanto el rotor con sus aspas, como el sistema biela manivela que transfiere el movimiento hacia la bomba. La estructura móvil se va a construir de madera de colorado, con una vela direccionadora de tela y dos chumaceras que sostienen a los rodamientos y al eje principal como se puede ver en la [figura 3.14](#).



**FIGURA 3.14: ESTRUCTURA MÓVIL Y SUJETADORES QUE SE VA A UTILIZAR**

En las siguientes figuras se van a describir las dimensiones de cada uno de los componentes de la estructura móvil y después de esto se describirá los pasos a seguir para la construcción de la estructura. Los prefijos EM hacen referencia a que son partes de la estructura móvil.

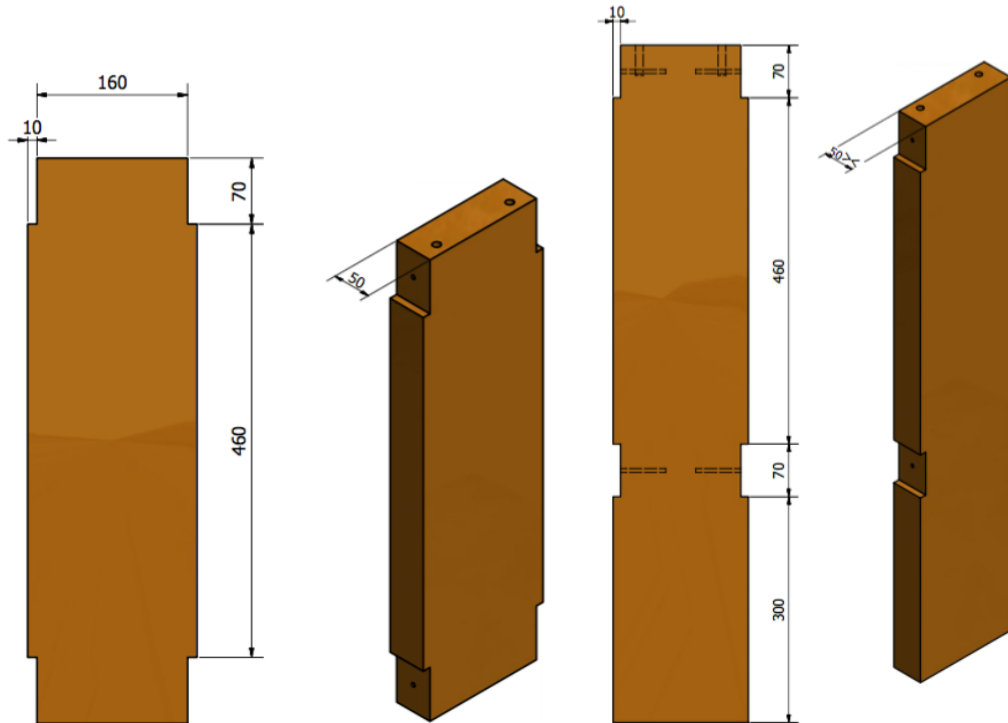


FIGURA 3.15: PARTES EM1 (IZQ.) Y EM2 (DER.) Y SUS DIMENSIONES

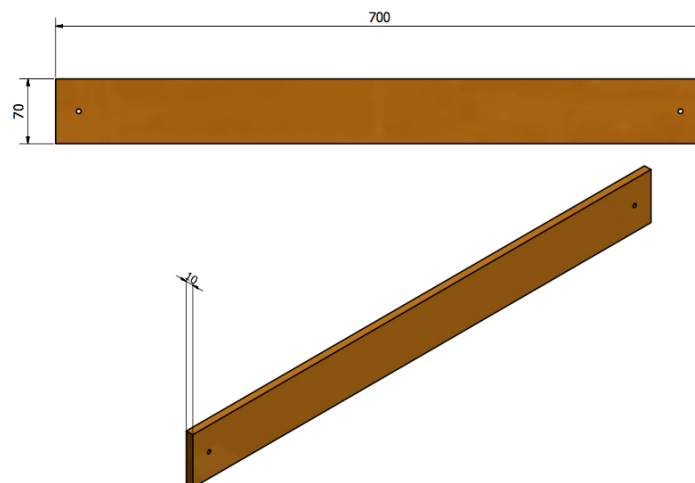


FIGURA 3.16: PARTE EM3 Y SUS DIMENSIONES

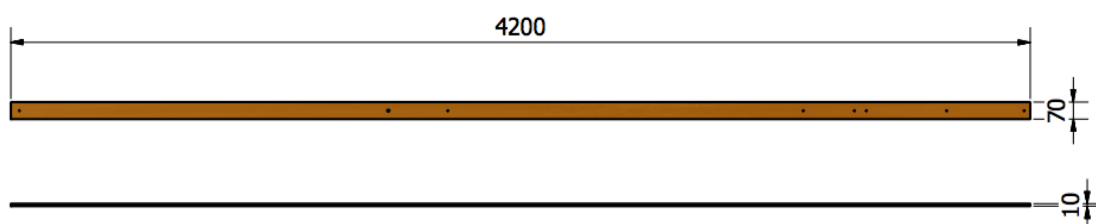


FIGURA 3.17: PARTE EM4 Y SUS DIMENSIONES

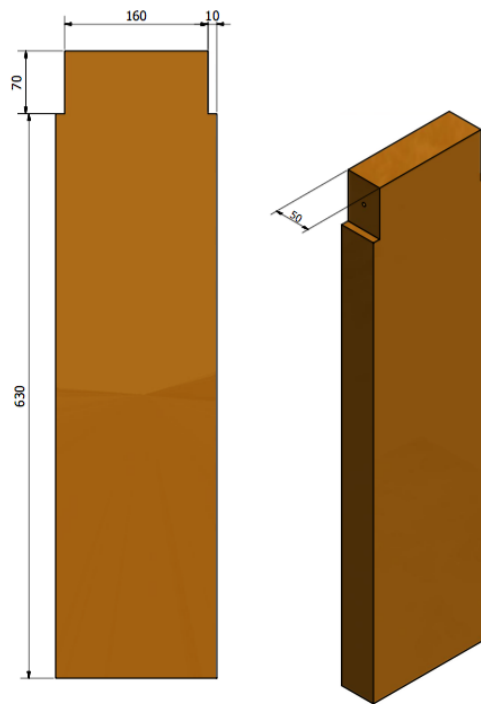


FIGURA: 3.18 PARTES EM5 Y EM6 (MISMAS DIMENSIONES)

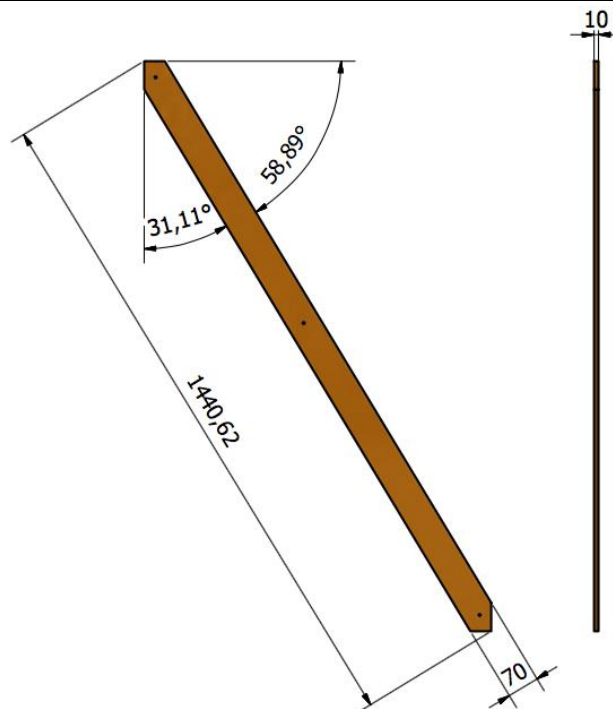
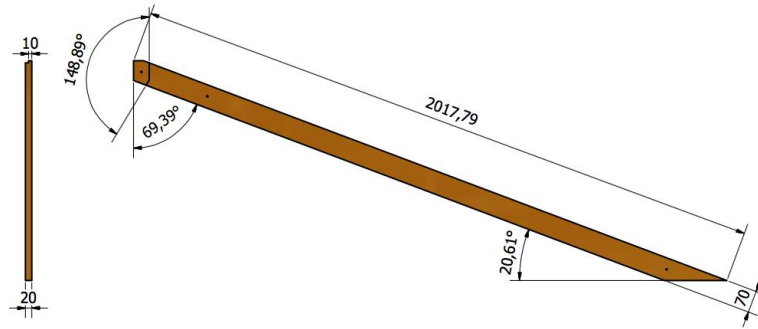
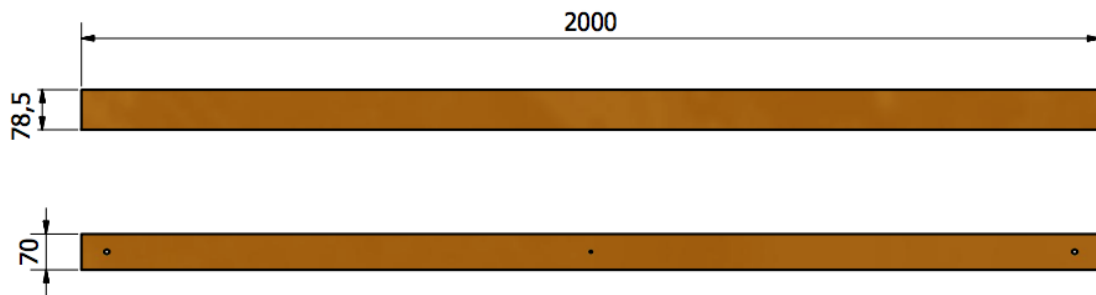


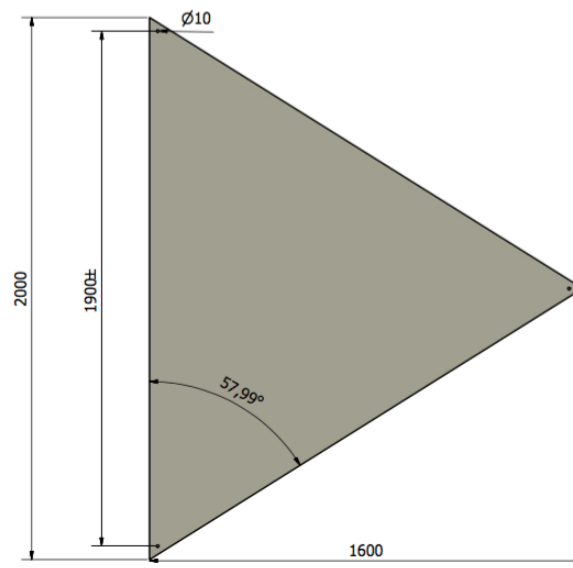
FIGURA 3.19: PARTE EM7 Y SUS DIMENSIONES



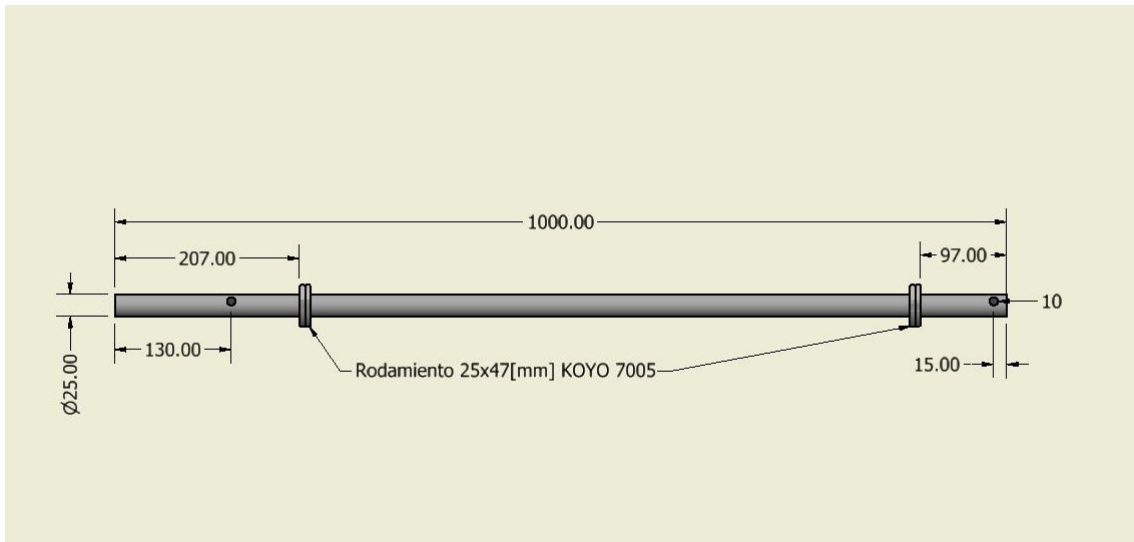
**FIGURA 3.20: PARTE EM8 Y SUS DIMENSIONES**



**FIGURA 3.21: PARTE EM9 Y SUS DIMENSIONES**

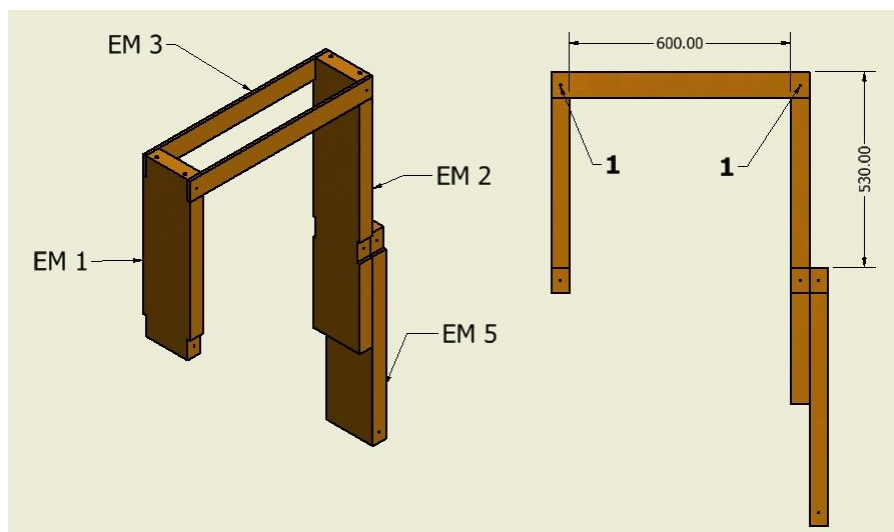


**FIGURA 3.22: DIMENSIONES DE LA VELA DIRECCIONADORA**



**FIGURA 3.23 EJE PRINCIPAL CON RODAMIENTOS**

Con todas las dimensiones y las piezas ya determinadas se puede empezar la construcción, el primer paso consiste en unir las piezas EM1, EM2 y EM3 con los tornillos M6x40. Para el primer paso se utilizan 4 tornillos en donde se señala con un número **1** como se ve en la [figura 3.24](#).



**FIGURA 3.24: PASO 1 DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA EM**

Con estas piezas unidas se pasa al segundo pase que consiste en unir la pieza EM4 con las piezas EM1, EM2 y EM5 utilizando los tornillos M6x40 donde se señala con el número **1** en la [figura 3.25](#).

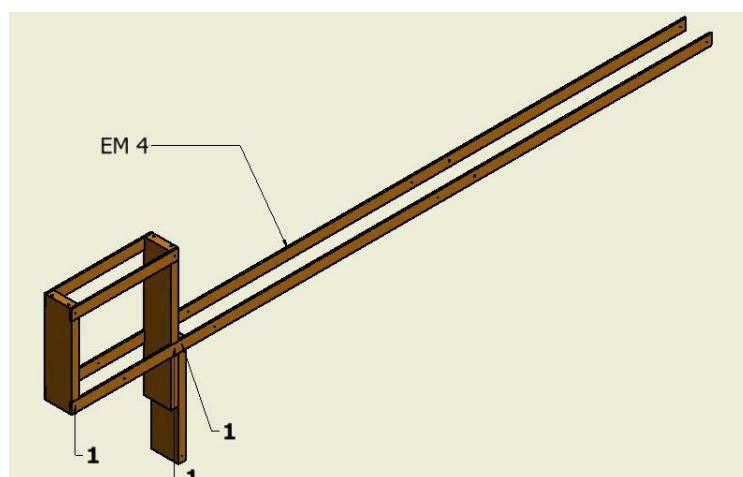


FIGURA 3.25: PASO 2 DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA EM

Tanto en el paso 1 como el 2 se debe realizar las uniones con los tornillos en los dos lados para que se sujeten las dos partes EM4 y las dos EM3. Con la parte EM4 en posición se pasa al paso 3 que consiste de posicionar la parte EM7 en su lugar utilizando tornillos M6x40 en las posiciones marcadas con el número **1** y con los pernos M4x25 en las posiciones marcadas con el número **2** Como se ve en la [figura 3.26](#).

