

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UN GRUPO EOLICO PARA BOMBEO DE AGUA

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela
Por los Brs. Ruiz O. Leonardo J.
Veliz A. Elvis R.
para optar al Título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2002

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UN GRUPO EOLICO PARA BOMBEO DE AGUA

TUTOR ACADEMICO: Dr. Ing. Stefan Zarea

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela
Por los Brs. Ruiz O. Leonardo J.
Veliz A. Elvis R.
para optar al Título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2002

Ruiz O. Leonardo J. Y Veliz A. Elvis R.

DISEÑO DE UN GRUPO EOLICO PARA BOMBEO DE AGUA

Tutor Académico: Dr. Ing. Stefan Zarea. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Mecánica. 2002, 108 pág.

Palabras Claves:

Grupo eólico, aeromotor multipalas, bombeo de agua.

Resumen.

Este trabajo aportó una respuesta a un problema de falta de agua en la Mesa de los Hachos al sur del estado Anzoátegui, para el cual se realizó la evaluación del recurso eólico y el recurso hídrico de la zona y la determinación de los parámetros necesarios para definir los criterios que limitarían el diseño del grupo eólico. De la evaluación de los parámetros cuantitativos se obtuvo la velocidad promedio del viento, la temperatura y la humedad relativa, además de la cantidad de personas que habitan en el sector, la forma de constitución del grupo familiar y la ocupación. También se evaluaron las necesidades de agua y el recurso hídrico superficial de la zona.

Para el grupo de bombeo propuesto a ser utilizado se escogió una bomba de pistón que será accionada por un aeromotor multipalas de fabricación nacional. Este tipo de molino de viento se construye en distintos arreglos constructivos con diámetros de 2.0 m a 3.0 m.

El aeromotor con un diámetro de 2.0 m y 15 palas ha sido evaluado experimentalmente en un banco de pruebas diseñado especialmente para tal fin. Se realizaron tres ciclos de pruebas: una que se caracterizó por el uso de un enderezador de flujo para asegurar una corriente axial a la entrada del aeromotor y otras dos pruebas en las cuales el flujo conservaba su carácter giratorio pero evaluado distintamente. La instrumentación adecuada del túnel de viento permitió obtener los valores de los parámetros aerodinámicos y mecánicos para trazar las curvas características del aeromotor. Se indica como se puede utilizar estos resultados para deducir las curvas características de los aeromotores del mismo tipo pero de mayor diámetro. Se seleccionó el sistema de transmisión entre el aeromotor y la bomba. También se seleccionó la torre del aeromotor y el tanque de almacenamiento del agua bombeada. El proyecto finaliza con un breve análisis económico del grupo eólico.

DEDICATORIA

A la memoria de mi madre, por darme toda su confianza y enseñanzas que han hecho que yo este aquí, y ser lo más valioso que he tenido.

A mis hermanos que de alguna u otra forma me han dado su apoyo y por ser como son, a mi sobrino Andrés.

Leonardo.

Para: Mariela.

Arnaldo.

Mariel.

Liébana.

Valeriano.

Mariaelena.

Josefina.

Emilia y Angel.

por brindarme su incalculable apoyo, su gran dedicación, su invaluable comprensión y cariño.

Elvis.

AGRADECIMIENTOS

Estas simbólicas palabras no reflejan en realidad el total agradecimiento que le debemos a un gran numero de personas que han aportado su grano de arena para el desarrollo de este trabajo, a muchos que han estado desde el comienzo hasta el final en el desarrollo de la misma, a otras que su aporte fue menor pero de manera muy util, en fin a todos sin excepción. Además, sin querer omitir a nadie, aunque de todas maneras disculpen que no los nombremos a cada uno, pero estamos concientes que le debemos un enorme agradecimiento.

Entre aquellas personas sin menos preciar a las que no nombremos, queremos expresar un gran y especial agradecimiento a nuestro tutor el Prof. Stefan Zarea, por haber aceptado ser nuestro profesor guía y aportarnos su valiosa experiencia y conocimientos para la culminación de esta tesis, orientándonos en el desarrollo de la solución de los problemas experimentales y manteniendo una beneficosa exigencia en el cumplimiento de las tareas asignadas además por su colaboración con el préstamo del anemómetro. También queremos darle las gracias por su constante preocupación e interés al Profesor José Luis Perera, al técnico jubilado señor José Troconis quien voluntariamente aporto sus conocimientos para la puesta en marcha del túnel de viento de la escuela de Ingeniería Mecánica, a los técnicos del taller de la Escuela de Ingeniería Mecánica, a los compañeros de carrera como Héctor Troya, Héctor Burgos, a el pana Carlos Pérez, entre otros, al profesor Félix Flores que desinteresadamente presto su colaboración, igualmente al señor Armando del galpón de química, a FUDECI y todo su personal por su receptividad y aporte por el desarrollo de esta tesis. .

