

SOLUCION INTEGRAL PARA EL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE Y
SISTEMA DE FERTIRIEGO EN EL VIVERO “LA FUENTE”, UTILIZANDO
ENERGIA ALTERNATIVA.

DIEGO FERNANDO CELIS TORRES
YESID GOMEZ PLATA
JOSE DEL CARMEN JULIO RODRIGUEZ



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA
2014

SOLUCION INTEGRAL PARA EL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE Y
SISTEMA DE FERTIRIEGO EN EL VIVERO “LA FUENTE”, UTILIZANDO
ENERGIA ALTERNATIVA.

DIEGO FERNANDO CELIS TORRES
YESID GOMEZ PLATA
JOSE DEL CARMEN JULIO RODRIGUEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

Ing. Jabid Eduardo Quiroga Méndez, Ms(c)

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA

2014

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	19
1. FORMULACION DEL PROBLEMA	20
1.1 IDENTIFICACION DEL PROBLEMA	20
1.2 JUSTIFICACION PARA LA SOLUCION DEL PROBLEMA	22
1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	23
1.3.1 Objetivo General	23
1.3.2 Objetivos Específicos	23
1.4 JUSTIFICACION DE LA SOLUCION DEL PROBLEMA	25
2. DISEÑO DEL SISTEMA EÓLICO	26
2.1 REQUERIMIENTO DE ENERGÍA Y NECESIDADES DE BOMBEO	26
2.1.1 Esquema del Sistema Hidráulico	27
2.1.2 Especificaciones del Sistema Hidráulico	27
2.1.3 Cálculo de la Energía a Suministrar por la Bomba	29
2.2 ESPECIFICACIÓN DEL RECURSO EÓLICO	30
2.3 DISEÑO MECÁNICO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA EÓLICO	32
2.3.1 Diámetro del Rotor	33
2.3.2 Cálculo del Número y Tamaño de las Palas del Rotor y su perfil	38
2.3.3 Diseño de la Araña	45
2.3.4 Diseño de la estructura de soporte	47

2.3.5	Cálculo de las cargas que actúan sobre las palas del rotor	48
2.3.5.1	Calculo Fuerza Centrifuga	48
2.3.5.2	Cálculo de las cargas aerodinámicas sobre el rotor	50
2.3.6	Diseño del Eje del Rotor	65
2.3.7	Detalles del Mecanismo Yugo Escocés	70
3.	SISTEMA DE FERTIRRIEGO	74
3.1	¿QUÉ ES EL FERTIRRIEGO?	74
3.2	HISTORIA	74
3.3	PROCESO DE DISEÑO	75
3.3.1	Consideraciones preliminares	75
3.3.2	Componentes del sistema	75
3.3.3	Cálculo del caudal requerido	78
3.3.4	Retención de agua en el suelo	84
3.3.5	Topografía del terreno	85
3.3.6	Diseño de la red hidráulica	87
3.4	RESULTADOS	91
3.5	ANALISIS ECONOMICO	95
4.	TORRE DE LA AEROBOMBA	97
4.1	DISEÑO DE LA TORRE	97
4.2	FABRICACION DE LA TORRE	98
4.3	CONSTRUCCION DE LA TORRE	101
5.	BOMBA DE PISTON	106
5.1	DISEÑO DE LA BOMBA	106

5.1.1 Dimensionamiento de la bomba	107
5.1.2 Materiales de fabricación	111
5.2 INSTALACIÓN DE LA BOMBA	112
5.3 PRIMERAS PRUEBAS DE BOMBEO	115
6. MEJORAMIENTO DEL SISTEMA	119
6.1 CAMBIOS REALIZADOS	119
6.2 PRUEBAS DE BOMBEO DESPUES DE LAS MEJORAS	125
CONCLUSIONES	128
BIBLIOGRAFIA	130
ANEXOS	132

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Entrada del Vivero “La Fuente”	20
Figura 2. Esquema general del sistema	24
Figura 3. Sistema de aerobombear	27
Figura 4. Rango de capacidad energética	29
Figura 5. Instrumento empleado para las mediciones	30
Figura 6. Velocidad del viento	31
Figura 7. Detalle de componentes de la turbina	32
Figura 8. Costos aerobomba	36
Figura 9. Relación entre el coeficiente de solidez Ω y el TSR	38
Figura 10. Curvas de $\eta_{(aerod.)}$ - TSR	39
Figura 11. Perfil Recto y perfil curvo	42
Figura 12. Comparación del Rendimiento aerodinámico	43
Figura 13. Comparación del flujo de aire	44
Figura 14. Araña o soporte central	45
Figura 15. Foto de la araña fabricada	46
Figura 16. Componentes del cabezal de la turbina	47
Figura 17. Diagrama viento sobre álabe	50
Figura 18. Fuerzas de viento sobre el alabe	51
Figura 19. Configuración inicial de simulación	52
Figura 20. Selección del fluido para simular	53
Figura 21. Parámetros de rugosidad	54
Figura 22. Parámetros de presión y temperatura	55
Figura 23. Resolución de análisis	56
Figura 24. Delimitación de la zona de análisis	57
Figura 25. Selección de resultados deseados	58

Figura 26.	Ejecución de la simulación	59
Figura 27.	Trayectoria de flujo	60
Figura 28.	Trayectorias de flujo 2 y 3	61
Figura 29.	Trayectoria de flujo 4	62
Figura 30.	Efecto del ángulo de ataque	64
Figura 31.	Cargas en el eje	65
Figura 32.	Cortante y Momento flector	66
Figura 33.	Graficas de comportamiento cinemático	71
Figura 34.	Detalle de los componentes y ensamble del mecanismo yugo	72
Figura 35.	Fotografía del Yugo escocés construido	73
Figura 36.	Marco Útil	82
Figura 37.	Levantamiento topográfico Vivero La Fuente	85
Figura 38.	Aumento de la presión debido a las pendientes	86
Figura 39.	Plano del Vivero La Fuente en el entorno de EPANET	87
Figura 40.	Ejemplo de propiedades de un nodo en EPANET	88
Figura 41.	Diagrama del cabezal de riego	89
Figura 42.	Diagrama y foto del distribuidor	90
Figura 43.	Impacto en el tiempo de trabajo en los cultivos	92
Figura 44.	Ahorro de agua con el sistema	94
Figura 45.	Prueba de presión de trabajo y montaje del cabezal de riego	96
Figura 46.	Planos de la torre	97
Figura 47.	Ajuste de la base de la torre	98
Figura 48.	Trabajo de soldadura en la punta	99
Figura 49.	Pintura y terminado de la torre	100
Figura 50.	Construcción Torre 1	101
Figura 51.	Construcción Torre 2	102
Figura 52.	Construcción Torre 3	103
Figura 53.	Construcción Torre 4	104
Figura 54.	Construcción Torre 5	105
Figura 55.	Componentes de la bomba	106

Figura 56.	Detalles de la bomba	107
Figura 57.	Diagrama de fuerzas en el pistón	108
Figura 58.	Fuerza sobre el vástago Vs Diámetro de pistón	110
Figura 59.	Instalación de la bomba	112
Figura 60.	Instalación de la bomba 2	113
Figura 61.	Aerobomba Instalada	114
Figura 62.	Grafica Prueba de caudal 1	116
Figura 63.	Unión a la manguera de la bomba centrífuga	117
Figura 64.	Grafica Prueba de caudal a 125 metros	118
Figura 65.	Bomba TOBO	119
Figura 66.	Instalación de la bomba TOBO	120
Figura 67.	Bomba TOBO instalada	121
Figura 68.	Álabes reforzados	122
Figura 69.	Cambio de la varilla de transmisión	123
Figura 70.	Triple sello en la unión Bomba-Varilla	124
Figura 71.	Guías para la varilla oscilante	125
Figura 72.	Volumen bombeado después de las mejoras	126
Figura 73.	Grafica de caudal después de las mejoras	127
Figura 74.	Pérdidas por conexión de los goteros	132

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Valores estimados de la eficiencia para pequeñas máquinas eólicas	34
Tabla 2. Parámetros del rotor	41
Tabla 3. Torque obtenido según perfil	44
Tabla 4. Resultados obtenidos de la Simulación	63
Tabla 5. Factores según acabado del eje	68
Tabla 6. Tipos de suelo, Capacidad de campo y velocidad de infiltración	80
Tabla 7. Factor de corrección por pendiente	81
Tabla 8. Requerimientos de agua para cítricos	82
Tabla 9. Requerimientos de agua cítricos 2	83
Tabla 10. Horas de trabajo en los cultivos sin el sistema	91
Tabla 11. Horas de trabajo en los cultivos con el sistema	93
Tabla 12. Costos sistema de fertirriego	96
Tabla 13. Datos Prueba de caudal 1	116
Tabla 14. Datos Prueba de bombeo a 125 metros	118
Tabla 15. Pruebas de caudal después de las mejoras	126
Tabla 16. Datos de velocidad del viento	138

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Perdidas de carga en los emisores	132
ANEXO B. Planos aerobomba, diseño e instalación	134
ANEXO C. Mediciones del viento	138
ANEXO D. Diagramas de funcionamiento del sistema	140
ANEXO E. Manual de Mantenimiento	142

RESUMEN

TITULO: SOLUCION INTEGRAL PARA EL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE Y SISTEMA DE FERTIRIEGO EN EL VIVERO “LA FUENTE”, UTILIZANDO ENERGIA ALTERNATIVA*

AUTORES:

Diego Fernando Celis Torres
Yesid Gómez Plata
Jose del Carmen Julio Rodríguez**

PALABRAS CLAVE: Energía renovable - fertirriego - turbinas eólicas - aerobomba

DESCRIPCION:

El desarrollo de este proyecto abarca el estudio y la solución de las necesidades particulares de una hacienda productora de cítricos ubicada en el municipio de “Los Santos” del departamento de Santander. Esta zona no cuenta con el servicio de acueducto, lo que obliga a recurrir a pozos y bombas eléctricas para la obtención de agua. Con el fin de aprovechar el potencial eólico de la zona, se diseña y construye una aerobomba de 10 metros de altura con el objetivo de elevar el agua a través de la finca hasta un tanque de almacenamiento para posteriormente mezclarla con nutrientes y distribuirla en los cultivos mediante una red de riego especialmente diseñada.

Este documento contiene las consideraciones preliminares, los procesos de diseño y los resultados reales obtenidos del sistema que fue puesto en operación en Enero del año 2014. Se describe de forma detallada el proceso de diseño de la turbina eólica incluyendo las mediciones del viento, el dimensionamiento de los álabes, los componentes del rotor y el mecanismo de transmisión de potencia. Se realiza un estudio básico de los requerimientos de agua para los cultivos particulares de la propiedad (Cítricos) para conocer el caudal que debe proveer la bomba y para dimensionar la red y el cabezal del sistema de fertirriego.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director Jabid Quiroga

ABSTRACT

TITLE: INTEGRATED SOLUTION FOR WATER SUPPLY AND FERTIGATION SYSTEM IN “LA FUENTE” FARM, USING CLEAN ENERGY*.

AUTHORS:

Diego Fernando Celis Torres
Yesid Gómez Plata
José del Carmen Julio Rodríguez **

KEY WORDS: Clean energy – fertigation - wells - wind power –wind pump.

DESCRIPTION:

The development of this Project covers the study and solution of the specific needs of “La Fuente Farm”, a citric fruits producer property located in “Los Santos” municipality in the Santander, Colombia. This area is not covered by the water supply service, making the use of wells and electric pumps the only available way to obtain water for consumption and farming. In order to make use of the wind power available, the owners of the farm ordered the design and construction of a wind pump capable of rise water to a reservoir and a fertigation system to mix and deliver the water to the crops.

This document describes the preliminary analysis, the design and construction process and the actual results of the entire system. Its operative life began in January 2014 in order to perform the necessary tests and to verify the system is working properly. The whole design process of the wind turbine is described, including wind measurement, blade sizing, rotor components and power transmission system. It was necessary to perform a water requirement analysis for the specific variety of citric trees in the farm, in order to know the hydraulic flow needed in the wind pump and the capacity needed in the fertigation system.

* Undergraduate thesis

** Physical-Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering School, Director Jabid Quiroga

INTRODUCCION

El desarrollo tecnológico de la agroindustria colombiana, al igual que otros sectores, se encuentra un estado de desigualdad bastante considerable. Por un lado, las grandes empresas con procesos altamente sofisticados de producción y procesamiento, y por el otro, los productores a baja y mediana escala que aun aplican soluciones empíricas a los problemas que logran identificar. La tecnología está al alcance de aquellos que pueden costear soluciones importadas, porque la magnitud de su actividad lo permite y requiere, pero el sector agrícola en nuestro país está constituido en buena parte por pequeños y medianos empresarios, que requieren soluciones formuladas a su medida, que les permita ser competitivos y crecer. Si a esta situación adicionamos la escasa actividad investigativa en el campo de la energía limpia, notamos un vacío tecnológico nacional que actualmente es aprovechado por las industrias extranjeras.

El proyecto del Vivero La Fuente se desarrolló de forma teórico-práctica, aplicando conocimientos de ingeniería en la formulación de soluciones para los requerimientos específicos identificados, principalmente la falta del servicio de acueducto (debido a las características geográficas de la zona). Partiendo de las necesidades puntuales del Vivero La Fuente, se realizó un proceso de evaluación preliminar de las condiciones generales, incluyendo la identificación de los puntos de toma de agua, los requerimientos de suministro, las características del terreno, características de los cultivos y el potencial eólico de la zona. Con esta información se desarrollaron los subsistemas necesarios para cumplir con todos los requerimientos, integrándolos en una solución global que fue implementada en la finca, cuidando todos los detalles para que el resultado final sea un logro notable que sirva de modelo y marque un precedente para proyectos futuros relacionados con el campo.

1. FORMULACION DEL PROBLEMA

1.1 IDENTIFICACION DEL PROBLEMA

El vivero “La Fuente” es una propiedad de aproximadamente 2 hectáreas, dedicada al cultivo y la comercialización de productos agrícolas. Se encuentra ubicada en el municipio Los Santos del departamento de Santander y al igual que las propiedades vecinas no cuenta con el servicio de acueducto. La fuente de agua del predio es un conjunto de estanques excavados para este fin que abarcan aproximadamente un tercio del terreno. También se cuenta con un pozo de dieciocho metros que se creó para la obtención de agua potable mediante una bomba sumergible tipo lapicero.

Figura 1. Entrada del Vivero “La Fuente”



Fuente: Autores

El cultivo de fruta y vegetales en el vivero “La Fuente” es una de sus principales actividades económicas. Las labores de cuidado y mantenimiento de las plantaciones son realizados por personas contratadas por temporadas, quienes usan técnicas empíricas no tecnificadas. Estas prácticas logran resultados que pueden mejorarse fácilmente mediante la implementación de la tecnología correcta. La búsqueda del mejoramiento continuo de sus procesos productivos ha llevado a los empresarios del vivero La Fuente a solicitar servicios de ingeniería que les proporcionen sistemas con los cuales se obtenga un mayor control de variables mediante la aplicación efectiva de la tecnología disponible y el desarrollo de soluciones personalizadas.

Se ha solicitado el diseño y construcción de una solución completa que incluye un sistema de fertirriego para los cultivos del predio, un sistema de bombeo de agua de los estanques que alimente el sistema de fertirriego y adicionalmente evaluar la viabilidad de aprovechar el recurso eólico disponible para suministrar la energía requerida por los subsistemas anteriormente mencionados.

1.2 JUSTIFICACION PARA LA SOLUCION DEL PROBLEMA

Observando las características de la zona y tomando como referencia las fincas aledañas es evidente que el Vivero La Fuente tiene un gran potencial. El proceso de investigación preliminar permite establecer el alcance de la implementación de la solución, para comparar con los resultados esperados. El costo de los estudios necesarios de las condiciones actuales de la propiedad, la adecuación del pozo y los estanques, la construcción y la mano de obra requeridos por el proyecto son asumidos por el cliente (El Vivero La Fuente).

1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.3.1 Objetivo General Solucionar los requerimientos puntuales del Vivero La Fuente mediante el diseño e implementación de un sistema integral de suministro de agua y fertirriego, mejorando su productividad, haciendo uso racional de los recursos y considerando el potencial eólico local, usando como guía los valores y la filosofía contenidos en la Misión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

1.3.2 Objetivos Específicos Desarrollar un sistema de fertirriego por goteo compuesto por los siguientes subsistemas:

Subsistema de Aerobombeo

- ✓ Diseñar, construir e instalar una turbina eólica con un rotor multipala de 3 metros de diámetro aproximadamente, que proporcionará la energía a una bomba de pistón.
- ✓ Construir una torre de soporte para la turbina eólica con una altura de 10 metros.
- ✓ Bombear del estanque a un tanque de almacenamiento, $3m^3$ de agua por día a una altura de 13 metros aproximadamente y realizar un proceso de selección para la adquisición de la bomba de pistón.

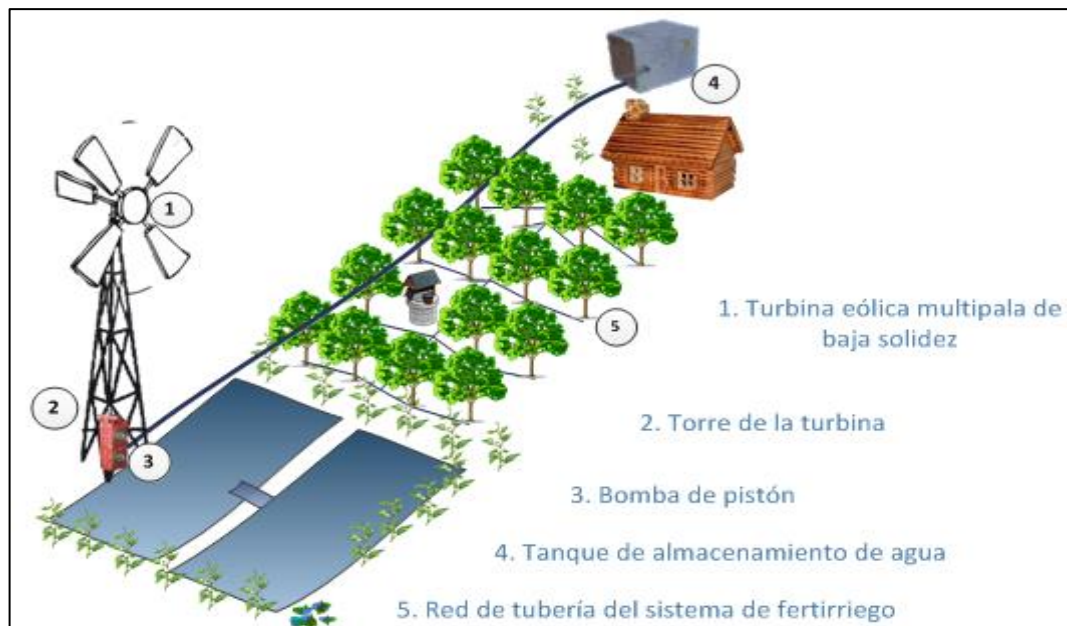
Subsistema de distribución de agua y fertilizante por goteo

- ✓ Para 300 árboles de cítricos contenidos en un área de 2 hectáreas. Este subsistema proveerá el agua y los nutrientes y operará de forma automática.

Adicionalmente,

- ✓ Investigar y recopilar la información necesaria para la realización del proyecto, incluyendo recursos bibliográficos e internet así como las normas técnicas aplicables.
- ✓ Comprobar el rendimiento del sistema de bombeo y la turbina eólica mediante pruebas de caudal y presión en el sistema construido.

Figura 2. Esquema general del sistema



Fuente: Autores

1.4 JUSTIFICACION DE LA SOLUCION DEL PROBLEMA

La implementación de la solución propuesta permite satisfacer las necesidades puntuales del vivero La Fuente, incluyendo sus requerimientos de agua y el mantenimiento de sus cultivos productivos en las mejores condiciones posibles. El proceso de diseño está guiado por las normas técnicas aplicables. Cada subsistema es probado individualmente y dentro del conjunto.

La formulación general del proyecto y su formato de subsistemas interconectados tienen como propósito brindar una gran flexibilidad al resultado final, posibilitando la implementación de mejoras en caso de ser necesarias sin problemas de incompatibilidad.

La solicitud del cliente acerca de la evaluación del potencial eólico como fuente de energía para el sistema es abordada como un subsistema individual. El sistema eólico se dimensiona en base a estudios locales del viento y se estima la cantidad de energía que puede proporcionar. Debido a la importancia de disponer del agua cuando sea necesaria, la flexibilidad del sistema permite el uso de un sistema de bombeo de respaldo, garantizando una alta confiabilidad del sistema.

2. DISEÑO DEL SISTEMA EÓLICO

El sistema eólico es el encargado de captar la energía cinética del viento, por medio de la rotación de las aspas de la turbina y transformarla en energía mecánica rotacional, para luego entregarla en forma de movimiento alternativo lineal, por medio del mecanismo de yugo escocés, a la bomba de pistón.

Para el diseño de este sistema se debe conocer el requerimiento de energía y las necesidades de bombeo específicas para la aplicación de fertirriego. Luego se corresponde con el diseño de todos los componentes que conforman al sistema, teniendo como fin el menor costo total posible (de construcción, instalación, servicio y mantenimiento).

2.1 REQUERIMIENTO DE ENERGÍA Y NECESIDADES DE BOMBEO

El requerimiento de energía del sistema hidráulico viene dado principalmente por dos parámetros que son:

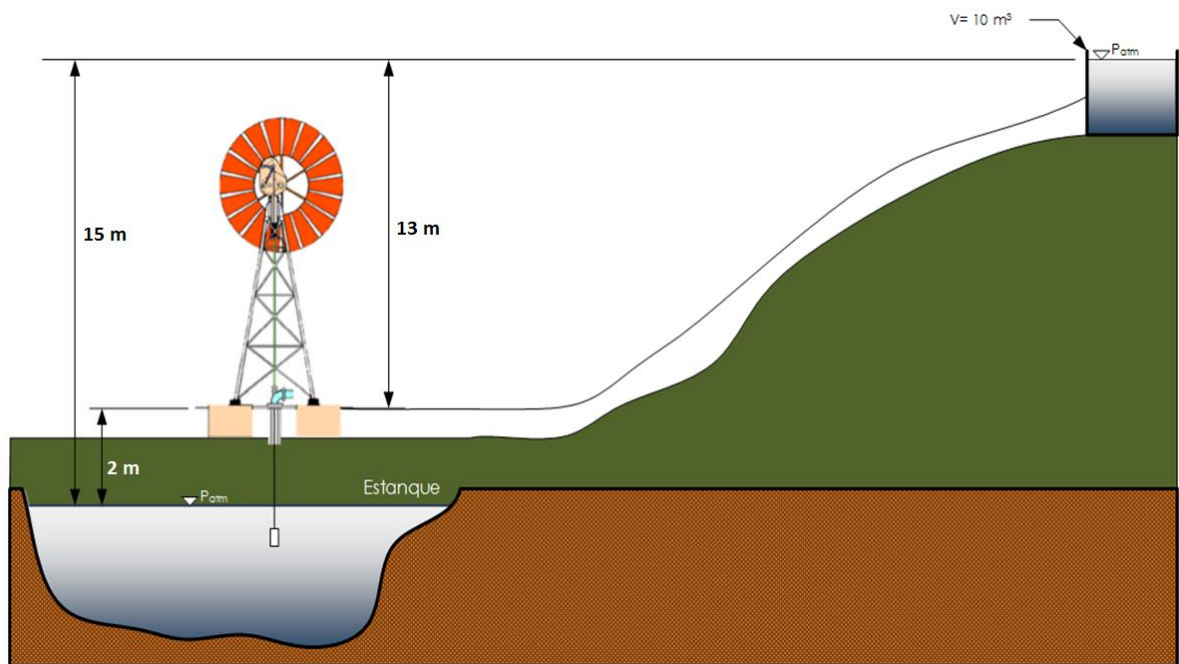
- El caudal a bombear
- La altura de bombeo

El caudal a bombear depende de la demanda de agua diaria del sistema de fertirriego, valor que se calcula en el capítulo del Sistema de Fertirriego. Por otro lado, la altura de bombeo está dada por la diferencia de altura entre el lugar de emplazamiento de la bomba y el tanque de almacenamiento. Para determinar el requerimiento exacto de energía del sistema hidráulico es necesario tener en cuenta los demás componentes que lo conforman y todas las pérdidas que se generan en el sistema.

Como un primer paso se cuantifica la demanda de agua promedio anual para la aplicación de fertirriego y el total de la altura de bombeo al tanque de almacenamiento.

2.1.1 Esquema del Sistema Hidráulico. Representación gráfica del sistema de aerobombearo indicando diferenciales de altura y puntos de toma y descarga de agua

Figura 3. Sistema de aerobombearo



Fuente: Autores

2.1.2 Especificaciones del Sistema Hidráulico

El diseño y análisis del sistema de fertirriego establece el requerimiento diario de agua en $3 \text{ (m}^3/\text{día)}$. Es preciso aclarar que la capacidad de entrega de la fuente de agua cumple con el requerimiento de agua y con el fin de que la instalación

eólica responde con las exigencias futuras, se tiene en cuenta un incremento a 4 ($m^3/día$) para los próximos años.

De la medición que se realiza en el lugar de emplazamiento del sistema se tiene una altura manométrica total de 15 (m). Ver figura 3.

Para el cálculo de la altura total real del sistema de bombeo se utiliza la ecuación de Bernoulli.

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + h_b = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + h_{perdidas}$$

Parámetros de frontera:

$v_1 = 0$; deposito de agua en el rio

$v_2 = 0$; Tanque de almacenamiento de agua

$p_1 = 0$; Presión atmosférica

$p_2 = 0$; Presión atmosférica

De la ecuación anterior se reemplazan los parámetros de frontera y se obtiene la altura total del sistema

$$h_b = (h_2 - h_1) + h_{perdidas}$$

$$Altura Total \Rightarrow h_b = (h_2 - h_1) + h_{perdidas} = (13 + 2) + 1.5 = 16.5 m$$

Entonces, las especificaciones del sistema hidráulico son:

$$Caudal diario a suministrar = 3 m^3/día$$

$$Altura Total de Bombeo = 16.5 m$$

2.1.3 Cálculo de la Energía a Suministrar por la Bomba. Conocida la cantidad necesaria de agua por día ($3 \text{ m}^3/\text{día}$) y la altura total de bombeo (16.5 m), la demanda total de energía hidráulica puede expresarse en m^4 ($\text{m}^3 \cdot \text{m}$) a través de:

$$E_H = Q \cdot H$$

$$E_H = 3 [\text{m}^3] \cdot 16,5 [\text{m}] = 49,5 [\text{m}^4]$$

Donde;

$E_H = \text{Energía hidráulica en } \text{m}^4$

$Q = \text{Requerimiento de agua en } \text{m}^3$

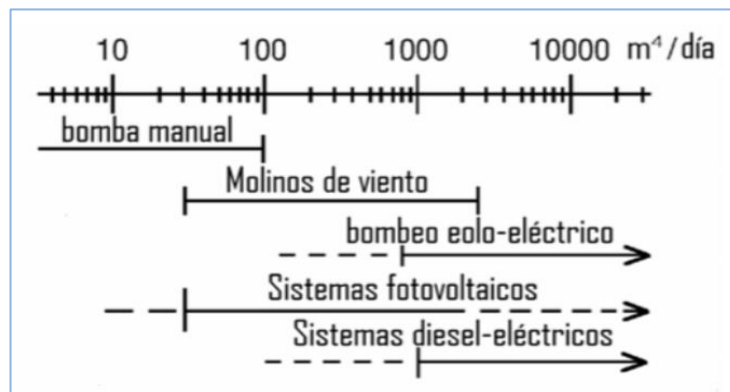
$H = \text{Altura manométrica total en } \text{m}$

La energía hidráulica se expresa generalmente en unidades de tiempo de acuerdo a las especificaciones del sistema. Para este caso, dado el requerimiento de agua por día, la energía hidráulica se expresa en días, entonces:

$$E_H = 49,5 [\text{m}^4/\text{día}]$$

Este valor además sirve para validar la selección de un sistema de aerobombear como solución a la necesidad en base a los requerimientos de la misma, como se puede observar en la siguiente imagen donde se expone el rango de aplicación varias alternativas.

Figura 4. Rango de capacidad energética



Fuente: Autores

Para nuestro caso, la demanda de energía hidráulica tiene un valor de $49,5 [m^4/día]$, situándose en el inicio del rango de aplicación de los molinos de viento.

Por otro lado, el requerimiento de energía en Julios, será:

$$E = V \cdot \rho_{agua} \cdot g \cdot H$$

$$E = 5(m^3) \cdot 1000 \left(\frac{kg}{m^3}\right) \cdot 9.8 \left(\frac{m}{s^2}\right) \cdot 15(m)$$

$$E = 735.000 [J]$$

2.2 ESPECIFICACIÓN DEL RECURSO EÓLICO

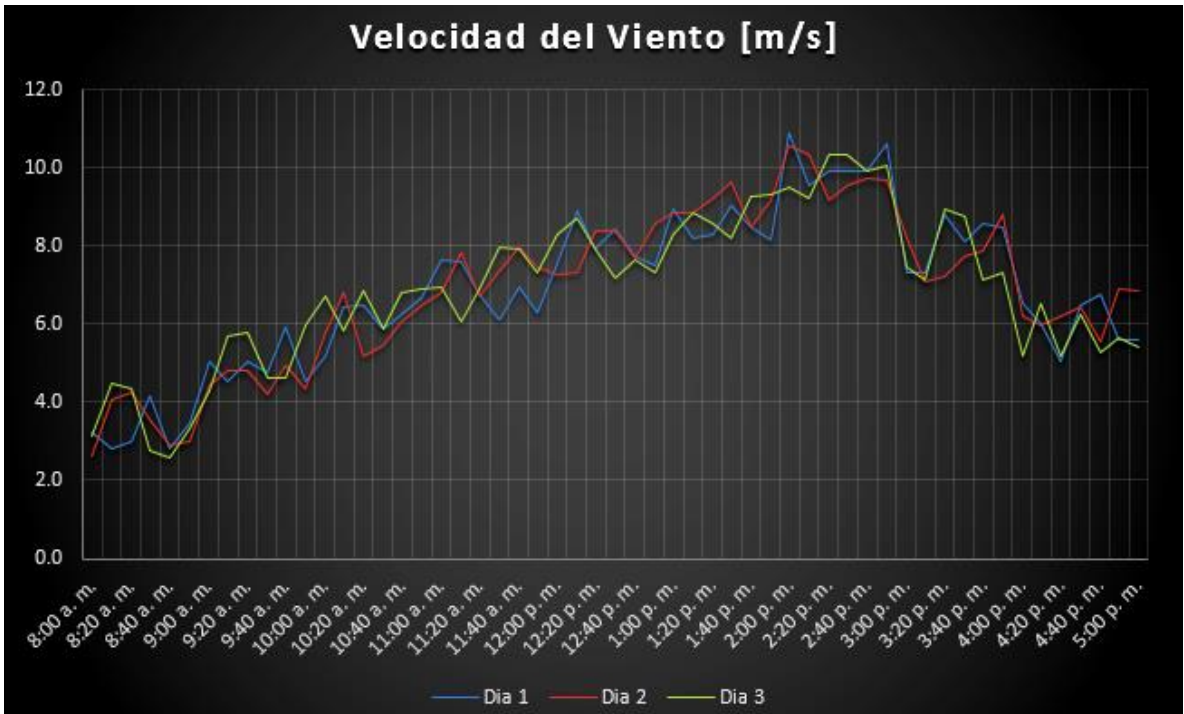
Figura 5. Instrumento empleado para las mediciones



Fuente: Autores

Del estudio del recurso eólico de la zona de emplazamiento del molino de viento, se obtuvieron los siguientes datos de mediciones realizadas durante 3 días.