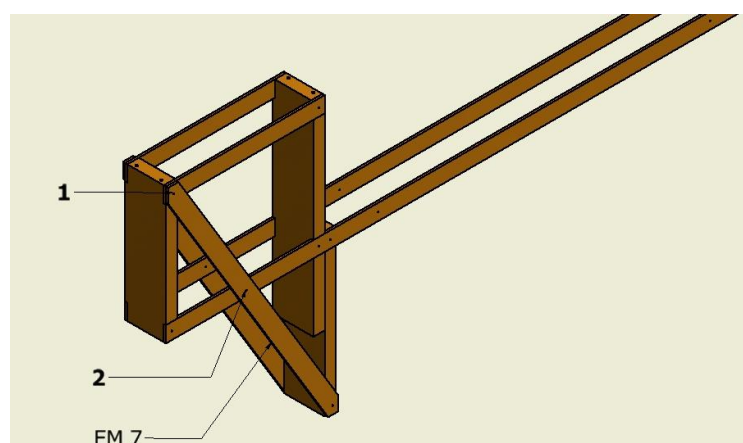


FIGURA 3.26: PASO 3 DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA EM

Se debe recordar que en los puntos marcados con el número **2** se debe poner rodela M4 entre la madera y el perno y también entre la madera y la tuerca M4. El cuarto paso consiste en unir la pieza EM8 con las demás piezas utilizando en la posición marcada con un **1** con los tornillos M6x40 y en la posición marcada con **3** se utiliza el perno M4x35 como se ve en la [figura 3.27](#).



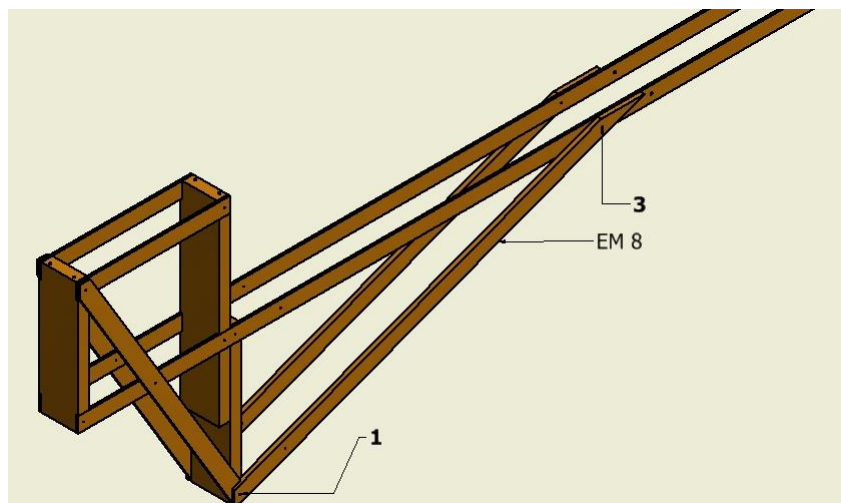


FIGURA 3.27: PASO 4 DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA EM

En la posición marcada con el número **3** se debe poner nuevamente las rodela M4 entre la madera el perno y la tuerca. En el siguiente paso se debe unir la parte EM6 con el resto de la estructura utilizando los tornillos M6x40 en las posiciones marcadas con el numero **1** como se ve en la [figura 3.28](#).

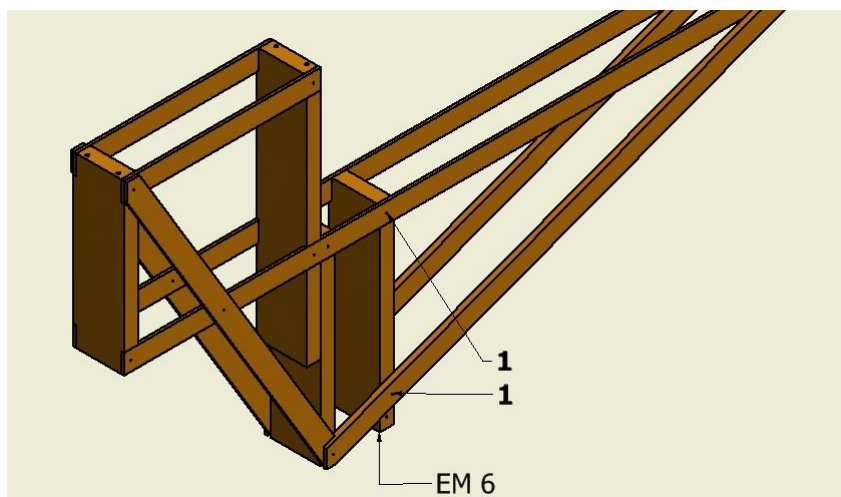
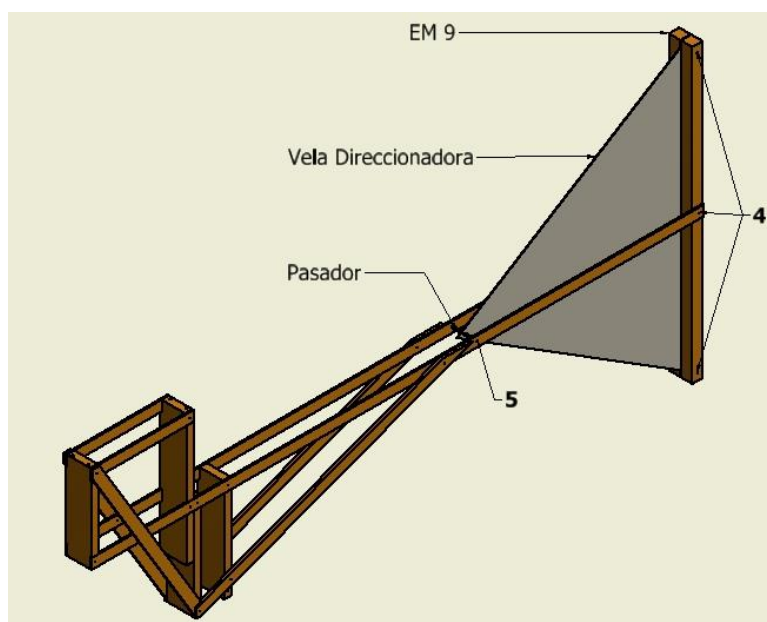
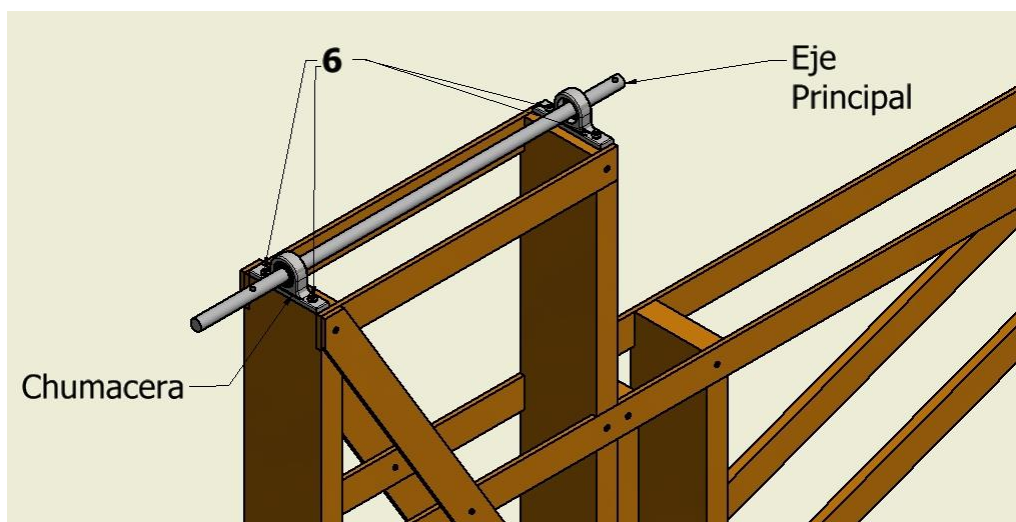


FIGURA 3.28: PASO 5 DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA MÓVIL



**FIGURA 3.29: PASO 6 DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA EM**

En el paso 6 de la construcción se debe unir la parte EM9 con la vela direccional y el resto de la estructura. Lo primero que se hace es posicionar la vela direccional entre las dos piezas EM9 y en su parte superior y en su parte inferior, donde se marca con el número 4 en la [figura 3.29](#) se colocan los pernos de 3/8x6[in]. Una vez que se tiene a la vela direccional y a las partes EM9 unidas se procede a unirla con el resto de la estructura. Primero se sujetan las partes EM9 con el perno 3/8x6 [in] por el orificio del medio de la parte con las dos parte EM4. Después, de esto se colocan los pernos M10x100 con los pasadores 10x80[mm] en la posición marcada con el 5 y se une el ultimo hueco de la vela direccional como se puede ver en la [figura 3.29](#).

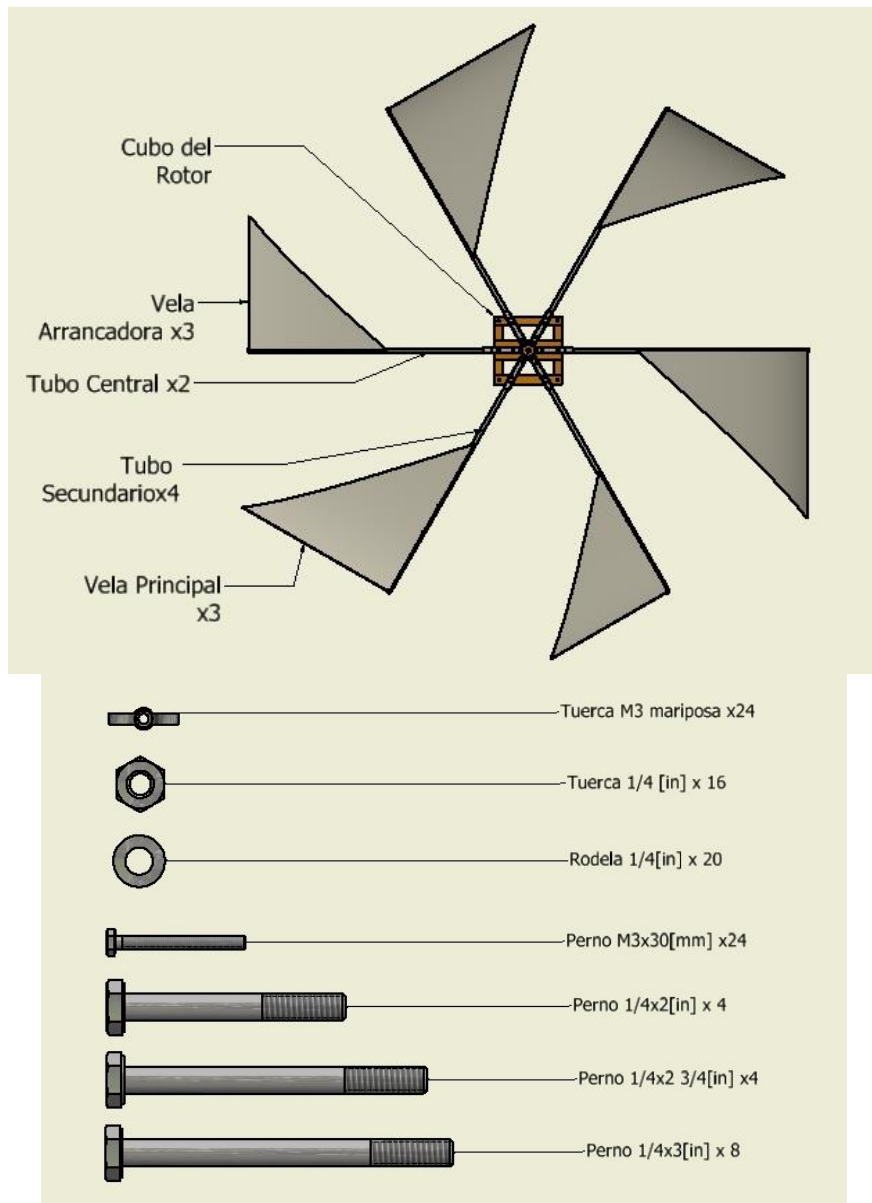


**FIGURA 3.30: 7 DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA EM**

El último paso consiste en posicionar la chumacera y el eje principal en su posición como se puede ver en la [figura 3.30](#). Lo primero que se debe hacer es sujetar la chumacera a las parte EM1 y EM2 con tornillos M8x50 en las posiciones marcadas con el número 6. Finalmente con la chumacera en posición se instalan los rodamientos en la chumacera y el eje queda en su posición final. Este es el último paso de la construcción de la estructura móvil y a continuación se explica la construcción del rotor.

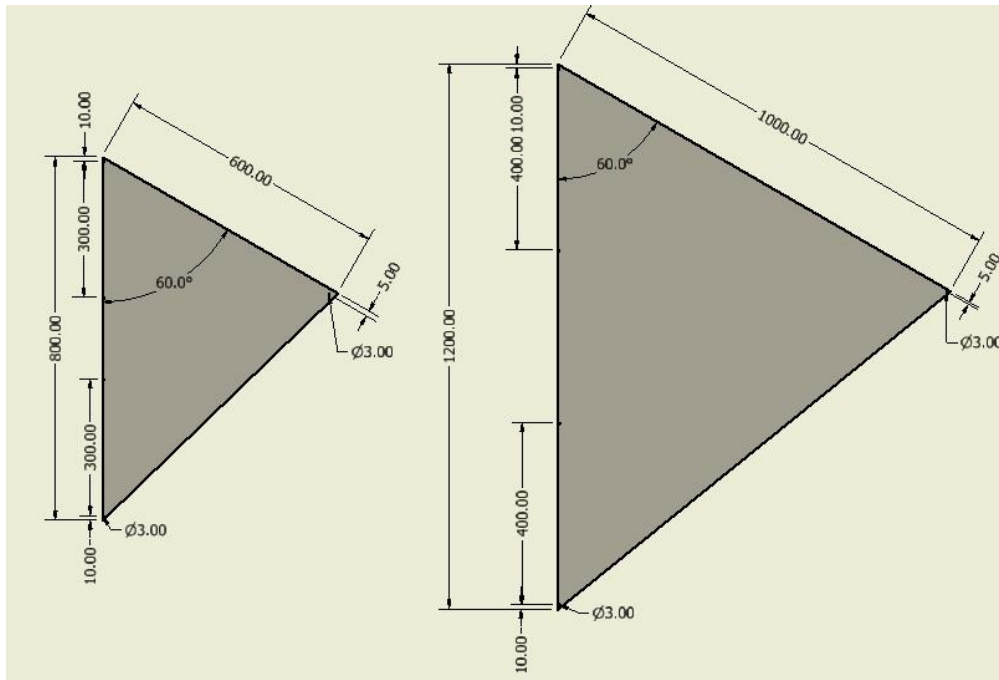
### 3.3 El rotor

El rotor del molino consiste principalmente de 3 partes que son el cubo del rotor, los tubos de las aspas y las velas del rotor. Existen dos tipos de tubos los centrales y los secundarios, así como dos tipos de velas las principales y las arrancadoras. Las velas arrancadoras tienen la función de, como dice su nombre, arrancar el sistema cuando la velocidad del viento es menor. Esta parte del molino se puede observar en la [figura 3.31](#).