INDICE GENERAL

<u>RESUMEN.</u>	III
<u>DEDICATORIAS.</u>	IV
<u>AGRADECIMIENTOS.</u>	V
<u>INDICE GENERAL.</u>	VI
<u>INTRODUCCIÓN.</u>	1
<u>CAPÍTULO 1.</u> Tema del proyecto y metodología del estudio.	4
<u>CAPÍTULO 2.</u> Aprovechamiento del recurso eólico.	7
<u>2.1 Características energéticas del viento.</u>	7
<u>2.2 Tipos de turbinas eólicas.</u>	8
<u>2.3 Bombeo de agua utilizando turbinas eólicas</u>	13
<u>2.3.1 Tipos de turbinas eólicas para bombeo de agua.</u>	14
<u>2.3.2 Tipos de bombas utilizadas para bombeo de agua.</u>	15
<u>CAPITULO 3.</u> Evaluación del régimen eólico en la mesa de los hachos.	18
<u>3.1 Identificación del área.</u>	18
<u>3.2 Instrumentos de medición y metodología utilizada.</u>	20
<u>3.2.1 Calibración del anemómetro.</u>	20
<u>3.2.2. Metodología utilizada.</u>	23
<u>3.3 Mediciones realizadas.</u>	27
<u>3.4 Interpretación de resultados.</u>	33
<u>CAPITULO 4.</u> Evaluación experimental del aeromotor multipalas.	39
<u>4.1 Determinación de las características geométricas del aeromotor multipalas.</u>	39
<u>4.2 Banco de pruebas.</u>	43
<u>4.3 Instrumentación y metodología de medición.</u>	48

<u>4.4 Mediciones utilizando un rectificador de flujo.</u>	53
<u>4.5 Mediciones considerando la componente axial y tangencial de la velocidad del viento.</u>	67
<u>4.6 Mediciones considerando solamente la componente axial del flujo.</u>	79
<u>4.7 Análisis comparativo de resultados.</u>	95
<u>CAPITULO 5.</u> Diseño del sistema de bombeo para la mesa de los hachos.	97
<u>5.1 Esquema del sistema de bombeo.</u>	97
<u>5.2 Calculo del caudal de agua para distintos regímenes del viento.</u>	98
<u>5.3 Breve análisis económico.</u>	104
<u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</u>	106
<u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.</u>	108
<u>ANEXOS.</u>	113

INTRODUCCION

Venezuela es un país con una ubicación geográfica muy beneficiosa, además de contar con una gran variedad de recursos naturales, los cuales siendo utilizados de una manera racional y equitativa le permitirían un gran desarrollo económico y social, de manera que no fuera dependiente del recurso energético más explotado, como lo es el petróleo. Esto no implica la sustitución total de este, por otro tipo de fuente de energía, sino que se utilizaría otros recursos que tendría como ventaja el aprovechamiento de algunos de estos de acuerdo a la zona en donde se necesite. Entre la variedad de los recursos naturales aprovechables tenemos: el agua tanto de mar (contando con una gran extensión costera) como de ríos, la energía solar debido a la ubicación cercana al Ecuador, energía eólica en una gran variedad de regiones en el país, entre otros.

Teniendo en cuenta que el principal objetivo de este trabajo es el estudio y diseño de un sistema para bombeo de agua en la zona rural denominada la mesa de los hachos, aprovechando los recursos naturales existentes en la zona, de manera que se puedan crear otras áreas de desarrollo como la creación de microempresas agrícolas, en función de la transferencia de tecnología. Esta meta se puede lograr con el trabajo conjunto entre la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV y FUDECI, con la finalidad de desarrollar herramientas y maquinarias apropiadas para zonas rurales del país.

Con la crisis energética mundial y el preocupante marco económico, ecológico, social y político en el mundo y que incluye a Venezuela, algunos entes se han abocado al estudio y desarrollo de nuevas fuentes de energía, como las fuentes autóctonas y renovables como por ejemplo la energía eólica en pequeña escala.