Figura 6. Velocidad del viento



Fuente: Autores

De las mediciones se observa un periodo útil de aproximadamente 10 horas, con velocidades mínimas de viento en dicho período en torno a los 3 [m/s].

Por tanto, el diseño de la turbina establecerá la velocidad del viento necesaria para el arranque en 3 [m/s], tal que le permita a esta operar durante el período de 10 horas.

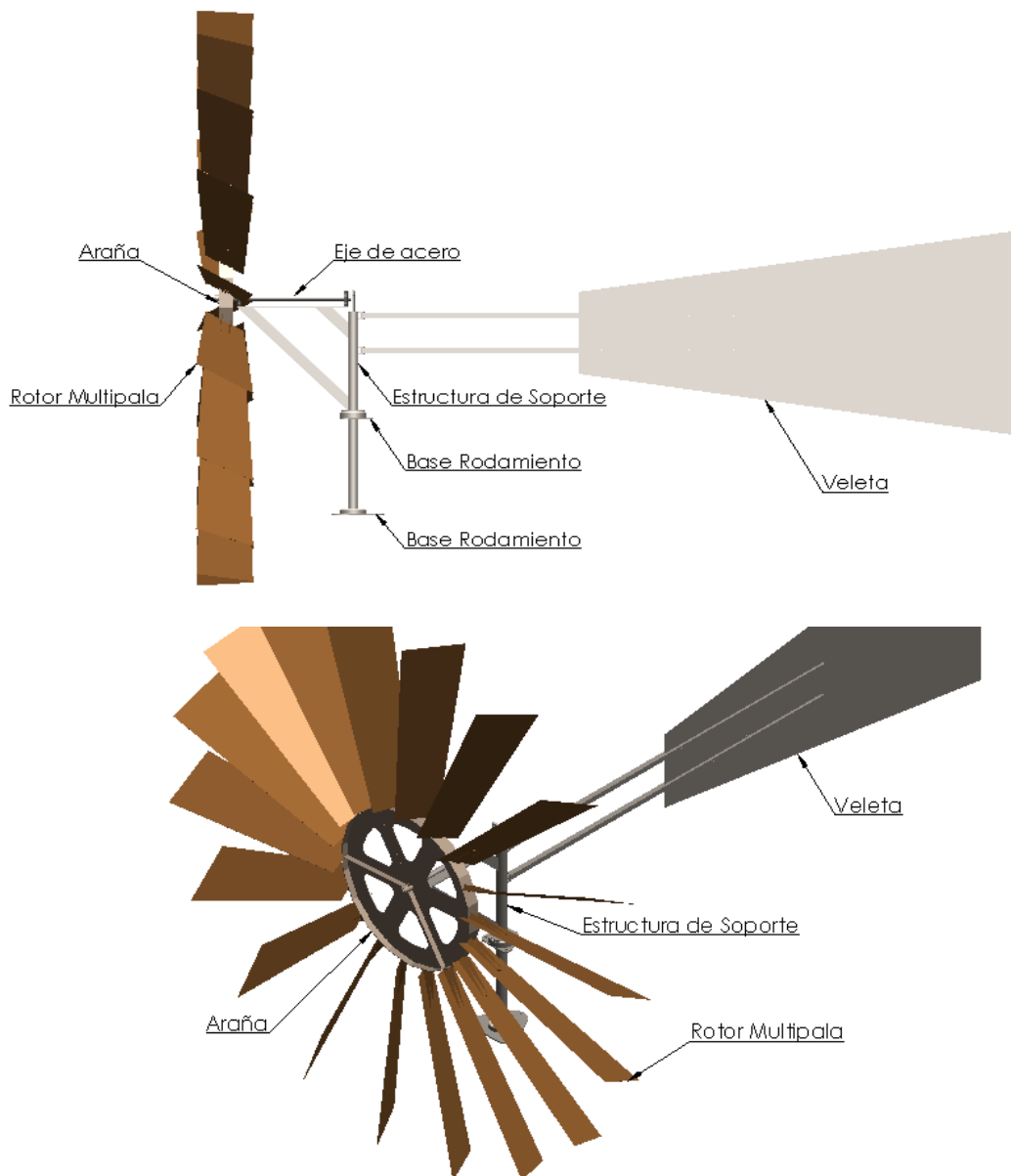
No se realizó el registro de la dirección del viento puesto que:

- El diseño considera la implementación de una veleta para la turbina.
- Se percibió poca variación de la dirección predominante del viento durante las mediciones.

2.3 DISEÑO MECÁNICO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA EÓLICO

El sistema eólico está conformado por varios elementos tales como el rotor, que consta principalmente de unas palas, una araña, en la que van sujetas dichas palas, un eje principal, el mecanismo biela-manivela además de otros elementos, como se indica en la siguiente figura.

Figura 7. Detalle de componentes de la turbina



Fuete: Autores

El diseño de cada uno de estos elementos se muestra a continuación. Con el objetivo de una mayor claridad y orden, el final del capítulo está reservado al cálculo que respalda y valida el diseño de los componentes. Comprende los estudios necesarios que implica el diseño, tales como estudios de carga estática, resistencia de materiales, fatiga, y cargas aerodinámicas.

2.3.1 Diámetro del Rotor. Dado el requerimiento de energía para la bomba, calculado en la sección 2.1.3 y con una eficiencia del sistema de bombeo del 90%, la energía a suministrar por el sistema eólico será de 816667 J por día.

La potencia que puede suministrar una turbina eólica de eje horizontal viene dada por la siguiente ecuación.

$$N_{eólica} = \eta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^3$$

η = *eficiencia de la maquina eólica*

ρ = *densidad del aire*

A = *área del rotor*

v = *velocidad del viento de frente al área de la turbina*

Donde la eficiencia de la maquina eólica es un factor que establece cuanta energía de la disponible en el flujo de aire es realmente capaz de entregar la turbina al eje principal.

Dicha eficiencia debe fijarse en forma aproximada en el diseño de la maquina eólica, puesto que es un factor desconocido, para lo que se hace uso de la Tabla 1 donde se especifican valores de eficiencias comunes para varios tipos de maquinas eólicas. Dichos valores son obtenidos de las maquinas eólicas existentes en el mercado.

Tabla 1. Valores estimados de la eficiencia para pequeñas máquinas eólicas

Máquina Eólica	Eficiencia en %	
	Construcción Simplificada	Diseño Optimo
Bomba de agua multipala	10	30
Bomba de agua de palas de tela	10	25
Bomba de agua Darrieux	15	30
Aeromotor Savonius	10	20
Prototipos de aeromotores pequeños < 2kW	20	30
Prototipos de aeromotores medianos de 2 a 10 kW	20	30
Prototipos grandes de más de 10 kW	---	30 a 40
Generador eólico Darrieux	15	35

Fuente: Pedro F. Diez

De acuerdo a la tabla los valores de eficiencia para la maquina eólica que se desea diseñar van del 10% para una construcción simplificada al 30% para una construcción con diseño optimo.

Un valor de eficiencia del 10% en las operaciones de cálculo puede llevar a incurrir en un sobredimensionamiento del rotor, acarreado un incremento del costo de material, producción y transporte.

Por otro lado, una elección del valor de la eficiencia del 30% podría causar como resultado un diseño inadecuado que no cumpla con los requerimientos energéticos, que en este proyecto se traduce a no suplir la demanda de agua diaria.

Con el fin de evitar cualquiera de los dos inconvenientes expuestos anteriormente y teniendo conciencia de que se desea realizar un diseño óptimo al menor coste posible, se acuerda trabajar con un valor de eficiencia de la maquina eólica del 20%, que corresponde al valor medio de eficiencia para el rango dado.

Para el valor de la densidad del aire, de acuerdo a los datos obtenidos en la medición y considerando que durante el año se presenta una variación del 10 al 15% debido a las fluctuaciones de presión y temperatura, se acuerda trabajar con un valor de densidad de $1.2041 \text{ (kg/m}^3\text{)}$.

Con los valores de eficiencia de la maquina eólica y densidad del aire, la formula se puede reescribir de la siguiente forma:

$$N_{eólica} = 0.095 \cdot D^2 \cdot v^3$$

Ahora, con la suficiente recolección de datos correspondientes a las velocidades del viento en función del tiempo, junto con otras propiedades como la temperatura, humedad y presión, podría realizarse un estudio detallado que permita caracterizar el comportamiento del viento y que a su vez sirva para determinar el diámetro más adecuado para el rotor.

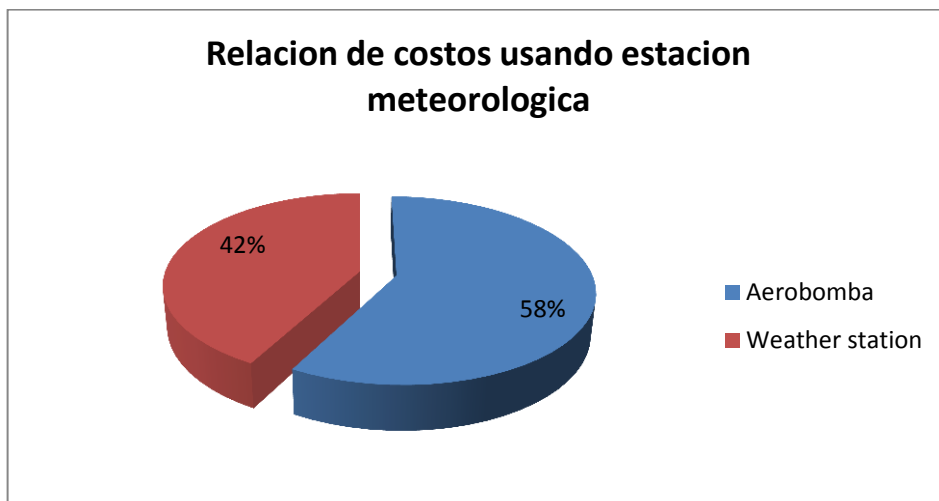
Esta sería la forma más precisa de determinar el diámetro, pero dicha medición de tiempo debe hacerse durante mínimo un año, con el fin de, por lo menos, contar con un período completo de tiempo (en el que se consideran todas las estaciones

del año). Lo ideal sería, de hecho, contar con un histórico de los últimos años, 3-5 años, para considerar y/o determinar una tendencia de cambio en el comportamiento del viento.

Otro percance que presenta este enfoque, es que obviamente, se requiere un equipo de medición para tal fin, específicamente una estación meteorológica, la cual tiene un costo en el mercado considerable que oscila entre 1.2 y 2 millones de pesos.

Si se considera que el costo estimado de todo el sistema de aerobombeo, que en esta fase del proyecto solo se puede estimar en base al precio de los molinos de viento ofrecidos en el mercado latinoamericano, oscila de 4 a 10 millones de pesos, se observa claramente que el costo del instrumento puede representar hasta un 40% del valor de todo el proyecto si se considera su utilización, sin embargo, su implementación en un proyecto de este tipo no constituye un ahorro en diseño de tal magnitud, por tanto, se hace necesario otro enfoque mas práctico y económico que se ajuste a las circunstancias del proyecto.

Figura 8. Costos aerobomba



Fuente: Autores

Dicho lo anterior, el enfoque a tomar será considerar que, puesto que el periodo de operación de la turbina es de 10 horas con una velocidad mínima de 3 [m/s] (correspondiente a la velocidad de arranque) de acuerdo a la **sección 2.2** y que el requerimiento de energía es de 816.667 J/día de acuerdo a la **sección 2.3.1**, se determinará un diámetro tal que permita a la turbina suministrar dicho requerimiento de energía trabajando a condiciones mínimas, de esta forma se asegura que incluso en tales condiciones de operación se logre bombear el volumen demandado.

Por ende,

$$E = 0.095 \cdot D^2 \cdot v^3 \cdot t$$

$$D = \sqrt{\frac{E}{0.095 \cdot v^3 \cdot t}}$$

$$D = \sqrt{\frac{816.667 \text{ [J]}}{0.095 \cdot 3 \text{ [m/s]}^3 \cdot 36000 \text{ [s]}}}$$

$$D = 3 \text{ [m]}$$

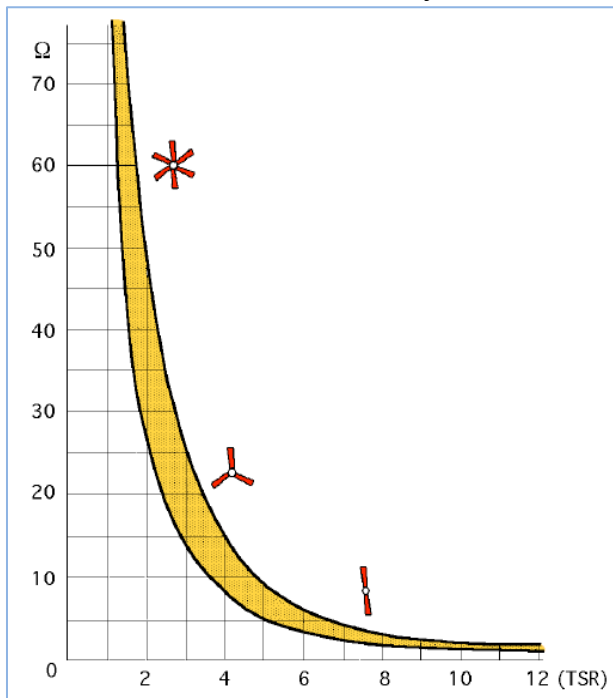
De esta forma, se obtiene que 3 [m] es el diámetro requerido para que la turbina suministre el caudal requerido operando durante 10 horas a velocidad mínima. Dado que este diámetro es conservador, debido al modo en que se obtuvo, es válido trabajar con valores un tanto menores.

2.3.2 Cálculo del Número y Tamaño de las Palas del Rotor y su perfil. La determinación del número de palas del rotor, como a su vez, el ancho de dichas palas, se desprende de una característica propia de los diferentes tipos de turbinas eólicas de eje horizontal, denominada coeficiente de solidez.

La solidez Ω de un rotor se puede interpretar como la relación entre el área total de las palas y el área barrida por dicho rotor. El coeficiente de solidez guarda una relación inversa con el TSR, esto implica que un rotor con determinado TSR tendrá un valor de solidez asociado. De hecho, el TSR de un rotor es una consecuencia directa del valor de solidez con que se diseña.

En la siguiente imagen se muestra la relación que guarda el TSR con la Solidez del Rotor, lo que la hace útil, puesto que permite estimar que valor de solidez se requiere para alcanzar determinado TSR.

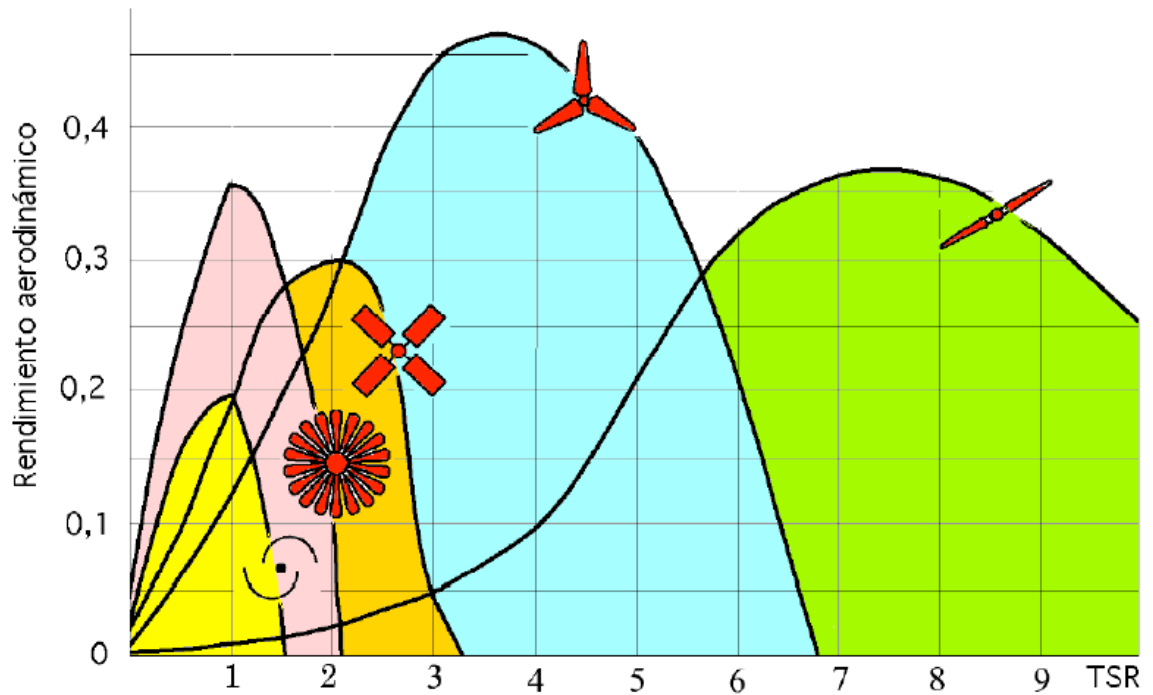
Figura 9. Relación entre el coeficiente de solidez Ω y el TSR



Fuente: Pedro F. Diez

Ya que el molino de viento multipala americano presenta un rendimiento aerodinámico máximo cuando su TSR ronda la unidad (ver figura 10), la anterior imagen nos indica que un valor de solidez apropiado para un molino de viento multipala americano debe estar por encima del 70%.

Figura 10. Curvas de $\eta_{aerod.} - TSR$



Fuente: Pedro F. Diez

En base a lo anterior, se procede a calcular el área de las palas.

El área de una pala es:

$$S = a \cdot l$$

Sí N es el número de palas, entonces el área total de las palas será

$$A_{palas} = N \cdot S$$

El área barrida por el rotor corresponde a la sección anular en la cual están comprendidas las palas.

$$A_{barrida} = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (3^2 - 1^2)}{4} = 6.2831$$

$$A_{barrida} = \mathbf{6.28 [m^2]}$$

Ahora, se puede indicar la solidez del rotor del siguiente modo:

$$\Omega = \frac{A_{palas}}{A_{barrida}}$$

Despejando el área de las palas

$$A_{palas} = A_{barrida} \cdot \Omega$$

Para determinar entonces el A_{palas} del rotor, se utiliza el valor de solidez correspondiente al 70%, entonces

$$A_{palas} = A_{barrida} \cdot \Omega = 6.28 \cdot 0.7 = 4.396$$

$$\mathbf{A_{palas} = 4.396 [m^2]}$$

Estableciendo un ancho de palas de 25 cm y una longitud de las mismas de 1 m, se tiene que el número de palas es:

$$N = \frac{A_{palas}}{a \cdot l} = \frac{4.396}{0.25 \cdot 1} = 17.584$$

$$\mathbf{N = 18 palas}$$

Recapitulando en lo que va del proceso de diseño del rotor, se tiene

Tabla 2. Parámetros del rotor

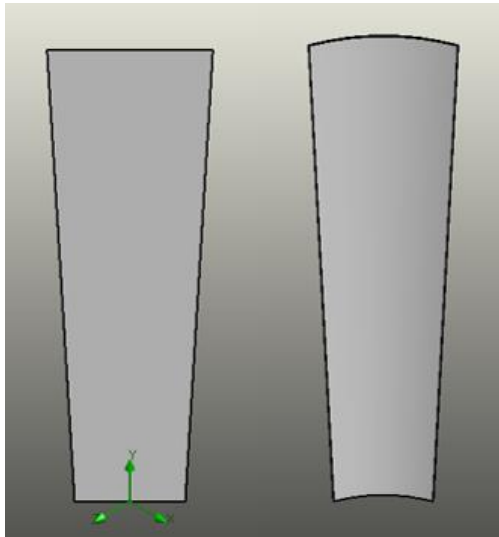
Diámetro del Rotor [m]	Número de Palas	Largo X Ancho de las Palas [m]
3	18	1 x 0.25

Fuente: Autores

El perfil de las palas que conforman el rotor es una característica que define la forma de la pala y la eficiencia aerodinámica de la misma.

Los molinos de viento usualmente constan de rotores compuestos por palas planas y en algunas ocasiones palas con un perfil curvo (perfil aerodinámico). En la siguiente imagen se puede observar los dos tipos de palas.

Figura 11. Perfil recto Y perfil curvo



Fuente: Autores

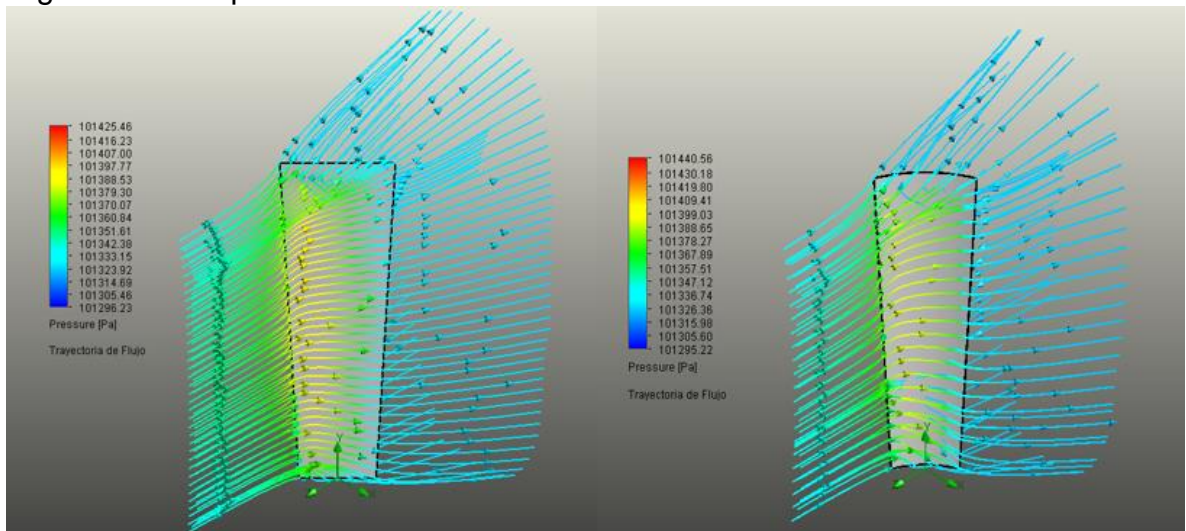
El uso de un perfil curvo tiene como finalidad proveer de un efecto aerodinámico a la pala para que sea más eficiente al momento de captar la energía del viento. Esto se logra mediante la variación de la relación entre las fuerzas de arrastre y sustentación que se generan sobre la pala.

En un molino tipo multipala americano se busca obtener la mayor cantidad de torque posible para el accionamiento de la bomba de pistón, por lo que el número y área de las palas es un factor mucho más influyente que el perfil, que solo proporciona una mayor eficiencia aerodinámica.

Además, teniendo como fin obtener un determinado valor de torque al menor costo posible, la elección de un número y tamaño de palas adecuado, en vez de un diseño aerodinámico (más complejo en diseño, construcción y prueba y por ende más costoso), es la opción más adecuada.

A continuación unas imágenes de la simulación de una pala plana y una pala aerodinámica con un 10% de curvatura sometidas ambas a una velocidad de viento de 10 m/s, con la indicación del torque generado en ambos casos, de acuerdo al Software CFD de Solidworks.

Figura 12. Comparación del Rendimiento aerodinámico.



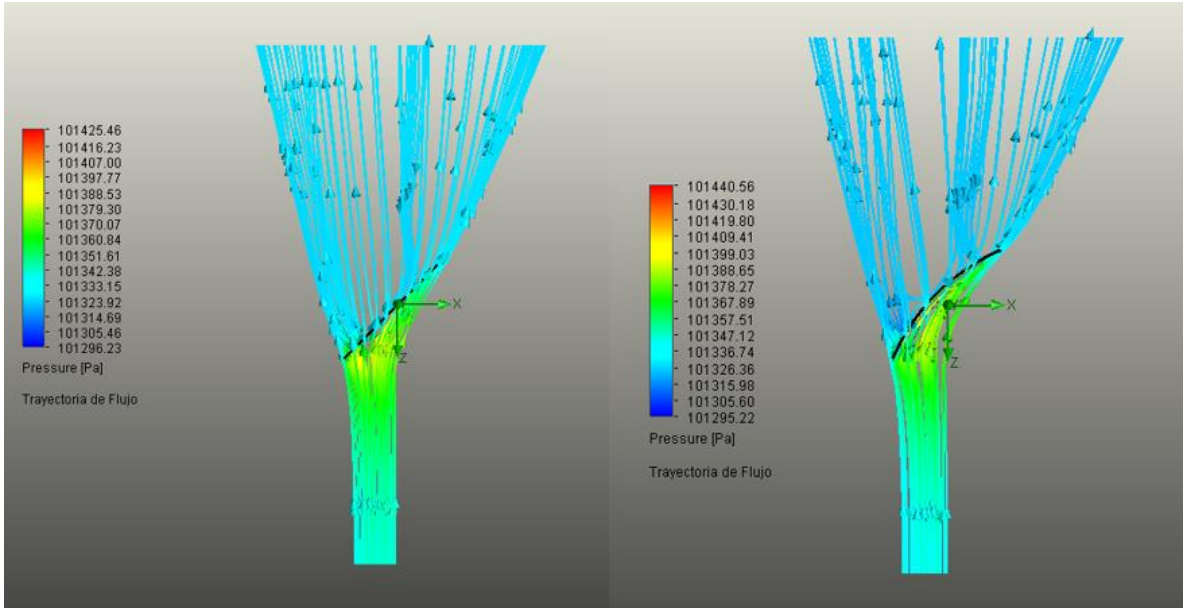
Fuente: Autores

En la imagen anterior se puede apreciar la presión del aire a lo largo de la trayectoria de flujo, además de los valores máximos y mínimos de presión en la corriente de aire. Dichos valores se indican a la izquierda de cada pala designando un color rojo y azul para el máximo y mínimo valor de presión respectivamente.

Para la pala curva el valor máximo de presión generado en el intradós gracias a su forma aerodinámica es apenas perceptiblemente mayor.

La siguiente imagen es una vista superior del mismo fenómeno en la que se puede observar más detalladamente la trayectoria del flujo.

Figura 13. Comparación del flujo de aire



Fuente: Autores

En la siguiente tabla se muestran los resultados del estudio de simulación, donde se obtuvo el torque generado (con respecto al eje z) por cada perfil.

Tabla 3. Torque obtenido según perfil

	Pala Plana	Pala Curva
Torque [Nm]	4.371	4.539

Fuente: Autores

Como se observa, la utilización de un perfil aerodinámico no genera un incremento considerable de torque que compense el incremento de costo que acarrea la utilización del mismo.

Una vez determinados estos parámetros, se procede a diseñar el resto de componentes del rotor.

2.3.3 Diseño de la Araña. La araña es la estructura que interconecta todas las palas con el eje del rotor. Su función principal es soportar las palas y transmitir el torque de las mismas al eje, al mismo tiempo que proporciona la estabilidad estructural del rotor.

Luego de varios modelos se convino por el siguiente modelo de araña para el rotor

Figura 14. Araña o soporte central



Fuente: Autores

La araña se ideó como un único elemento, con la finalidad de disminuir el número de componentes que se ve incrementado cuando se utilizan elementos de sujeción no permanentes, tales como tornillos, remaches, sujetadores, etc. Por consiguiente, su construcción se basa en el uso de diferentes tipos de soldadura.

Figura 15. Foto de la araña fabricada

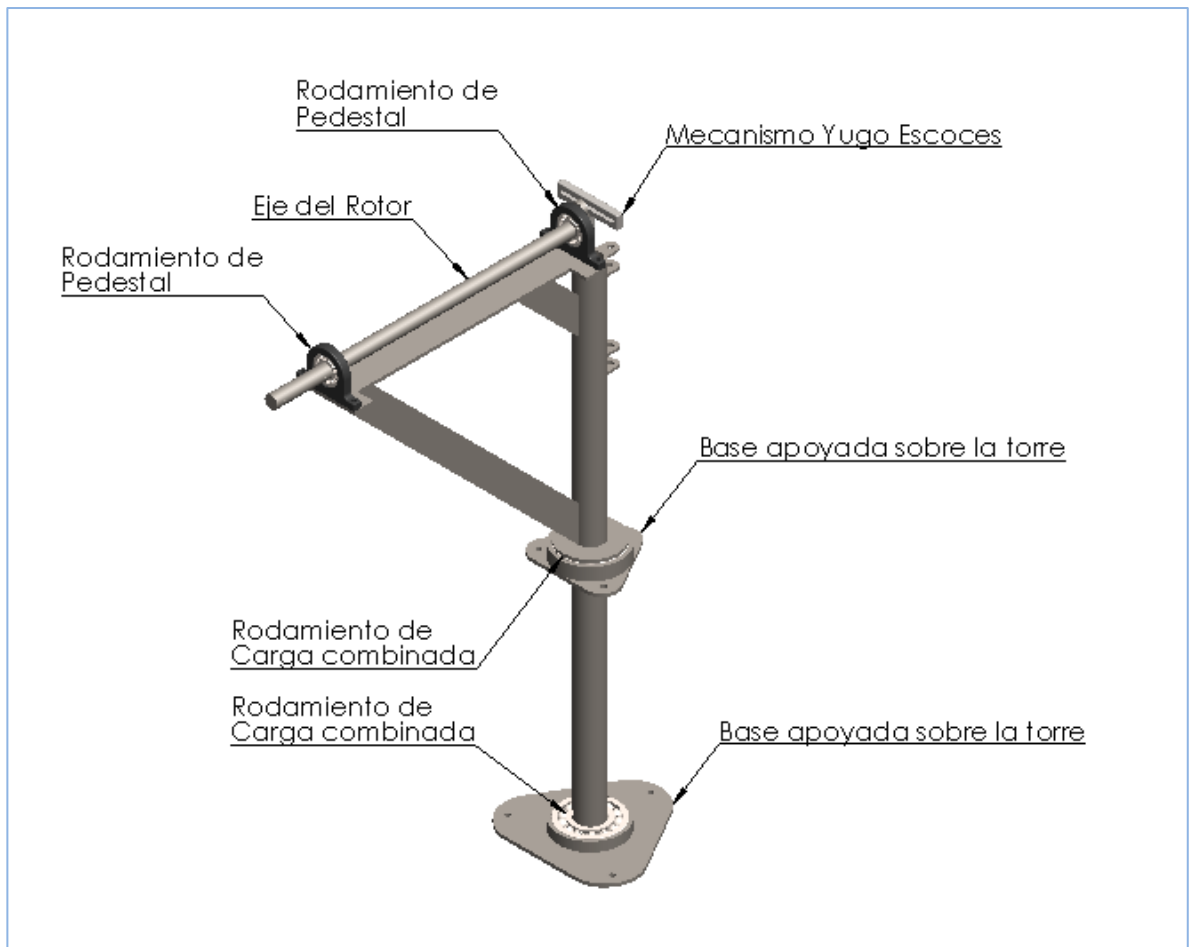


Fuente: Autores

2.3.4 Diseño de la estructura de soporte. Dicha estructura soporta el cabezal del rotor y la veleta. Debe permitir libertad de movimiento para que el molino tenga la capacidad de orientarse de cara al viento. El material elegido es acero estructural, y todas las uniones son soldadas.