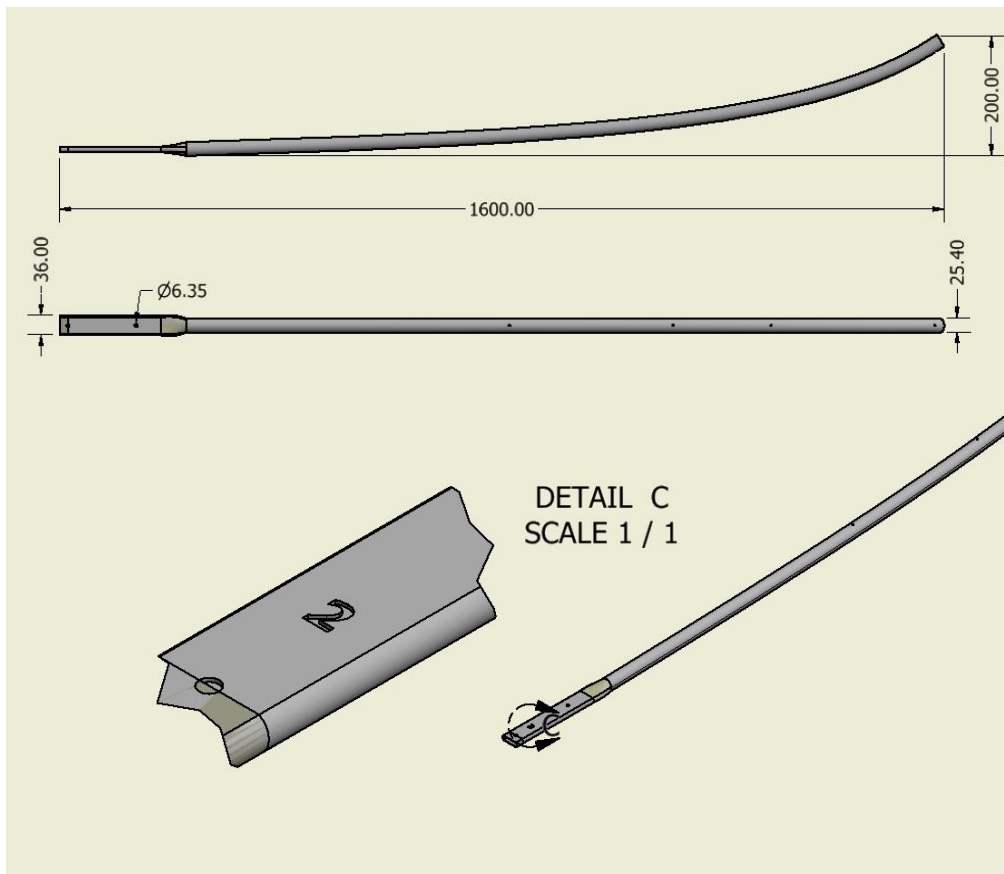
**FIGURA 3.31: ROTOR Y LOS PERNOS QUE SE VAN A UTILIZAR**

Como se puede ver en la figura 3.31 la diferencia entre las velas arrancadoras y las velas principales es su tamaño. Las arrancadoras son más pequeñas y tienen un ángulo de incidencia mayor para poder arrancar el sistema. Las dimensiones de las velas se presentan en la [figura 3.32](#).

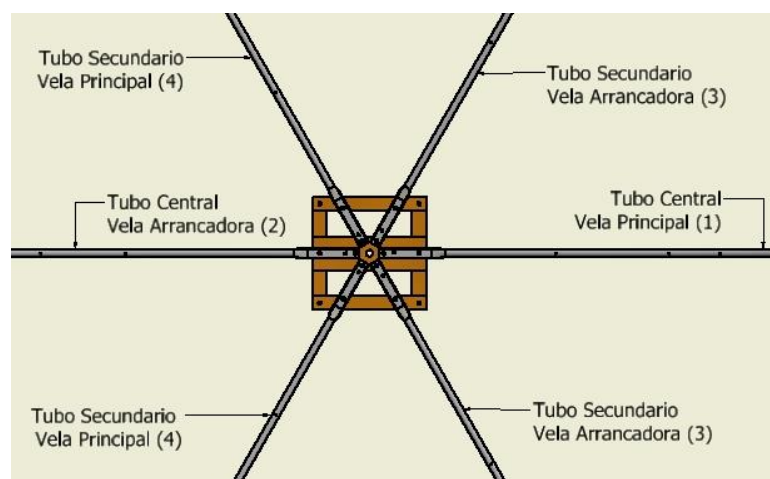


**FIGURA 3.32: DIMENSIONES DE LAS VELAS PRINCIPALES (IZQ.) Y LAS ARRANCADORAS (DER.)**

Los tubos de las aspas tienen todas las mismas dimensiones como se describe en la figura 3.32. Sin embargo existen 4 tipos de tubos diferentes debido, a que por un lado, los tubos centrales tienen una distancia menor entre los huecos que los unen al cubo y por otro lado tienen diferente distancia entre los huecos para la posición de las velas ya que tienen diferentes tamaños las arrancadoras y las principales. A estos tubos se los puede diferenciar por el número que llevan grabado en la base como se puede ver en la [figura 3.33](#) y en el detalle C.

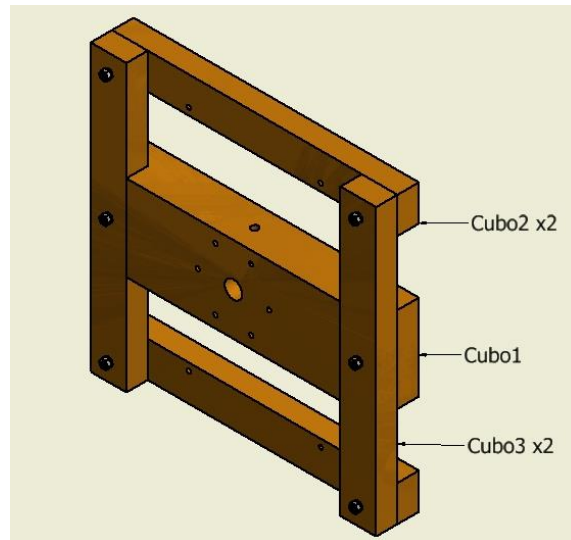


**FIGURA 3.33: DIMENSIONES DE LOS TUBOS DE LAS ASPAS**



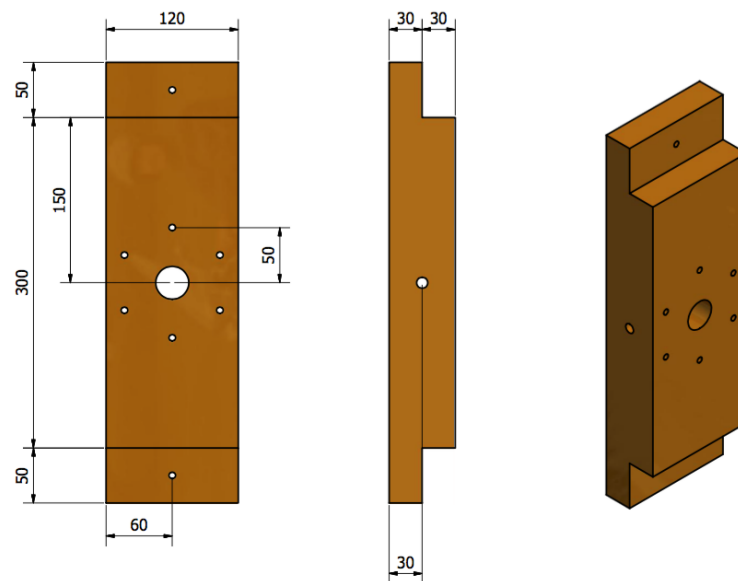
**FIGURA 3.34: DESCRIPCIÓN DE LOS DISTINTOS TUBOS DE LAS ASPAS**

El cubo del rotor se construye de madera de colorado al igual que la estructura móvil y cuenta con 3 partes principales como se puede ver en la [figura 3.35](#).

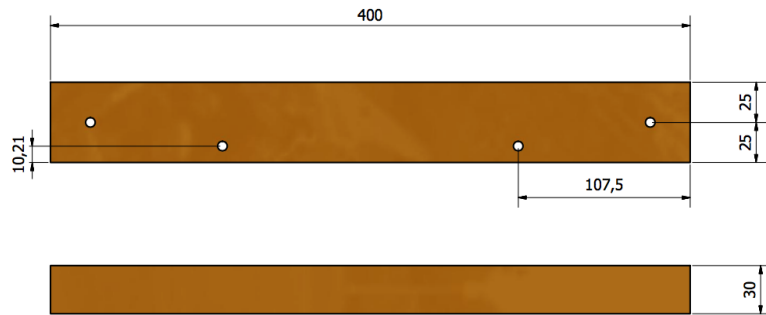


**FIGURA 3.35: CUBO DEL ROTOR**

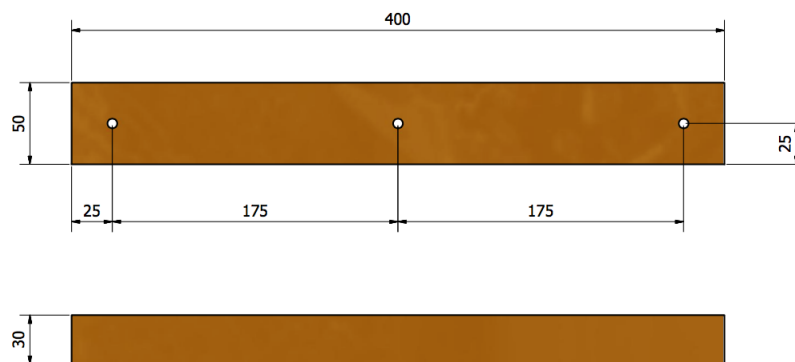
El cubo del rotor cumple dos funciones, por un lado sirve para sujetar las aspas del molino y por otro lado sirve como unión entre el rotor y el eje principal. Las dimensiones de las partes Cubo1, Cubo2 y Cubo3 se presentan en las [figuras 3.36-3.38](#).



**FIGURA 3.36: DIMENSIONES DE LA PARTE CUBO1**

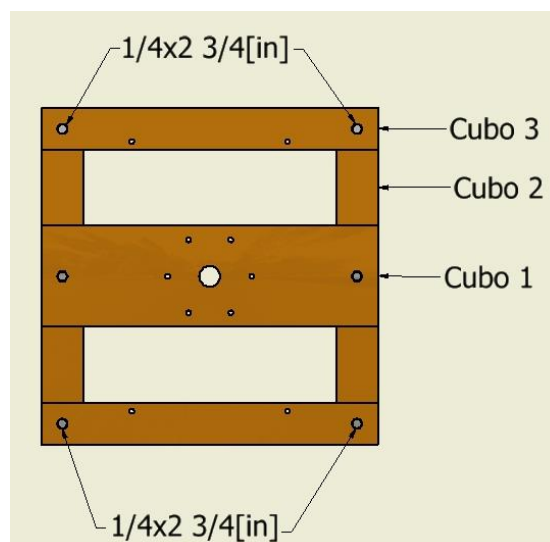


**FIGURA 3.37: DIMENSIONES DE LA PARTE CUBO 2**



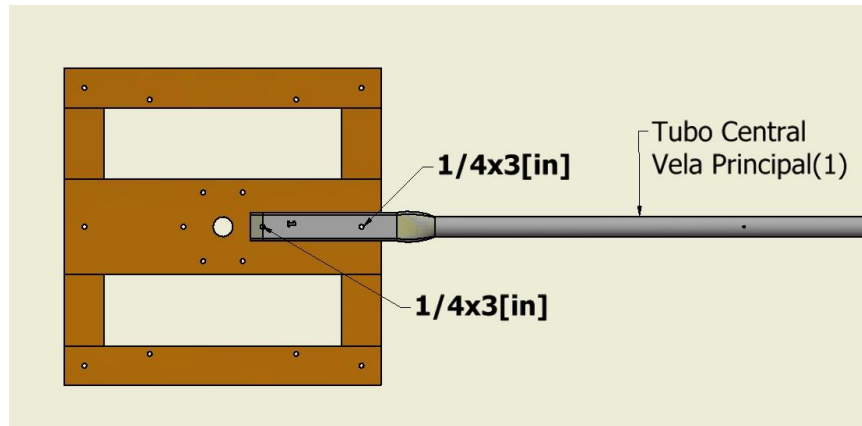
**FIGURA 3.38: DIMENSIONES DE LA PARTE CUBO 3**

Estas son todas las dimensiones que se requieren para iniciar el proceso de construcción del rotor del molino. El primer paso del ensamble es la construcción del cubo del rotor que se va a unir utilizando pernos  $1/4 \times 2 \frac{3}{4}$  [in] en las esquinas como se muestra en la [figura 3.39](#).



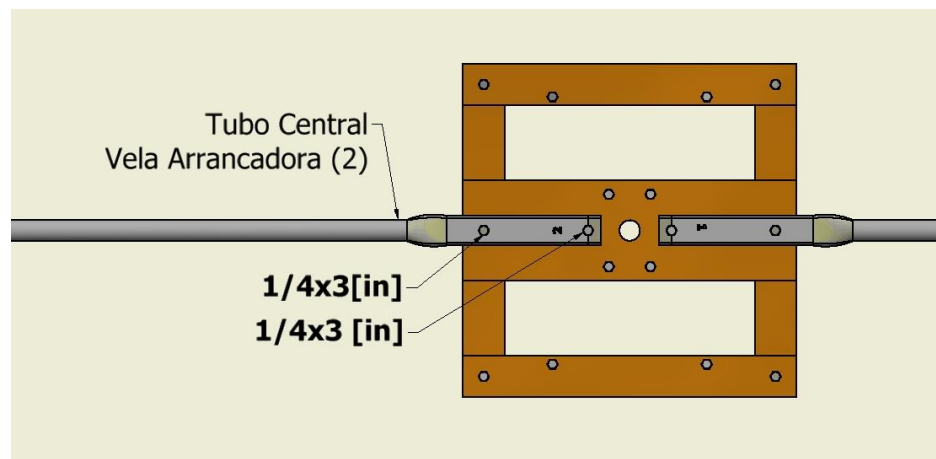
**FIGURA 3.39: PASO 1 DE LA CONSTRUCCIÓN DEL ROTOR**

Las partes Cubo2 y Cubo3 se unen en las esquinas como se ve en la [figura 3.39](#) o en el detalle del rotor en la [figura 3.35](#). Se debe utilizar rodela de  $1/4$  [in] entre las maderas, el perno y la tuerca. La parte Cubo1 solo se coloca en posición ya que esta se sujeta con los pernos  $1/4 \times 3$  [in] junto a los tubos centrales como se ve en el paso 2 en la [figura 3.40](#).



**FIGURA 3.40: PASO 2 DE LA CONSTRUCCIÓN DEL ROTOR**

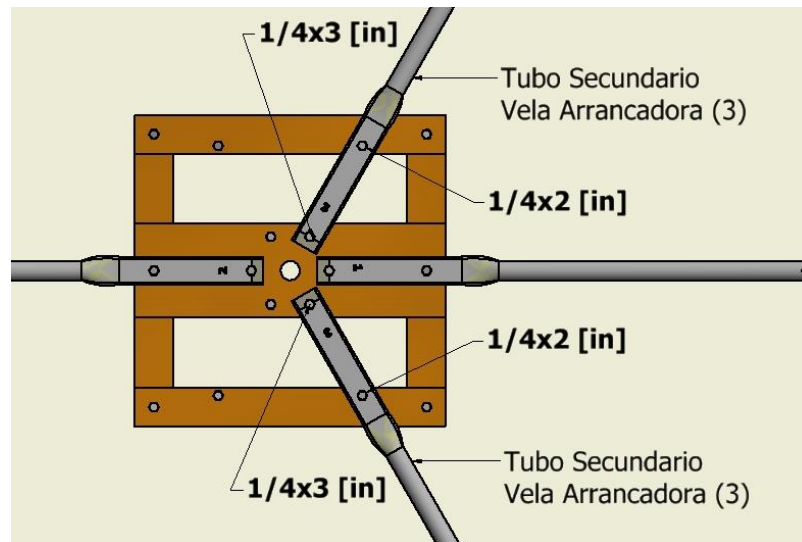
Para el segundo paso se debe unir el tubo central de la vela principal, que cuenta con el número **1** grabado en la parte inferior, al cubo del rotor colocando los pernos de  $\frac{1}{4} \times 3$  [in] en las posiciones señaladas en la [figura 3.40](#). En la parte inferior del cubo se debe utilizar una rodela entre la tuerca y la madera. El segundo paso es colocar el tubo central de la vela arrancadora en el sentido opuesto como en la [figura 3.41](#).