Al respecto de la energía eólica, como de la energía solar directa, las "desventajas" que se les atribuye en una sociedad industrial ávida de energía, son su intermitencia y su baja densidad energética, si la comparamos con los medios convencionales de producción de energía en forma masiva. La realidad es que la

energía solar directa así como la eólica, tienen las ventajas que los sistemas convencionales no tienen, como lo es el fácil acceso a la fuente de energía. Si bien esta energía por sí misma no presenta las características de disponibilidad y continuidad de las formas convencionales, donde ya existe la infraestructura de explotación, producción y distribución, a través de sistemas de almacenamiento o respaldo se pueden lograr las características antes descritas. Esto indudablemente aumenta el costo del sistema, y el costo unitario de la energía disponible, aún así, su utilización puede resultar competitiva con otras fuentes. Desde un punto de vista económico, al nivel actual de la tecnología de aprovechamiento de la energía eólica y el nivel de producción industrial de estos equipos, son susceptibles aún de significativas disminuciones en sus costos, al ampliarse la magnitud de su mercado, así como de innovaciones en su construcción. La realidad actual es que para lugares aislados, normalmente marginados y pauperizados, cualquier fuente de energía convencional es altamente costosa.

Con la motivación de cumplir con los objetivos y los alcances planteados y con la satisfacción de poder realizar el desarrollo de un trabajo donde se pueda dar respuesta a un sector de la población con relación al suministro de agua y donde el aporte energético es a través de una fuente alternativa o no convencional, es que se realizó este proyecto. El informe se estructuró en 5 capítulos.

En el primer capítulo se hace una breve descripción del tema y la metodología general del desarrollo, para este capítulo se tocan tópicos como: de dónde surge el tema, quienes lo plantean, las causas que lo generan y las posibles soluciones, además se hace un esbozo general de la metodología que se aplica en el desarrollo del trabajo.

El segundo capítulo es referido a la fuente de energía que se aprovechará para dar respuesta al problema, tomando en consideración las posibles alternativas de aprovechamiento y los distintos elementos que pueden ser utilizados para la conversión de la energía eólica en energía mecánica. Otro elemento no menos importante que se considera, son los tipos de bombas, y de los cuales se detallan las características y requerimientos propios, que puedan servir para tomar la decisión de

la selección de un sistema de bombeo, al que se le transferirá energía a través del seleccionado sistema conversor de energía eólica.

En el tercer capítulo se considera la evaluación del régimen del viento en la zona para la cual se realizó el diseño. Esta evaluación consistió en la toma de datos de las variables consideradas necesarias para la caracterización del sistema eólico, con el objeto de llevar a cabo tal evaluación se requirió del traslado y la respectiva estadía en la zona, lo que permitió seleccionar el tipo de aeromotor que se requería en la zona.

El cuarto capítulo trata muy detalladamente de la evaluación experimental realizada al aeromotor multipalas seleccionado. Aquí se aplicó la metodología requerida y normalizada para la obtención de los parámetros característicos del aeromotor que se evaluó. Para este fin se construyó y puso en marcha un banco de prueba. En la aplicación experimental de la metodología a sugerencia del profesor tutor se consideraron tres tipos de experimentos para determinar las curvas características del aeromotor para distintos tipos de flujo de aire.

El quinto y último capítulo trata lo referido al diseño del sistema de bombeo y la cuantificación aproximada del aporte energético del viento para bombear ciertos volúmenes de agua a través del tiempo y de cómo se puede satisfacer la demanda requerida, en la zona. Se realizó también un breve análisis económico del grupo eólico estudiado.

CAPÍTULO 1

Tema del proyecto y metodología del estudio.

El tema surge a través de un proyecto de FUDECI (Fundación para el Desarrollo de las Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales) de crear granjas integrales en la mesa de los Hachos, donde las personas que habitan en la zona, se encuentran en exclusión e indefensión económica y tecnológica, desarrollo de pequeños sistemas de producción agrícola, permitirían lograr el autoabastecimiento alimenticio y los excedentes podrían ser llevados a los centros de consumo del país. En estas granjas se aplicarían nuevas técnicas de producción, donde el uso de contaminantes como los insecticidas y fertilizantes quedan descartados, por otros métodos de cultivo donde se usaran productos de la propia naturaleza, además de la utilización de materia vegetal que actualmente se desecha, pero que es muy rica en proteínas y minerales, para realizar alimentos de consumo animal y de esta forma no depender de los productos comerciales.

Debido a que la zona no cuenta con un suministro de agua potable constante, porque el terreno es agreste por las condiciones climáticas reinantes, la vegetación existente es escasa y predominan pequeños arbustos y malezas, la composición del suelo es principalmente arena y arcilla, las lluvias son escasas durante la mayor parte del año, los suelos facilitan el escurrimiento rápido, los ríos de la zona se encuentran alejados, son de poco caudal y no tienen un sistema para bombear el agua, para satisfacer el consumo humano. Además en la zona concurren constantemente corrientes de viento, las cuales pueden ser aprovechables. Considerando lo anterior FUDECI le planteó a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV la necesidad de solucionar el problema y el cual se asignó como trabajo especial de grado.