En la siguiente imagen se detalla el diseño de esta estructura y el arreglo de los componentes en la misma.

Figura 16. Componentes del cabezal de la turbina



Fuente: Autores

2.3.5 Cálculo de las cargas que actúan sobre las palas del rotor. Tanto el rotor como sus componentes están sometidos a diferentes cargas que pueden ser de naturaleza estática o dinámica.

La fuerza centrífuga corresponde a la carga estática que se presenta en el rotor, con una componente de tracción a lo largo de la pala. Los esfuerzos estáticos que se originan debido a esta carga son muy pequeños.

En las cargas dinámicas se tienen la resultante por el peso, debido a la gravedad, que se comporta de manera oscilante en el plano del rotor y otras no significativas para el tipo y tamaño del rotor que se diseña, como las cargas dinámicas por la variación del viento con la altura o los efectos debidos a las turbulencias.

Las fuerzas aerodinámicas que se presentan sobre la superficie de la pala debido a las diferencias de presión generan también unas cargas de flexión sobre la pala, ya que esta se comporta como una viga empotrada y en ella aparecen esfuerzos de tracción y compresión que provocan la fatiga.

De cualquier modo, los efectos estáticos y dinámicos que actúan sobre el rotor se estudian en situaciones límites, tales que si en ellas se asegura que la pala no se rompe, esta no se romperá en ninguna de las otras situaciones previsibles.

2.3.5.1 Calculo Fuerza Centrífuga

El cálculo de la fuerza centrífuga se realiza para una situación límite, en la cual el rotor rota a máxima velocidad, o velocidad máxima de diseño, que para el caso de estudio es lograda cuando la velocidad del viento alcanza los 15 m/s (54 kph). La masa de las palas y la distancia del centro de masa de estas al eje de rotación son los otros dos parámetros implicados en la determinación de la fuerza centrífuga.

$$F_c = \vec{F}_c$$
$$F_c = m \cdot \omega^2 \cdot r_1$$

El valor de la masa de la pala depende del tamaño, espesor y material de la misma. El material seleccionado es acero galvanizado, que se utiliza en los molinos de viento multipala americano. En ocasiones se utiliza aluminio pero este presenta serias desventajas contra el acero galvanizado, como son la baja resistencia mecánica y a la fatiga y un costo tres veces mayor.

Así bien, la masa de una pala con un área de 0.25 m^2 hecha de acero galvanizado calibre 24 es de 1.15 kg.

La distancia del eje de rotación del rotor al centroide de la pala es de 0.9 m

Recordando que el TSR es la relación entre la velocidad de punta de la pala y la velocidad del viento, se procede a calcular la velocidad angular ω .

$$TSR = \frac{\text{Velocidad de la punta de la pala}}{\text{Velocidad del viento}}$$

$$\begin{aligned} \text{Vel. de la punta de la pala} &= TSR \cdot \text{Velocidad del viento} \\ &= (1) \cdot (15)[\text{m/s}] \\ &= 15 [\text{m/s}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{v}{r_2} = \frac{15 [\text{m/s}]}{1.4 [\text{m}]} \\ \omega &= 10.71 [\text{s}^{-1}] \end{aligned}$$

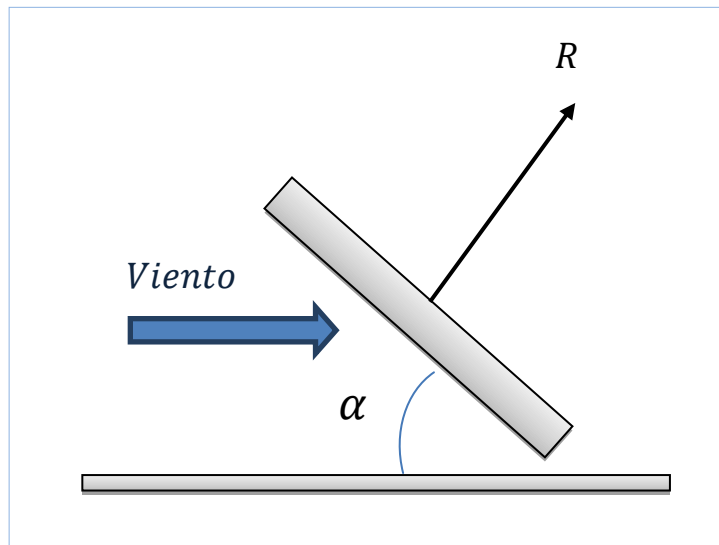
Entonces,

$$F_c = m \cdot \omega^2 \cdot r_1 = (1.15) \cdot (10.71)^2 \cdot (1.4)$$

$$F_c = 184.67 [N]$$

2.3.5.2 Calculo de las cargas aerodinámicas sobre el rotor. Los efectos de la resistencia del aire sobre la pala plana genera una fuerza resultante sobre la misma, teniendo como punto de aplicación de la fuerza el centro aerodinámico o centro de empuje de la pala, su dirección es perpendicular a esta, su sentido el del viento y su intensidad proporcional a la superficie de la pala y al ángulo de ataque.

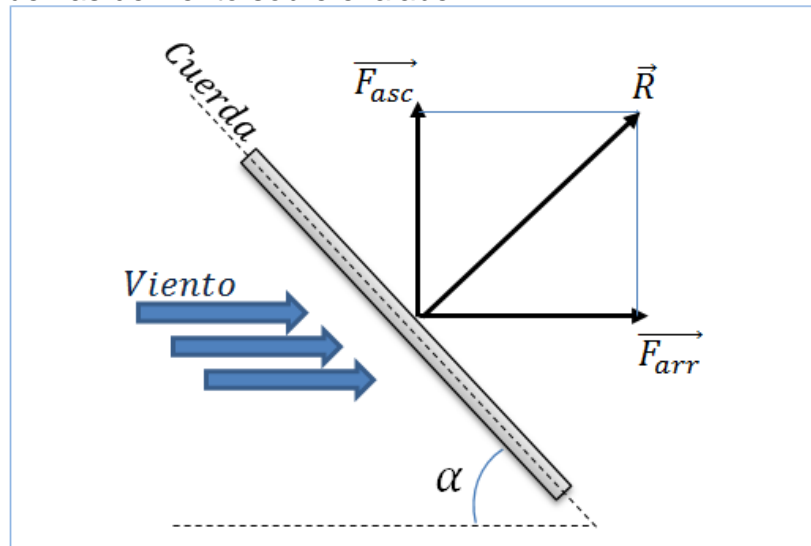
Figura 17. Diagrama viento sobre álabes



Fuente: Autores

Ahora, dicha fuerza resultante se puede descomponer en una componente ascensional, (generadora del torque) y una componente de arrastre en la dirección del eje del rotor.

Figura 18. Fuerzas de viento sobre el alabe



Fuente: Autores

La suma de la componente de arrastre de todas las palas produce un empuje axial sobre el eje del rotor, el cual es soportado por dos rodamientos de carga combinada. Es una fuerza desperdiciada, que solo genera pérdidas.

Por el contrario, la componente ascensional de cada pala genera torque sobre el eje del rotor. A mayor número de palas y un mayor valor de esta componente, más torque se obtiene. Puesto que el número de palas está limitado por el valor de solidez (establecido en orden de obtener la mayor eficiencia) se pretende un ángulo de ataque al cual corresponda una componente ascensional con el mayor valor.

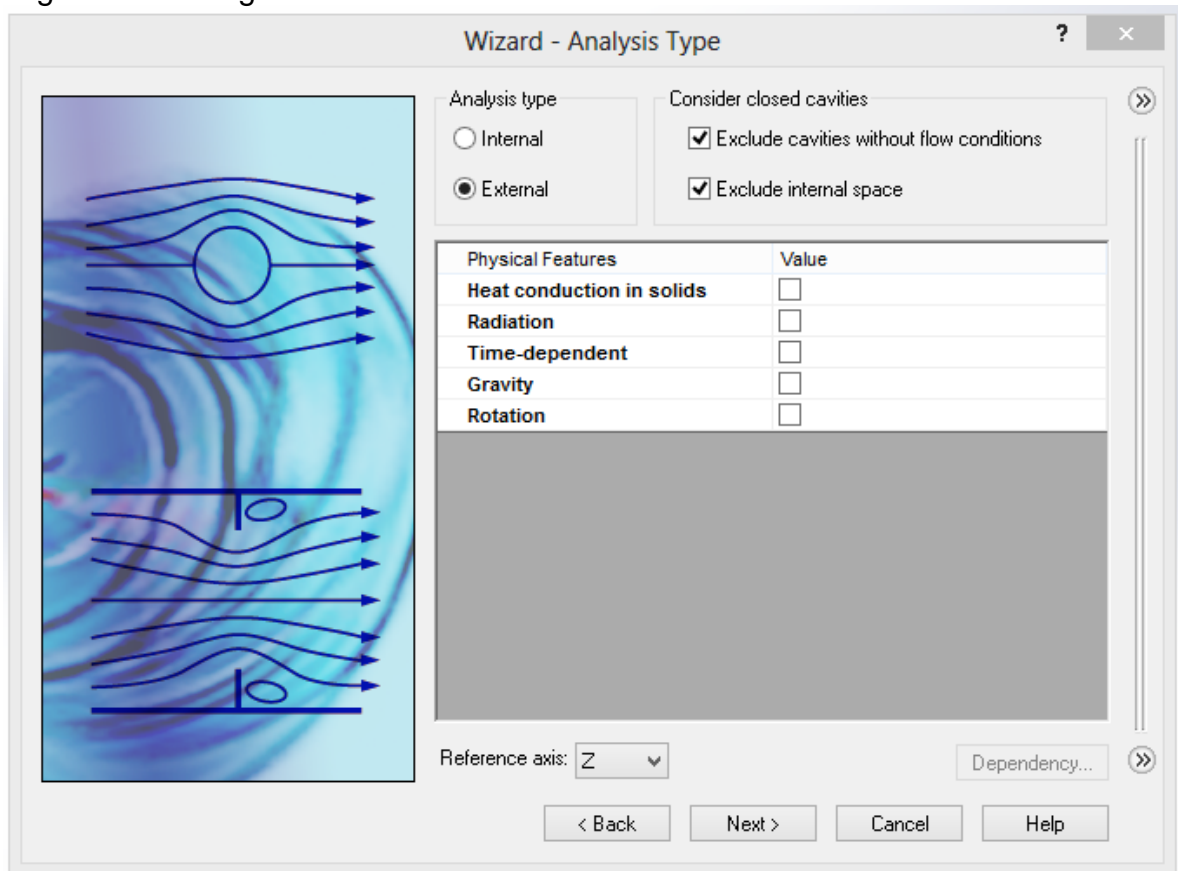
Por tanto el procedimiento a seguir es determinar el ángulo de ataque óptimo, el cual se puede realizar en un túnel de viento o mediante simulación utilizando mecánica de fluidos computacional o CFD por sus siglas en inglés.

Optando por la segunda opción, lo primero es configurar los parámetros generales de la simulación en **Flow Simulation**, complemento de Solidworks.

Los pasos son los siguientes:

1. Configurar el tipo de análisis, estableciendo si se trabajará con flujo externo o interno, para el caso, externo, y establecer el eje de referencia, de preferencia, con la misma dirección que tendrá el flujo de viento a simular.

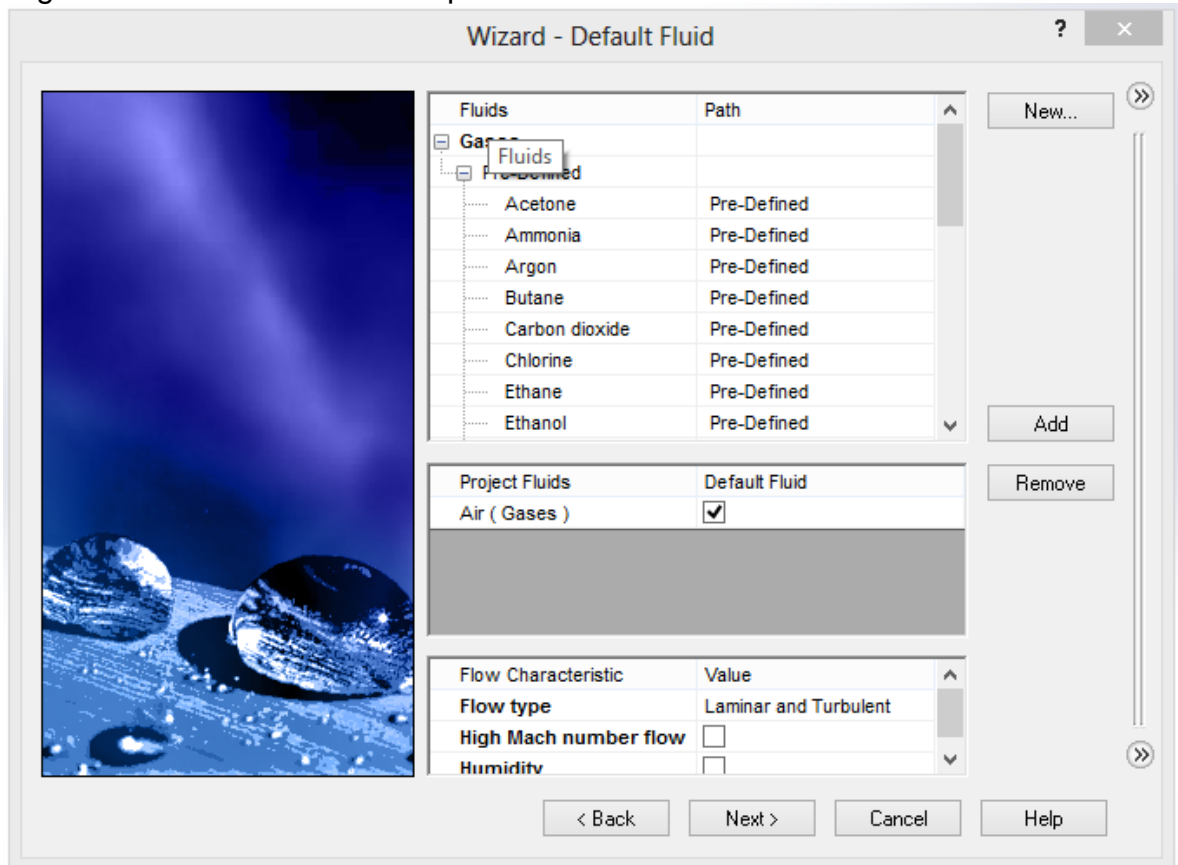
Figura 19. Configuración inicial de simulación



Fuente: Autores

2. Seleccionar el tipo de fluido a simular, en este caso aire.

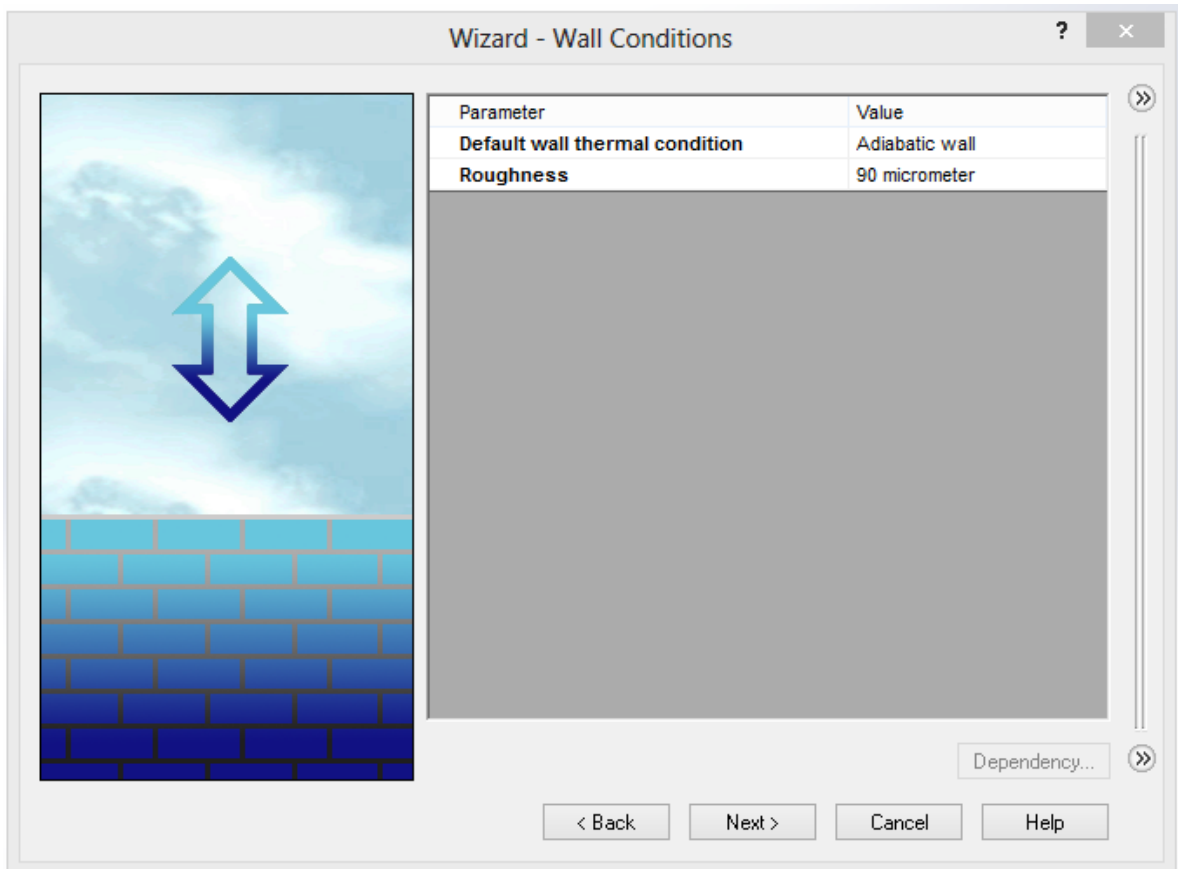
Figura 20. Selección del fluido para simular



Fuente: Autores

3. En este paso es importante establecer un valor de rugosidad, puesto que la influencia de esta en la resistencia que ejerce el aire sobre la pala afecta los valores de carga dinámica. Promediando entre catálogos comercial se obtiene una rugosidad de 90 micrómetros para la lámina de acero galvanizado.

Figura 21. Parámetros de rugosidad



Fuente: Autores

4. En este paso se verifican los valores de los parámetros termodinámicos (presión y temperatura), y se establece el valor de la velocidad del flujo de viento.

Figura 22. Parámetros de presión y temperatura

The screenshot shows a software wizard window titled "Wizard - Initial and Ambient Conditions". On the left, there is a visual representation of a thermometer and a velocity graph. The thermometer has a scale from -20 to 70, with the needle pointing to approximately 29.3. The graph shows velocity in m/s over a 10-second period, with values fluctuating between 0 and 10. On the right, a table lists the parameters and their values.

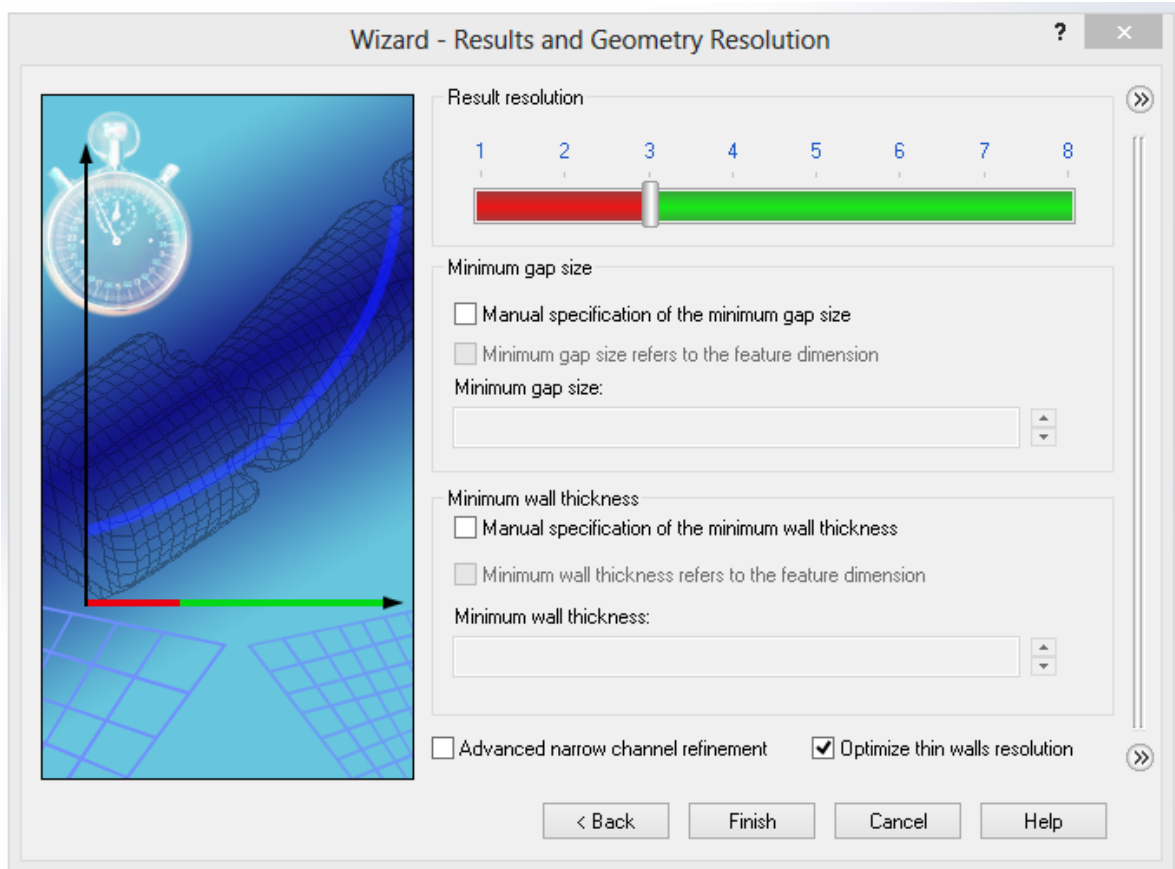
Parameter	Value
Parameter Definition	User Defined
<input checked="" type="checkbox"/> Thermodynamic Parameters	
Parameters:	Pressure, temperature
Pressure	101325 Pa
Temperature	293.2 K
<input checked="" type="checkbox"/> Velocity Parameters	
Parameter:	Velocity
Velocity in X direction	0 m/s
Velocity in Y direction	0 m/s
Velocity in Z direction	-15 m/s
<input checked="" type="checkbox"/> Turbulence Parameters	
Parameters:	Turbulence intensity and length
Turbulence intensity	0.1 %
Turbulence length	0.00259972621 m

At the bottom of the window, there are navigation buttons: "< Back", "Next >", "Cancel", and "Help". A "Dependency..." button is also present on the right side.

Fuente: Autores

5. En el último paso del asistente de configuración se opta por elegir nivel 8 para la resolución del resultado. Con esto lo que se logra es tener una resolución de malla más densa lo que permitirá valores más exactos y precisos pero acarreando un aumento considerable de tiempo (horas debido a la capacidad de computo disponible). Por lo tanto se programa realizar la simulación durante una semana.

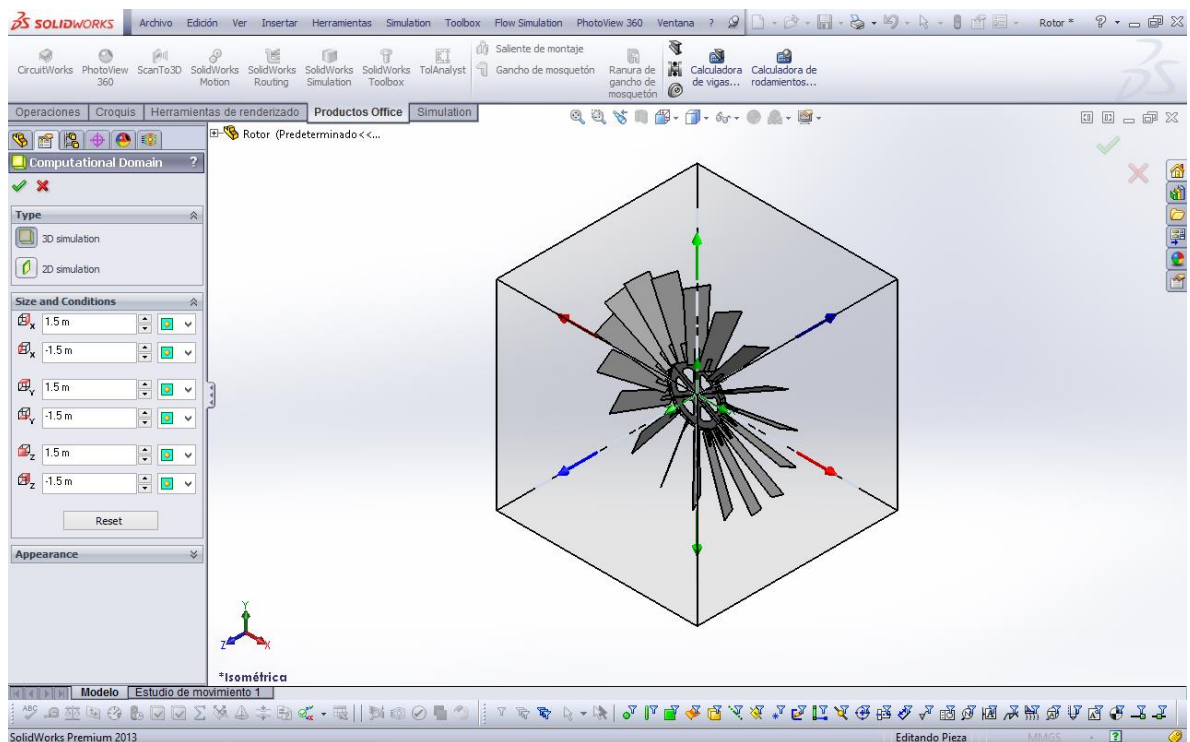
Figura 23. Resolución de análisis



Fuente: Autores

- Una vez terminado con el asistente de simulación, se procede a delimitar el dominio computacional. Dicho dominio no es más que la zona en la cual se presenta flujo y todo el estudio estará limitado a dicha zona. Las paredes de dicho dominio interactúan con el rotor, o lo que se esté estudiando, por tanto, el tamaño del dominio deber ser lo suficientemente grande para evitar que afecte el estudio. Cabe resaltar también que un excesivo tamaño acarrearía más tiempo de simulación sin conseguir mayor exactitud en los resultados.

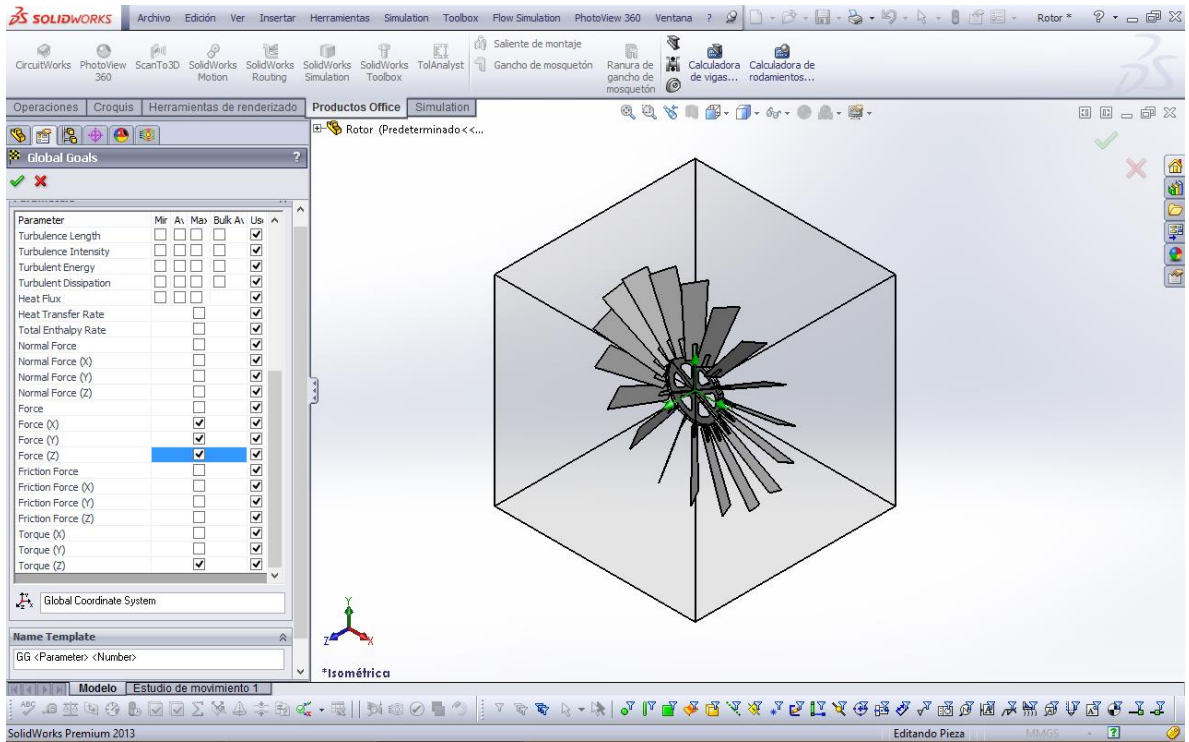
Figura 24. Delimitación de la zona de análisis



Fuente: Autores

7. Se indican los objetivos deseados del estudio.

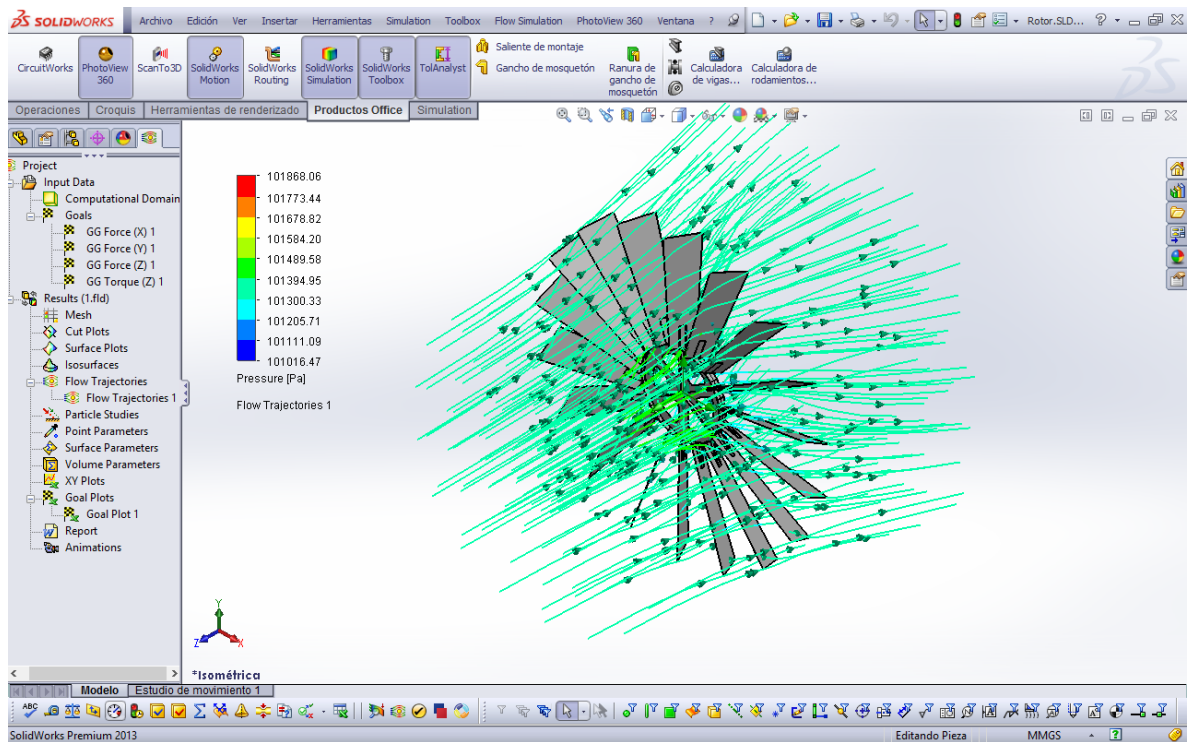
Figura 25. Selección de resultados deseados



Fuente: Autores

8. Se procede a simular y al término de la simulación se exportan los datos deseados a Excel y se obtienen además gráficos indicativos de las trayectorias de flujo con algunas propiedades. Esto último es bastante útil, porque una de las propiedades, entre otras, es la presión, que permite identificar zonas de baja y/o alta presión.
- El diseño de la araña es, de hecho, el resultado de buscar eliminar zonas de alta presión por delante del rotor, que ocasionaban mayor empuje axial y una disminución de la eficiencia. Algunas veces, a elección del diseñador/cliente se trata de aliviar dicha presión colocando un cono sobre el rotor. Se consiguió un resultado muy similar al realizar los 6 agujeros que se observan en el rotor, con el beneficio extra de disminuir peso.