**FIGURA 3.41: PASO 2 DE LA CONSTRUCCIÓN DEL ROTOR**

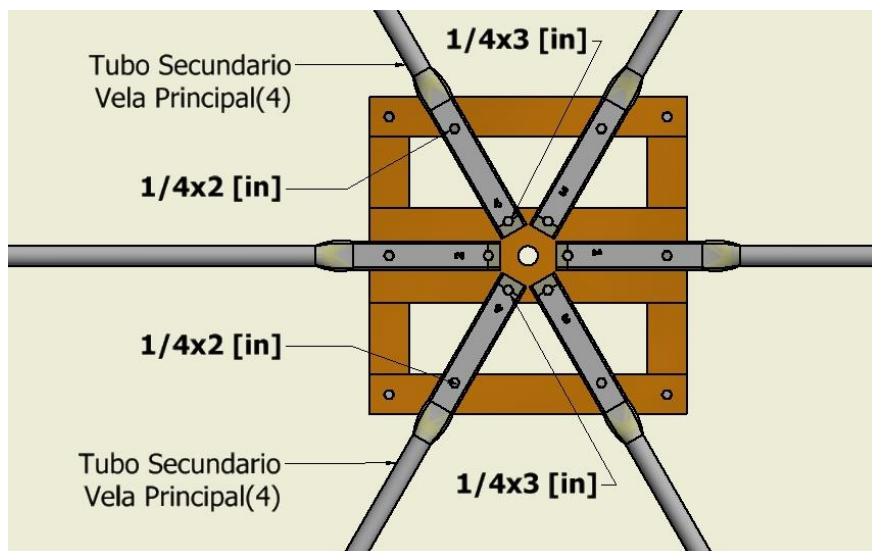
El tubo central de la vela arrancadora tiene grabado el número **2** en su base para su reconocimiento. Se utilizan los mismos pernos en las posiciones señaladas, y se debe incluir nuevamente una rodela entre la madera y la tuerca. El tercer paso es colocar los dos tubos secundarios de las velas arrancadoras como se aprecia en la [figura 3.42](#).





**FIGURA 3.42: PASO 3 DE LA CONSTRUCCIÓN DEL ROTOR**

Los tubos secundarios de la vela arrancadora tienen grabado el número **3** en la base y son 2 tubos con las mismas medidas. Estos tubos se colocan como en la figura 3.42 del lado del tubo central de la vela principal. La parte interna de los tubos se une con pernos  $\frac{1}{4} \times 3$  [in] como se ve en la figura mientras que las partes de afuera, las que se sujetan en la parte cubo3, van con pernos de  $\frac{1}{4} \times 2$  [in] al igual que en la figura. El paso 4 consiste en unir los tubos secundarios de las velas principales al cubo del rotor como en la [figura 3.43](#).



**FIGURA 3.43: PASO 4 DE LA CONSTRUCCIÓN DEL ROTOR**

El paso 4 es similar al paso 3 pero se utilizan los tubos con el número **4** grabado en la base. De la misma manera se unen en la parte de adentro con pernos  $\frac{1}{4} \times 3$  [in] y en la parte de afuera con pernos  $\frac{1}{4} \times 2$  [in] como en la figura 3.43. Esto concluye la unión entre el rotor y los tubos de las aspas. El paso 5 de la construcción de las aspas es poner las velas en sus posiciones. Como se dijo anteriormente hay 3 velas principales y 3 velas arrancadoras, las cuales se deben posicionar en sus respectivos tubos. La primera vela que se coloca es la vela grande en el tubo central como se ve en la [figura 3.44](#).

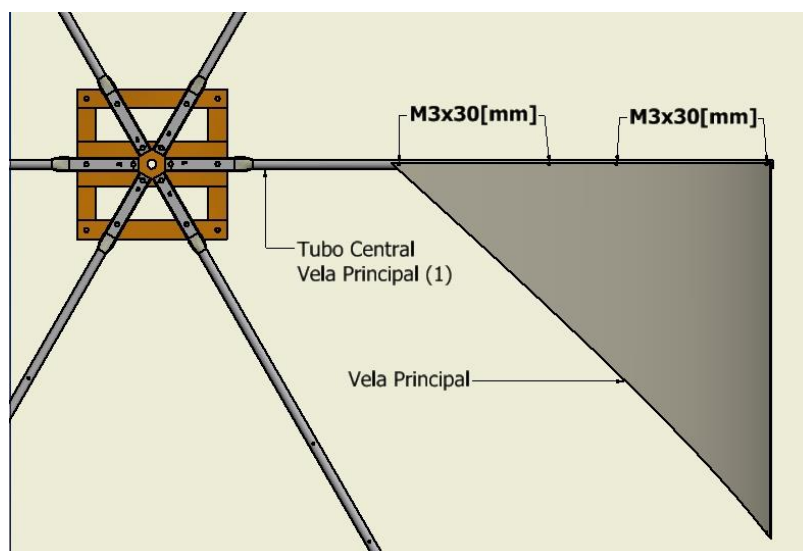


FIGURA 3.44: PASO 5 DE LA CONSTRUCCIÓN DEL ROTOR.

Las velas se unen a los tubos utilizando pernos M3x30[mm] y tuercas tipo mariposa M3 como se ve en el detalle C de la figura 3.45:

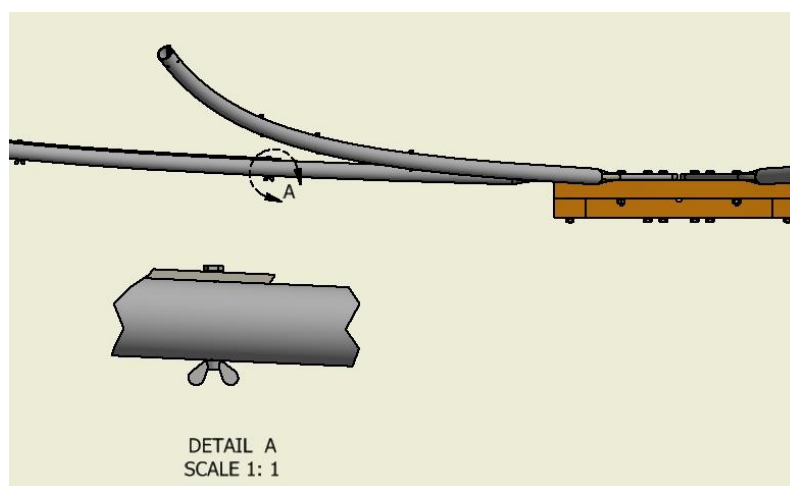


FIGURA 3.45: DETALLE DE LA SUJECIÓN DE LAS VELAS EN LOS TUBOS

Se utiliza este tipo de tuercas ya que se pueden sacar fácilmente, en el caso de que no se desee utilizar el molino, o se lo quiera apagar por así decirle se pueden retirar las velas del rotor lo que detiene el sistema. Después de poner los 4 pernos y tuercas como se ve en la figura 3.46 se pasa al siguiente paso que es poner las otras velas principales en los tubos correspondientes como se ve en la figura 3.46.

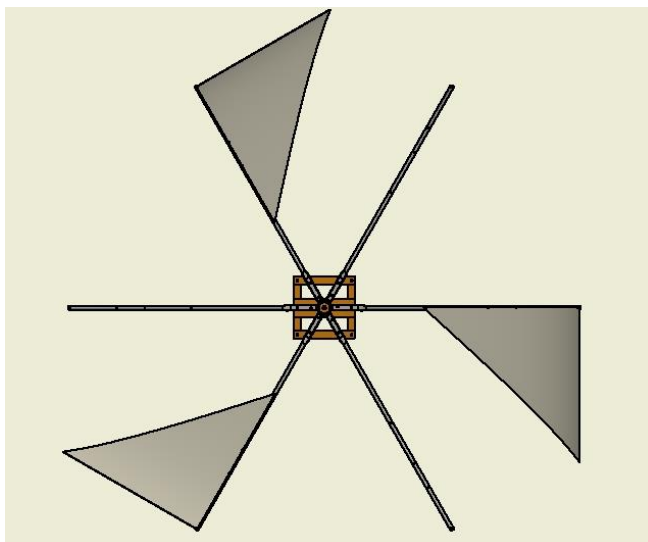


FIGURA 3.46: PASO 6 DE LA CONSTRUCCIÓN DEL ROTOR

Con las velas principales en posición se continúa con el paso 7 que es la sujeción de las velas secundarias en los tubos respectivos como se puede ver en la [figura 3.47](#).

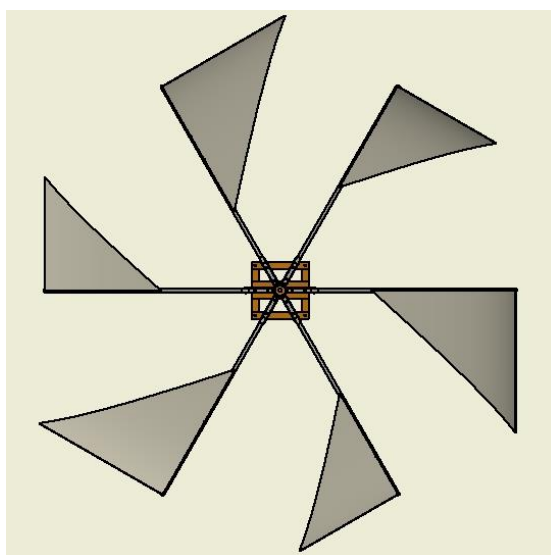
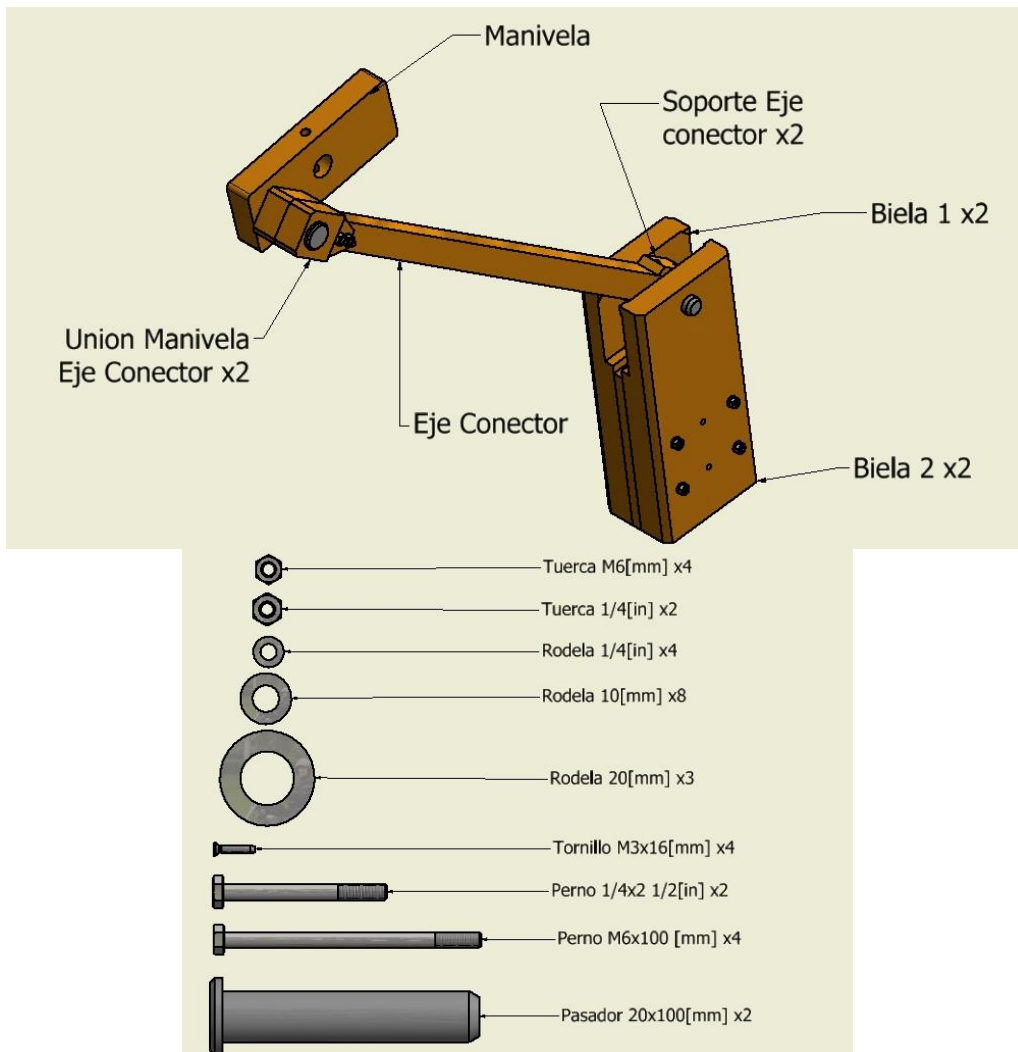


FIGURA 3.47: PASO 7 DE LA CONSTRUCCIÓN DEL ROTOR

Para unir las velas arrancadoras se utilizan los mismo pernos M3x30[mm] con las tuercas M3 tipo mariposa como en el paso anterior. Con esto se concluye la construcción del rotor y se continúa con el siguiente componente del molino que es el sistema biela manivela.

### **3.4 Sistema biela manivela**

El sistema biela manivela también se construye de madera de colorado y se utiliza para transformar el movimiento giratorio del eje principal en un movimiento de vaivén que acciona la bomba y da como resultado la extracción del agua de la fuente. En la [figura 3.48](#) se puede apreciar las partes que conforman el sistema.



**FIGURA 3.48: SISTEMA BIELA MANIVELA Y PERNOS QUE SE VAN A UTILIZAR**

El sistema biela manivela consta de 5 componentes principales que son la manivela, la unión entre la manivela y el eje conector, el eje conector, el soporte del eje conector y de la biela. Las dimensiones de estos componentes se presentan en las [figuras 3.49-3.53](#).