Para el desarrollo del tema se partió de la base que la condición fundamental que regirá en el diseño del grupo eólico para bombeo de agua, es la velocidad del viento que predomina en la zona. Para este fin se realizó una visita en la zona donde se obtuvo la información, y además, la corroboración con las respectivas mediciones realizadas.

La obtención del valor de la velocidad media del viento era muy importante ya que con esta se pudo seleccionar el elemento transformador de la energía eólica. En primera instancia se pensó escoger alguno de los aeromotores diseñados en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV, pero estos fueron diseñados para velocidades de viento mucho mayores que la velocidad determinada en la zona de la mesa de los hachos. En consulta con el profesor tutor se optó por utilizar un aeromotor multipalas que es conveniente para velocidades pequeñas de viento. La empresa Marullo de Barquisimeto es la única en producir molinos de vientos en el país. Esta empresa dio en calidad de préstamo uno de sus equipos para realizarle el respectivo estudio y por ende obtener los parámetros característicos que rigen a este tipo de aeromotores. Esta evaluación aporta los elementos necesarios para el desarrollo del grupo eólico de bombeo.

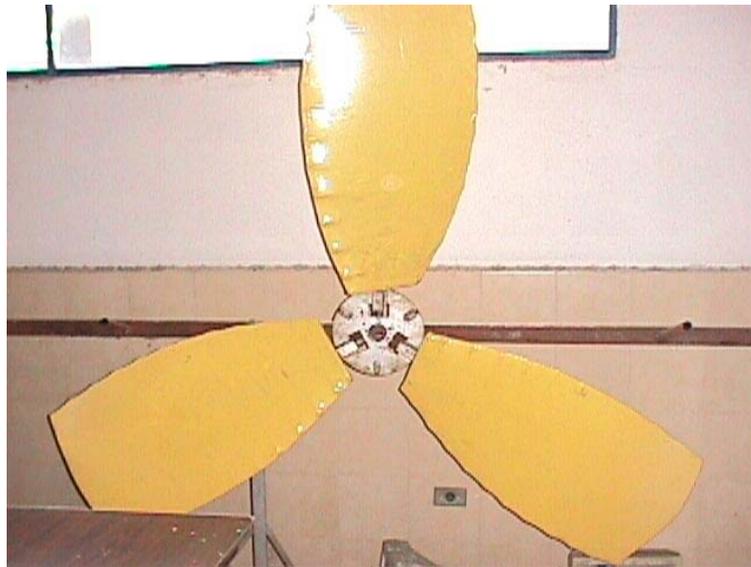


Foto 1. Aeromotor diseñado, construido y probado en la Escuela de Ingeniería Mecánica.
(Tesis de Arcuri, S; Parada, M. Guiada por el profesor Stefan zarea)

En la foto 1 se presenta una vista frontal de un aeromotor de tres palas que arranca a velocidades relativamente pequeñas del viento (3 m/s aprox.). Este aeromotor tiene una buena eficiencia [Diseño y construcción de un aeromotor de

alabes inclinados] pero se cuenta solamente con este prototipo, no hay una versión comercial .

Al grupo eólico lo componen los siguientes elementos: el aeromotor, la torre, el mecanismo de transmisión de potencia, el dispositivo de seguridad, el elemento de orientación si es necesario y el sistema de bombeo.

CAPÍTULO 2.

Aprovechamiento del recurso eólico.

2.1 Características energéticas del viento.

La energía eólica es aquella que se puede obtener de la energía cinética del viento. El viento es una consecuencia de la radiación solar, los gradientes de temperatura que se suceden en distintos puntos del planeta que generan diferentes áreas térmicas y los desequilibrios de temperatura se traducen en variaciones de presión. El aire como cualquier gas, se mueve de las zonas de alta presión a las de baja presión, y por esta consecuencia aparecen las corrientes de aire o vientos los cuales son fuente de estudios para su aprovechamiento. La utilización del viento como una fuente de energía ha sido tema de interés en todo el mundo en las últimas décadas.

La energía eólica no contamina, es inagotable y frena el agotamiento de combustibles fósiles contribuyendo a evitar el calentamiento global. Es una tecnología de aprovechamiento con alto desarrollo, de múltiples aplicaciones, relativamente económica, es independiente de cualquier política o relación comercial, se obtiene en forma mecánica y por tanto es directamente utilizable.