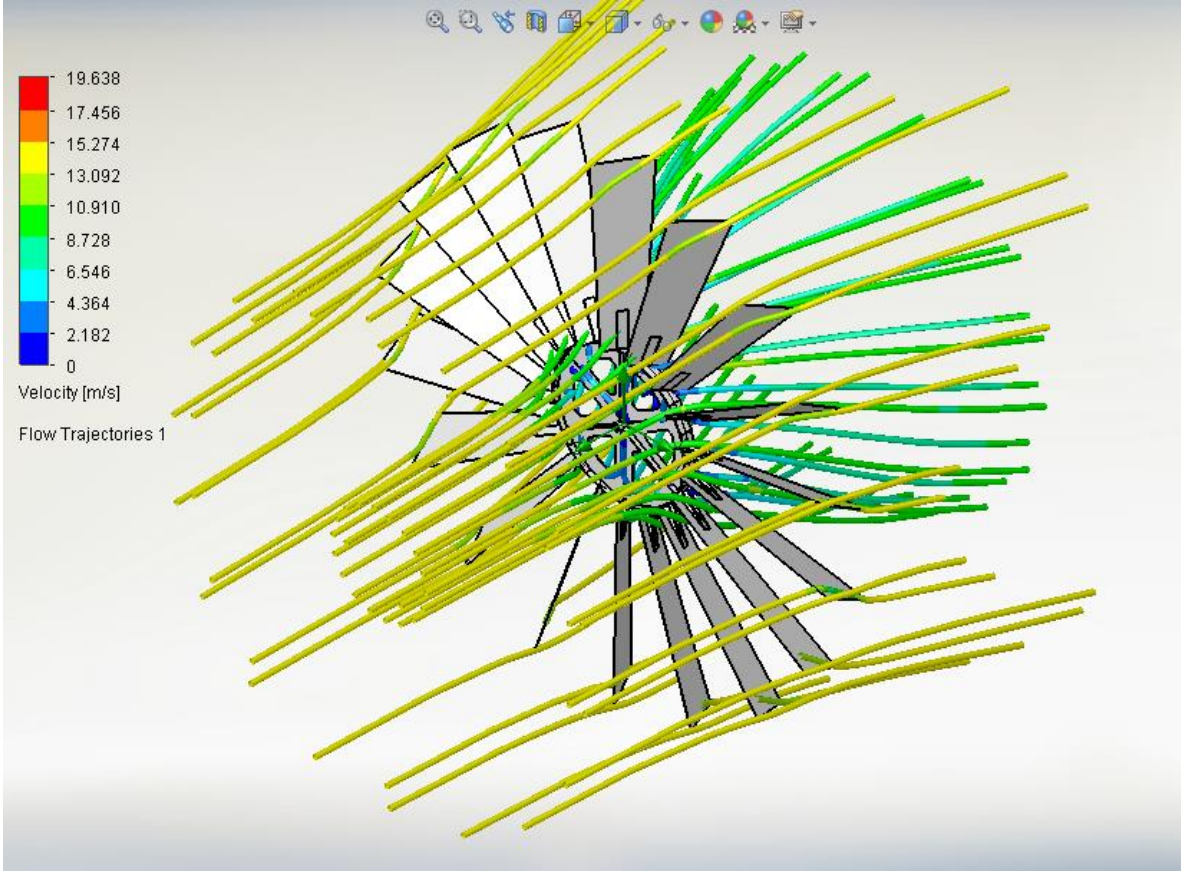
Figura 26. Ejecución de la simulación



Fuente: Autores

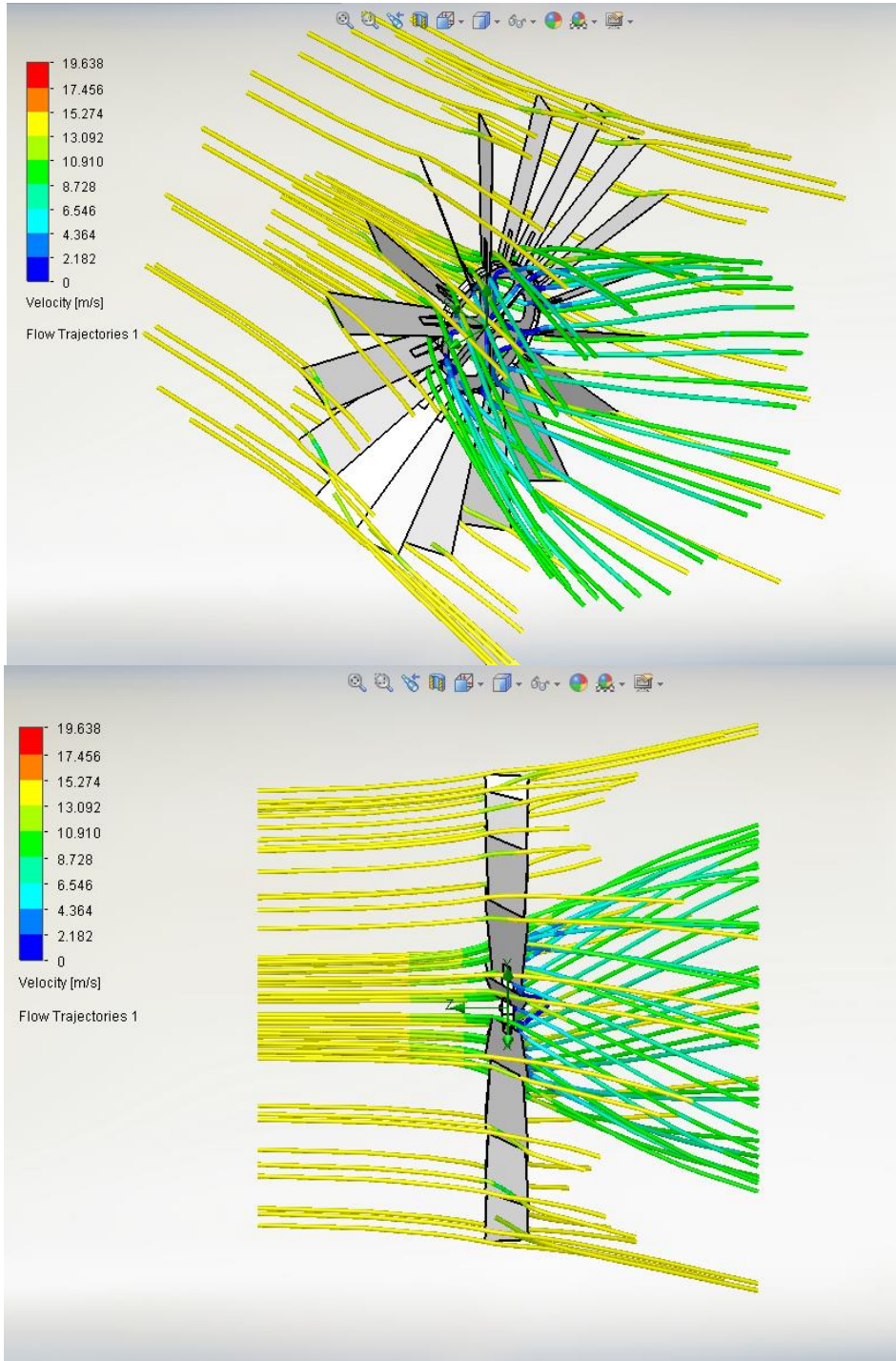
A modo de ejemplo, las siguientes son imágenes que se obtuvieron de la trayectoria de flujo con velocidad como parámetro.

Figura 27. Trayectoria de flujo 1



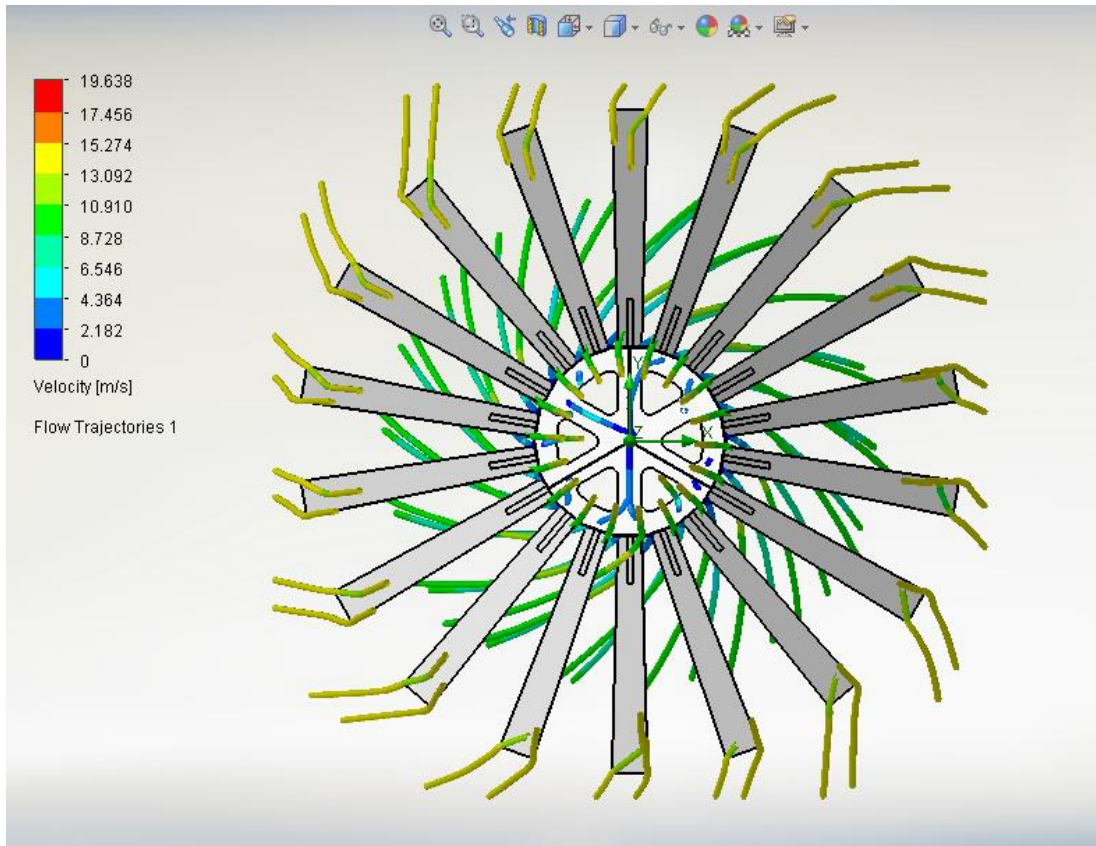
Fuente: Autores

Figura 28. Trayectorias de flujo 2 y 3



Fuente: Autores

Figura 29. Trayectoria de flujo 4



Fuente: Autores

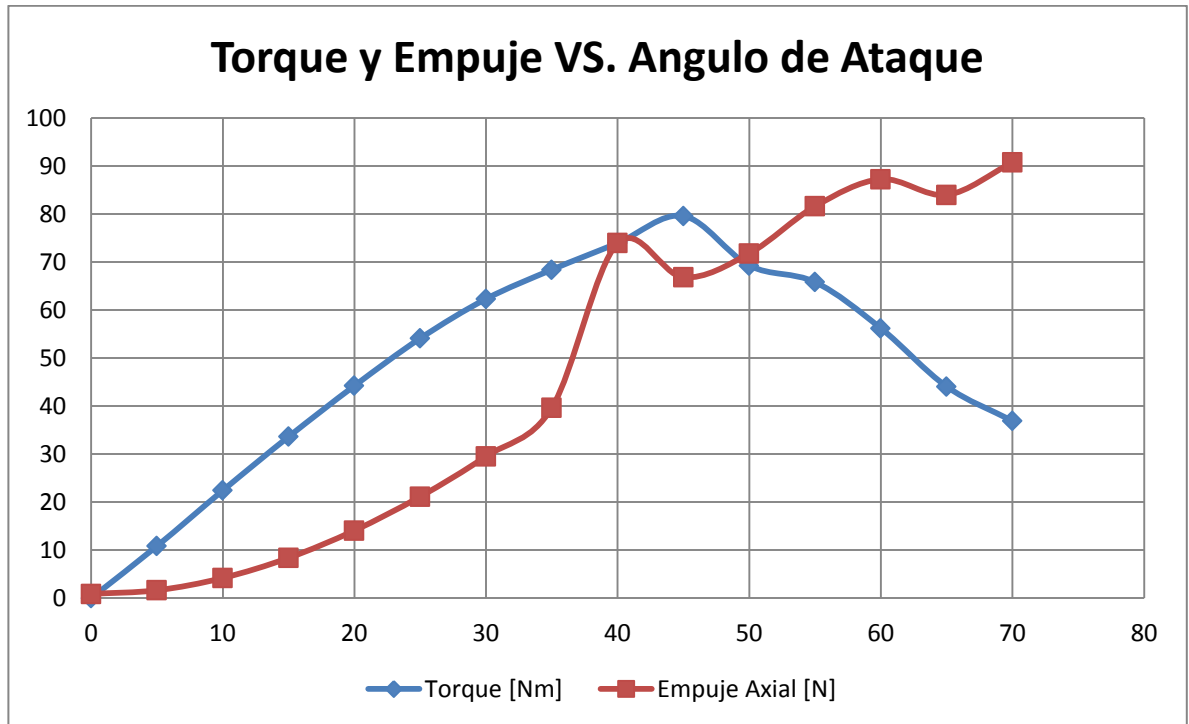
A continuación se tabulan y grafican los resultados de torque y empuje para un rango de ángulo de ataque de 0° a 70° a intervalos de 5°. Se observo el mismo comportamiento para diferentes velocidades, por tanto, se tabulara solo para una velocidad (10 m/s).

Tabla 4. Resultados obtenidos de la Simulación

Angulo de Ataque	Torque [Nm]	Empuje Axial [N]
0°	0.01	0.882
5°	10.84	1.634
10°	22.415	4.191
15°	33.61	8.377
20°	44.213	14.08
25°	54.088	21.14
30°	62.3	29.528
35°	68.39	39.639
40°	73.923	73.923
45°	79.572	66.801
50°	69.252	71.764
55°	65.805	81.587
60°	56.194	87.229
65°	44.054	83.962
70°	36.891	90.726

Fuente: Autores

Figura 30. Efecto del ángulo de ataque



Fuente: Autores

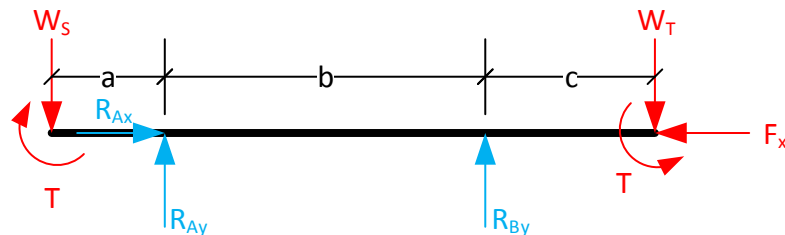
De la grafica anterior se observa que:

1. Se genera el mayor valor de torque a un ángulo de ataque de 45°. Este mismo patrón se observó cuando se corrió la simulación con diferentes velocidades.
2. A mayor ángulo de ataque, mayor empuje generado, con un incremento notable a partir de los 35° como resultado de las turbulencias generadas por la sobrepresión.

En base al resultado de la simulación se opta por construir la turbina con un ángulo de ataque fijo de 45°, el cual asegura obtener el mayor torque, cualidad indispensable para garantizar el funcionamiento de la turbina a bajas velocidades (<2.5 m/s) y una menor velocidad de arranque.

2.3.6 Diseño del Eje del Rotor. Como se observa en la vista de dibujo a continuación, el eje se encuentra apoyado sobre dos rodamientos de bolas, que admiten carga combinada, y sobre el eje mismo actúan: el peso del rotor, el empuje axial que produce el viento sobre dicho rotor, el peso de la sarta que acciona al embolo y el torque que el rotor le imprime al mecanismo que acciona la sarta.

Figura 31. Cargas en el eje



Fuente: Autores

Lo siguiente es el proceso de diseño del eje teniendo en cuenta las cargas y apoyos anteriormente mencionados.

Los valores de torque y empuje axial corresponden a situación límite de máximo esfuerzo, cuando el viento alcanza una velocidad máxima de 15 m/s.

El peso de la sarta (conjunto de elementos que transmite la energía desde el mecanismo hasta el embolo) es de 10 kg.

El peso de la turbina corresponde al peso de la araña, las 18 palas, soporte de cada pala y tornillos, y es de 30 kg.

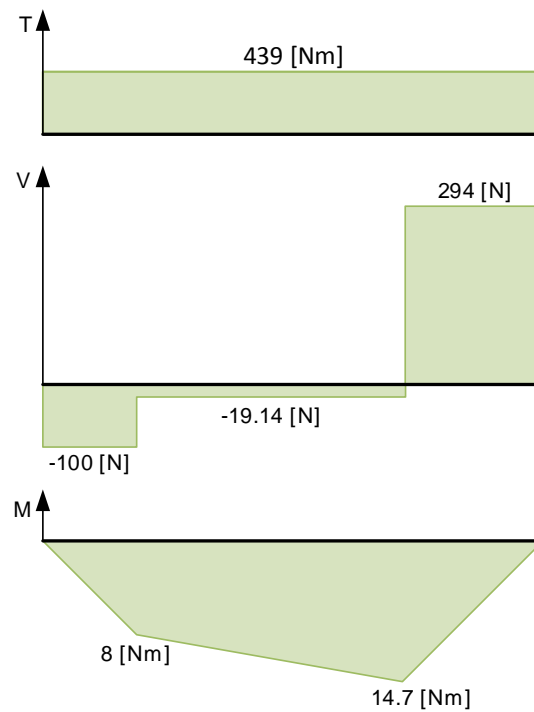
$W_s = \text{Peso de la sarta (100 N)}$

$W_T = \text{Peso de la turbina (294 N)}$

$F_x = \text{Empuje Axial (261 N)}$

$T = \text{Torque transmitido (439 Nm)}$

Figura 32. Cortante y Momento flector



Fuente: Autores

Cálculos:

$$\sum F_X = 0 \quad R_{AX} = F_X$$

$$\sum F_Y = 0 \quad W_S - R_{AY} + W_T = R_{BY}$$

$$\sum M_B = 0 \quad W_S(430) = R_{AY}(350) + W_T(50)$$

$$R_{AY} = \frac{W_S(430) - W_T(50)}{350}$$

$$R_{AY} = \frac{100(430) - 294(50)}{350}$$

$$\mathbf{R_{AY} = 80.86 [N]}$$

$$\Rightarrow R_{BY} = 100 - 80.86 + 294$$

$$\mathbf{R_{BY} = 313.14 [N]}$$

Evaluación por medio de la teoría de falla de Goodman:

$$M_a = 14.7 (Nm) ; M_m = 0$$

$$T_a = 493 (Nm) ; T_m = 0$$

Factores que modifican la resistencia a la fatiga

- Factor de Superficie k_a (Material Eje: AISI 1020 CD $S_{ut} = 470 \text{ Mpa}$)

$$k_a = aS_{ut}^b = 4.51(470)^{-0.625} = 0.883$$

Tabla 5. Factores según acabado del eje

Surface Finish	Factor a		Exponent b
	S_{ut} kpsi	S_{ut} MPa	
Ground	1.34	1.58	-0.085
Machined or cold-drawn	2.70	4.51	-0.265
Hot-rolled	14.4	57.7	-0.718
As-forged	39.9	272.	-0.995

Fuente: ROBERT L. Norton. Pearson educación, Prentice Hall, 1999

- Factor de tamaño k_b

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ in} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ in} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

$$\Rightarrow k_b = 1.24d^{-0.107} = 0.877 \text{ (suponiendo } d = 1"/25.4\text{mm)}$$

- Factor k_c

$$k_c = 1 \text{ (carga combinada)}$$

- Factor de temperatura k_d

$$k_d = 1.010 \text{ (50°C)}$$

5. Factor de confiabilidad k_e

$$k_e = 0.620 \text{ (confiabilidad del 99.9999\%)}$$

6. $S'_e = 0.5 S_{ut} = 0.5(470) = 235 \text{ [Mpa]}$

7. $S_e = K_a K_b K_c K_d K_e S'_e = (0.883)(0.877)(1)(1.010)(0.620)(235) = 113.96 \text{ [Mpa]}$

8. Estimación del diámetro con ED – Goodman

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

$$\left(\frac{16(1.5)}{\pi} \left\{ \frac{1}{107 \times 10^6} [21609 + 16875]^{1/2} + \frac{1}{470 \times 10^6} [16875]^{1/2} \right\} \right)^{1/3}$$

$$(7.64\{1.8339 \times 10^6 + 2.7639 \times 10^{-7}\})^{1/3} = 0.025.26 \text{ mm} \approx 1''$$

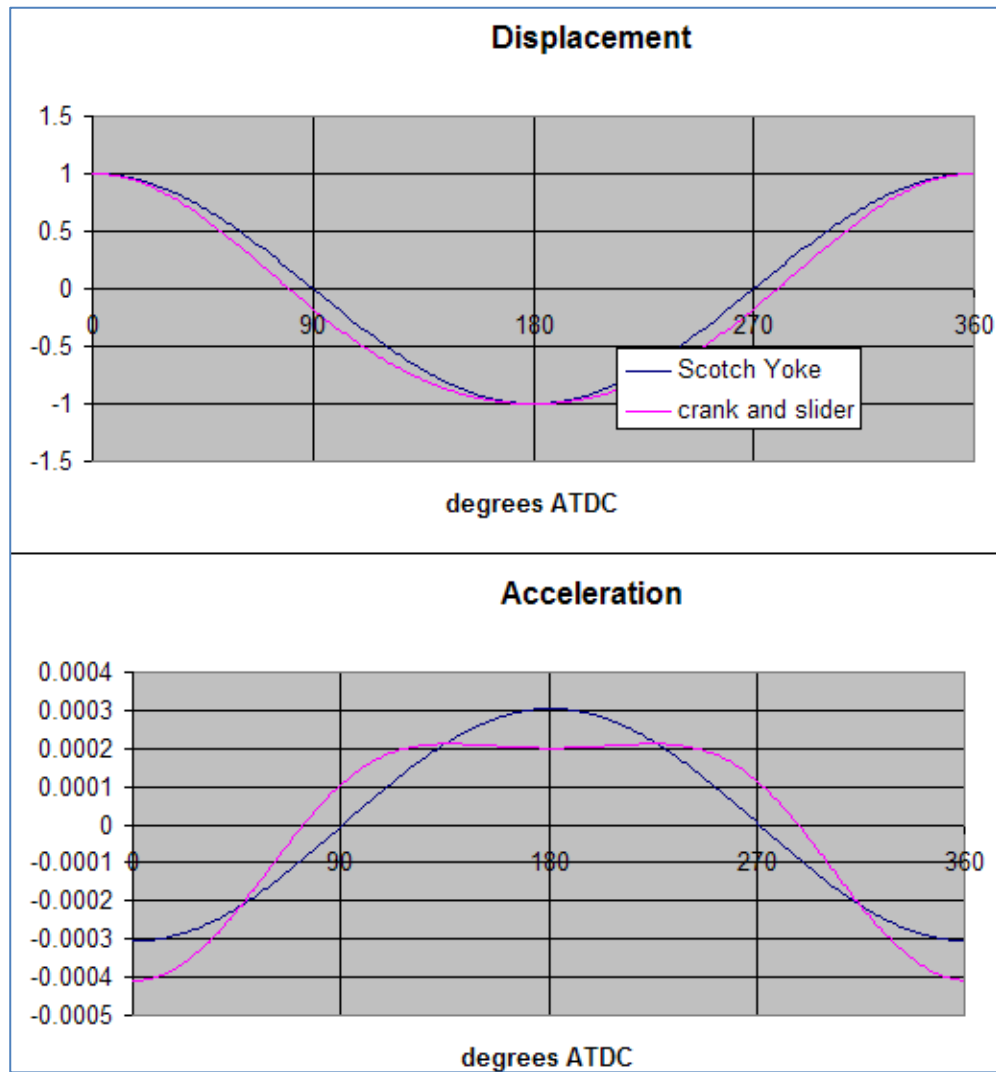
$$\mathbf{d = 1'' \text{ AISI 1020}}$$

2.3.7 Detalles del Mecanismo Yugo Escocés. El mecanismo de yugo escocés es el mecanismo que permite transformar el movimiento rotacional del eje del rotor en un movimiento rectilíneo alternativo que acciona la bomba de pistón. En vez de este mecanismo se suele utilizar el mecanismo biela-manivela para la aplicación de aerobombeo con molino multipala americano, pero el mecanismo del yugo escocés presenta algunas ventajas sobre anterior mecanismo, tales como:

- ✓ Menor cantidad de piezas, lo que lo hace más fiable, también más económico de construir y fácil de diseñar.
- ✓ Aceleraciones del vástago más suaves, en comparación con las generadas en el mecanismo biela-manivela, lo que ayuda a un mejor funcionamiento del aerobombeo.

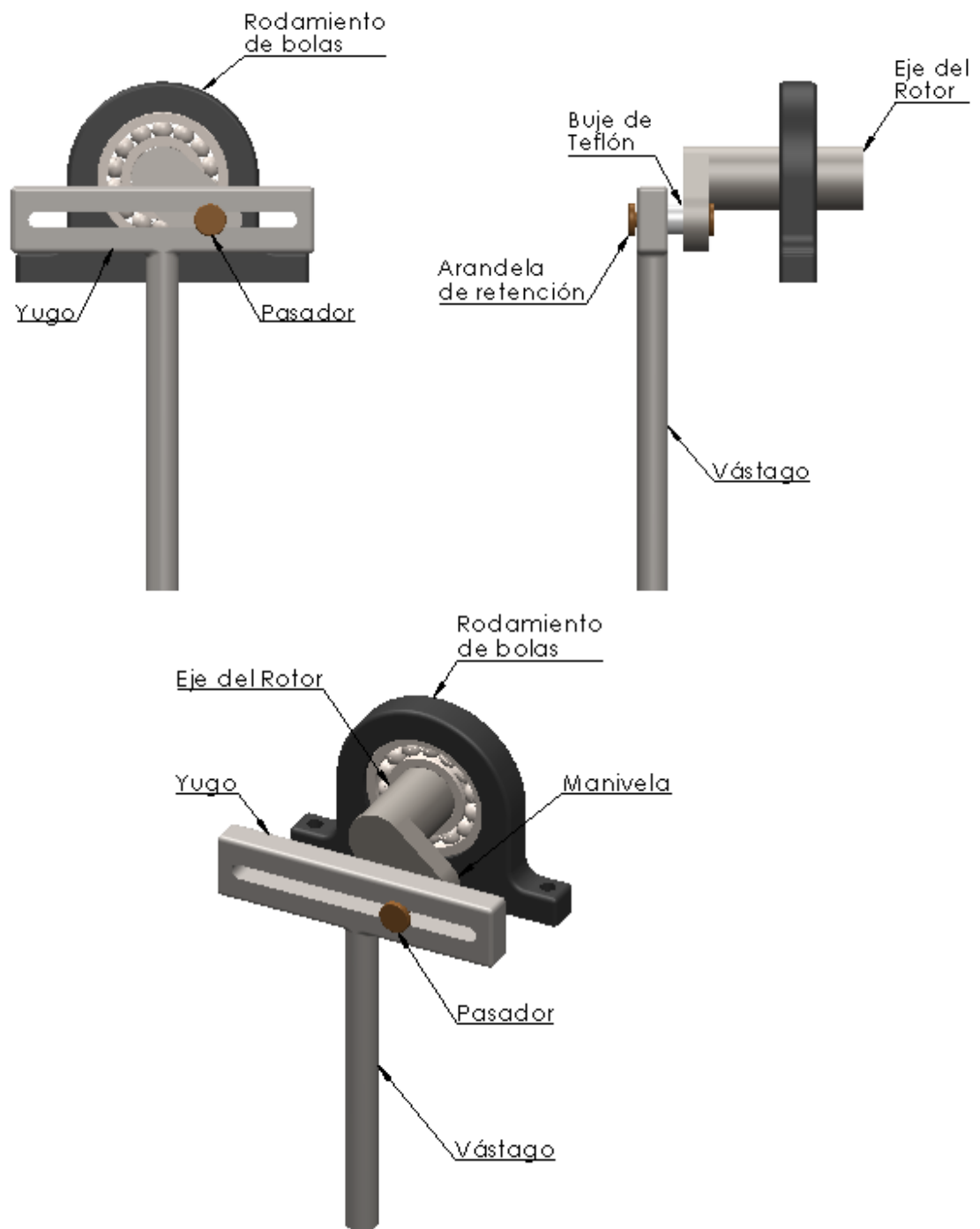
En la siguiente grafica se observa el comportamiento cinemático del pistón para los dos mecanismos anteriormente mencionados, observándose la diferencia de los valores de aceleración y desplazamiento a lo largo del ciclo.