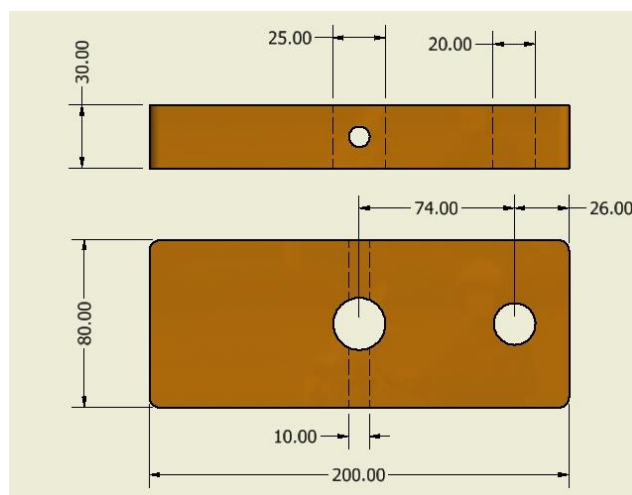


FIGURA 3.49: DIMENSIONES MANIVELA

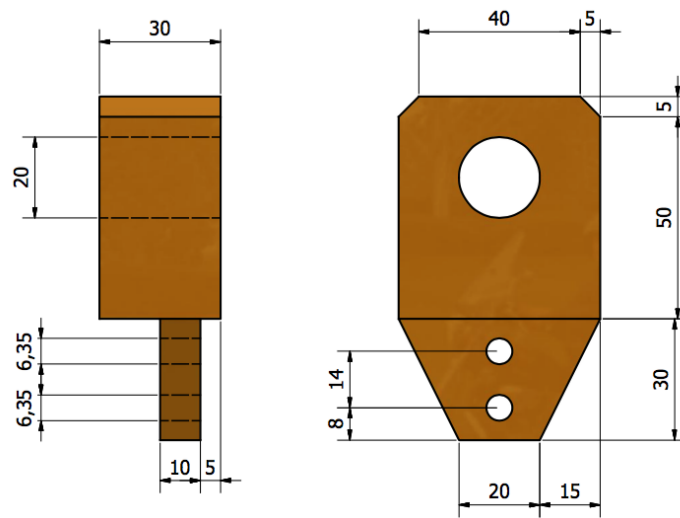


FIGURA 3.50: DIMENSIONES UNIÓN MANIVELA Y EJE CONECTOR

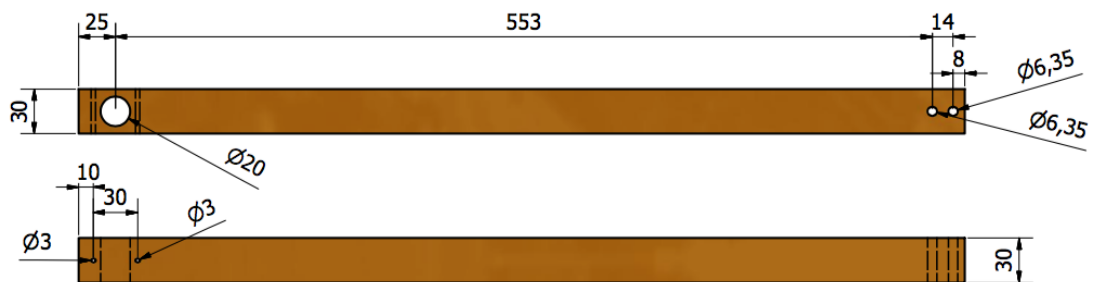


FIGURA 3.51: DIMENSIONES EJE CONECTOR

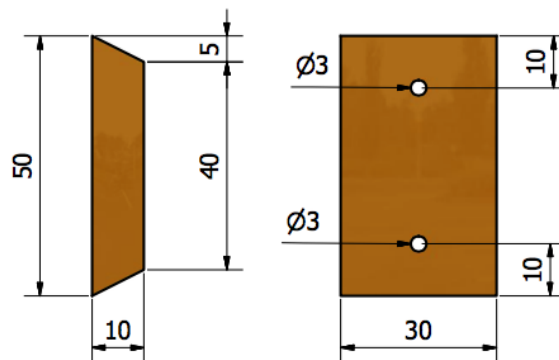
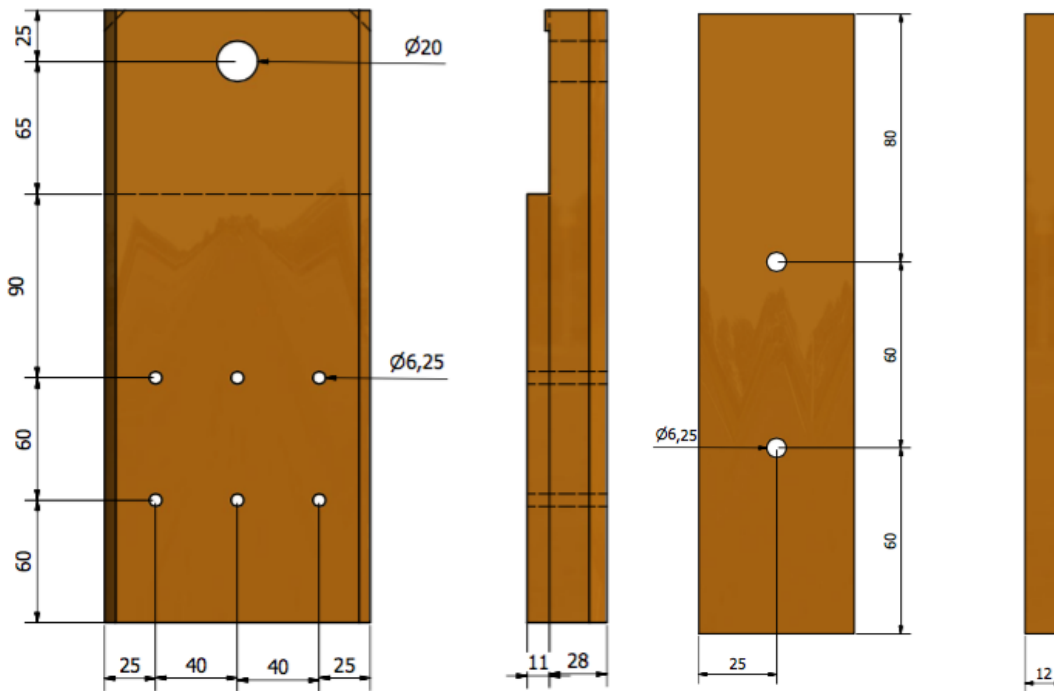
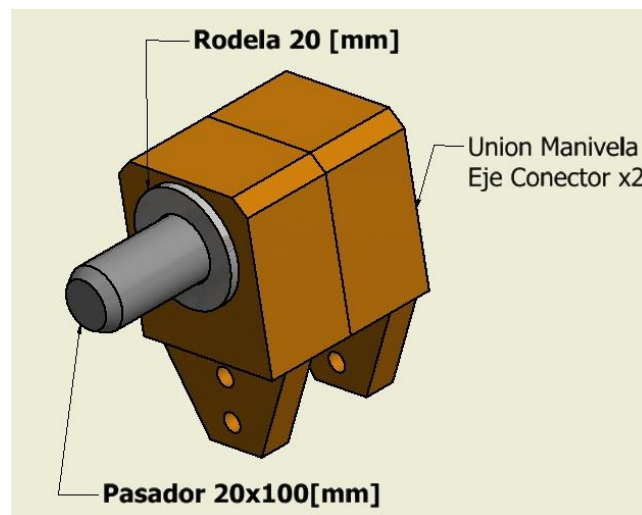


FIGURA 3.52: DIMENSIONES SOPORTE EJE CONECTOR



**FIGURA 3.53: DIMENSIONES DE BIELA1 (IZQ.) Y BIELA2 (DER.)**

Estas son las dimensiones de cada una de las partes que conforman el sistema biela manivela. La construcción del sistema empieza con el primer paso que es juntar las dos uniones entre la manivela y el eje conector como se puede ver en [la figura 3.54](#).



**FIGURA 3.54: PASO 1 DE LA CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA BIELA MANIVELA**

La unión se hace mediante el pasador 20x100[mm] y también se tiene que poner una rodela M20 para proteger la madera de desgaste por el movimiento de la manivela. El segundo paso es la unión de la manivela al pasador como se aprecia en [la figura 3.55](#).

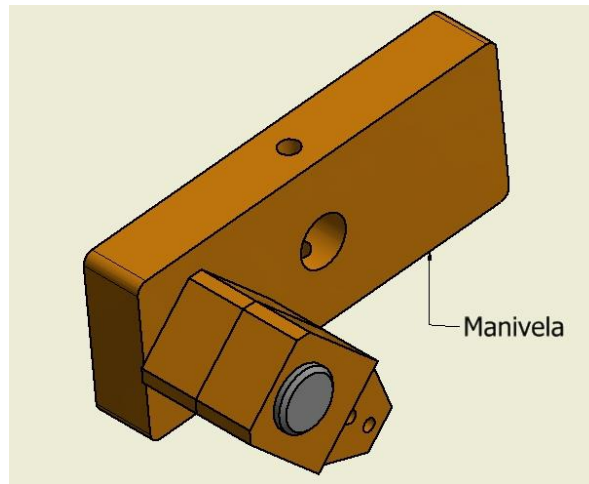


FIGURA 3.55: PASO 2 DE LA CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA BIELA  
MANIVELA

Después, de unir la manivela a la unión se debe juntar las dos uniones con el eje conector mediante pernos  $\frac{1}{4} \times 2\frac{1}{2}$  [in], rodela de  $\frac{1}{4}$  [in] y tuercas de  $\frac{1}{4}$  [in] como se puede ver en la [figura 3.56](#).

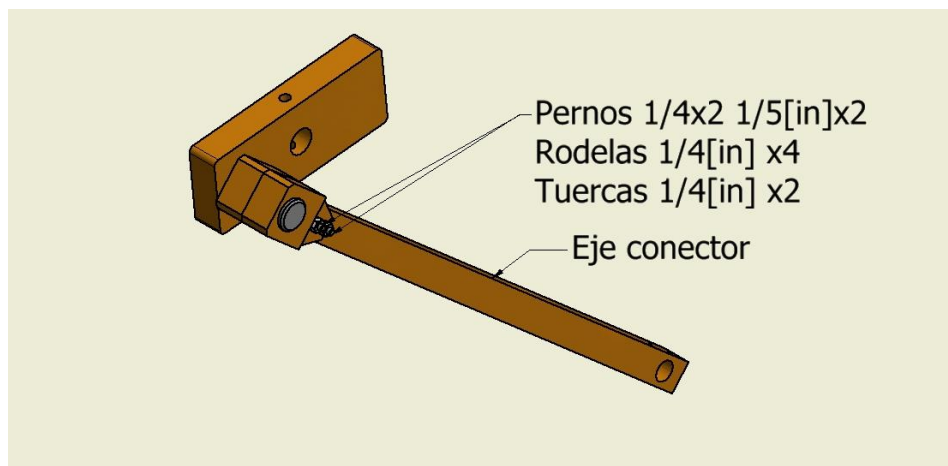


FIGURA 3.56: PASO 3 DE LA CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA BIELA  
MANIVELA

El cuarto paso del proceso de construcción es poner los soportes del eje conector con los tornillos M3x16[mm] como se demuestra en la [figura 3.57](#).

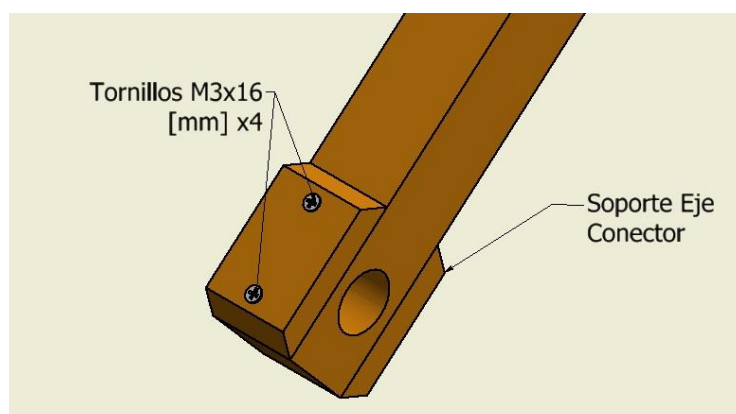


FIGURA 3.57: PASO 4 DE LA CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA BIELA MANIVELA

Después, se une el eje conector con la parte biela1 como se demuestra en la [figura 3.58](#) utilizando el pasador 20x100[mm] y rodela M20 entre la partes.

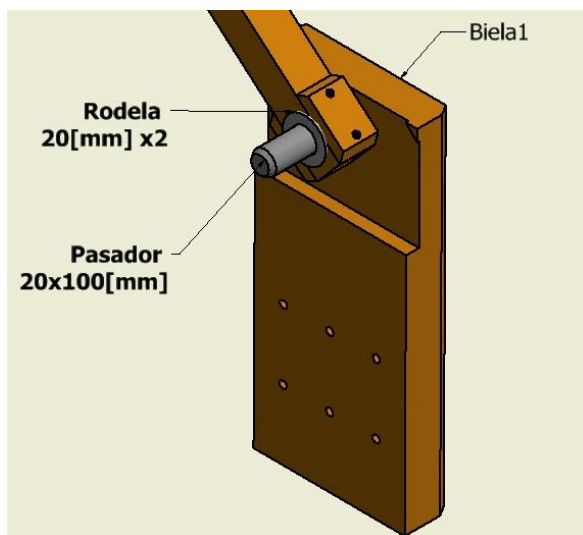


FIGURA 3.58: PASO 5 DE LA CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA BIELA MANIVELA

El último paso de la construcción del sistema biela manivela consiste en unir las partes biela1 restante y las dos parte biela2 con los pernos M6x100[mm], utilizando rodela M6 entre pernos M6 las tuercas y la madera como se demuestra en la [figura 3.59](#).

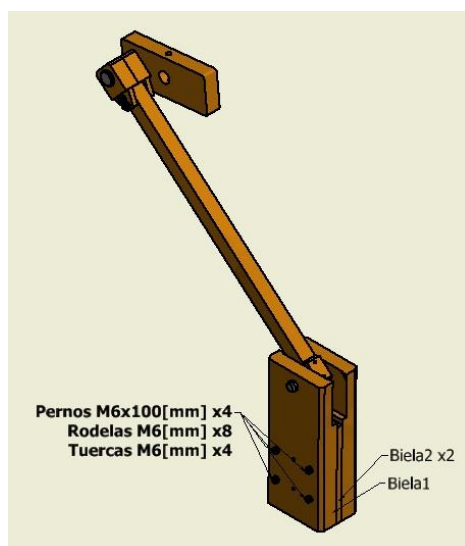


FIGURA 3.59: PASO 6 DE LA CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA BIELA MANIVELA

Este paso concluye la construcción del sistema biela manivela y se pasa al último componente que se debe construir del molino que es la bomba.



### 3.5 La bomba

La bomba que se seleccionó va a ser construida con materiales que se pueden conseguir principalmente en una ferretería. Cuenta con dos partes separadas por un lado está el cuerpo de la bomba y por otro lado está el pistón estas partes se pueden observar en la [figura 3.60](#).

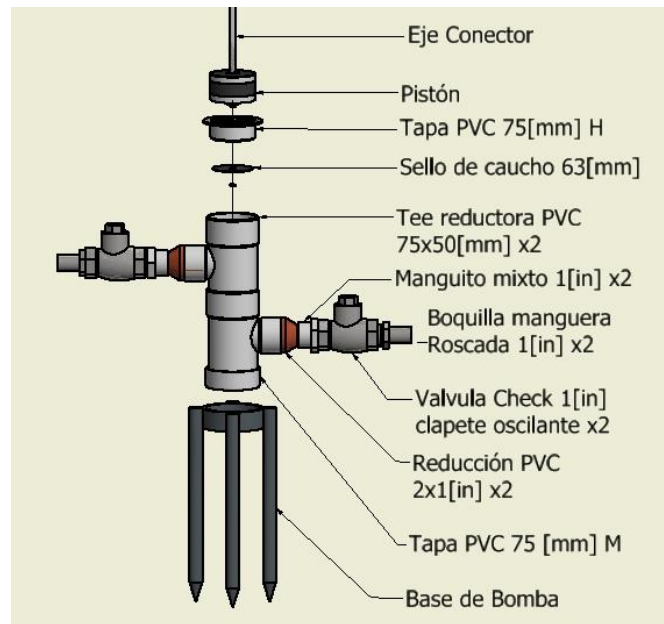
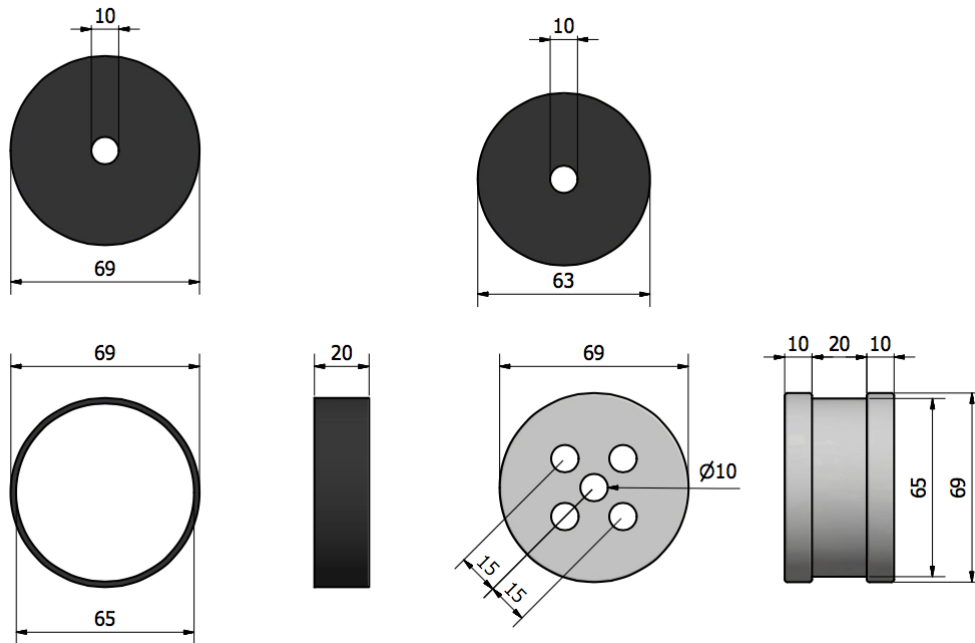
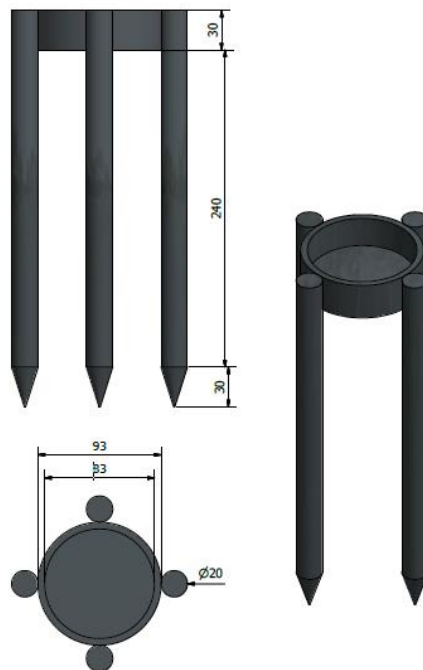


FIGURA 3.60: LA BOMBA Y EL PISTÓN.