Actualmente la energía eólica se aprovecha de dos formas bien diferenciadas: Por una parte se utilizan para obtener agua de pozos, es el tipo de eólicas llamados aerobombas, actualmente hay un modelo de aeromotores muy generalizados, los molinos multipala del tipo americano. Directamente a través de la energía mecánica o por medio de bombas estos molinos extraen el agua de los pozos sin mas ayuda que la del viento. Los aeromotores también pueden aportar su potencia para generar energía eléctrica.

En general la energía eólica conjuntamente con otras fuentes de energía no convencionales, tendrá importancia en la contribución al suministro mundial de energía en el futuro, el cual deberá aprovechar todas las fuentes que sean razonablemente utilizables. Las principales dificultades que presenta el aprovechamiento de esta fuente son: las variaciones en la velocidad del viento y la

incapacidad de asegurar un suministro regular o constante. Las mejores condiciones para la utilización de energía eólica son: Terrenos llanos, particulares en regiones costeras. Donde existen cumbres planas o colinas solitarias sin laderas escarpadas. Mesas, valles planos y extensos, expuestos en la dirección del viento predominante.

2.2 Tipos de turbinas eólicas.

Las turbinas eólicas o aeromotores son los dispositivos mecánicos encargados de transformar la energía cinética aportada por el viento en la energía requerida para mover un elemento o equipo mecánico. Existen diversos tipos de aeromotores cada uno con diferentes características de diseños que se adecuan a las distintas exigencias. No se puede agrupar a todos los aeromotores en una sola clasificación por la variedad en sus características, por lo tanto existen dos clasificaciones que agrupan la gran mayoría de los mismos como lo son: Por la dirección en que pasa el flujo de aire con respecto al eje transmisor del movimiento o por el posicionamiento del eje en: aeromotores de eje vertical y aeromotores de eje horizontal. Además se pueden clasificar por la velocidad de giro en: aeromotores de alta velocidad y aeromotores de baja velocidad. A continuación se detalla estas clasificaciones:

Aeromotores de eje vertical. En las cuales los álabes motrices se desplazan en planos paralelos a la dirección del viento. Las máquinas de eje vertical se caracterizan por el hecho de que la velocidad tangencial (u) del extremo del alabe puede ser menor igual o mayor (no más de 2 veces) que la velocidad del viento (V), por lo tanto se definen como máquinas lentas. (Tomado de la referencia bibliográfica 23)

El eje de la zona motriz es normal a la dirección del viento. Este tipo de aeromotores son autodireccionables, no necesitan de ningún elemento que posicione el rotor en dirección al viento. Entre los aeromotores de eje vertical los más usados son el Savonius y el Darrieus, a los cuales se hace referencia a continuación:

Rotor de Savonius fue desarrollado primeramente en 1929 y se basa en el efecto de Flettner. Se forma cortando un cilindro en el sentido longitudinal y luego desplazando las dos superficies semicilíndricas a lo largo del plano del corte, de tal manera que el corte se parezca a la letra S. (Tomado de la referencia bibliográfica 4)

La operación del rotor Savonius se aprecia mejor en los diagramas de flujo del aire en la figura 1. Es aparente que con el pasaje de álabe cerrado se impide mayormente la circulación del flujo de aire. Tal circulación ocasiona un vacío parcial en el lado de viento, abajo del álabe, el cual avanza hacia el viento.