Figura 33. Graficas de comportamiento cinemático



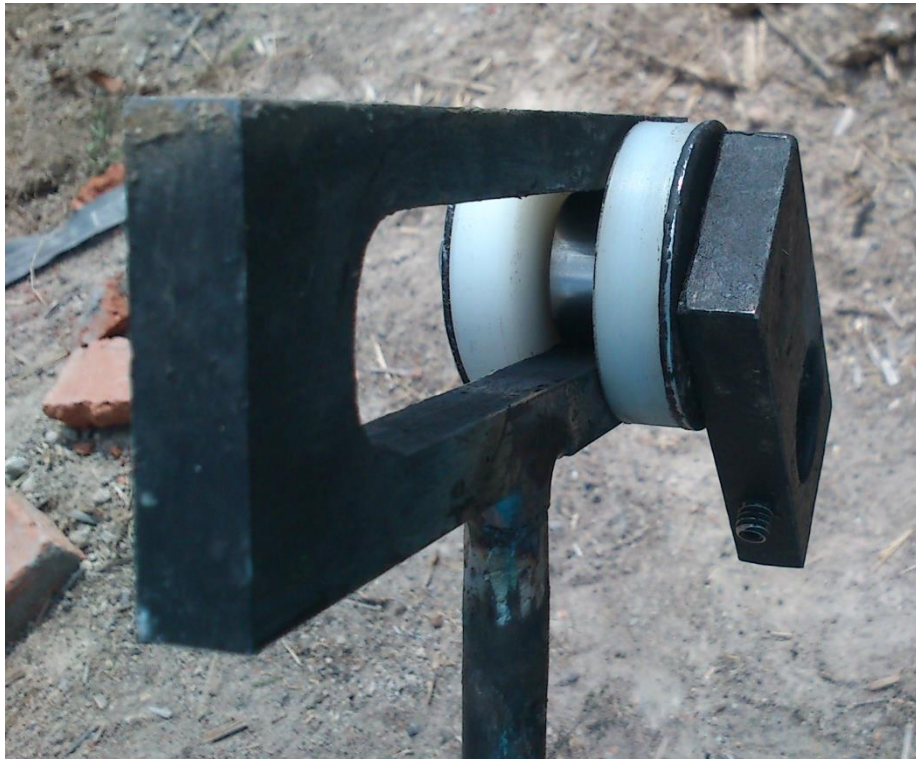
Fuente: en.wikipedia.org

Figura 34. Detalle de los componentes y ensamble del mecanismo yugo



Fuente: Autores

Figura 35. Fotografía del Yugo escocés construido



Fuente: Autores

3. SISTEMA DE FERTIRRIEGO

3.1 ¿QUÉ ES EL FERTIRRIEGO?

Es una técnica agronómica que consiste en distribuir agua y nutrientes a través de una red hidráulica hacia los cultivos. Su aplicación proporciona un ahorro significativo de agua (aproximadamente 50% en comparación con el riego tradicional) y simplifica las tareas de riego y mantenimiento de los cultivos. Los beneficios de esta técnica son notables, y durante el desarrollo del proyecto se ha recopilado información de primera mano sobre el proceso de diseño, costos y características clave para obtener buenos resultados. El objetivo principal de este subsistema es lograr un impacto en la producción a mediano plazo, y documentar el proceso de diseño y construcción.

3.2 HISTORIA

El riego localizado ha existido desde la antigüedad, comenzando por vasijas de barro llenas de agua que eran enterradas para humedecer zonas de cultivo. El uso de tubería perforada comenzó en Alemania en 1920. Posteriormente en Australia se comenzó a usar plástico para conducir y distribuir agua en sistemas de riego por goteo. El uso de emisores plásticos fue introducido en Israel en 1960 y más adelante en la misma década fue inventada la cinta de riego (*DewHose*). El riego por goteo ha sido la innovación más valiosa para la agricultura desde el aspersor de impacto (1930) ofreciendo la primera alternativa práctica al riego tradicional especialmente en grandes extensiones de cultivo.

3.3 PROCESO DE DISEÑO

3.3.1 Consideraciones preliminares. La efectividad del sistema de fertirriego está determinada por la calidad de su planeación e instalación. Deben considerarse todos los métodos que es posible implementar y decidir si el fertirriego es el apropiado. Un factor importante en esta decisión es la extensión del cultivo que se desea regar. El fertirriego es una forma de automatización, siendo posible reducir en gran medida las labores requeridas en la plantación, por esto, entre más grande sea la plantación, más recomendable es la implementación de esta técnica. A excepción de la inversión inicial en el cabezal (Bomba, tanques, inyectoros), el costo del sistema es proporcional a la extensión de terreno que se va a regar, lo que permite una implementación progresiva. Otro factor a considerar es el tipo de plantas. Dependiendo de esto se puede elegir el tipo de emisor a utilizar, el número de tanques de mezcla y la disposición general de las redes.

En el caso del Vivero la Fuente, se tienen cultivos de cítricos en su etapa tardía (Arboles de 2 años o más), en una distribución de líneas paralelas que descienden por la pendiente de la finca. Esta característica topográfica de la finca permitió considerar la posibilidad del riego por gravedad.

3.3.2 Componentes del sistema. Fuente de agua: Puede ser un río, lago, estanque artificial, pozo profundo etc. Incluso el suministro de agua del servicio de acueducto puede ser usado en casos de proyectos pequeños.

Cabezal. Está constituido por:

- Tanque elevado
- Filtro de angeo y geotextil
- Filtros de malla
- Tanque de preparación y almacenamiento de la solución nutritiva
- Manómetro para medir la presión en la salida del cabezal hacia la red de distribución.

Distribución

- Línea primaria de distribución de agua de riego (entre el cabezal y el distribuidor)
- Línea secundaria de distribución y líneas regantes laterales (Distribuidor)
- Válvulas para control de riego por secciones.

El diseño agronómico preliminar realizado en función de las características del suelo, tipo de cultivo, tamaño de la plantación etc, arroja como resultado los datos necesarios para el diseño hidráulico, como el caudal necesario por planta y el tiempo de riego, entre otros.

Análisis individual de componentes usados en el Vivero La Fuente:

Fuente de agua: El agua de riego es obtenida de un conjunto de estanques artificiales ubicados en la parte baja de la finca. El agua es elevada a una altura de 14 metros desde la superficie del lago, hasta el tanque de almacenamiento que la recibe.

Tanque elevado: Este tanque recibe el agua directamente de la bomba. Cumple dos funciones; almacena el agua que envía la bomba y se ha adaptado para sustituir al filtro de arena mediante la adición de capas de angeo fino y geotextil. La sustitución del filtro de arena fue necesaria para reducir las pérdidas de presión

al mínimo, evitando limitar el caudal que pueda suministrar la bomba (Las pérdidas de presión normales en un filtro de arena limpio son de aproximadamente 3 m.c.a.).

Filtro de anejo y geotextil: Es una adición realizada al tanque elevado. Se ha comprobado experimentalmente que el trabajo realizado por un filtro de arena puede ser reemplazado mediante filtros de malla adicionales, siempre que no se trate de agua para consumo humano¹. En el sistema construido para el Vivero La Fuente se instalaron dos filtros de malla de 200 mesh y las capas de anejo y geotextil ayudan filtrando gran cantidad de material evitando sobrecargar los filtros de malla.

Manómetros: Se han ubicado varios manómetros en puntos importantes, como la entrada y la salida del cabezal y en puntos distantes de las líneas de riego para comprobar la presión disponible para los goteros más alejados. El límite máximo de los manómetros es de 0.3 bar (Aproximadamente 3 m.c.a) debido a que estas son las magnitudes de presión que se manejan en el sistema. La instalación de manómetros ayuda a identificar taponamientos y obstrucciones en diferentes zonas del sistema.

Filtros de malla: Mientras que el filtro de arena representa más una barrera para microorganismos nocivos para las personas, el filtro de malla cumple una función orientada a limitar el tamaño máximo de las partículas que transitan por la red de riego. El sistema cuenta con dos filtros de malla de 200 mesh, que garantizan un diámetro máximo de partícula de 0.075 [mm]. Un buen filtrado es clave para evitar problemas de taponamiento en los goteros, cuyos orificios son de 0,9 [mm].

Tanque de preparación y almacenamiento de la solución nutritiva: Es un contenedor hermético con tapa conectado al sistema mediante un bypass, que permite adicionar nutrientes solubles al agua que se descarga hacia la red de riego. El sistema de bypass permite controlar el contenido de los riegos ya que los nutrientes se deben distribuir según la programación definida para el cultivo.

¹. Paper Evaluación de filtros de arena y de malla. Pinilla Fernando

Líneas de distribución: El agua que sale del cabezal de riego es conducida y distribuida mediante mangueras de polietileno reciclado de bajo costo, (Fabricadas en Bucaramanga-Colombia por la empresa *Riegoplast*) diseñadas específicamente para sistemas de fertirriego, permitiendo la adición de goteros mediante perforación directa sin necesidad de accesorios adicionales. La manguera principal de diámetro de 2 pulgadas lleva el agua desde el cabezal hasta un arreglo de tubería y llaves de paso de PVC que la distribuye hacia cada una de las líneas laterales de la plantación. La distribución de las mangueras y su disposición se realizó en base al mapa topográfico a escala de la finca que especificaba los límites del campo, las obstrucciones, las pendientes del terreno y la localización de las fuentes de agua. Se realizaron pequeños ajustes durante las pruebas para asegurar el suministro de agua en todos los emisores.

3.3.3 Calculo del caudal requerido. La cantidad de agua que se debe suministrar al sistema de riego depende de los requerimientos particulares de las plantas, de las características del suelo, del clima y la topografía del lugar. El primer paso para el cálculo del agua necesaria es un reconocimiento de los cultivos para recopilar datos específicos. Algunos se pueden obtener rápidamente, otros, como la clasificación del tipo de suelo, se obtienen mediante estudios en entidades especializadas.

Estos datos son:

- Tipo de suelo
- Pendiente del terreno
- Características de la planta (Profundidad de raíz, edad)
- Características del cultivo (Tipo y variedad, cantidad de plantas, Marco útil)
- Porcentaje de malas hiervas

Además se debe saber con cuales elementos se cuenta para la construcción del sistema, especialmente los goteros que es posible conseguir y su respectivo caudal nominal.

En el riego por goteo se presentan dos tipos de riego diferentes, un riego abundante (empleado al inicio de los ciclos de riego y para realizar lavados anti-salinidad) y Riegos sucesivos (con caudales moderados mantenidos durante todo el ciclo).

Para el cálculo del caudal a suministrar durante el riego abundante se usan los datos recopilados previamente. En esta etapa se trata de definir el tiempo necesario para que el agua alcance la profundidad deseada.

Para calcular el tiempo de riego se usan las siguientes relaciones probadas experimentalmente ²

$$V = S * Pf * Cc$$

$$V = Q * t$$

$$S = \frac{Q}{i}$$

V: Volumen liquido en litros

S: Superficie mojada en m²

Pf: Profundidad que alcanzará el agua en cm

Cc: Capacidad de campo o de retención en mm

Q: Caudal del gotero en litros/hora

t: duración del riego abundante en horas

i: Velocidad de infiltración en mm/hora

². MOYA TALENS, J.A., Riego localizado y Fertirrigacion. 4 ed. Madrid: Mundiprensa, 2009.

Usando estas relaciones se obtiene la fórmula para el cálculo del tiempo máximo de riego continuo.

$$t = \frac{Pf * Cc}{i * \alpha}$$

α es un factor de corrección por pendiente del terreno.

La capacidad de campo y la velocidad de infiltración son características que dependen del tipo de suelo. (Ver tabla 5)

Tabla 6. Tipos de suelo, Capacidad de campo y velocidad de infiltración

Tipo de suelo	Cc [mm/cm]	i [mm/h]
Arenoso	0,33 a 0,85	19 a 25,5
Franco-Arenoso, Ligero	0,85 a 1,25	12 a 19
Franco-Limoso, Medio	1,2 a 1,9	10 a 12
Limo-Arcilloso, Arcilloso	1,45 a 2,1	7,5 a 9

Fuente: Riego por Goteo y Fertirrigacion. Moya A. Talens

El vivero la fuente posee un suelo Franco-Arenoso, por lo tanto su capacidad de campo se encuentra entre 0,85 y 1,25 [mm/cm] y la velocidad de infiltración del agua entre 12 y 19 [mm/h]. En este caso tomamos valores que proporcionen el tiempo máximo que debería durar el riego. La profundidad a alcanzar debe ser la misma profundidad de la raíz del árbol. Según diferentes publicaciones, los árboles frutales tienen la mayoría de sus raíces activas a 40 cm bajo la superficie por lo que se toma ese valor para Pf. El valor de corrección por pendiente α se obtiene de la Tabla 6:

Tabla 7. Factor de corrección por pendiente

Pendiente	α
< 5%	1
5 a 6%	0,9
7 a 8%	0,8
9 a 10%	0,7
11 a 12%	0,6
13 a 15%	0,5
16 a 20%	0,4
>20%	0,3

Fuente: Riego por Goteo y Fertirrigación. Moya A. Talens

El vivero la fuente tiene una pendiente de 28° que equivale a 30%, por lo que el valor de corrección α es 0,3.

Reemplazando todos los valores en la fórmula para calcular el tiempo máximo de riego:

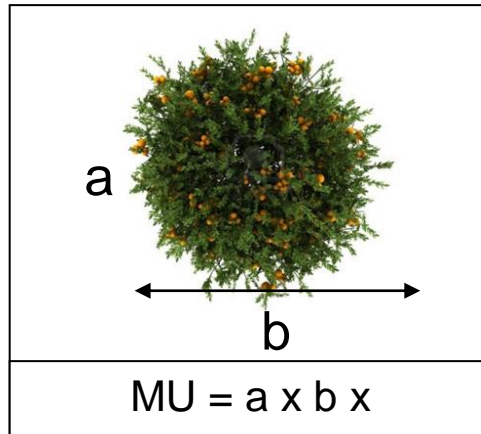
$$t = \frac{40 [cm] * 1,25 [mm/cm]}{12 [mm/h] * 0,3}$$

$$t \approx 14 \text{ horas}$$

Para el cálculo de los riegos sucesivos se utilizan algunos de los datos usados anteriormente junto con otros como el porcentaje de superficie del terreno cubierto por malas hierbas, el volumen de la copa de los árboles y el número de árboles.

Para estimar las necesidades hídricas de un árbol se tiene en cuenta su variedad y tamaño. En el Vivero La Fuente se tienen cultivos de cítricos en su edad tardía, y su tamaño se obtuvo midiendo la distancia entre los brotes más lejanos al tronco. Estas distancias proporcionan un área denominada marco útil (MU) que es el área total del terreno cubierta por la sombra de los árboles.

Figura 36. Marco Útil



Fuente: Autores

Si el suelo se encuentra cubierto de hierba se toma la superficie total de la parcela como Marco Útil.

Requerimientos de agua aproximados para cítricos:

Tabla 8. Requerimientos de agua Para cítricos

Meses	Agua (mm/día)	
	Tipo Satsumo	Tipo Navel
	Sin Hierba	Sin Hierba
Enero	1,21	1,21
Febrero	1,43	1,43
Marzo	1,76	1,76
Abril	2,09	2,09
Mayo	2,53	2,53
Junio	3,08	3,08
Julio	3,30	3,3
Agosto	3,30	3,19
Septiembre	2,97	2,75
Octubre	2,53	2,42
Noviembre	1,32	1,87
Diciembre	1,21	1,43

Fuente: Riego por Goteo y Fertirrigacion. Moya A. Talens

Tabla 9. Requerimientos de agua cítricos 2

Meses	Agua (mm/día)	
	Tipo Salustiano y Clementinos	Tipo Valencia
	Sin Hierba	Sin Hierba
Enero	1,30	1,30
Febrero	1,50	1,50
Marzo	1,80	1,90
Abril	1,90	2,50
Mayo	2,30	2,90
Junio	2,80	2,80
Julio	3,00	3,00
Agosto	2,90	2,90
Septiembre	2,50	2,50
Octubre	2,30	2,30
Noviembre	1,70	1,70
Diciembre	1,30	1,30

Fuente: Riego por Goteo y Fertirrigación. Moya A. Talens

De estas tablas se obtiene un valor conservador de 4 [L/m²-día] como el agua requerida por los cítricos. El área promedio de sombra de los cítricos del Vivero La Fuente es de 6,25 [m²] y en la primera etapa del cultivo a regar existen 97 árboles completamente desarrollados.

El requerimiento total de caudal diario para este sector de cultivo será:

$$Q_{req} = \#Arboles * AreaArbol * RequerimCitricos$$

$$Q_{req} = 97 * 6,25 [m^2] * 4 [L/m^2 - día]$$

$$Q_{req} = 2425 \left[\frac{L}{día} \right] = 101 \left[\frac{L}{hora} \right] = 1,68 \left[\frac{L}{min} \right]$$

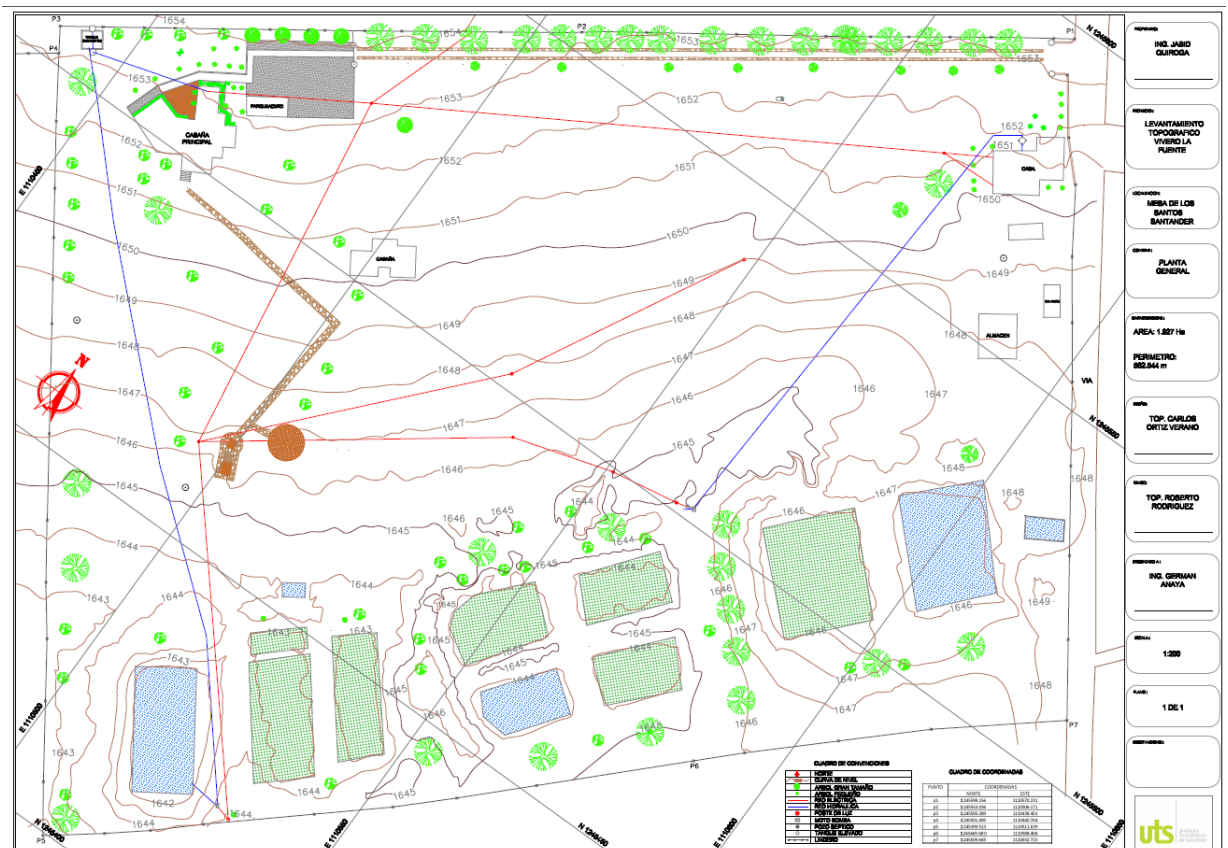
3.3.4 Retención de agua en el suelo. La humedad del suelo debe encontrarse dentro de dos límites, la capacidad de campo (Punto de saturación del terreno) y el punto de marchitez permanente de la planta (Nivel de humedad insuficiente). La humedad puede interpretarse como la presión necesaria para absorber el agua del suelo. Si la humedad esta cerca de la capacidad de campo que es aproximadamente 0.33 Bares, significa que el suelo está casi saturado de agua, lo que implica que habrá poco aire disponible y afectara negativamente el normal desarrollo de la planta.

En caso de que la humedad este cerca del punto de marchitez permanente (aproximadamente 15 Bar) la planta tendrá dificultad para absorber el agua lo que le producirá daños irreversibles a nivel fisiológico.

La distribución del agua en el terreno es un factor importante. La forma del bulbo húmedo permite para precisar parámetros de diseño, como la distancia entre emisores y el número de emisores por planta. La zona radicular efectiva de la planta absorbe entre 85 y 90 % del agua, por esto, no es necesario humedecer la totalidad de la base del árbol. En el suelo arenoso del Vivero La Fuente se puede mantener una alta frecuencia de riego sin que este se sature. Con estas consideraciones, se decidió instalar 3 goteros de caudal nominal de 4 litros/hora en cada árbol. Mediante pruebas, se estableció que con la presión disponible del sistema por gravedad, que es de 3 psi, los goteros emiten aproximadamente 1 litro por hora, siendo bastante próximo al valor deseado.

3.3.5 Topografía del terreno. Se realizó un estudio topográfico del terreno para diseñar la red de riego. Este estudio proporciona un plano a escala detallado del predio, incluyendo la ubicación de las viviendas, zonas de cultivo y estanques. Además, el plano incluye las curvas de nivel del terreno, proporcionando la elevación exacta de cada lugar dentro del predio, lo que permite calcular diferenciales de presión entre distintos puntos.

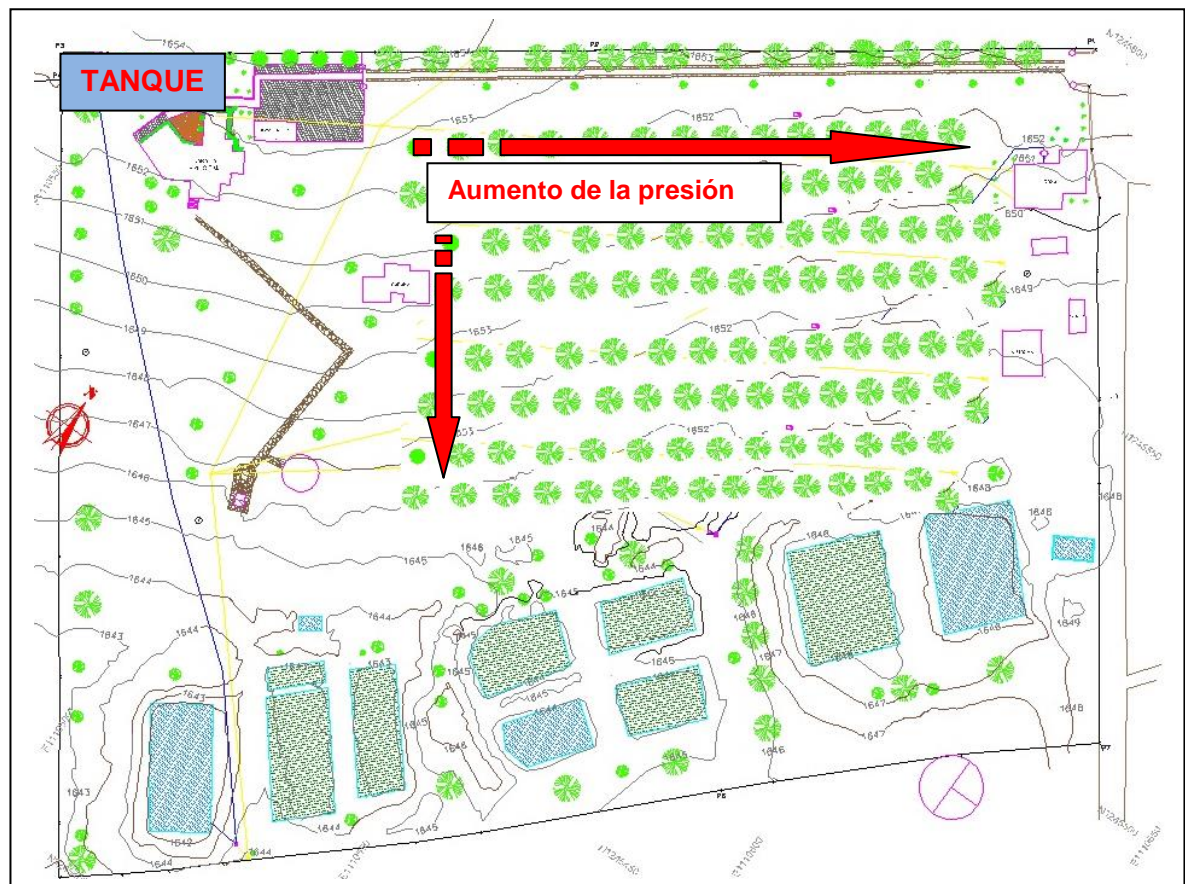
Figura 37. Levantamiento topográfico Vivero La Fuente



Fuente: Topógrafo Carlos Ortiz Verano

El estudio muestra una tendencia descendente mientras el agua se aleja del tanque de suministro a lo largo de las líneas de riego, lo que favorece un aumento de la presión en los goteros más alejados, compensando con creces las pérdidas de presión a lo largo de las líneas.

Figura 38. Aumento de la presión debido a las pendientes

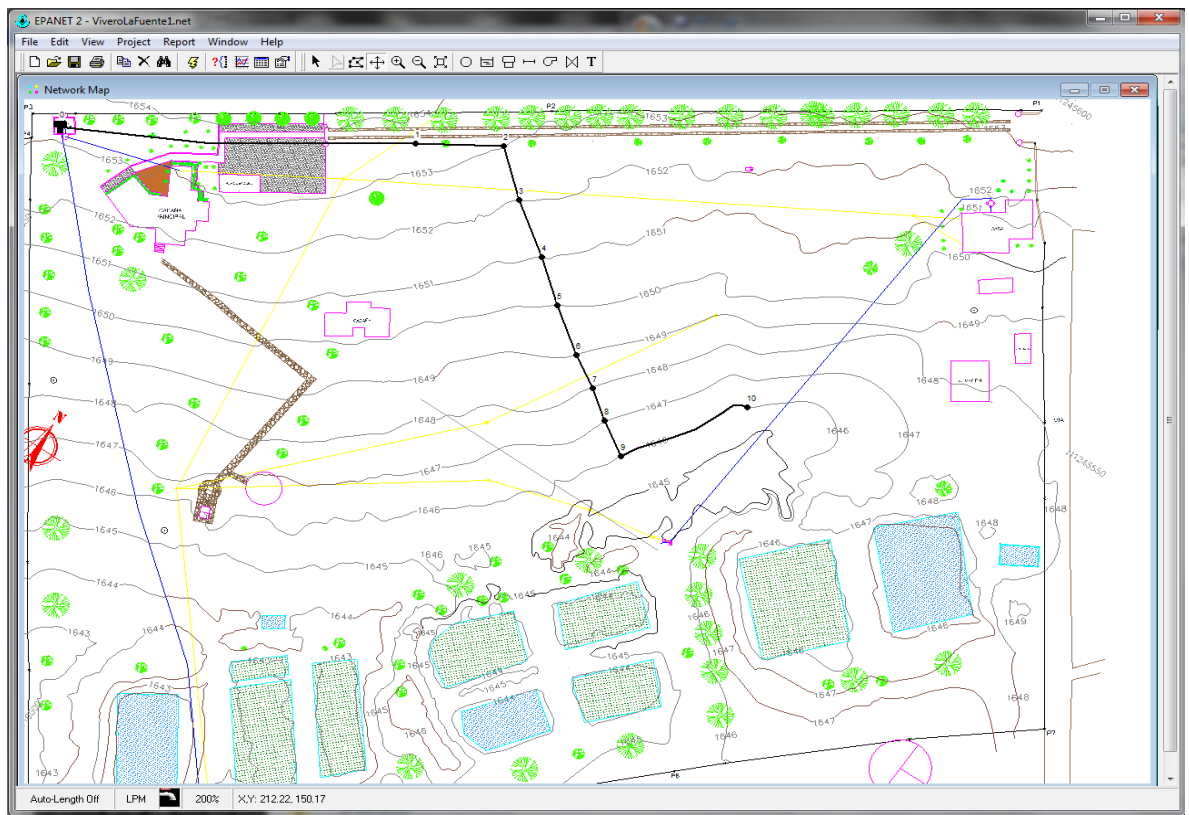


Fuente: Autores

El mapa a escala permitió diseñar la red de riego con un gran nivel de confiabilidad, proporcionando distancias entre puntos de interés. El levantamiento topográfico debería realizarse como apoyo para cualquier proyecto de riego o de diseño de redes hidráulicas.

3.3.6 Diseño de la red hidráulica. Para distribuir correctamente la red sobre el terreno es necesario trabajar sobre un mapa a escala y preferiblemente que incluya las curvas de nivel. Los cálculos de caudal y presión en los puntos de interés de la red se realizaron usando el Software EPANET. Este programa permite importar el plano del terreno para trabajar sobre él. También permite ubicar emisores, tuberías y tanques y asignar propiedades a cada uno de estos, como el caudal nominal de los goteros, la capacidad del tanque, diámetro de las tuberías, etc. El programa también facilita el cálculo de pérdidas de presión debida a accesorios y a la fricción en las tuberías y permite escoger entre varios modelos para hacerlo. En este proyecto se utilizó el modelo de Hazen-Williams para el cálculo de pérdidas.

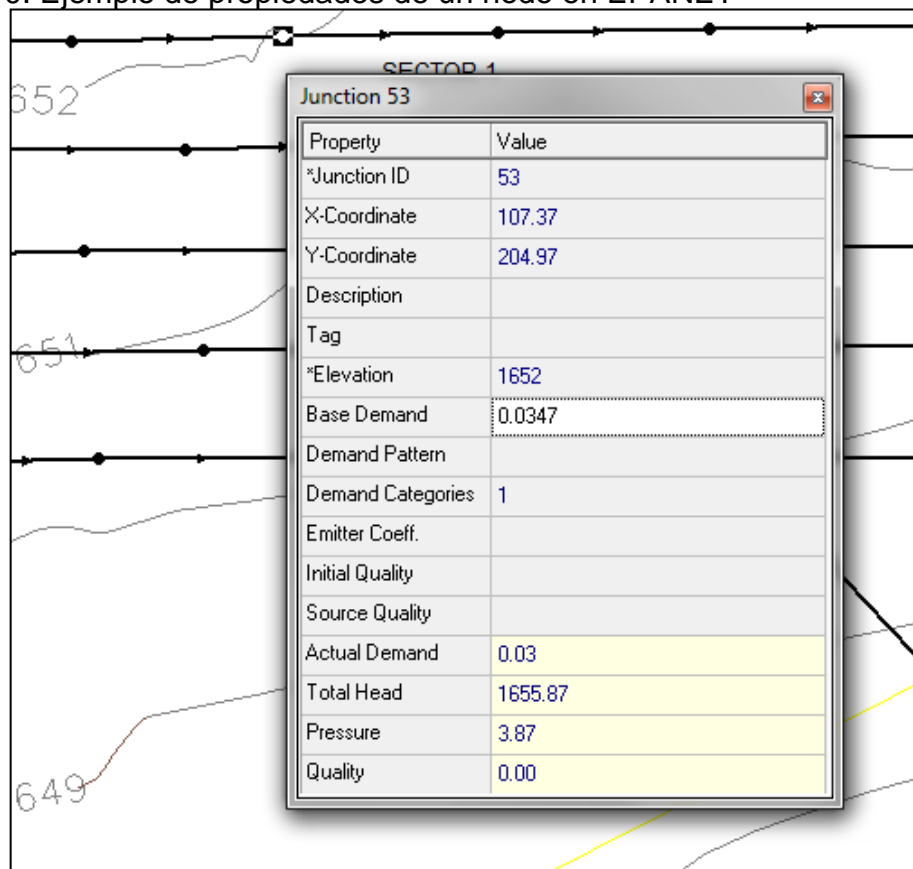
Figura 39. Plano del Vivero La Fuente en el entorno de EPANET



Fuente: Autores

Luego de importar el plano a escala en EPANET, se ubican los emisores según la distribución de los árboles en el terreno. Cada punto en el mapa representa un punto de salida de agua, al cual se le ha asignado un caudal nominal, coordenadas y su altura en el plano. Debido a que cada punto tiene su valor de elevación, el programa calcula los diferenciales de presión entre nodos y comprueba la dirección y el caudal del agua.