En la [figura 3.60](#) se ven todos los componentes que tiene la bomba. La mayoría de estos se compran y existen algunos componentes como la base, la cabeza del pistón y las parte de caucho se deben fabricar y se presentan sus dimensiones en las [figuras 3.61](#) y [3.62](#).

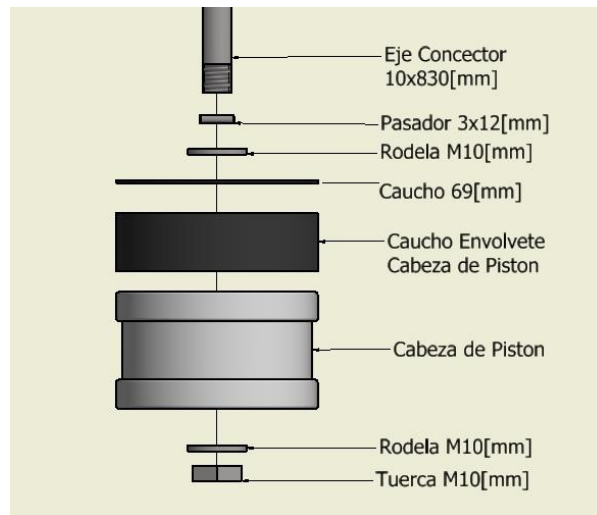


**FIGURA 3.61: DIMENSIONES DE LA CABEZA DEL PISTÓN Y LOS COMPONENTES DE**



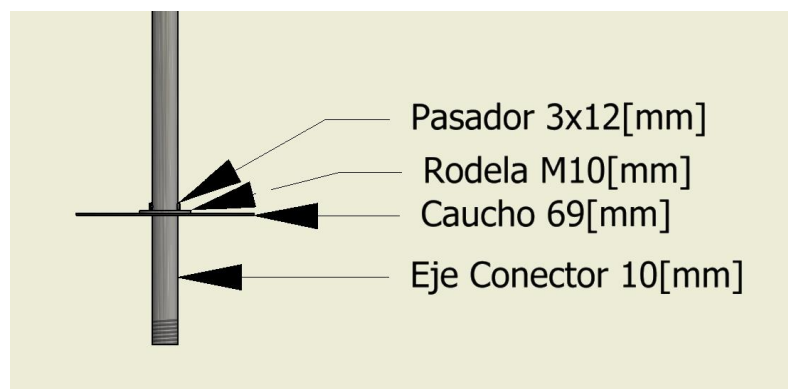
**FIGURA 3.62: DIMENSIONES DE LA BOMBA**

Con las dimensiones de la bomba ya descritas se puede proceder con las instrucciones. Como se mencionó antes se va a construir por un lado el pistón y luego se va a unir con el cuerpo de la bomba. En la [figura 3.63](#) se va a describir todos los componentes que tiene el pistón.



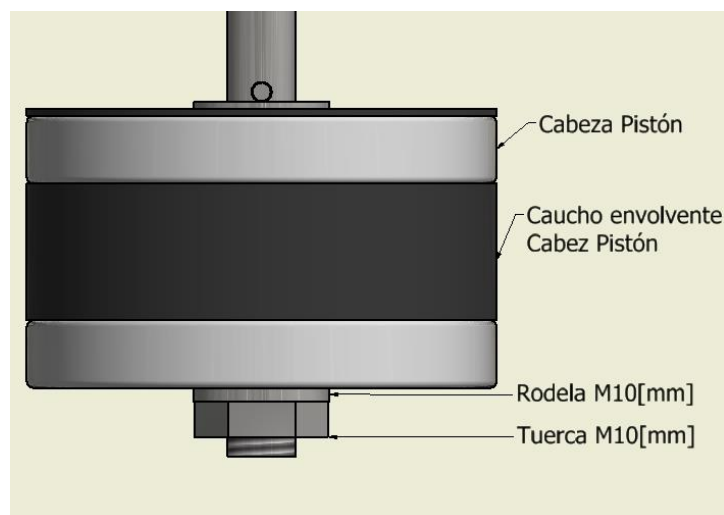
**FIGURA 3.63: COMPONENTES DEL PISTÓN**

El primer paso de la construcción del pisto es colocar el pasador 3x12 [mm], la rodela y el caucho de 69 [mm] en el orificio del eje conector como se demuestra en la [figura 3.64](#).



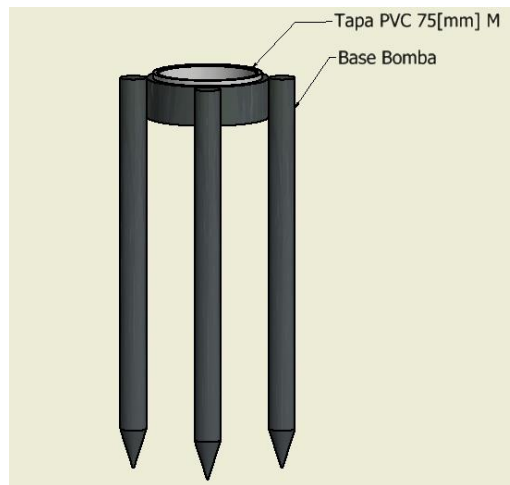
**FIGURA 3.64: PRIMER PASO DE CONSTRUCCIÓN DEL PISTÓN**

A continuación se ponen los demás componentes del pistón en su posición como se gráfica en la [figura 3.65](#).



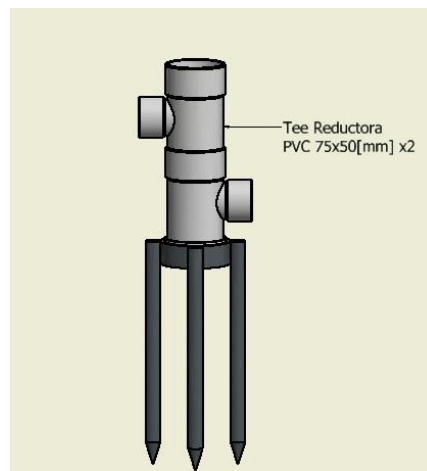
**FIGURA 3.65: SEGUNDO PASO DE CONSTRUCCIÓN DEL PISTÓN**

Con el pistón ensamblado se construye el cuerpo de la bomba. Se empieza colocando la tapa de PVC 75[mm] M en la base de la bomba como en la [figura 3.66](#).



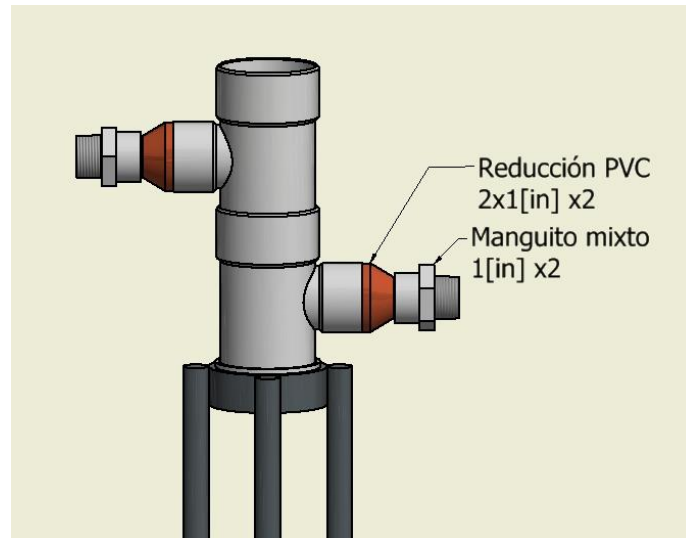
**FIGURA 3.66: PRIMER PASO DE CONSTRUCCIÓN DE LA BOMBA**

El siguiente paso de la construcción es colocar las dos tees de 75x50[mm] en la tapa que está colocada en la base. Todas las uniones entre las piezas de PVC se deben hacer con la pega especial de tubería PVC de plastigama.



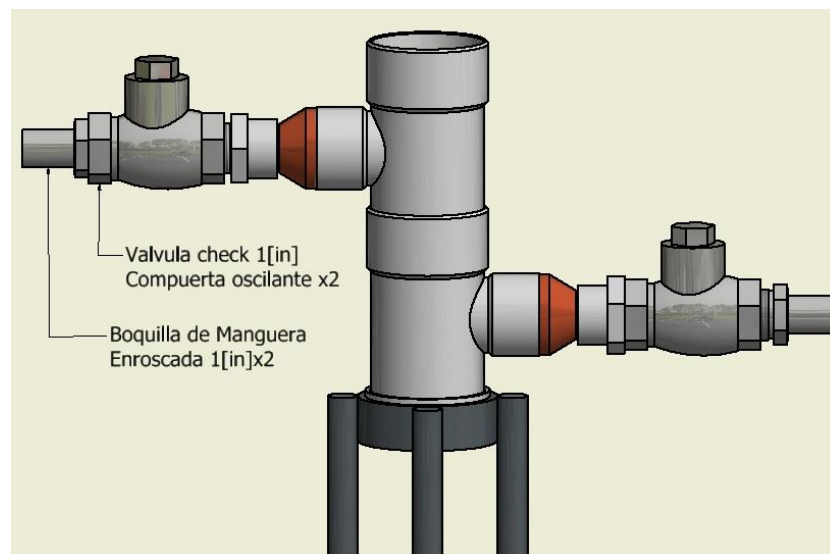
**FIGURA 3.67: SEGUNDO PASO DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA BOMBA**

Con las tees en su lugar se colocan las reducciones de 2x1[in] y el manguito mixto de 1[in].



**FIGURA 3.68: TERCER PASO DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA BOMBA**

El cuarto paso consiste en enroscar las válvulas check de 1[in] de solapa y las boquillas de la manguera de 1[in] a los manguitos mixtos como se muestra en la [figura 3.69](#).



**FIGURA 3.69: CUARTO PASO DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA BOMBA**

Después, de colocar la mayoría de los componentes del cuerpo de la bomba se une el pistón al cuerpo de la bomba insertándolo por la parte superior de la bomba como se puede ver en la [figura 3.70](#).

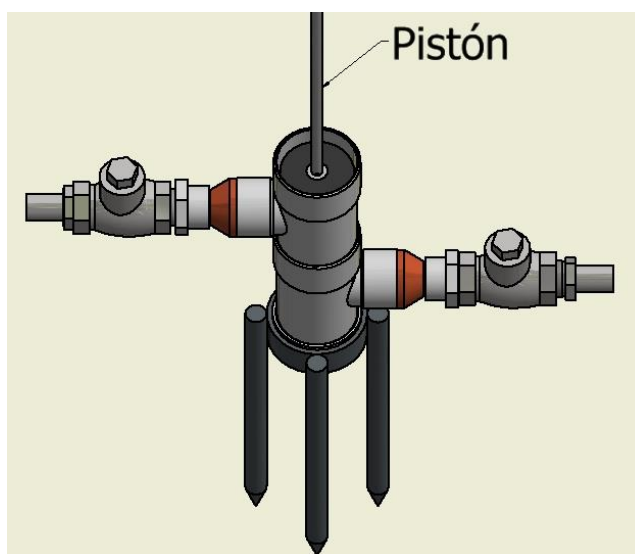


FIGURA 3.70: QUINTO PASO DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA BOMBA

El último paso de la construcción de la bomba es el de sellado utilizando la tapa de PVC de 75[mm] H con el caucho en su interior para asegurar el funcionamiento de la bomba y que se genere el vacío necesario como se ve en la [figura 3.71](#).

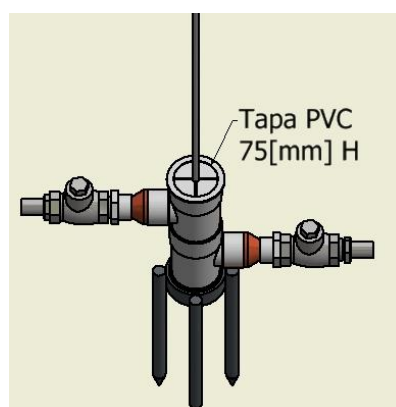


FIGURA 3.71: SEXTO PASO DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA BOMBA

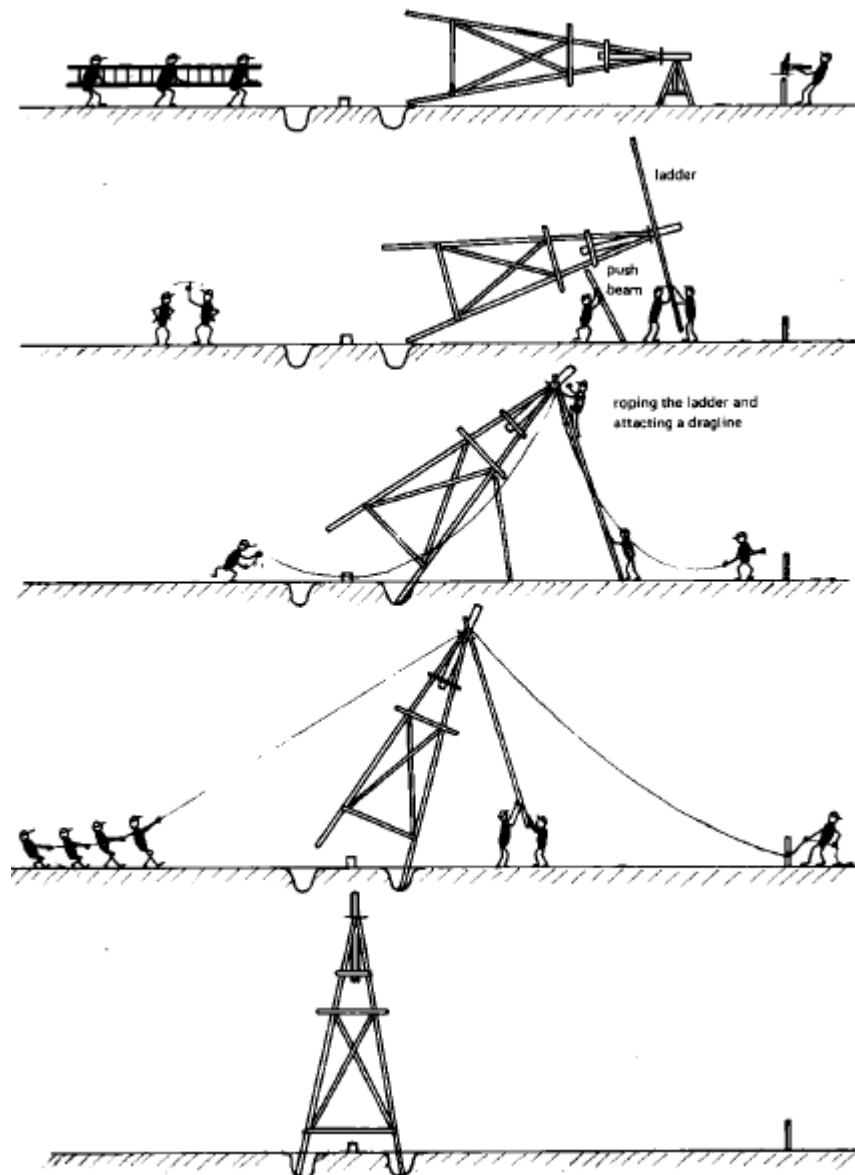
Con este paso se culmina la construcción y del último componente individual del molino, en la siguiente sección se va a describir como realizar el ensamble completo del molino de viento.

### 3.6 Ensamble final

Con los cinco componentes principales armados individualmente se procede con el ensamble final de los componentes que empieza por la torre. Para la instalación de la torre se debe hacer cuatro huecos en el suelo de un diámetro de 180[mm] aproximadamente, una profundidad de 800[mm] y con una distancia entre sus centros de 3 [m], estos huecos deben formar un cuadrado. Antes de instalar la torre se debe cubrir la parte inferior de las vigas de la torre con breña para proteger la madera.

El levantamiento de la torre puede ser complicado debido a las dimensiones de la torre y por su peso. Para este paso se debe trabajar en un grupo de 7 personas. El procedimiento de instalación de la torre va a seguir las recomendaciones del manual de

construcción de Van de Ven. Este procedimiento se describe gráficamente en la [figura 3.72](#) y se a explicar verbalmente.