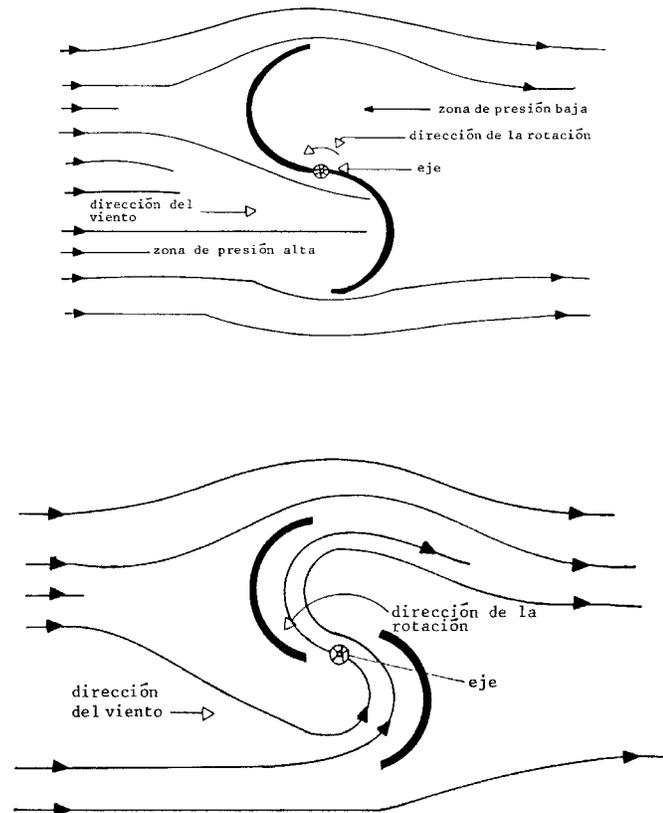


Figura 1. Diagrama del flujo de aire, pasaje de álabe cerrado y pasaje de álabe abierto en un rotor Savonius.

Debido al vacío parcial, la fuerza de retardo de este álabe es grande y el torque neto en el rotor es solamente moderado. A través del desplazamiento de las posiciones de dos armaduras, se llega a la geometría del pasaje de álabe abierto, como se observa en la figura 1.

Es evidente que la región del vacío se reemplaza por una región de presión y se aumenta el torque. Así que por la regulación del flujo de aire en esta apertura, es posible controlar tanto la velocidad de rotación como el valor del torque.

Savonius mismo probó más de 30 modelos diferentes del rotor que lleva su nombre, variando la forma de la directriz del álabe, el tamaño del pasaje central, etc. Al operar con una carga óptima, el mejor de los modelos del rotor extrajo el 31% de la potencia del viento (pruebas en túnel de viento). La relación de velocidades en el extremo del álabe (λ_0) fue 0.85 en su punto máximo. Esto significa que un rotor Savonius opera a bajas velocidades de rotación, en comparación con la de las máquinas de eje horizontal.

Rotor Darrieus. El aeromotor de eje vertical tipo Darrieus puede constar de 2 o 3 álabes de forma parabólica donde la envergadura puede variar desde 1.5 hasta 200 m de diámetro y puede llegar a generar hasta 20.000 Kw. Requiere de un dispositivo autoiniciador del movimiento giratorio, tiene una eficiencia relativamente alta, pero una torque bajo si lo comparamos con aeromotor multipala del mismo diámetro. (Tomado de la referencia bibliografica 13)

Máquinas de eje horizontal. En las cuales los álabes motrices se desplazan en planos perpendiculares a la dirección del viento. Sus álabes motrices se desplazan perpendicularmente a la dirección del viento. En estas máquinas, la velocidad de extremo del álabe (u), es generalmente mayor que la velocidad del viento (V). La potencia motriz se obtiene por la desviación del flujo del aire al pasar por el conjunto de álabes. Esta circulación, generadora de potencia motriz, se obtiene en forma general por la combinación de la incidencia de la corriente relativa y de la forma del perfil. Las máquinas de este tipo se diferencian por el modo de desplazamiento del conjunto de álabes motores y por las combinaciones mecánicas que este desplazamiento necesita. . (Tomado de la referencia bibliografica 4)

De una manera general, sin ser absolutamente verdadero, se puede decir que mientras mayor sea el número de álabes, menor es la velocidad angular, pero se obtiene un torque mayor. En estas turbinas eólicas la orientación del plano de rotación de los álabes deberá cambiar constantemente de acuerdo al cambio de la dirección del viento, por lo tanto requieren de un mecanismo de orientación del plano de rotación de los álabes suficientemente sensible y de respuesta rápida.

En este tipo de turbina eólica se pueden distinguir dos tipos: las turbinas eólicas de baja velocidad (aeromotor multipalas) y las turbinas eólicas de alta velocidad (2 o 3 palas).

El multipalas aparece en los Estados Unidos en el 1870 y luego se extendió en el resto del mundo. El número de álabes varía desde 12 hasta 24 y cubren prácticamente toda el área del rotor. Estas turbinas se orientan por medio de una cola tipo veleta colocada en la parte posterior del rotor de manera de mantener el plano de rotación perpendicular a la dirección del flujo de viento. Los diámetros del rotor van a depender de las necesidades y del potencial eólico, se han llegado a construir rotores de 15 m de diámetro. (Tomado de la referencia bibliográfica 4)

Estas turbinas eólicas se adaptan fácilmente a bajas velocidades de viento, estas pueden arrancar a velocidades de viento entre 2 y 3 m/s dependiendo de la carga que tengan que mover. Una de las características favorables es que el torque de arranque es relativamente alto y el coeficiente de potencia puede alcanzar hasta 0.3.