Figura 40. Ejemplo de propiedades de un nodo en EPANET

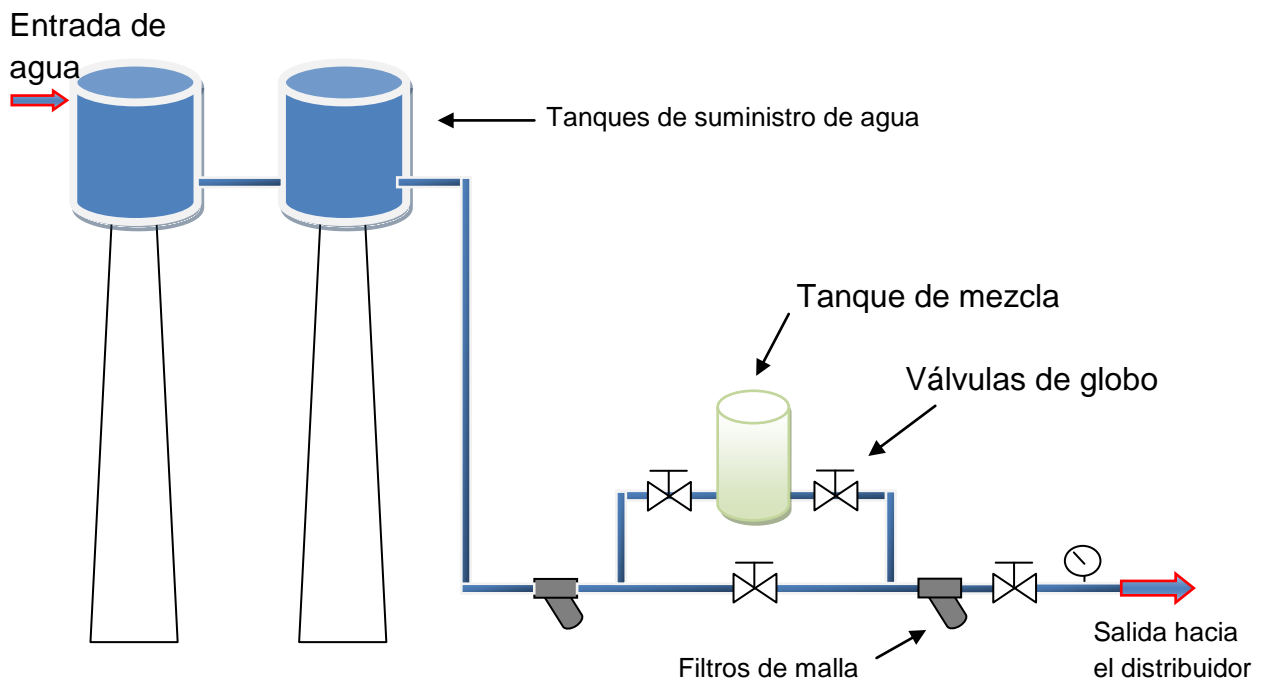


Fuente: Autores

La fuente de agua para el sistema se ha modelado como un “Reservorio”, un estanque teórico que no varía su nivel y que proporciona un suministro ilimitado. Este modelado es aproximado al comportamiento de los tanques de suministro, dos tanques interconectados de 500 litros cada uno que se llenan con la aerobomba durante las horas de riego y que en caso de necesitarse pueden llenarse mediante la bomba eléctrica auxiliar. Los tanques se encuentran a tres metros de altura y la superficie libre del agua se encuentra un metro más arriba, por lo que la presión disponible para el cabezal de riego que está en la base del montaje de los tanques es de 4 m.c.a. ó 5,69 psi.

Esta presión es suficiente para que el agua atraviese los dos filtros de malla, el tanque de mezcla y logre llegar hasta el distribuidor hacia las líneas regantes portagoteros.

Figura 41. Diagrama del cabezal de riego

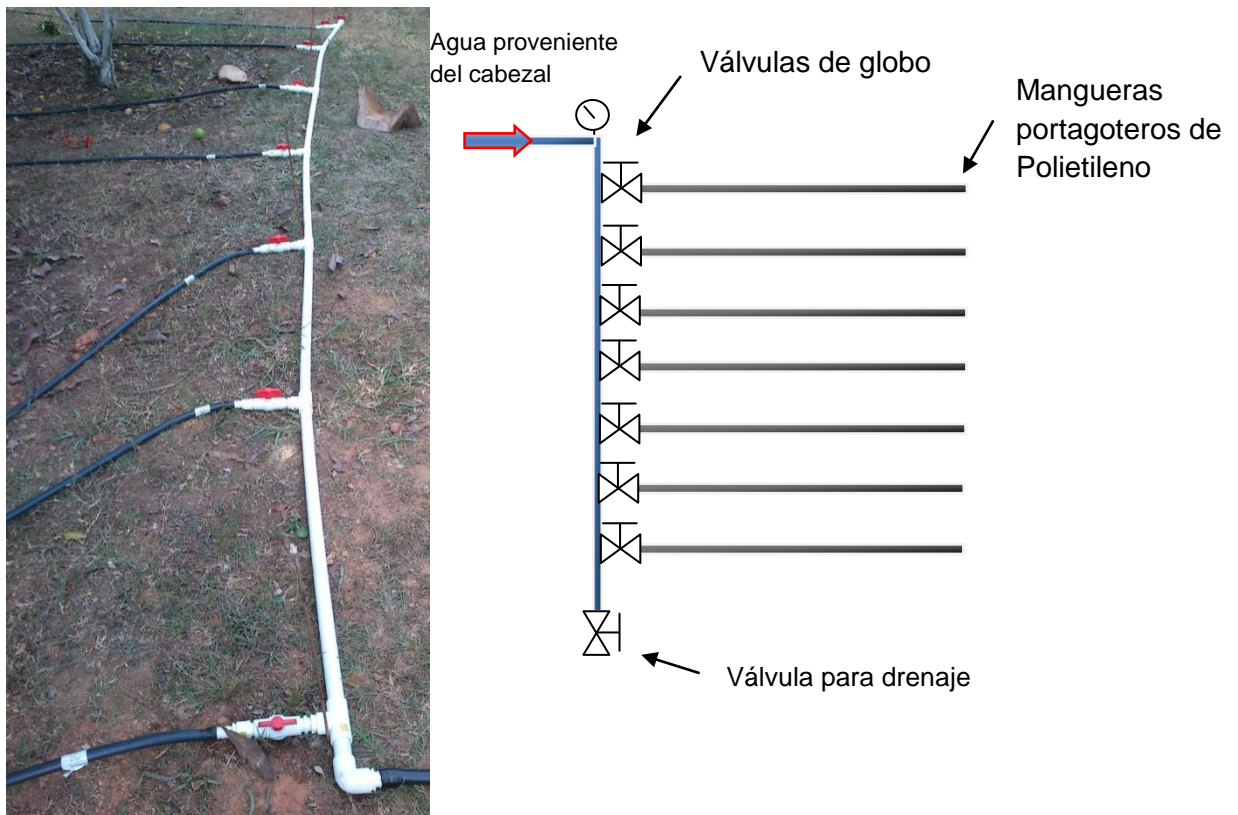


Fuente: Autores

El distribuidor recibe el agua proveniente del cabezal mediante un tramo de 50 metros de manguera de 2 pulgadas de diámetro. Para realizar este recorrido, se dispone de la presión con la que sale el agua del cabezal, sumada al diferencial de altura entre este y el distribuidor, que se encuentra en un nivel 1 metro más bajo.

El manómetro ubicado en el distribuidor muestra una presión de 3 m.c.a durante el riego con todas las líneas porta goteros abiertas simultáneamente. Con esta prueba se comprobó que se podían regar los 97 árboles simultáneamente, observando los 3 goteros en cada uno de estos y verificando que todos emitieran agua. Mediante otro manómetro ubicado al final de la línea más alejada se observó que la presión descendía a 1,90 psi, pero aun así, los goteros en ese punto emitían suficiente caudal para cumplir con los requerimientos del árbol.

Figura 42. Diagrama y foto del distribuidor



Fuente: Autores

3.4 RESULTADOS

Luego de la puesta en marcha del sistema se realizó un análisis para determinar el impacto logrado sobre los cultivos. Las variables consideradas en el análisis fueron la productividad del cultivo, el caudal entregado a los árboles, el ahorro de agua y las horas de atención dedicadas al cultivo.

Antes de la instalación del sistema, el riego se realizaba manualmente. Un encargado recorría diariamente las 8 líneas de cultivo de 100 metros cada una, regando con una manguera, lo que le tomaba en promedio 2 minutos por árbol para un total de 3 horas diarias en los 97 árboles de este sector. La frecuencia del riego no era constante y podían pasar varios días sin riego si el encargado tenía otras tareas. En cuanto al fertilizante, el encargado tardaba 9 minutos en promedio en aplicar nutrimentos a cada árbol, llegando a usar dos jornadas completas de 10 horas cada una en esta tarea que se realizaba cada dos semanas.

Tabla 10. Horas de trabajo en los cultivos sin el sistema

	Frecuencia	Subtotal
Tiempo empleado en riego	3 h/día X 30 días	90 horas
Tiempo empleado en fertilizar	20 h X 2 veces por mes	40 horas
	Total Mensual	130 Horas

Fuente: Autores

Luego de la instalación del sistema, el tiempo empleado en las labores de riego se redujo a 15 minutos diarios, necesarios solamente para abrir las válvulas del sistema y verificar la presión en los manómetros. La adición de fertilizantes al agua de riego se realiza de forma semanal, dando tiempo a los frutales de absorber los nutrimentos, evitando saturar el terreno o desperdiciar nutrientes.

Esta tarea toma alrededor de 1 hora, mientras se prepara la solución y se vierte en el tanque de mezcla del sistema de fertirriego. Luego, basta abrir la válvula del bypass para comenzar la distribución de fertilizantes a través de la red.

Tabla 11. Horas de trabajo en los cultivos con el sistema

	Frecuencia	Subtotal
Tiempo empleado en riego	0.25 h/día X 30 días	7.5 horas
Tiempo empleado en fertilizar	1h X 4 veces por mes	4 horas
	Total Mensual	11.5 Horas

Fuente: Autores

Figura 43. Impacto en el tiempo de trabajo en los cultivos

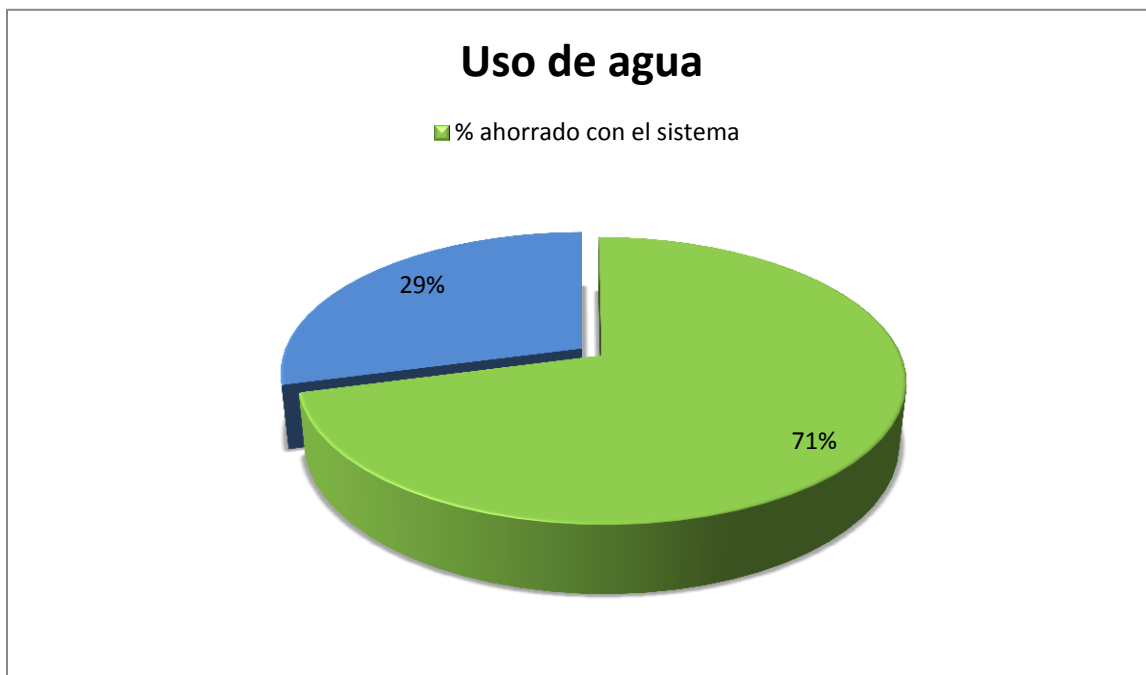


Fuente: Autores

La siguiente variable a considerar es el ahorro de agua, un elemento importante por su escasez en la zona y por el trabajo necesario para disponer de esta en el tanque de distribución. La bibliografía consultada habla de un ahorro de 50% de agua en comparación con el riego tradicional. En el vivero la fuente se ha hecho este análisis comparando las veces que era necesario rellenar el volumen total de 1000 litros de los dos tanques juntos durante el riego de los 97 árboles con el riego manual y luego con el sistema de fertirriego. Con el riego manual los tanques debían llenarse 3 veces para regar los 97 árboles del sector. Esto representa 3000 litros de agua que se distribuyen en los arboles a medida que el empleado avanza entre los cultivos regándolos, tarea que le tomaba cerca de 3 horas, esto representa un consumo de 1000 litros por hora. Debido a que el agua interactúa con el aire durante su caída al suelo y luego queda sobre la superficie, una proporción considerable no alcanza a ser absorbida por el suelo y no es aprovechada por el árbol.

Para estimar el ahorro de agua podemos comparar la cantidad de agua que se usa en un mismo periodo de tiempo para regar la misma cantidad de arboles. Con el riego manual, se consumen 1000 litros por hora y su distribución no es uniforme, mientras que en el sistema de fertirriego el agua fluye por cada uno de los goteros a razón de 1 litro por hora, para un total de 291 litros por hora (Cada árbol tiene 3 goteros). El agua usada en el sistema de fertirriego representa un tercio del agua que se usa en el riego manual. Además, el sistema de riego localizado garantiza que el agua será entregada directamente al suelo, siendo absorbida rápidamente, minimizando pérdidas por evaporación o por malas hierbas cercanas.

Figura 44. Ahorro de agua con el sistema



Fuente: Autores

El cuarto factor considerado es la productividad de los cultivos. El impacto logrado será medible tras varios ciclos de cosecha. Se espera un incremento en la producción tanto en calidad como en cantidad ya que esta depende casi totalmente del agua y los nutrientes de los que dispone el árbol productor. En comparación con los riegos esporádicos y la fertilización manual que se realizaba cada dos semanas, el nuevo sistema de fertirriego, con su suministro constante, eficiente y efectivo de agua y nutrientes garantiza una mejora considerable de las condiciones para los árboles y en consecuencia un gran cambio a favor de la productividad.

3.5 ANALISIS ECONOMICO

El sistema de fertirriego se compone de elementos en su mayoría comunes, como tuberías de pvc, manómetros, recipientes herméticos, válvulas y filtros. Las características de estos componentes varían según la magnitud del proyecto. Proyectos más grandes requerirán bombas para impulsar el agua a través de la red lo que implicará mayor presión en el sistema y elementos más costosos que puedan trabajar en esas condiciones; filtros especiales, válvulas automáticas, recipientes más grandes y resistentes etc. El sistema de fertirriego del *Vivero La Fuente* trabaja por gravedad, por lo que la presión es mínima (Máximo 10 m.c.a. ó 15 psi) y no se requieren accesorios especiales.

En la Tabla 9 se listan los componentes del sistema de fertirriego y sus costos. (Ver facturas en los anexos)

Tabla 12. Costos sistema de fertirriego

Elementos	Costo
Tubería y accesorios PVC	\$ 200.000
2 Filtros de malla	\$ 90.000
3 manómetros	\$ 72.000
Recipiente hermético	\$ 70.000
900 m manguera	\$ 450.000
300 Goteros	\$ 150.000
Costo Total	\$ 1.032.000

Fuente: Autores

La instalación del sistema puede realizarse en tres días y puede comenzar a funcionar tan pronto este completo.

La recuperación de la inversión se refleja en el tiempo que el trabajador de la finca tiene libre para otras tareas y en el incremento de la producción del cultivo.

El empleado recibe un pago de 3000 pesos por hora, la reducción en el tiempo dedicado al cultivo es de 118 horas mensuales, que equivalen a \$354.000. Considerando esto, la inversión de \$1.032.000 se recupera en poco más de tres meses solo en reducción de tiempo de trabajo en los cultivos. Si tenemos en cuenta el impacto en la producción, la relación costo beneficio es extraordinaria.

Figura 45. Prueba de presión de trabajo y montaje del cabezal de riego



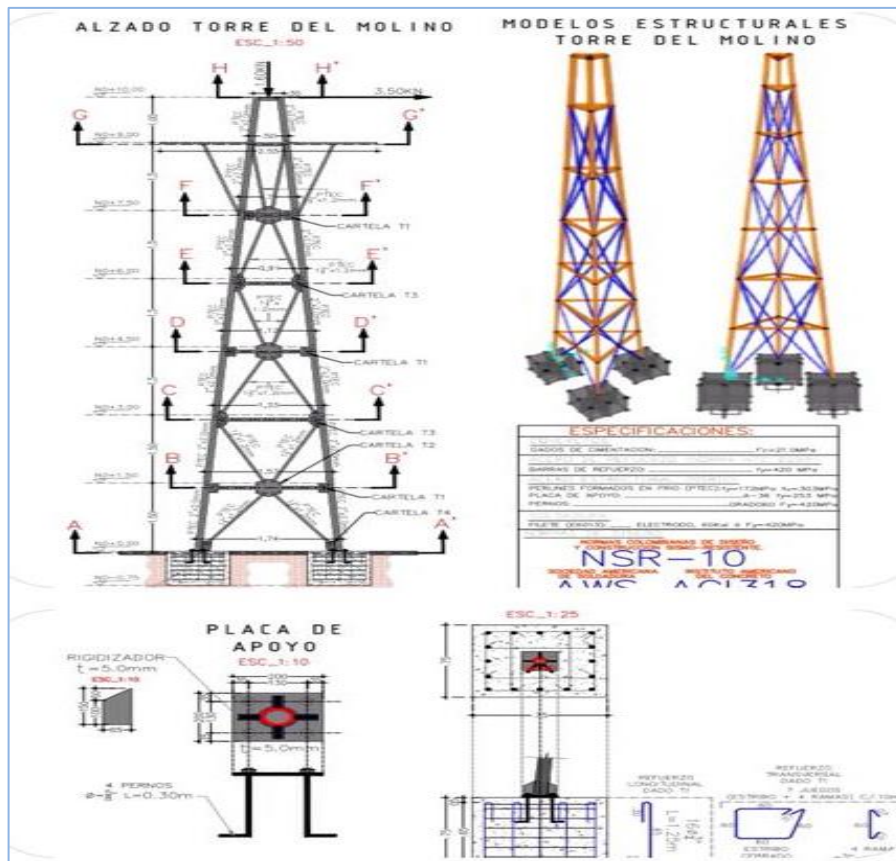
Fuente: Autores

4. TORRE DE LA AEROBOMBA

4.1 DISEÑO DE LA TORRE

Para el diseño de la torre se recurrió al Ingeniero Civil Rafael Jaramillo quien se especializa en el desarrollo de este tipo de estructuras. Se optó por tercerizar este diseño debido a la criticidad de este importante componente. La integridad y la seguridad necesarias en esta enorme estructura están garantizadas por la firma del Ingeniero. Su extensa experiencia en trabajos similares proporcionan la tranquilidad necesaria que se debe procurar para las personas que trabajen cerca de la torre. Los diseños proporcionados por el Ingeniero Rafael Jaramillo fueron seguidos y ejecutados bajo la dirección de los autores en un taller contratado para la construcción. (Ver planos completos de la torre en los anexos)

Figura 46. Planos de la torre



Fuente: Autores

4.2 FABRICACION DE LA TORRE

La fase de construcción de la torre se desarrolló en un plazo de dos semanas en un taller ubicado en la carrera 19 con calle 17 de Bucaramanga. La fabricación estuvo dirigida por los autores todos los días del trabajo para verificar que se siguieran las especificaciones de los diseños y hacer las correcciones necesarias al proceso. El propietario del taller apoyo en gran medida el proceso de fabricación, aportando su amplia experiencia y sus técnicas comprobadas para agilizar el proceso y para alcanzar el excelente resultado final que se logró. La habilidad del soldador del taller también fue notable, dada su experiencia previa en las industrias FALCON donde trabajó previamente.

Figura 47. Ajuste de la base de la torre



Fuente: Autores

Figura 48. Trabajo de soldadura en la punta



Fuente: Autores

Figura 49. Pintura y terminado de la torre



Fuente: Autores

4.3 CONSTRUCCION DE LA TORRE

Una vez terminado el proceso de fabricación de la torre, se transportan todos los componentes a la ubicación del emplazamiento para iniciar la construcción.

La primera sección de la torre es anclada en una base de concreto previamente preparada. El diseño desarmable de la torre fue necesario para facilitar su transporte y su construcción, la cual se realizó fácilmente mediante tornillos y tuercas.

Figura 50. Construcción Torre 1



Fuente: Autores

La construcción de la torre se realiza de forma ascendente por secciones. Las primeras secciones se arman fácilmente desde el nivel de piso.

Figura 51. Construcción Torre 2



Fuente: Autores

A medida que se asciende se hace necesario el uso del arnés de seguridad

Figura 52. Construcción Torre 3



Fuente: Autores

Las últimas secciones y el montaje de la turbina son realizados por técnicos especializados en trabajo en altura con las medidas de seguridad necesarias.

Figura 53. Construcción Torre 4



Fuente: Autores

Figura 54. Construcción Torre 5



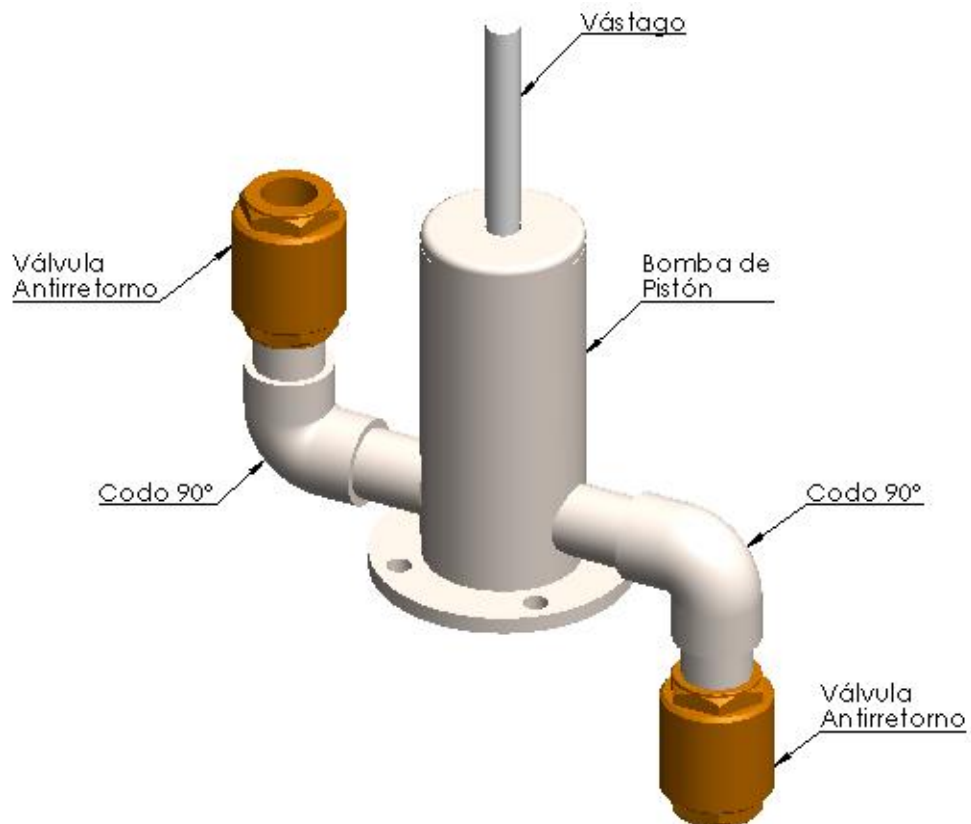
Fuente: Autores

5. BOMBA DE PISTÓN

5.1 DISEÑO DE LA BOMBA

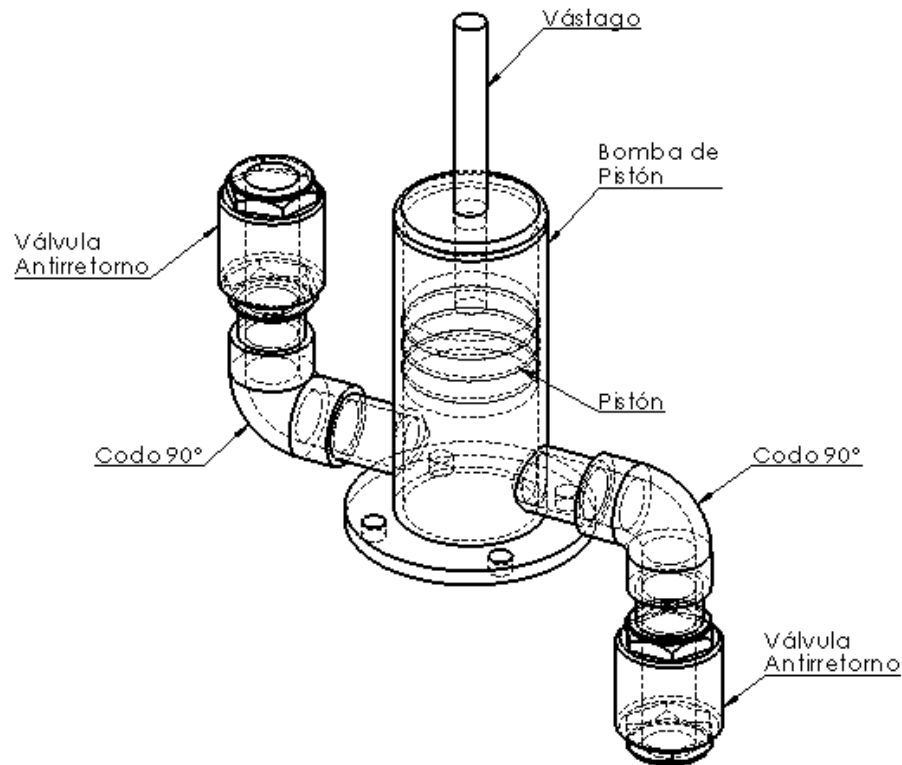
La bomba de pistón es el dispositivo mecánico encargado de bombear el agua mediante paquetes de fluido, por medio del movimiento de un pistón que desaloja un volumen de fluido equivalente al volumen ocupado por el pistón durante su carrera. La ilustración de la misma y los elementos que la componen se muestran a continuación

Figura 55. Componentes de la bomba



Fuente: Autores

Figura 56. Detalles de la bomba

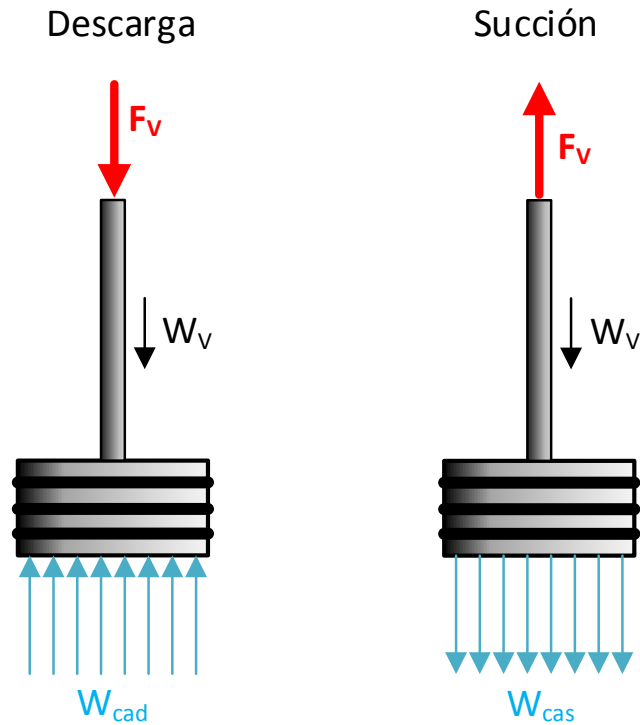


Fuente: Autores

De las dimensiones a determinar para el diseño de la bomba resaltan por sobre todas el diámetro y la carrera del pistón, puesto que definen el volumen bombeado por cada recorrido del mismo, estableciendo el caudal de la bomba para cierto valor de rpm del rotor. A continuación se explica la determinación de cada uno de ellas.

5.1.1 Dimensionamiento de la bomba. El diámetro de la bomba (o del pistón más precisamente) es un valor que resulta de la búsqueda de un balance de las fuerzas y el torque en un ciclo completo del rotor. Este balance se busca con el fin de someter al rotor a un mismo valor de torque tanto en el momento de la succión como en el de la descarga. Para ello se realiza un balance de fuerzas sobre el pistón para ambas situaciones (succión y descarga) para después calcular un diámetro tal que la fuerza en el vástago para un ciclo completo sea la misma.