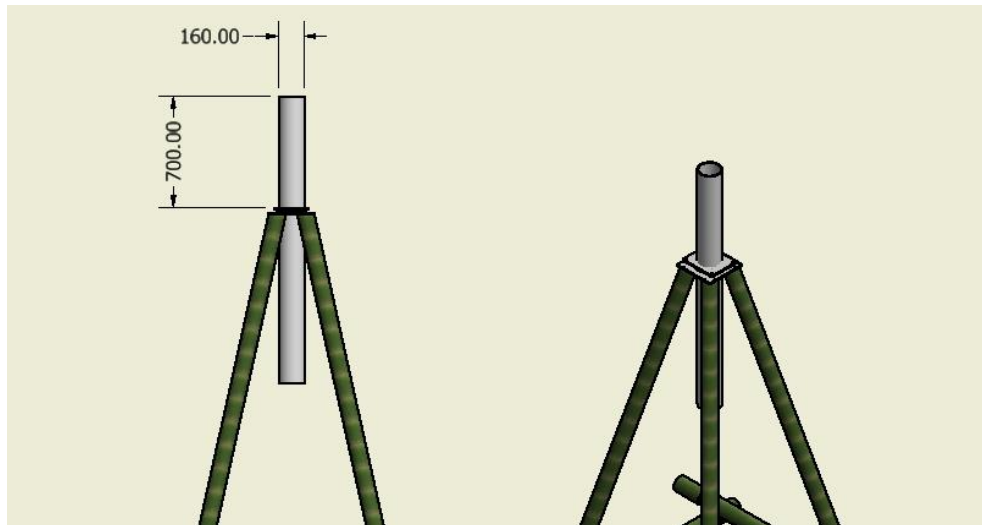


**FIGURA 3.72: PROCEDIMIENTO DE LEVANTAMIENTO DE LA TORRE (VAN DE VEN, 1977)**

El primer paso es enterrar un tronco de madera dura a unos diez metros de donde se va a levantar la torre a una profundidad mínima de un metro. Para el levantamiento se va a necesitar además una escalera y dos cabos de unos quince metros aproximadamente. Con ayuda de un tronco se levanta poco a poco la punta de la torre apoyándose en las gradas de la escalera. Cuando la torre llegue a un ángulo de 30-40° se atan los cabos a la punta de la torre. Con un cabo se da una vuelta al tronco enterrado y con el otro cabo se jala la estructura en el sentido contrario. De forma lenta se va a dando cuerda desde el lado del tronco, mientras del otro lado se jala. Una vez con la torre en posición se sueltan los cabos.

Con la torre en posición es recomendable rellenar los orificios con una capa de unos 200-300 [mm] de piedra fina para después rellenar el resto con tierra. Se debe realizar un fuerte compactación de a tierra preferiblemente utilizando un pisón. La

siguiente parte que se instala es la estructura móvil, pero antes de instalar la estructura móvil se debe insertar un tubo de PVC de 160 [mm] y 1,8[m] de largo en el rodamiento de la torre como se puede observar en la [figura 3.73](#). Este tubo sirve como guía para la biela y para mantener a la estructura móvil en su lugar.



**FIGURA 3.73: DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DEL TUBO**

Con el tubo de PVC en su posición se puede continuar con la instalación de la estructura móvil sobre la torre. La estructura móvil es pesada por lo que para levantarla hasta su posición se recomienda utilizar una escalera para amarrarla en la parte superior de la torre para utilizarla como polea para subir la estructura móvil. Se debe amarrar la escalera de manera que quede bien sujeta y que su parte superior quede al menos un metro sobre el nivel del tubo de PVC.

Con la escalera en su posición se puede amarrar un cabo a la estructura móvil y utilizar el último escalón de la escalera como polea para desde abajo subir la estructura. Además se necesita una segunda escalera para que una persona vaya guiando la estructura móvil hasta su posición final que debe quedar como se aprecia en la [figura 3.74](#).

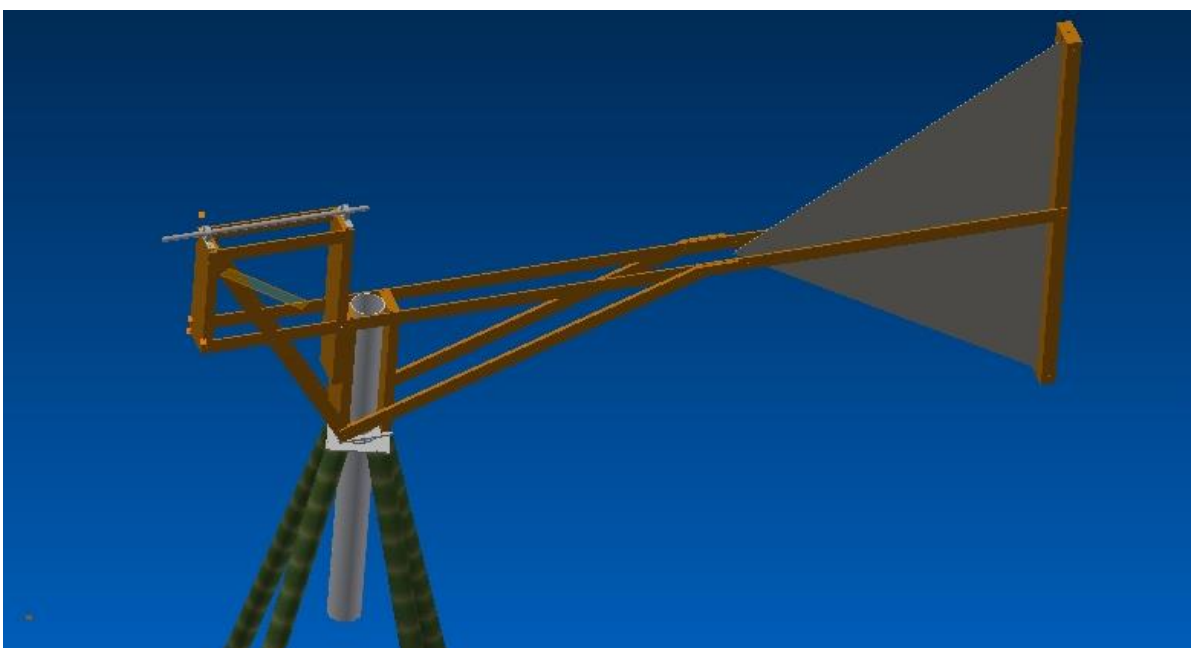




FIGURA 3.74: ESTRUCTURA MÓVIL SOBRE LA TORRE

Cuando la estructura móvil este en posición se debe utilizar 4 tornillos M6x40[mm] para unir la tapa de la torre con la parte inferior de la estructura móvil como se detalla en la figura 3.75.



FIGURA 3.75: DETALLE DE POSICIÓN DE TORNILLOS PARA UNIÓN DE ESTRUCTURA MÓVIL Y TORRE

Una vez que se está en posición la estructura móvil y sujeta se puede continuar con la instalación del rotor. Con la misma escalera se puede elevar el rotor hasta su posición de la misma manera que se subió la estructura móvil. Se eleva el rotor hasta su posición y se inserta el eje principal en el agujero del cubo del rotor viendo que coincidan los huecos por donde debe pasar el perno que va a funcionar como pasador. Una vez que este el rotor en su posición se pasa un perno de  $3/8 \times 5 \frac{1}{2}$  [in], con rodela de  $3/8$  y la tuerca de  $3/8$  por el hueco que une el rotor y el eje principal como se puede apreciar en la figura 3.76.

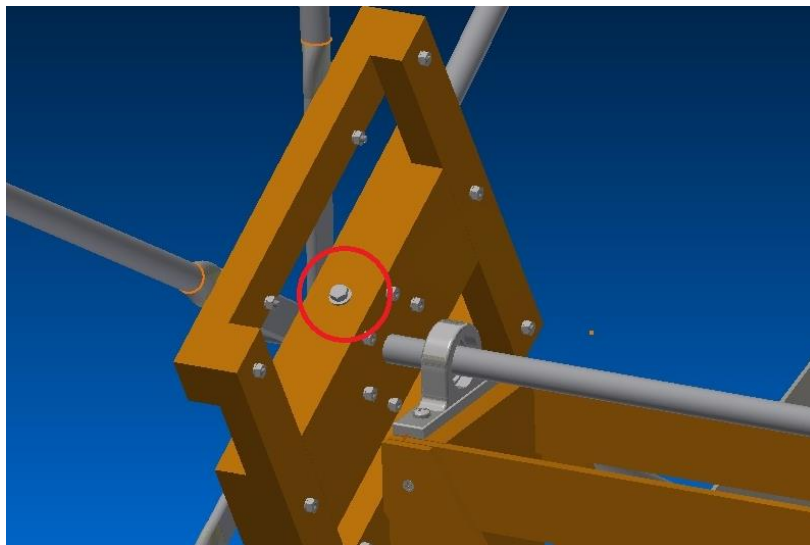


FIGURA 3.76: DETALLE DE LA POSICIÓN DEL PERNO  $3(X5 \frac{1}{2})$ [IN]

El rotor una vez posicionado sobre el eje principal debería verse como la [figura 3.77](#).



**FIGURA 3.77: ROTOR Y ESTRUCTURA MÓVIL INSTALADAS SOBRE LA TORRE**

Con el rotor en su posición el siguiente paso a seguir es la instalación del sistema biela manivela. Se debe llevar el sistema biela manivela a la parte superior de la torre a donde va a ser instalado pero antes de unir la manivela con el eje principal es preferible instalar un eje conector que va a transferir el movimiento de la biela al eje de la bomba. Este eje es de acero AISI 1018 de una distancia de 6 [m], roscado en la parte inferior y con dos huecos en la parte superior, como se detalla en la [figura 3.78](#), para que se pueda unir con la biela.

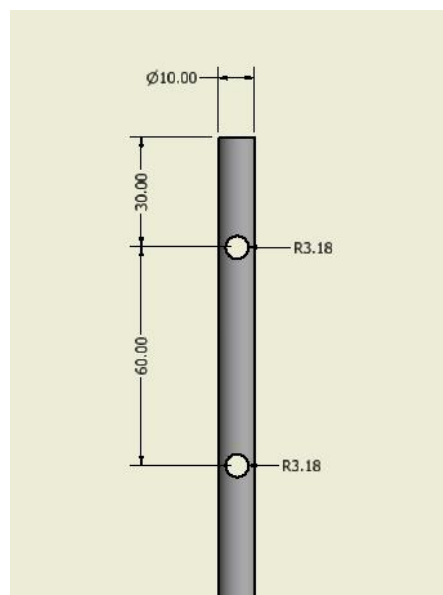
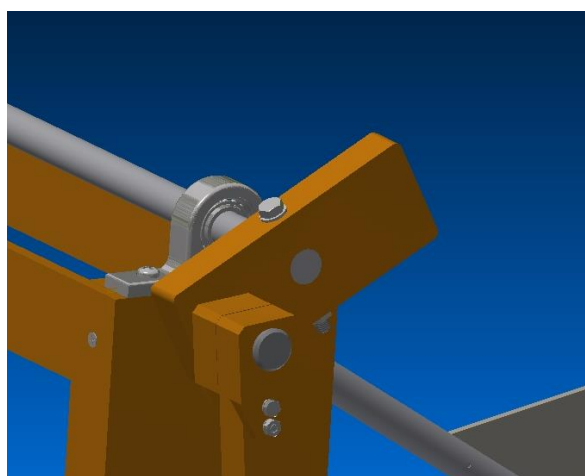
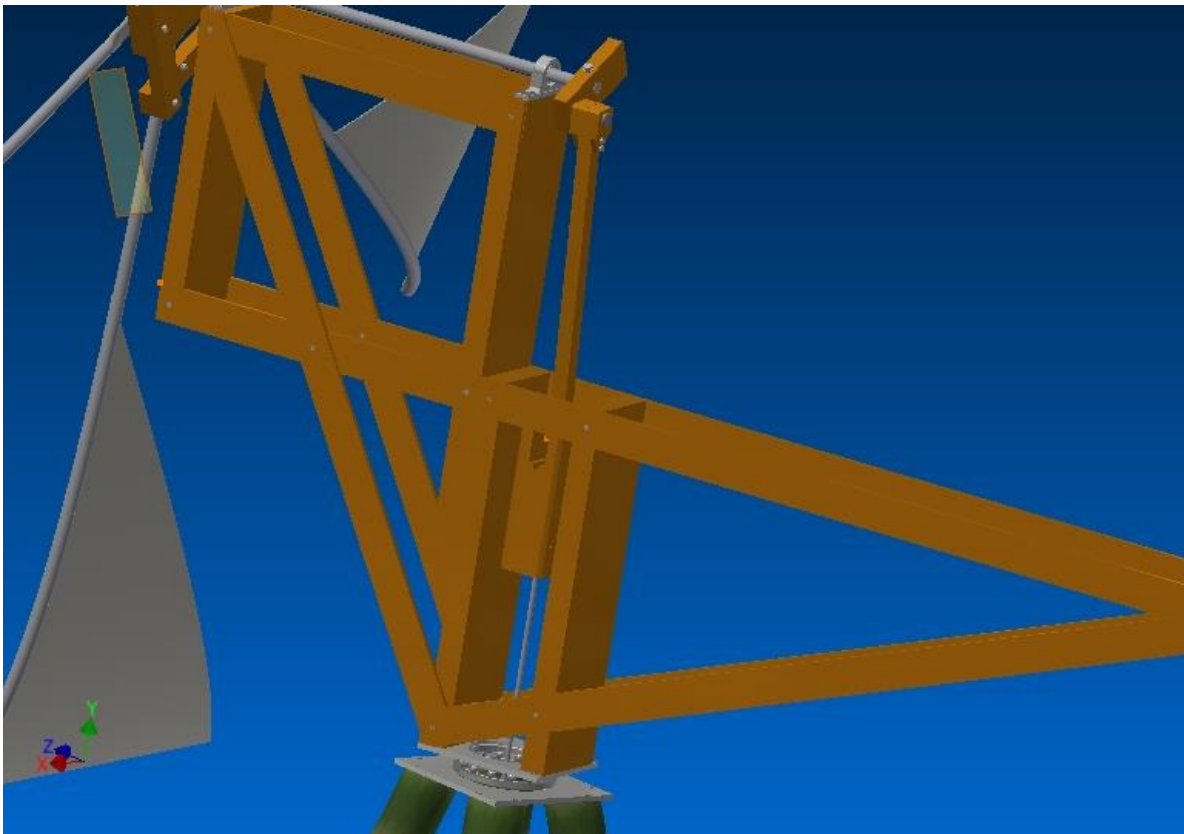


FIGURA 3.78: DETALLE DE LOS HUECOS SUPERIORES DEL EJE CONECTOR

El eje se une a los huecos del medio de la parte Biela1 del sistema biela manivela utilizando dos pernos de 1/4x4[in], 4 rodela de 1/4 y dos tuercas de 1/4. Con el eje unido a la biela se puede subir el sistema a su posición. Al ser este un componente que pesa se puede simplemente sujetar la manivela con una cuerda y subirla hasta su posición pero se debe pasar la cuerda por el tubo de PVC para que el eje y la biela ya queden en posición. La manivela se une con el eje principal utilizando un perno M10x100[mm], rodela M10 y una tuerca M10. Esta unión se puede ver a detalle en la [figura 3.79](#) y en la [figura 3.80](#) se puede ver cómo queda el eje conector unido a la biela (se quita la visibilidad del tubo de PVC para poder apreciar este detalle).

FIGURA 3.79: UNIÓN DE MANIVELA CON EJE PRINCIPAL.