Las turbinas eólicas de alta velocidad tienen el número de alabes mucho más reducido, variando entre 2 y 4, estas turbinas son muchos más livianas que la de baja velocidad por la versatilidad y variedad de los materiales. Una de sus características principales es que la velocidad del viento para su arranque es de aproximadamente 5 m/s.

Las turbinas eólicas de alta velocidad se adaptan muy bien a los propósitos generales de generación de electricidad, además de tener un alto coeficiente de potencia. Debido a su alta velocidad angular requieren de pocos alabes por lo tanto el precio y el peso son mucho menores que los de un multipalas de igual diámetro. Los aeromotores de alta velocidad el par de arranque es bajo.

En la escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV en la década de los años ochenta se realizaron múltiples trabajos especiales de grado sobre sistemas de ahorro de energía utilizando la fuerza del viento y que, para el presente trabajo fueron tomados como referencia y en algunos casos como patrones de selección y comparación por sus características especiales de operación, estos trabajos en su mayoría fueron guiados por el profesor Stefan Zarea y de los cuales se darán a

continuación detalles técnicos de algunos de los aeromotores diseñados, construidos y evaluados experimentalmente en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV.

Aeromotor de tres aspas (referencia bibliográfica 12). Tiene un rendimiento de $C_p = 0.423$, para condiciones normales, con su punto óptimo de funcionamiento para una relación de velocidades $\lambda = 4.46$. Entre las ventajas presenta una alta eficiencia para un margen de relación de velocidades relativamente amplio, lo cual a pesar de la variación de velocidades del viento mantiene un buen porcentaje de producción de energía.

Aeromotor de aspas dobles desfasadas (referencia bibliográfica 2). Es una turbina de eje horizontal que consta de 2 rotores montados sobre un eje, uno detrás del otro unidos por una placa en los extremos de las aspas. Por su geometría, las aspas comenzarán a rotar a regímenes de velocidades de viento muy bajas, manteniéndose casi constante su velocidad de giro gracias a la inercia del peso del rodete. Tiene un comportamiento óptimo para un rango de $\lambda = 4$ a $\lambda = 4.5$, con placa, sin placa la eficiencia máxima se obtuvo para $\lambda = 4.12$ a $\lambda = 4.43$, el modelo con placa tiene incremento de C_p , para mayor desfase -12.5 a $+12.5$ C_p aumenta. C_p max. 0.545 a 320 rpm, con $V_o = 8.155$ m/s, ángulo óptimo de desfase $\zeta_0 = 12.5^\circ$ para lo cual presento gran estabilidad dinámica a altas velocidades de giro e inestable para ángulo de $\zeta = -12.5$.

Aeromotor de dos aspas (referencia bibliográfica 7). Se alcanzo un $C_p = 0.488$, la relación de velocidades debe estar entre 5 y 6 a una velocidad de viento de $6,75$ m/s. El sistema constructivo es sencillo lo que hace que sean de bajo costo, el aeromotor arranca a baja velocidad del viento.

Grupo eólico solar (referencia bibliográfica 8). De eje vertical, solidez = 0.4 , relación de velocidades $\lambda = 3.0$, $C_p = 0.4$ y un numero de alabes de 3.

Aeromotores de alas rectangulares (referencia bibliográfica 12). Aeromotor bipala de alas rectangulares de 5 m de diámetro, asegura estabilidad no hay vibraciones, de gran sensibilidad y buena eficiencia, con $V_o = 7.5$ m/s, $C_p = 40\%$, $\lambda=6$, con una eficiencia máxima de 28.3% a 8 m/s, $C_p = 43.68\%$ para $V_o = 5.71$ m/s.

Tripalas con $C_p = 34.54\%$, buen comportamiento, diámetro exterior mayor logrando así un diseño confiable.

Aeromotor de tres aspas (referencia bibliográfica 3). Relación de velocidades $\lambda = 3.4$, con C_p ideal = 0.552 (ver Foto 1).

2.3 Bombeo de agua utilizando turbinas eólicas.

Un sistema de bombeo es un conjunto de elementos transformadores de energía, requiere de energía mecánica que puede ser aportada por un motor eléctrico, turbina (térmica o hidráulica para grandes caudales), aeromotor, etc., y transfiere parte de la energía recibida a un fluido (agua, gasolina, etc.) en forma de presión, de posición o de velocidad.