Figura 57. Diagrama de fuerzas en el pistón



Fuente: Autores

Donde:

$$W_{cad} = \text{Peso de la columna de agua de la descarga} = \frac{\pi \phi_p^2}{4} \cdot h_d \cdot \rho \cdot g$$

$$W_{cas} = \text{Peso de la columna de agua de la succión} = \frac{\pi \phi_p^2}{4} \cdot h_s \cdot \rho \cdot g$$

$$W_V = \text{Peso del vástago (desde el yugo hasta el pistón)} = 10 \text{ [kg]} \text{ (98 [N])}$$

$$h_d = \text{Altura de descarga} = 13 \text{ [m]}$$

$$h_s = \text{Altura de succión} = 3 \text{ [m]}$$

$$\rho = \text{densidad del agua} = 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$g = \text{gravedad} = 9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$F_V = \text{Fuerza aplicada al vástago}$$

Del balance de fuerzas en el pistón durante la descarga:

$$F_v = W_{cad} - W_v$$

Del balance de fuerzas en el pistón durante la succión:

$$F_v = W_{cas} + W_v$$

Igualando ambas ecuaciones se halla el diámetro para el cual la fuerza en el vástago tiene la misma magnitud durante un ciclo completo del rotor.

$$W_{cad} - W_v = W_{cas} + W_v$$

$$W_{cad} - W_{cas} = 2 \cdot W_v$$

$$\left(\frac{\pi \phi_p^2}{4} \cdot h_d \cdot \rho \cdot g \right) - \left(\frac{\pi \phi_p^2}{4} \cdot h_s \cdot \rho \cdot g \right) = 2 \cdot W_v$$

$$\frac{\pi \phi_p^2}{4} \cdot \rho \cdot g \cdot (h_d - h_s) = 2 \cdot W_v$$

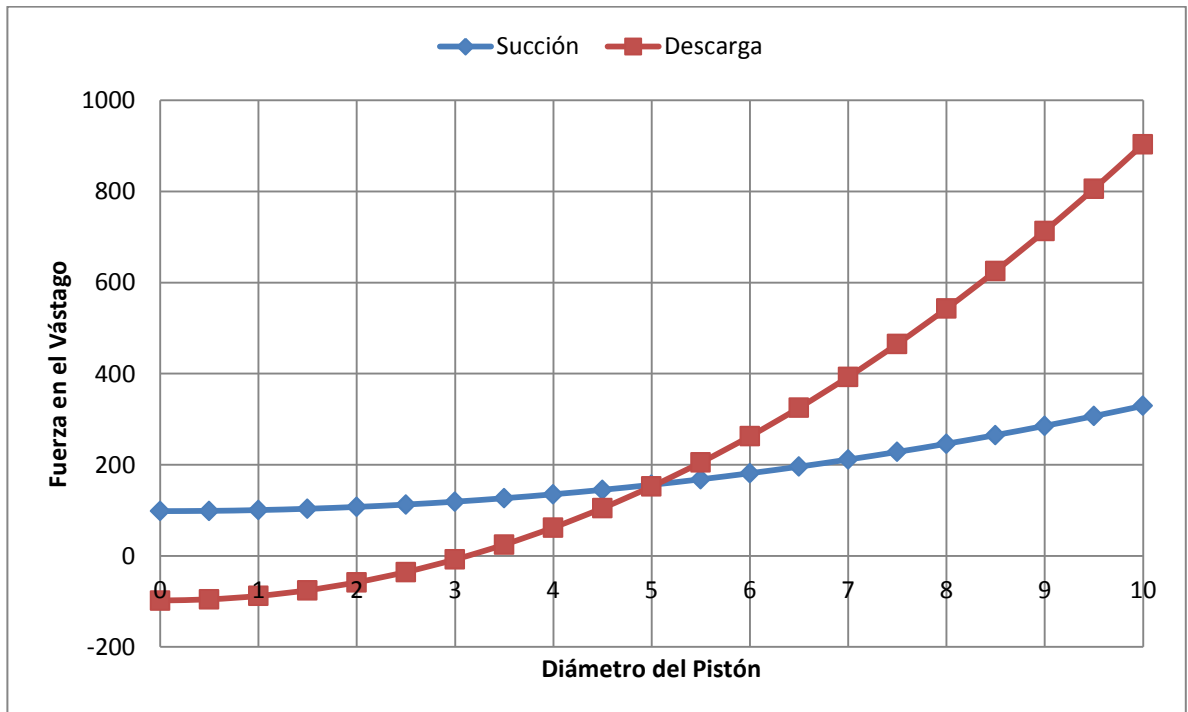
$$\phi_p = \sqrt{\frac{8 \cdot W_v}{\pi \cdot \rho \cdot g \cdot (h_d - h_s)}}$$

$$\phi_p = \sqrt{\frac{8 \cdot 98 [N]}{\pi \cdot 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 9.8 \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot (13 - 3) [m]}}$$

$$\phi_p = 5.04 [cm]$$

En la siguiente grafica se ilustra la fuerza en el vástago durante la succión y la descarga en función del diámetro del pistón. Se puede observar que en el valor calculado anteriormente efectivamente se cruzan las curvas de fuerza en el vástago.

Figura 58. Fuerza sobre el vástago Vs Diámetro de pistón



Fuente: Autores

5.1.2 Materiales de fabricación. Para el diseño definitivo de la bomba, puesto que el cuerpo de la misma es un tubo de acero inoxidable comercial, se selecciona un diámetro nominal de tubo que tenga el diámetro interior más cercano al valor calculado.

El diámetro interior de una tubería de acero inoxidable de 2" de diámetro nominal, cedula 40, es de 52.5 mm, lo más cercano al diámetro de 50.4 mm calculado anteriormente. Por tanto se seleccionara ese tamaño para la construcción de la bomba.

Se selecciona una tubería cedula 40 por que proporciona el suficiente valor de espesor para realizar un maquinado dentro del tubo, lo que resulta siendo la "camisa interior" de la bomba.

La **longitud del recorrido** del pistón equivale al radio de la manivela del mecanismo yugo escocés, encargado de transformar el movimiento rotacional a lineal. Para una manivela de menor longitud se obtiene una fuerza en el vástago mucho mayor.

Puesto que la preocupación radica en que la turbina opere en las condiciones de viento suave presentes en el vivero "La Fuente", en otras palabras que tenga un torque de arranque bajo, la longitud de la manivela se establece en 3 cm, valor mínimo utilizado en los rotores multipala comerciales hasta la fecha.

Esto establece la carrera del pistón en 60 mm, lo que genera un volumen desplazado por cada revolución del rotor de 130 [ml].

5.2 INSTALACIÓN DE LA BOMBA

Luego de tener instalada la turbina eólica sobre la torre, se construyó una base especial para ubicar la bomba de pistón sobre 4 tornillos. Este montaje permite acomodar la posición y altura de la torre para que la unión entre el elemento oscilante y el pistón de la bomba sea óptima.

Figura 59. Instalación de la bomba



Fuente: Autores

Los accesorios de la bomba se reconfiguraron de forma que las válvulas antirretorno quedaran verticales para mejorar su rendimiento. Asimismo, fue necesario mejorar los sellos para garantizar hermeticidad e incrementar el rendimiento volumétrico.

Figura 60. Instalación de la bomba 2



Fuente: Autores

Figura 61. Aerobomba Instalada



Fuente: Autores

5.3 PRIMERAS PRUEBAS DE BOMBEO

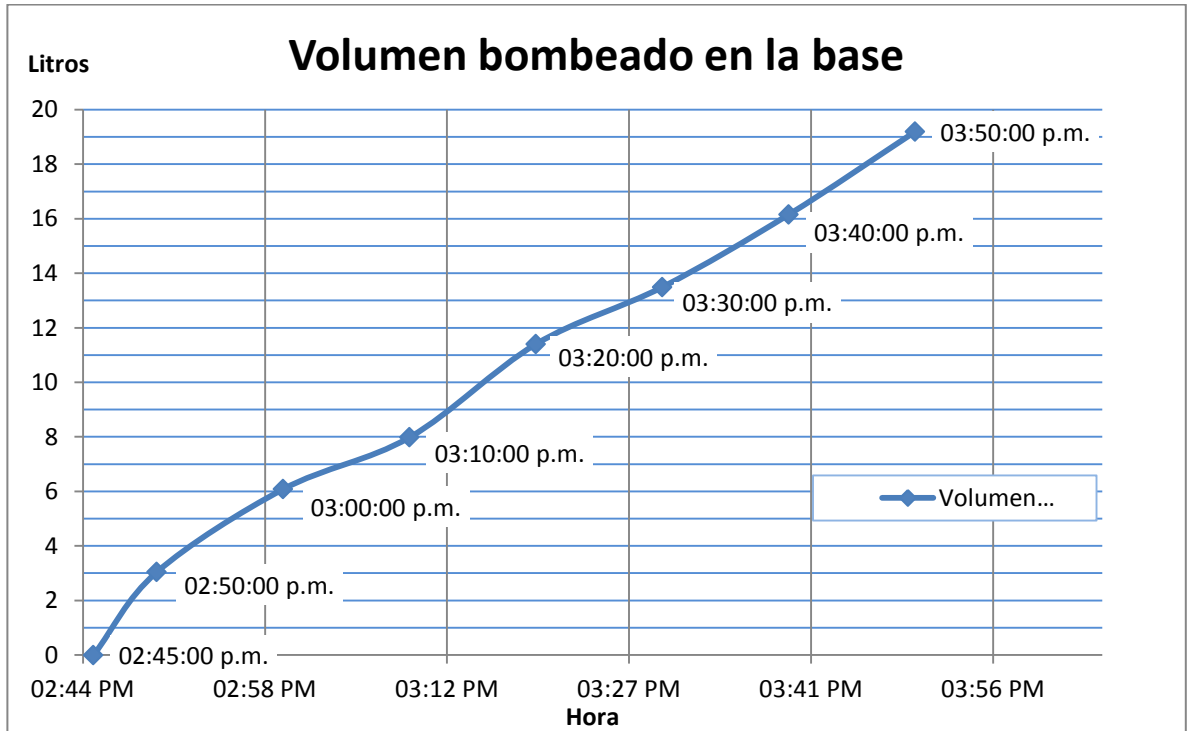
Durante las pruebas realizadas a la aerobomba se tienen dos indicadores clave: el caudal que puede suministrar y la cabeza de altura a la que es capaz de enviar el agua. Para conocer el caudal se hicieron mediciones cronometradas del volumen de agua que entregaba la bomba, primero a la salida de la bomba junto a la torre y luego a 150 metros de distancia con un diferencial de altura de 15 metros.

Los resultados de la prueba junto a la bomba fueron prometedores, con un caudal promedio de 26 [L/h] debido a que la incidencia del viento era intermitente con un promedio de 6 ráfagas por hora. Cada medición se iniciaba cuando el rotor comenzaba a girar y terminaba cuando este se detenía por completo.

Tabla 13. Datos Prueba de caudal 1

PRUEBAS DE CAUDAL (En la base de la torre)					
Hora	Tiempo (min)	Nivel del tanque (cm)	Volumen (L)	Caudal (L/h)	Volumen Acumulado [L]
02:45 p.m.	inicio	0	0	0	0
02:50 p.m.	6	8	3,04	30,41	3,04
03:00 p.m.	5	5	1,90	22,81	6,08
03:10 p.m.	7	9	3,42	29,32	7,98
03:20 p.m.	6	5,5	2,09	20,91	11,40
03:30 p.m.	5	7	2,66	31,93	13,49
03:40 p.m.	7	8	3,04	26,07	16,16
03:50 p.m.	5	4,5	1,71	20,53	19,20
				Promedio	26,00

Figura 62. Grafica Prueba de caudal 1



Fuente: Autores

Luego de comprobar que la bomba trabajaba bien a descarga libre, se procede a conectar la manguera de salida de 2 pulgadas y 125 metros de longitud que conduce el agua hacia el tanque de agua subiendo 15 metros por la pendiente de la finca.

La manguera que lleva el caudal de la aerobomba al tanque es compartida con una bomba centrífuga que funciona como respaldo del sistema y que ya estaba antes de la construcción de la aerobomba. El empalme se realiza mediante una "T" de PVC. (Ver figura)

Figura 63. Unión a la manguera de la bomba centrífuga

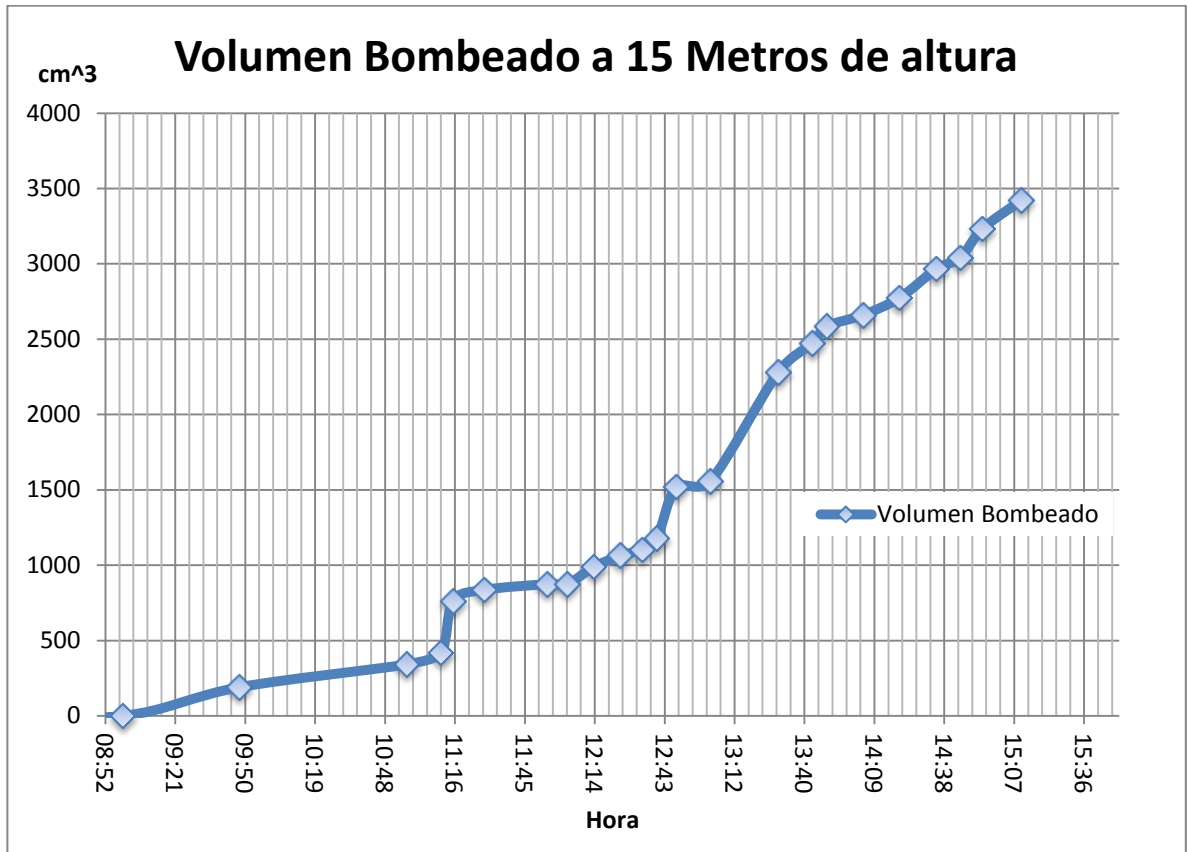


Tabla 14. Datos Prueba de bombeo a 125 metros

Hora	Nivel [cm]	Volumen [cm3]
8:00:00	0	0
9:00:00	0	0
9:48:00	0,5	190
10:57:00	0,9	342
11:11:00	1,1	418
11:16:00	2	760
11:29:00	2,2	836
11:55:00	2,3	874
12:03:00	2,3	874
12:14:00	2,6	988
12:25:00	2,8	1064
12:34:00	2,9	1102
12:40:00	3,1	1178
12:48:00	4	1521
13:02:00	4,1	1559
13:30:00	6	2281
13:44:00	6,5	2471
13:50:00	6,8	2585
14:05:00	7	2661
14:20:00	7,3	2775
14:35:00	7,8	2965
14:45:00	8	3041
14:54:00	8,5	3231
15:10:00	9	3421

Fuente: Autores

Figura 64. Grafica Prueba de caudal a 125 metros



Fuente: Autores

Los resultados de la prueba de caudal a 125 metros indican que existe algún problema. Entre las causas se encuentra la posible presencia de aire atrapado al interior de la manguera de descarga y, en menor medida, algunos goteos mínimos identificados a lo largo de esta. Se ha sugerido también que es necesario el cambio de la bomba por una versión comercial del Fabricante HOBBER, con un costo aproximado de \$600.000 de la versión de 2.5 pulgadas de diámetro de pistón. Se espera que con la implementación de estos cambios el rendimiento mejore.

6. MEJORAMIENTO DEL SISTEMA

6.1 CAMBIOS REALIZADOS

En vista de los resultados poco satisfactorios obtenidos durante las primeras pruebas se decidió cambiar la bomba por un modelo comercial del fabricante MOLINOS TOBO Y CIA LTDA y se implementaron otras mejoras listadas a continuación.

Figura 65. Bomba TOBO



Fuente: Autores

Figura 66. Instalación de la Bomba TOBO



Fuente: Autores

Figura 67. Bomba TOBO instalada



Fuente: Autores

Figura 68. Álabes reforzados



Fuente: Autores

Figura 69. Cambio de la varilla de transmisión



Fuente: Autores

Figura 70. Triple sello en la unión Bomba-Varilla



Fuente: Autores

Figura 71. Guías para la varilla oscilante



Fuente: Autores

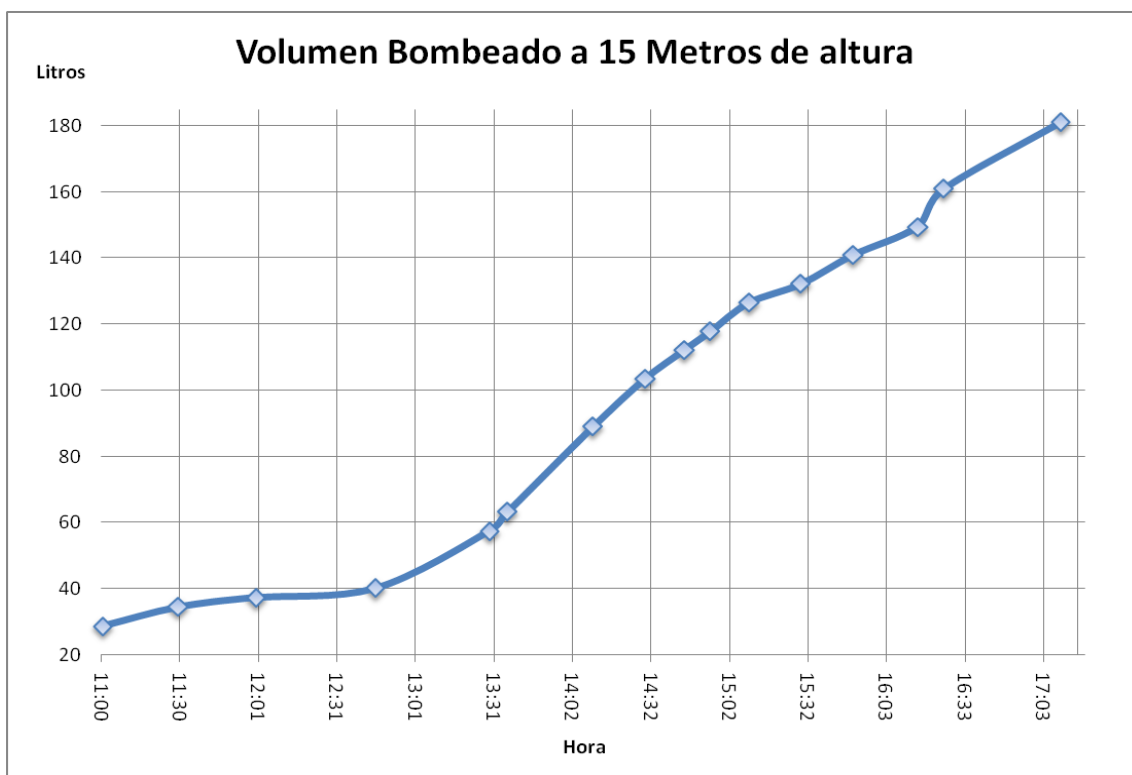
6.2 PRUEBAS DE BOMBEO DESPUES DE LAS MEJORAS

Tras implementar estas mejoras, que tomaron cerca de cuatro semanas, se logra un incremento notable del rendimiento del sistema alcanzando caudales pico de 70 litros por hora y promedio de 35 [L/h] entregados a **125 metros** de distancia con un **delta de altura de 15 metros**.

Tabla 15. Pruebas de caudal después de las mejoras

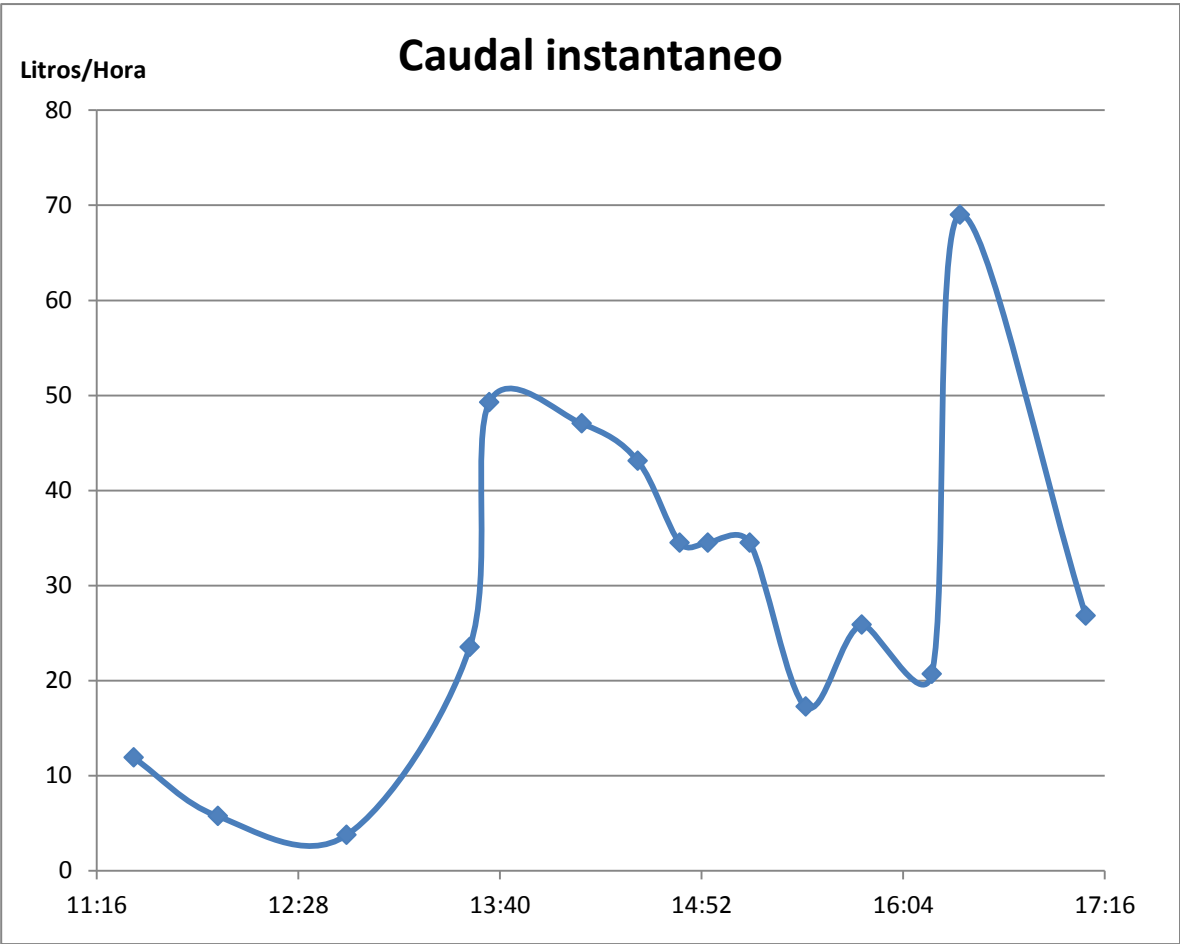
Hora	Nivel [cm]	Volumen [L]	Caudal [L/hora]
11:01:00	10	29	
11:30:00	12	34	11,9
12:00:00	13	37	5,7
12:46:00	14	40	3,7
13:30:00	20	57	23,5
13:37:00	22	63	49,3
14:10:00	31	89	47,0
14:30:00	36	103	43,1
14:45:00	39	112	34,5
14:55:00	41	118	34,5
15:10:00	44	126	34,5
15:30:00	46	132	17,2
15:50:00	49	141	25,9
16:15:00	52	149	20,7
16:25:00	56	161	69,0
17:10:00	63	181	26,8

Figura 72. Volumen bombeado después de las mejoras



Fuente: Autores

Figura 73. Grafica de caudal después de las mejoras



Fuente: Autores

CONCLUSIONES

Después de hacer estudios de viento preliminares en la zona y de simulaciones aerodinámicas con software CAD se logró desarrollar el diseño definitivo de la turbina eólica, con palas de 1 metro de longitud montadas sobre un centro de 1 metro de diámetro, consiguiendo un rotor de 3 metros de diámetro.

El diseño de la torre fue elaborado por el Ingeniero Rafael Jaramillo, especialista en torres quien garantizó con su firma la integridad de la estructura, respaldado por su experiencia, aplicando las normas colombianas de diseño sísmico resistente NSR-10, las normas de la Sociedad Americana de Soldadura AWS y las normas del Instituto Americano del Concreto ACI318.

El diseño y la manufactura de la bomba fueron realizados y dirigidos por los autores, basados en un sistema de pistón simple. El material empleado en todo el cuerpo y los accesorios de la bomba fue acero inoxidable, con un pistón de teflón con triple sello tipo o-ring y dos válvulas anti-retorno.

Durante las pruebas de bombeo se comprobó un rendimiento de la bomba mayor al previsto, debido al gran rendimiento volumétrico logrado mediante sellos herméticos tanto en la bomba como en sus accesorios.

Mediante el uso del Software EPANET se diseñó y modeló la red hidráulica de distribución, con base en el plano topográfico de la propiedad. A partir de los

resultados obtenidos con EPANET, se adquirieron los materiales necesarios en la cantidad que se calculó durante el modelado.

Tras la construcción de la red hidráulica se realizaron pruebas de presión y caudal para comprobar que el agua llegara a todos y cada uno de los goteros dispuestos sobre las líneas. Con estas pruebas, se garantiza que el agua llegará del lago a los arboles de forma continua y desatendida.

Durante la fase inicial del proyecto, este se dividió en tres sub sistemas, la turbina, la bomba y la red de fertirriego. Cada uno de los tres autores se especializo en uno de los temas, estudiándolo a profundidad antes de comenzar con el diseño. Los avances en los tres campos eran luego compartidos y aprobados por los tres autores y el Director del proyecto.

Se incluye una lista de instrucciones y recomendaciones de operación y mantenimiento a modo de manual para el encargado de la administración del sistema.

BIBLIOGRAFIA

ALCANTAR GONZALEZ, Gabriel y TREJO TELLEZ, Libia. Nutrición de cultivos. Cuauhtémoc: Mundi-Prensa, 2007. p. 422-454.

CUNTY, Guy. Aeromotores y Aerogeneradores. Guía de la energía eólica. Barcelona: Marzo 80, 1981. 181p.

FERNANDEZ DIEZ, Pedro. Energía eólica. s.l.: s.n., s.f. 208p.

GONZALEZ ACEVEDO, Hernando. Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico. Tesis de maestría ingeniero electrónico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuelas de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones, 2008. 128p.

GROGG, Kira. Harvesting the wind: The physics of wind turbines. Carleton: CarletonCollege, 2005. Physics and astronomy comps papers.

MOYA TALENS, J.A., Riego localizado y Fertirrigacion. 4 ed. Madrid: Mundiprensa, 2009. 573 p.

ORDUZ BERDUGO, Oscar Iván y SUÁREZ PEREZ, Julián Edgardo. Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica, 2011. 172p.

PINILLA, Alvaro y HERNANDEZ, Harold. Disminución de carga de arranque en aerobombas. En: Revista de ingeniería Uniandes. s.f. p. 6-11.

RASTOGI, T. y TATA ENERGY RESEARCH INSTITUTE. Review of the Literature on Promotion of Windpumps. Paris: UNESCO; 1982. 43p.

TORQUATI, Carlo E. Características técnicas para la implementación de molinos de viento para bombeo de agua. s.l.: Industrias Jober, s.f. 28p.

USCATEGUI, Omar y PRADA, Darío. Modelado y simulación del sistema mecánico de un generador eólico de eje horizontal con tres palas. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica, 2007. 177p.

Wind turbine technology. Fundamental concepts of wind turbine engineering. Edited by David A. Spera. 2 ed. New York: ASME, 2009. 835p.

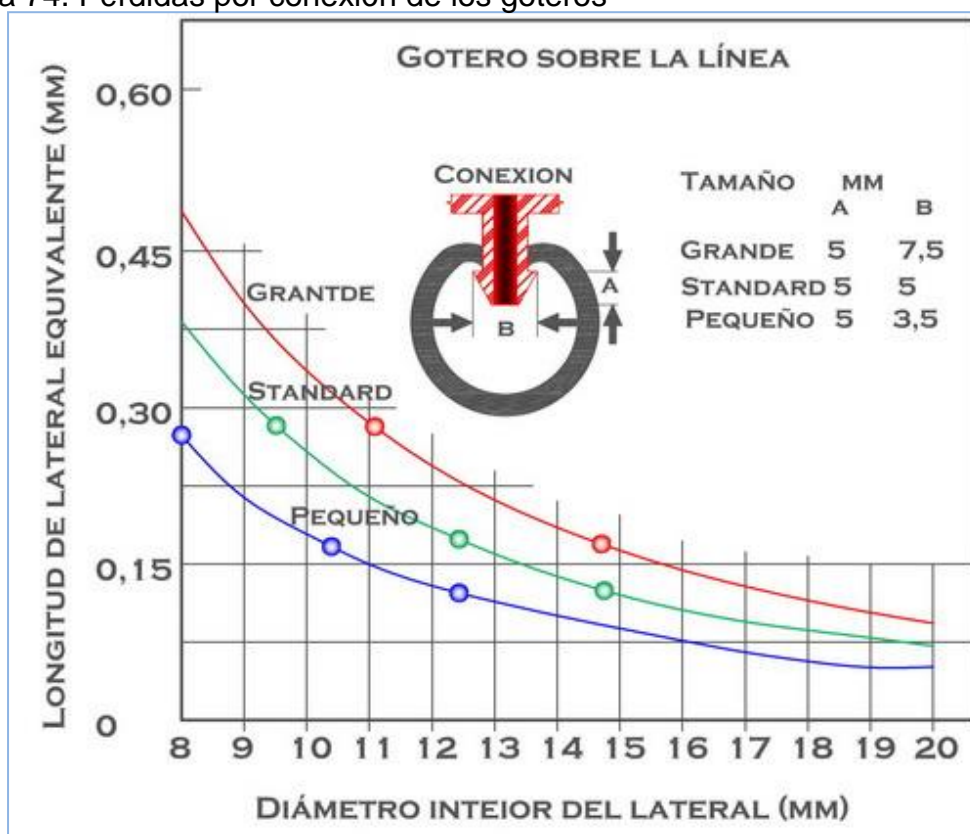
ANEXOS

ANEXO A: PERDIDAS DE CARGA EN LOS EMISORES

Emisor sobre línea.

Un método para medir estas pérdidas de carga en laboratorio es el siguiente: Se toma un trozo de tubería de unos 20 m de longitud como mínimo y mediante manómetros diferenciales se mide su pérdida de carga para un determinado caudal. Se montan en esta tubería una serie de emisores a la separación normal, obturándolos para que no descarguen agua y se hace pasar el mismo caudal, midiendo de nuevo la pérdida de carga que se produce a la tubería con los emisores. La diferencia entre ambas será la debida a las conexiones de los emisores.