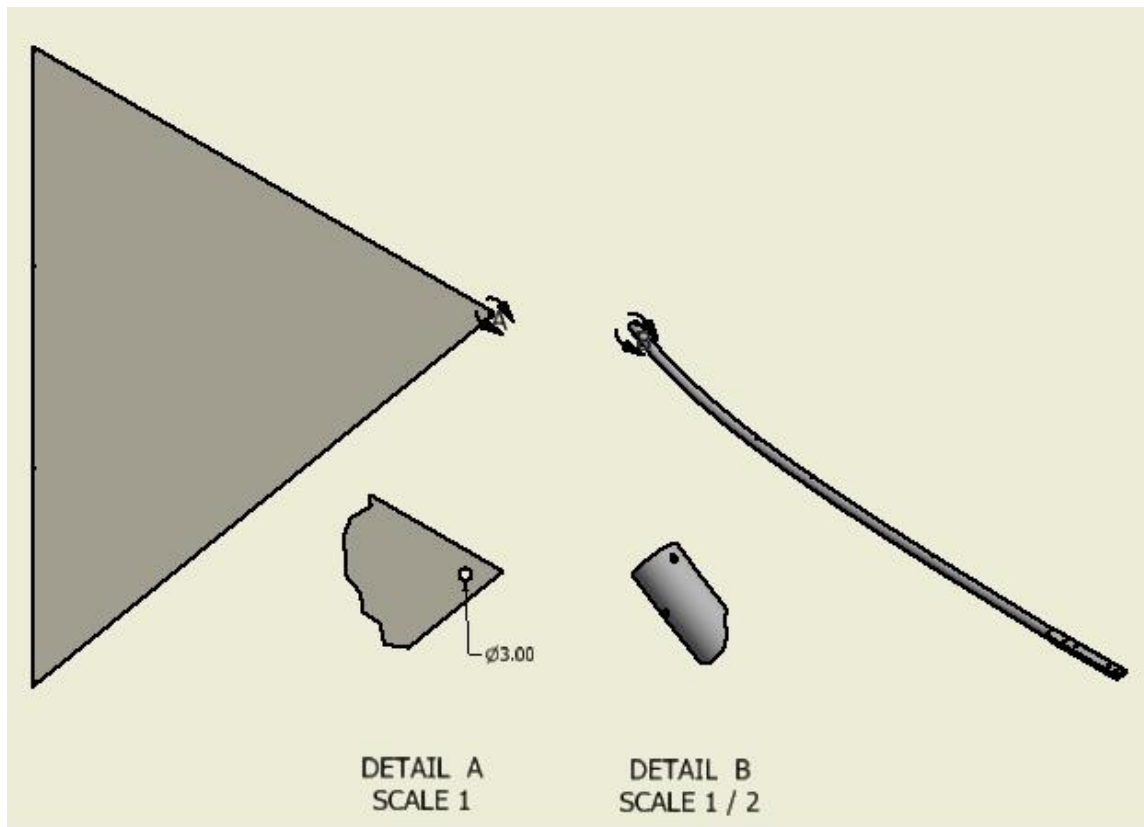


**FIGURA 3.80: DETALLE DEL EJE CONECTOR UNIDO A LA BIELA**

Con el sistema biela manivela en posición solamente falta unir la bomba al resto del sistema para completar el ensamble de todo el molino. Para instalar la bomba se debe asegurar que esta quede posicionada exactamente por debajo del tubo de PVC. Para esto se utiliza un cordón largo y un peso (puede ser una piedra, un pedazo de metal etc.) y se deja al cordón colgar desde el centro de la biela hasta llegar al piso para marcar el centro. Se debe asegurar que el cordón no se esté moviendo debido al viento. En este punto se clava la base de la bomba y se une el eje conector de la bomba y el eje conector de la biela con un perno M10 que es preferible que se suelde al eje conector de la biela para que no se suelte.

De esta forma termina el ensamble del sistema del molino y con todos los componentes unidos y conformando el sistema se procede al último paso antes de poner en funcionamiento del molino. Este último paso es el de unir las puntas de las velas con los ejes. Esto se debe hacer al final ya que si se realiza en algún momento anterior se corre el riesgo de que se accione el sistema y empiece a girar durante la instalación.

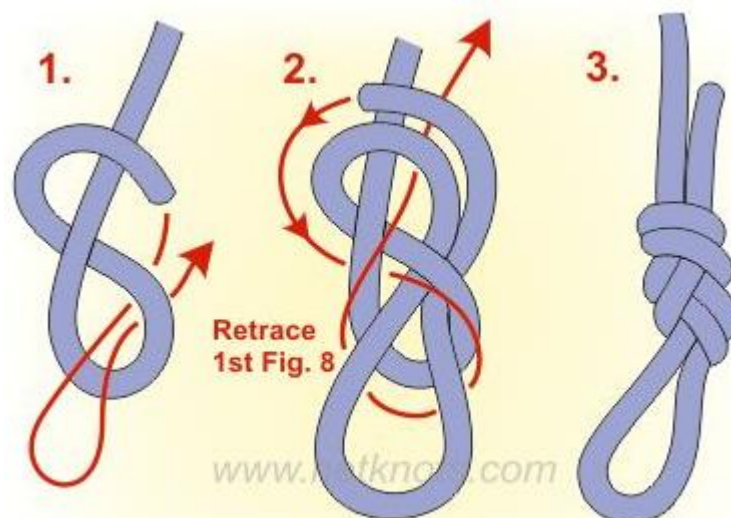
El hilo que se va a utilizar para unir es sedal de pesca de alta resistencia, se puede utilizar sedal de pesca de 50lb, que tiene un espesor aproximado de 0,25[mm] pero es muy resistente. Este material es ideal debido a su alta resistencia y no sufre desgaste debido a las condiciones, además de no ser costoso y se puede conseguir fácilmente. El hilo se debe sujetar en el hueco al final de la vela con el hueco que tienen los tubos de las aspas. Estos agujeros se pueden observar en la [figura 3.81](#).



**FIGURA 3.81: DETALLE DE LOS HUECOS EN LAS VELAS Y EN LOS TUBOS**

Estos huecos se debe unir con el hilo de pesca que se describió anteriormente con una longitud de 1[m] para las velas principales y 1,3 [m] para las velas arrancadoras, de esta forma se asegura que las velas arrancadoras tengan un ángulo de incidencia mayor y puedan arrancar el sistema.

Para asegurar que no se suelten las cuerdas de los huecos se recomienda hacer un nudo llamado ocho ya que este es muy resistente y sin importar las condiciones no se suelta. Como hacer el nudo 8 se describe en la [Figura 3.82](#) (Netknots.com, 2016).



**FIGURA 3.82: INSTRUCCIONES PARA HACER UN NUDO 8**

Una vez que se termina la construcción del sistema se recomienda hacer un tratado tanto de la madera como de la caña. Para esto se recomienda el uso de Solignum protege la madera y la caña contra hongos, polillas y la hace impermeable. Posteriormente también se recomienda dar de 2-4 capas con laca selladora para prolongar la vida útil del sistema.

## CAPÍTULO 4

### 4.1 Análisis de costos

Para hacer el análisis de costos se tiene que construir una tabla con todos los componentes que se tienen en el sistema para de esta forma incluir su valor unitario y poder saber cuál va ser el costo final del equipo. Estos resultados se presentan en la tabla 4.1

Nombre	Costo unitario	Cantidad	Costos adic	Valor total
Caña guadua x[20m]	12	5	5	65
Pernos 3/8*5 (con tuerca)	0,46	16	0	7,36
Rodelas 10	0,1	34	0	3,4
Tornillos M6x30	0,08	8	0	0,64
Tela Aguablock	15,95	5		79,75
M6x40	0,12	18	0	2,16
M4x25	0,03	4	0	0,12
m8x50	0,75	2	0	1,5
Tablon 23x4x240	15	2	30	60
Tratamiento de madera	20	1		20
Viga 7x14x5	25	1	30	55
Rodelas	0,05	9	0	0,45
Tubos dishierro	4,11	2	20	28,22
Rodelas	0,05	20		1
Perno 1/4x3	0,2	12	0	2,4
Perno 1/4x2	0,13	4	0	0,52
Tee	4,22	2	0	8,44
Tapon 75 m	1,41	1	0	1,41
Tapon 75 h	1,2	1	0	1,2
Eje piston	3,41	1	0	3,41
Piston	6,25	1	10	16,25
Caucho	1,32	1	0	1,32
Reduccion 2-1 in	1,75	2	0	3,5
Valvula check	35,53	2	0	71,06
Manguito mixto	0,84	2	0	1,68
Boquilla para manguera	0,18	1	0	0,18
Base bomba	30	1	0	30
Tubo pvc 160 mm	29,89	1	0	29,89
Rodamiento carga axial NTN 160mm	280	1	0	280
Rodamiento KOYO 30x55	27	2	0	54
Eje 30mm 1018	14,16666667	1	5	19,1666667
Tuberia 10 mm aisi 1018	3,41	1	5	8,41
Chumacera 30	18,5	2	0	37
Manguera 30m	0,65	30	0	19,5
TOTAL \$				913,936667

Tabla 4.1: Análisis de costos del sistema

## 4.2 Conclusiones

Este proyecto se propuso como un proyecto sin fines de lucro, es decir se realizó como un apoyo para las comunidades de menores recursos de la zona de la costa. Por este motivo se intentó reducir al máximo los costos sin tener como motivación ganar un beneficio del desarrollo del proyecto.

La motivación del trabajo de titulación fue poder aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de ingeniería mecánica para ayudar a comunidades en las que el acceso al agua resulte laborioso y de esta forma simplificar el acceso a la misma. La ingeniería mecánica nos provee con una forma de pensar distinta que nos ayuda a encontrar soluciones a problemas de la vida cotidiana. Para las personas que vivimos en ciudades desarrolladas el acceso al agua potable se da por sentado y es tan simple como abrir un grifo y tener acceso ilimitado a agua potable. Sin embargo, en las zonas rurales el acceso al agua potable muchas veces resulta complicado y laborioso.

Existen dos fuentes comunes de agua en las zonas rurales de la costa ecuatoriana. Por un lado, existen pozos de los cuales se extrae el agua pero el proceso es realizado en su mayoría con baldes y cuerdas y resulta muy laborioso. Por otro lado, existen ríos o riachuelos que proveen agua, aunque suele ser de mala calidad, esta se puede utilizar para animales. Por lo tanto el enfoque de este proyecto no es de proveer con agua potable para las comunidades, ya que para esto se debe hacer tratamiento de las agua, sino de reducir el esfuerzo que se debe realizar para tener acceso al agua que dependiendo de su calidad va a sujetarse cual es su aplicación.

Este proyecto fue meramente de diseño sin embargo se pueden pensar dos pasos que se podría seguir si se quiere desarrollar el sistema y realizar su construcción. Por un lado existe la posibilidad de conseguir financiamiento externo, por parte del gobierno o una ONG, para realizar la fabricación del sistema y distribuirlo en forma de kit con toso los componentes que se requieran y el manual de construcción. De esta forma se puede distribuir los molinos a comunidades que necesiten este tipo de sistema. El otro enfoque que se puede tomar es simplemente poner a disponibilidad del público todo el trabajo para que la gente lo pueda obtener e individualmente, siguiendo las instrucciones realice la construcción del sistema. La segunda opción se ve más factible por el momento y es algo que se desea hacer a corto plazo mientras que la primera opción se tiene para largo plazo.

Las complicaciones en la construcción del molino son al momento de elevar la estructura móvil y el rotor hacia la parte superior de la torre. Sin embargo, las instrucciones del Manual de Construcción explican detalladamente la manera correcta de hacerlo para evitar que se presenten mayores complicaciones.

Como se describió en la sección (2.2) el proyecto está enfocado para una comunidad de 25 personas y que estas puedan autoabastecerse de comida con el agua de riego, además de proveer agua para ganado. El caudal de 3 [m<sup>3</sup>] diarios es capaz de abastecer todas estas necesidades y este sistema es capaz de proveer este caudal, por lo que se ve como una solución viable para el problema propuesto. Por un lado cumple con las expectativas de extracción de agua que se requiere para una comunidad relativamente pequeña.



### 4.3 Recomendaciones

Al momento el país está pasando por un momento difícil tras sufrir una catástrofe debida al terremoto del pasado 16 de abril. Muchas de las ciudades de la costa quedaron completamente destruidas y con los servicios básicos colapsados. Este sistema podría aplicarse por el gobierno y que sean enviados los kits de construcción a las comunidades campesinas que se encuentran aisladas y sin acceso a agua potable. Este proyecto es más probable que se logre desarrollar si es presentado como una inversión gubernamental ya que el costo de aproximadamente \$1000 es un valor elevado para una comunidad campesina.

El costo se vuelve elevado principalmente por el precio del rodamiento de carga axial NTN. Para reducir el valor del sistema se puede encontrar una alternativa a este componente, es decir desarrollar un tipo de rodamiento producido en el país ya que el movimiento que se da en este eje no es rápido y se podría sustituir de alguna manera.

A pesar del costo elevado del sistema se debe recordar que este equipo funciona a partir de energía renovable. Este recurso está disponible a lo largo del año y no tiene ningún costo de la misma manera que reduce contaminación producida por el uso de bombas a gasolina. La energía eólica es un recurso gratuito y que mediante la aplicación de este sistema se puede aprovechar para el uso en comunidades de escasos recursos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Emrah Kulunk (2011). Aerodynamics of Wind Turbines, Fundamental and Advanced Topics in Wind Power, Dr. Rupp Carriveau (Ed.), ISBN: 978-953-307-508-2, InTech. <http://www.intechopen.com/books/fundamental-and-advanced-topics-in-wind-power/aerodynamics-of-wind-turbines>
- M. H. (2008). Aerodynamic of Wind Turbines (Second ed.). London: Earthscan.
- M.A. Sabbir, S.M. Ashfaquul Hoq, and S.F. Fancy (2011). Determination of Tensile Property of Bamboo for Using as Potential Reinforcement in the Concrete. (vol: 11 No: 5.). IJCEE-IJENS
- Green, D., Kretschmann, D., & Winandy, J. (1999). Mechanical properties of wood.
- Fraenkel, P. (1986). Water lifting devices. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Margrét Ósk Óskarsdóttir, 2014, A General Description and Comparison of Horizontal Axis Wind Turbine and Vertical Axis Wind Turbine, Master's thesis, Faculty of Industrial Engineering, Mechanical Engineering and Computer Science, University of Iceland, pp. 130.
- Dykes, K. & Kalmikov, A. Wind Power Fundamentals. Presentation.
- Rea Lozano, V. (2012). USO DE LA CAÑA GUADUA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN: EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL FRENTE A SISTEMAS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES (Máster). Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica.
- Gleick, P. Basic water requirements for human activities.
- Rottke, E. (2016). Mechanical properties of bamboo. [Bambus.rwth-aachen.de](http://bambus.rwth-aachen.de).  
[http://bambus.rwth-aachen.de/eng/reports/mechanical\\_properties/referat2.html](http://bambus.rwth-aachen.de/eng/reports/mechanical_properties/referat2.html)
- Van de Ven, N. (1977). Construction manual for a cretan windmill. Amersfort, the Netherlands: Development Cooperation Information Dept.
- Cajamar. (2005). *Series Temáticas*.

- <http://www.publicacionescajamar.es/pdf/series-tematicas/centros-experimentales-las-palmerillas/dosis-de-riego-para-los-cultivos.pdf>. (2nd ed., pp. 1-16). España.
- Cueva, L. (2015). Diseño y Construcción de un Generador Eólico de Eje Vertical Tipo Savonius para Producir 20 Watts (Pregrado). Escuela Politecnica Nacional.
- Mahzuz, H. (2010). Determination of Several Properties of a Bamboo of Bangladesh. <http://dx.doi.org/10.5923/j.jce.20130301.02>
- Villarrubia, M. (2015). *Energía eólica*. Barcelona: Ediciones CEAC.
- Galarza Dávila, J. (1987). *Diseño y Construcción de un Molino de Viento Aplicado en el Bombeo de Agua*. Pregrado. Escuela Politécnica Nacional-Facultad de Ingeniería Mecánica.
- Shigley, J. and Mischke, C. (1989). *Mechanical engineering design*. New York: McGraw-Hill.
- White, F. (1986). *Fluid mechanics*. New York: McGraw-Hill.
- Mann, R. (1979). *How to build a 'Cretan sail' wind-pump*. London: Intermediate Technology Publications.
- Saliba, G. (1988). Islamic Technology: An Illustrated History Ahmad Y. al-Hassan Donald R. Hill. Isis, 79(4), 723-724. <http://dx.doi.org/10.1086/354894>
- Quaschnig, V. (2009). *Regenerative Energiesysteme*. München: Hanser.
- Gleick, P. (2003). The Human Right to Water. *Water Nepal*, 10(1). <http://dx.doi.org/10.3126/wn.v10i1.97>
- Beer, F., Dorador G, J., & Murrieta Murrieta, J. (2010). *Mecánica de materiales*. México: McGraw-Hill.
- Netknots.com. (2016). *Figure Eight Knot - How to tie a Figure Eight Knot*. [online] Available at: [http://www.netknots.com/rope\\_knots/figure-eight/](http://www.netknots.com/rope_knots/figure-eight/) [Accessed 13 May 2016].
- Ayuji.com. (2016). [online] Available at: <http://ayuji.com/mecanica/images/bomba%20de%20agua%20de%20piston1.jpg> [Accessed 13 May 2016].