Figura 74. Pérdidas por conexión de los goteros



Fuente: elregante.com

Naturalmente todas las medidas deben referirse a la misma temperatura. Como de trata de una perdida de carga que se origina en un punto singular, siempre podrá hacerse equivalente a la que se produce en una longitud (f_e) de lateral

De no tener los datos del fabricante, el grafico anterior puede tomarse para determinar las pérdidas producidas por el regatón del gotero. También pueden utilizarse las formulas obtenidas por Montalvo (1983)

Grande:

$$f_e = 23,04 d_i^{-1,84}$$

Estándar:

$$f_e = 18,91 d_i^{-1,87}$$

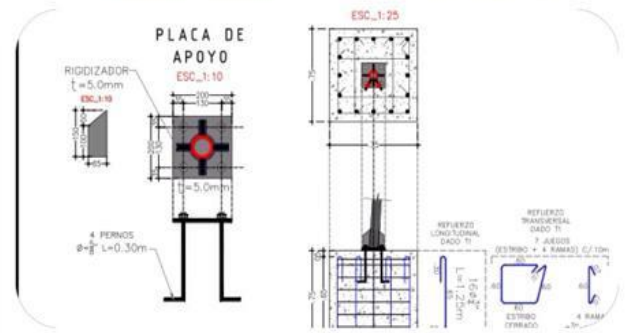
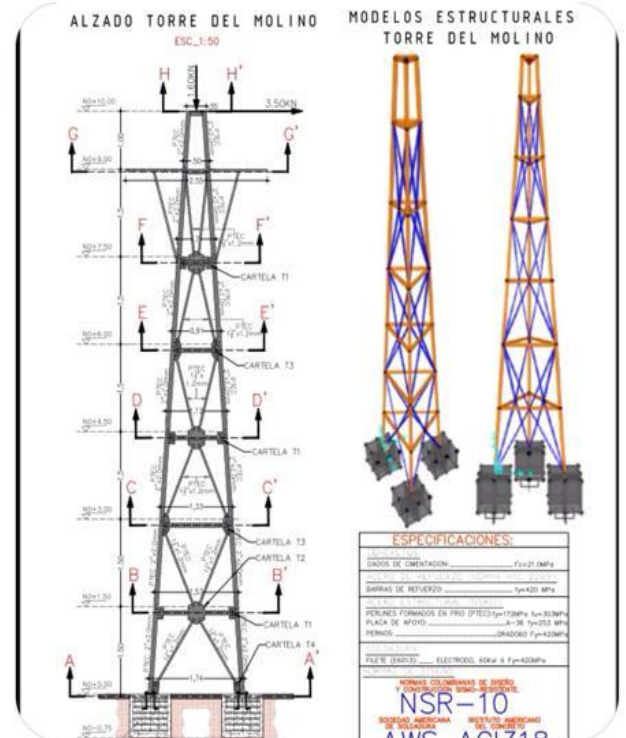
Pequeña:

$$f_e = 1,48 d_i^{-1,89}$$

Se ha comprobado experimentalmente que esta longitud equivalente es independiente del caudal del lateral, siempre que se mantenga entre los límites normales de utilización.

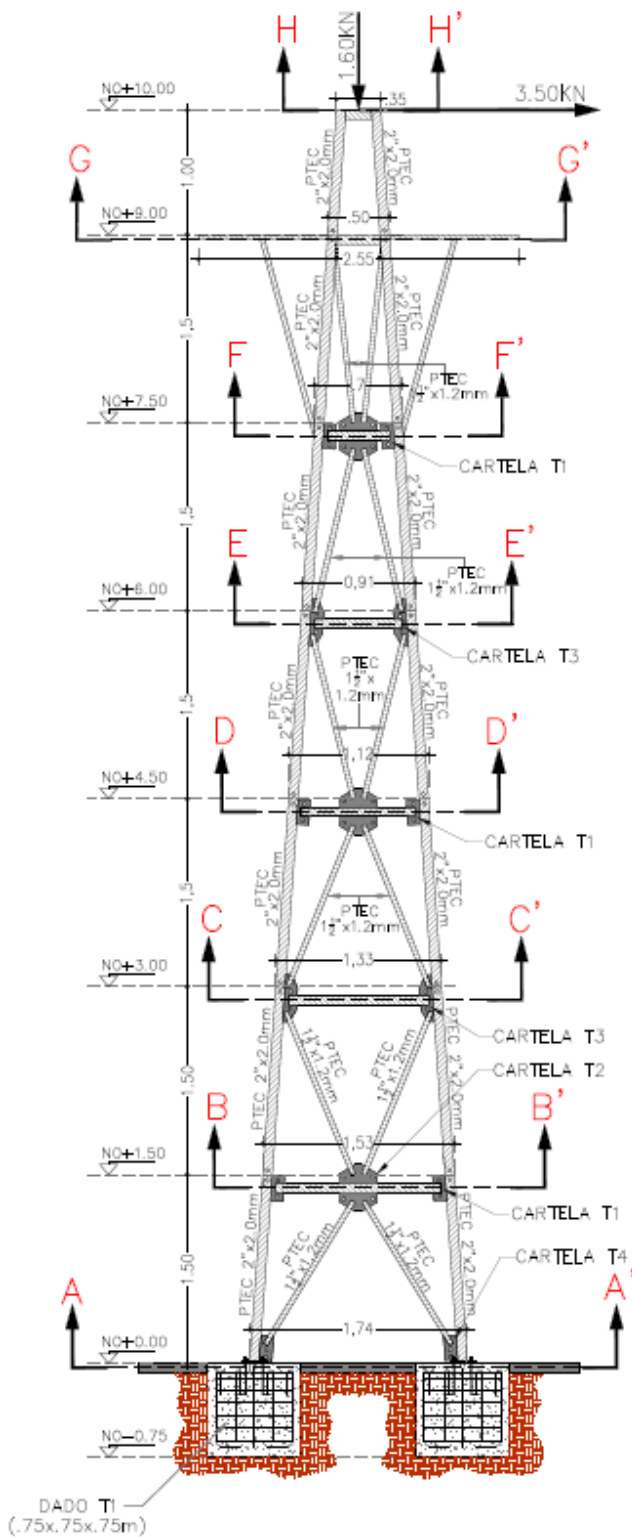
Las pérdidas de carga producidas por las conexiones deben tenerse en cuenta, pues en emisores colocados muy juntos, como conexiones interlineas, puede llegar a aumentar en un 30 ó 40% la pérdida que se tendrá en el lateral sin emisores

ANEXO B: PLANOS AEROBOMBA, DISEÑO E INSTALACION

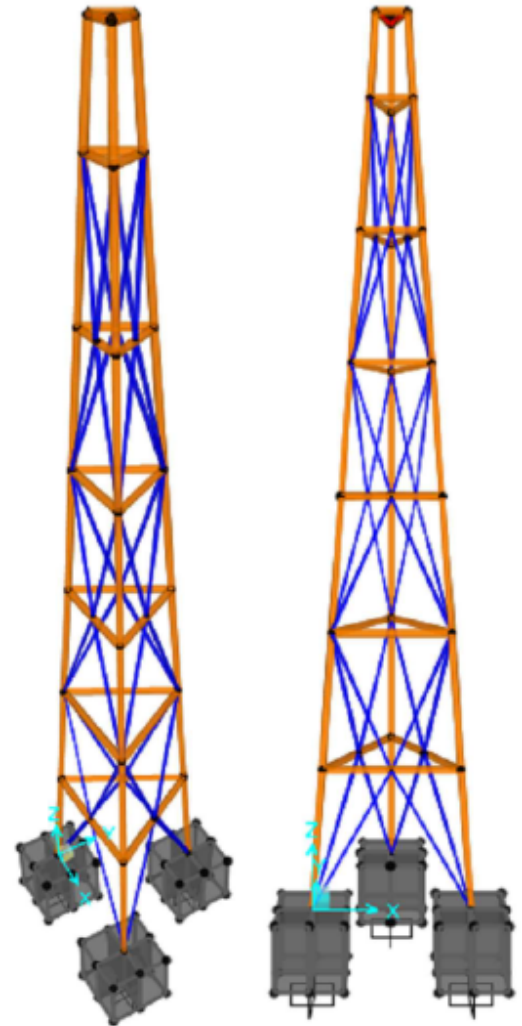


ALZADO TORRE DEL MOLINO

ESC_1:50



MODELOS ESTRUCTURALES TORRE DEL MOLINO



ESPECIFICACIONES:

CONCRETOS:	
DADOS DE CIMENTACION:	$f_c=21.0MPa$
ACERO DE REFUERZO (NORMA NTC 2289):	
BARRAS DE REFUERZO:	$f_y=420 MPa$
ACERO ESTRUCTURAL (NSR10):	
PERLINE FORMADOS EN FRIO (PTEC):	$f_y=172MPa f_u=303MPa$
PLACA DE APOYO:	A-36 $f_y=253 MPa$
PERNOS:	GRADO 60 $F_y=420MPa$

SOLDADURA:	
FILETE (E6013):	ELECTRODO, 60Ksi $f_y=420MPa$

NORMAS DE DISEÑO:

NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCION SISMO-RESISTENTE.

NSR-10

SOCIEDAD AMERICANA DE SOLDADURA

INSTITUTO AMERICANO DEL CONCRETO

AWS ACI318

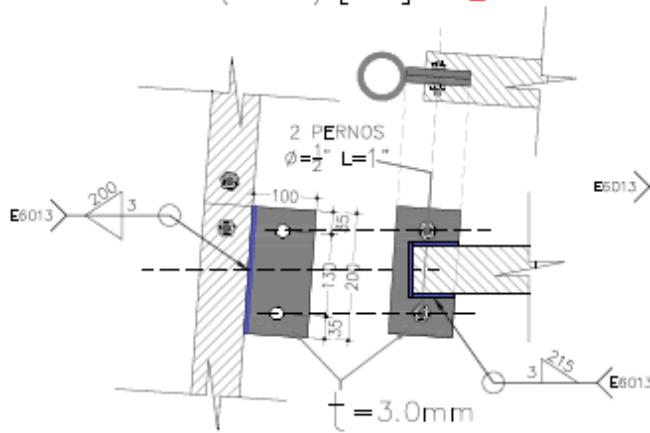
RECUBRIMIENTOS GENERALES PARA EL PROYECTO

1) DADOS: 5.0cm

DETALLES DE CONEXIONES

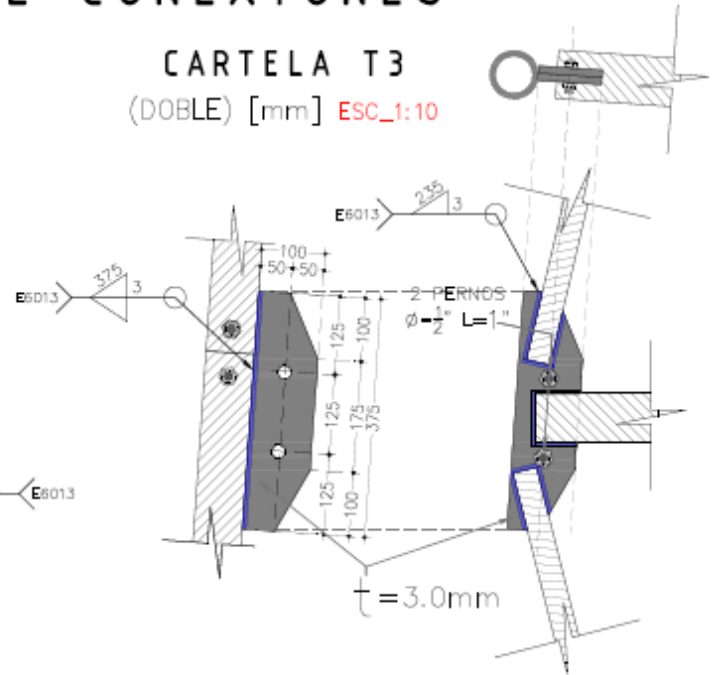
CARTELA T1

(DOBLE) [mm] ESC_1:10



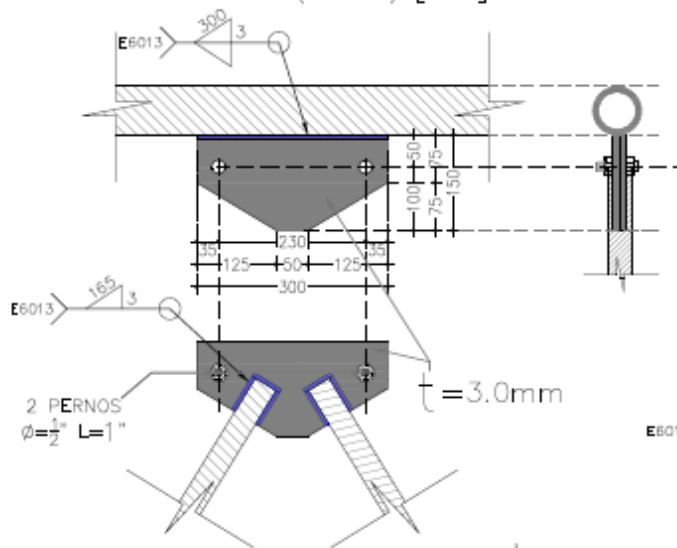
CARTELA T3

(DOBLE) [mm] ESC_1:10



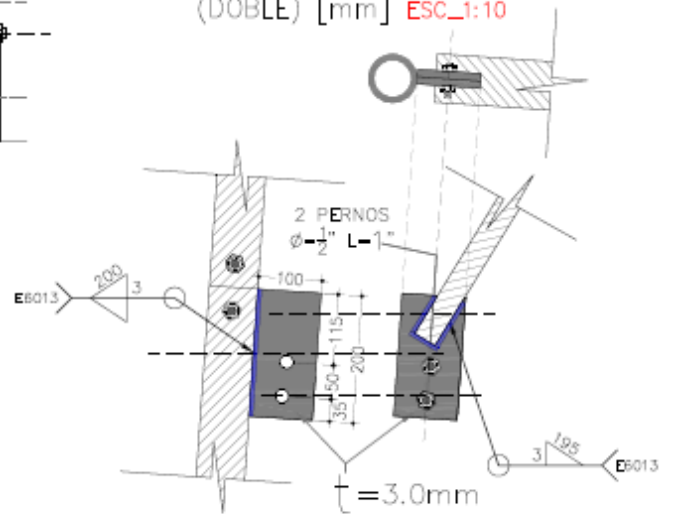
CARTELA T2

(DOBLE) [mm] ESC_1:10



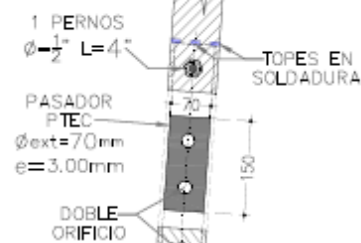
CARTELA T4

(DOBLE) [mm] ESC_1:10



PASADOR DE ENSAMBLAJE

[mm] ESC_1:10



ANEXO C: MEDICIONES DE VIENTO

Tabla 15. Datos de velocidad del viento

Hora	Velocidad del viento [m/s]		
	Día 1	Día 2	Día 3
8:00 AM	4.1	3.8	3.3
8:10 AM	4.7	4.2	4.6
8:20 AM	4.7	4.5	3.9
8:30 AM	2.8	4.0	2.6
8:40 AM	4.3	4.7	2.7
8:50 AM	4.8	4.5	4.2
9:00 AM	5.0	5.8	4.6
9:10 AM	4.1	5.8	4.9
9:20 AM	4.6	5.9	4.0
9:30 AM	4.5	4.7	4.8
9:40 AM	4.8	5.2	4.8
9:50 AM	5.1	5.5	4.8
10:00 AM	6.2	5.0	5.5
10:10 AM	7.0	5.5	5.1
10:20 AM	5.4	5.2	6.2
10:30 AM	5.7	6.8	5.8
10:40 AM	5.0	5.7	6.9
10:50 AM	5.8	5.7	6.5
11:00 AM	6.2	7.3	6.9
11:10 AM	6.4	7.0	7.3
11:20 AM	7.3	7.9	7.5
11:30 AM	6.4	7.6	7.7
11:40 AM	6.9	6.6	6.9
11:50 AM	8.0	7.8	6.2
12:00 PM	8.2	7.5	8.3
12:10 PM	8.2	7.3	7.3
12:20 PM	7.6	7.7	8.6
12:30 PM	8.2	7.2	8.3
12:40 PM	8.2	8.2	7.8
12:50 PM	8.8	8.2	7.5
1:00 PM	9.7	8.6	9.7

1:10 PM	8.7	8.3	8.7
1:20 PM	9.1	8.8	8.8
1:30 PM	9.5	8.7	8.5
1:40 PM	8.5	8.9	8.7
1:50 PM	8.2	9.3	8.5
2:00 PM	10.5	9.1	10.9
2:10 PM	9.0	11.0	9.7
2:20 PM	10.6	10.0	9.9
2:30 PM	10.8	9.5	10.1
2:40 PM	9.8	10.3	10.4
2:50 PM	9.5	10.9	9.4
3:00 PM	8.1	8.9	7.7
3:10 PM	8.1	7.6	7.8
3:20 PM	7.1	8.5	8.4
3:30 PM	8.7	7.7	8.3
3:40 PM	8.6	8.9	7.5
3:50 PM	8.7	8.2	7.5
4:00 PM	5.1	6.4	5.2
4:10 PM	5.7	6.1	5.2
4:20 PM	6.8	5.2	5.9
4:30 PM	6.7	5.2	5.0
4:40 PM	6.6	5.4	5.8
4:50 PM	6.7	6.7	5.1
5:00 PM	6.1	6.7	6.3

Fuente: Autores

DIAGRAMA BOMBA TOBO

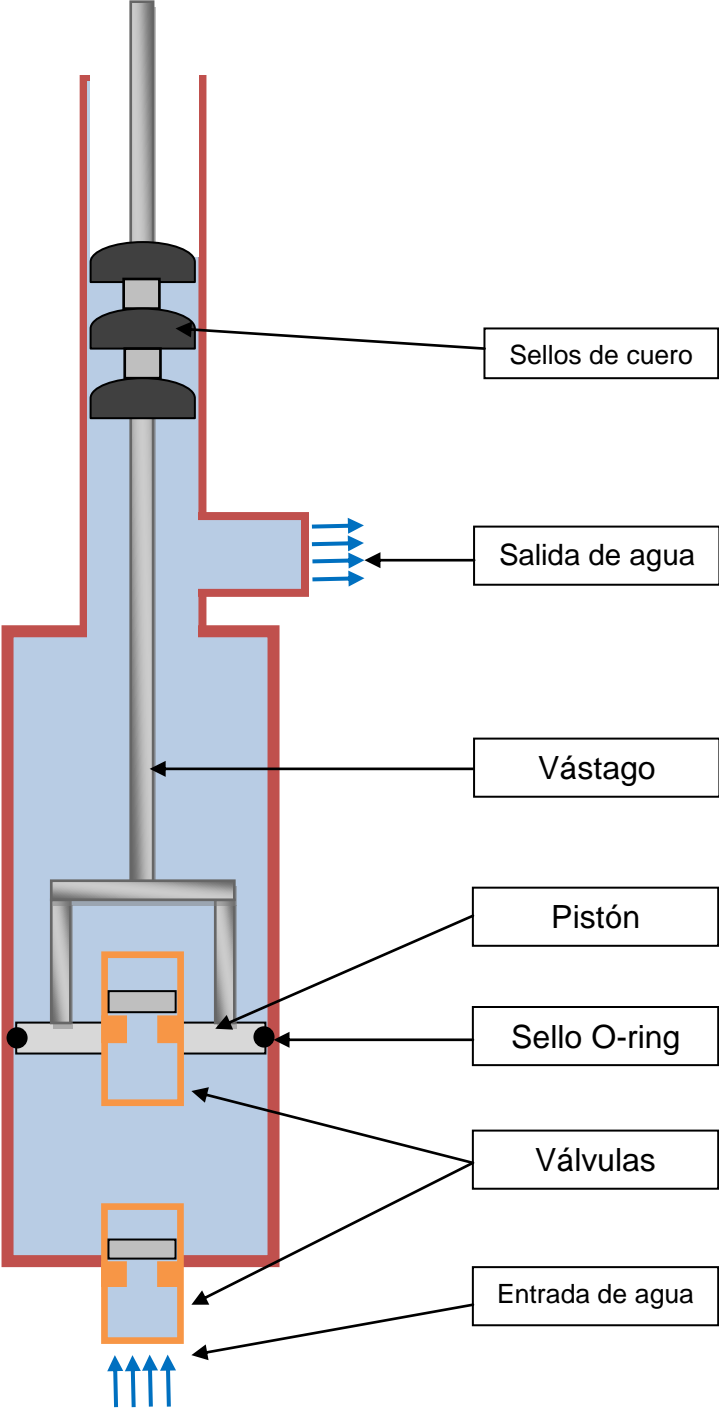
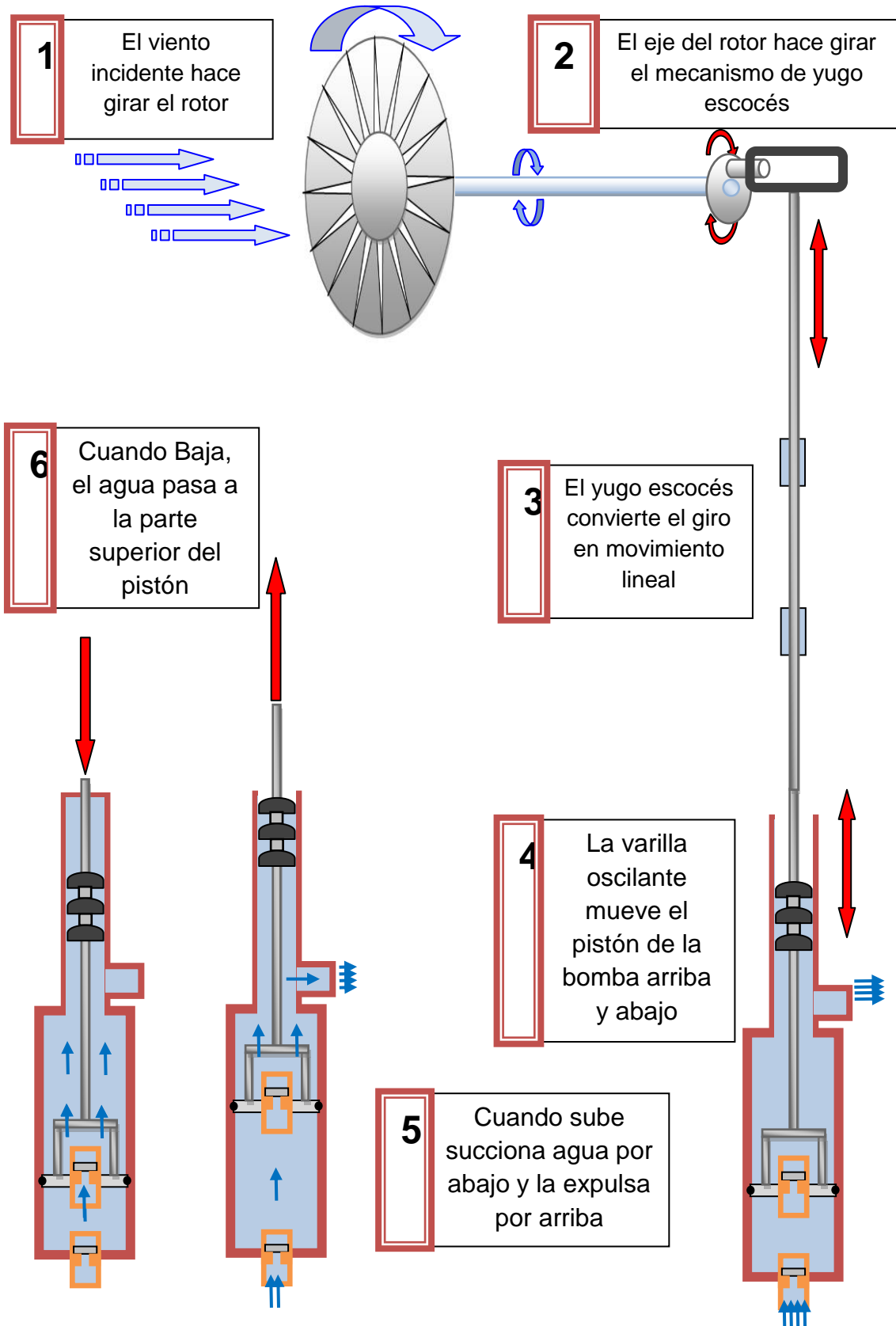


DIAGRAMA DE OPERACIÓN DEL SISTEMA



MANUAL DE MANTENIMIENTO

**SOLUCION INTEGRAL PARA EL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE Y
SISTEMA DE FERTIRIEGO EN EL VIVERO “LA FUENTE”, UTILIZANDO
ENERGIA ALTERNATIVA.**

TORRE

El mantenimiento debe realizarse anualmente.

- ✓ **Comprobar la perpendicularidad de la torre con respecto al suelo.**
- ✓ **Revisar las abrazaderas, uniones y barras, en busca de elementos faltantes o doblados.**
- ✓ **Comprobar que todos los tornillos estén bien sujetos, de ser necesario realizar un proceso de apriete.**
- ✓ **Comprobar el estado de la pintura, si se está descascarando o hay signos de oxidación, se debe llevar a cabo un repintado de la zona desgastada. El procedimiento para el repintado, el cual debe hacerse en un día soleado es el siguiente:**
 - 1. Eliminar el óxido y las impurezas: Se debe realizar un cepillado con un cepillo de cerdas metálicas y realizar un acabado con una lija de grano fino.**
 - 2. Limpiar el polvo: Con un trapo se debe limpiar la superficie hasta eliminar todos los residuos de polvo y grasa.**
 - 3. Pintar con anticorrosivo: Se deben aplicar dos manos de pintura anticorrosiva, dejando secar entre una y otra un mínimo de 12 horas.**

ROTOR Y COLA

Al comenzar el mantenimiento la persona encargada de esta labor debe frenar el sistema para asegurarse que no gire, además debe verificar que las superficies de apoyo no estén podridas, tengan aceite, o haya insectos que podrían hacerle caer.

- ✓ **Anualmente comprobar que todos los tornillos estén bien sujetos, de ser necesario realizar un proceso de apriete.**
- ✓ **Anualmente Comprobar el estado de los remaches, en caso de falta o deterioro, estos deben ser reemplazados.**
- ✓ **Realizar una limpieza cada seis meses, para esta se hacen las siguientes recomendaciones:**
 - **Utilizar agua limpia y realizar en un día de baja intensidad solar, o durante un día nublado.**
 - **Iniciar siempre la limpieza desde la parte superior hacia abajo y usar métodos suaves de limpieza y solo si es necesario utilizar mayor intensidad.**
 - **Si los depósitos de suciedad permanecen adheridos después del lavado, entonces debe utilizarse una solución de detergente con pH neutro en agua, en este caso usar cepillos suaves o esponjas, se deben aplicar movimientos horizontales y luego verticales, intentando minimizar el escurrimiento hacia otras zonas. Se debe enjuagar rápidamente con abundante agua limpia y secar. No se debe permitir que las soluciones jabonosas se sequen sobre las superficies metálicas.**
- ✓ **Anualmente realizar una lubricación, se deben usar aceites ligeros y que no contengan detergentes. Además se deben inspeccionar los rodamientos para determinar si necesitan ser cambiados. A los 3 rodamientos sellados se les debe aplicar aceite, y al que viene sin protección, se le debe aplicar grasa. A continuación se expone el proceso de desmontaje y lubricación de los rodamientos sellados:**

- 1. Con una llave quitar el tapón de las pistas de los rodamientos. Se debe tener cuidado de no dañar las bridas de goma que se entrelazan para almacenar el lubricante o después no se sellará correctamente**
 - 2. Retirar los elementos rodantes con cuidado de no perderlos.**
 - 3. Limpiar los elementos rodantes usando un paño suave desechable o una toalla de papel para eliminar cualquier sedimento o lubricante que tengan, inspeccionar en busca de desgaste y reemplazar si es necesario.**
 - 4. Limpiar las pistas, retirando cualquier lubricante, escombros y/o sedimento con un paño suave o una toalla de papel. Si es posible usar un desengrasante.**
 - 5. Volver a colocar los elementos rodantes, utilizar tanto lubricante como pueda soportar el rodamiento.**
 - 6. Volver a montar el rodamiento. Con los dedos volver a enroscar la tapa en las pistas con los elementos rodantes en su lugar. Se debe asegurar que las gomas para sellar las bridas estén bien colocadas y sellen de forma apropiada.**
 - 7. Ajustar los rodamientos. Se debe atornillar la primera tapa hasta que se sienta presión en el interior de los rodamientos. El rodamiento debe girar sin sentirse áspero (si se sienten baches o no gira fácilmente, la tapa está muy apretada y se debe retroceder un poco hasta que gire bien). Utilizar la segunda tapa de bloqueo atornillada para fijar la primera tapa de forma correcta. Apretar la tapa de bloqueo con una llave, presionando hacia atrás con una segunda llave sobre la primera tapa para evitar que apriete y baje los elementos rodantes.**
- ✓ **Semestralmente comprobar el estado de buje y pasadores y si están deteriorados deberán reemplazarse.**
 - ✓ **Anualmente verificar que el muelle de la cola conserva sus cualidades elásticas, y que el soporte no está doblado o en mal estado.**
 - ✓ **Anualmente se deben examinar los engranajes en busca de desgaste y dientes rotos, además se deben mover lateralmente para comprobar que no estén sueltos.**

BOMBA

Para el mantenimiento de la bomba, se debe bloquear el rotor o realizar cuando no haya carga eólica, además se debe sellar el paso de agua en la descarga.

- ✓ **Cada seis meses realizar una inspección en las tuberías de succión y descarga:**
 - a) **Si las mangueras presentan agrietamientos o desgaste grave se deben reemplazar.**
 - b) **Si se encuentran fugas en las uniones de los tubos, se deben desacoplar, limpiar cualquier residuo de las áreas de contacto, aplicar teflón y apretar con llave de tubo, posteriormente se recomienda sellar con silicona para evitar fugas.**
- ✓ **Se debe llevar a cabo cada tres meses una limpieza de los cheques, de los tubos de succión y descarga y del cuerpo de la bomba, para evitar obstrucciones de residuos sólidos que derivan en un mal funcionamiento del sistema y bajan su rendimiento.**
- ✓ **Se debe realizar una inspección semestral del pistón, para comprobar su desgaste y reemplazarlo si es necesario. Para desmontar el pistón de la bomba es necesario soltar la tapa superior, aflojar las abrazaderas del tramo inferior del tubo que viene de la transmisión del rotor, liberar dicho tramo y sacar hacia arriba. El pistón está asegurado a esta pieza con una tuerca, al soltarla se puede liberar al pistón.**

A parte del pistón se deben inspeccionar los o-rings, si están excesivamente desgastados se deberán reemplazar, se pueden retirar y reemplazar con ayuda de una espátula. Se deben limpiar las superficies de cualquier residuo de o-ring antes de volver a ensamblar. Para un ensamblaje más sencillo lubricar el pistón y el cuerpo de la bomba con un poco de aceite. La entrada del pistón con o-rings nuevos siempre debe ser forzada, esto asegura un buen sellado.

SISTEMA DE FERTIRRIGACIÓN

- ✓ **Mensualmente se deberán limpiar los filtros de malla para evitar su obstrucción.**
- ✓ **Cada seis meses revisar las mangueras y accesorios para comprobar que no existen poros o roturas.**
- ✓ **Cada año se debe comprobar que la altura de la arena ocupe 3/4 partes de la altura del recinto del filtro de arena, además de verificar que no existen aglomerados, terrones, ni canales directos.**
- ✓ **Anualmente realizar una limpieza de la instalación, abriendo los finales de las tuberías terciarias, mientras se mantiene abierto el riego, para ello se emplearán soluciones de limpieza y se recogerán los efluentes de la misma, para evitar que lleguen a los cultivos**
- ✓ **Cada tres años limpiar el fondo del filtro de angeo y geotextil de sedimentos y limos.**