Tanto el bombeo de agua para aplicaciones de consumo y riego mediante aeromotores de baja potencia, como el bombeo a gran escala, se adaptan perfectamente a la irregularidad en el suministro de energía que caracteriza a los sistemas eólicos. Por otra parte el comportamiento hidrodinámico de los elementos constitutivos del sistema de bombeo, pueden cumplir las funciones de regulación del aeromotor, impidiendo que se produzcan velocidades excesivas del rotor. Esta ventaja permite la utilización de máquinas más sencillas e incluso de sistemas eólicos que funcionen a velocidades de giro variables, con lo que se mejora el aprovechamiento energético del viento.

La potencia absorbida en un sistema de bombeo depende de la cantidad de agua a bombear, de la altura piezométrica a la que hay que elevar el agua y de las pérdidas de presión por rozamiento en el interior de las tuberías.

Cuando aumenta la velocidad del viento y se incrementa la potencia generada por el aeromotor aumenta la presión de la bomba y el agua circula a mayor velocidad, incrementándose las pérdidas por rozamiento en el interior de las tuberías. La potencia absorbida por la instalación crecerá en función de estas pérdidas actuando como un freno hidrodinámico que evitará aceleraciones excesivas en el aeromotor.

2.3.1 Tipos de turbinas eólicas para bombeo de agua.

Las turbinas eólicas para bombeo de agua deben cumplir con ciertas características propias de los sistemas de bombeo de agua, entre otras un torque relativamente alto para vencer la inercia producida por el peso de la columna de agua, además que deben girar a bajas revoluciones si el acople es directo, en caso contrario hay que colocar una caja de transmisión para reducir las rpm. Su funcionamiento debe adaptarse a velocidades bajas de viento, para tener un rango más generalizado de aplicación del sistema de bombeo.

Entre las turbinas eólicas que cumplen estas características son: a) una de eje horizontal como lo es la multipalas (ver figura 2) y b) una de eje vertical, como savonius, descritas anteriormente. La primera es más eficiente y en este trabajo se realizó una evaluación experimental. La segunda es de muy fácil construcción, requiere de materiales económicos, pero no se cuentan con suficiente información confiable sobre su eficiencia para realizar una selección de este tipo de aeromotor, en las condiciones del caso concreto estudiado.

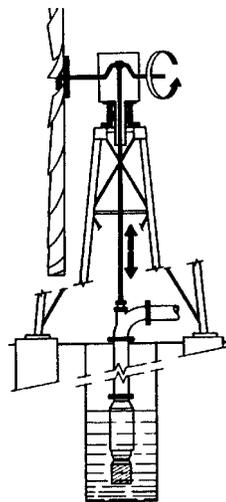


Figura 2 . Grupo eólico de bombeo de agua, una turbina eólica multipalas que mueve una bomba de pistón.

2.3.2 Tipos de bombas utilizadas para bombeo de agua.

Existente una gran variedad en el mercado de equipos de bombeo, algunos de los cuales por sus requerimiento de diseño no pueden adaptarse a un sistema conversor de energía eólica, por lo tanto a continuación se nombran algunos tipos de bombas y sus características generales: . (Tomado de la referencia bibliografica 28)

Bomba de pistón. El sistema de pistón es el que se viene utilizando desde hace más tiempo por ser el más adecuado en aeroturbinas de rotor lento del tipo multipala o Savonius. La ventaja de la bomba de pistón es que funciona con velocidades bajas lo que permite acoplarlas a la turbina mediante un multiplicador de velocidad o incluso directamente.

El sistema clásico de pistón lleva acoplado a la turbina una biela, una excéntrica o una caja reductora que mueven el eje del pistón.

Un problema típico de las bombas de pistón es que requieren un elevado par motor para el arranque precisamente en el momento en que la turbina funciona a bajo rendimiento al no haber alcanzado la velocidad de régimen. Este inconveniente es menos grave en los aeromotores lentos que presentan un elevado par de arranque pero en los aeromotores rápidos obliga a disponer de mecanismos especiales como un motor de arranque auxiliar o un embrague centrífugo para que el acoplamiento al eje motor se produzca cuando se ha alcanzado cierta velocidad.

Bombas de tornillo helicoidal. Las bombas helicoidales funcionan a velocidades de giro de 100-1.000 rpm. con lo que son muy adaptables a turbinas eólicas rápidas con acoplamiento directo. Son de constitución muy robusta y operan con buenos rendimientos del orden del 75 % al 80 % para alturas piezometrica de 30 m. Aunque no requieren un par de arranque muy elevado suelen disponer de un embrague centrífugo o de una válvula que vacía el cilindro antes de ponerse en marcha.

Bombas centrífugas. Las bombas centrífugas son más adecuadas para adaptarlas a los modernos aerogeneradores rápidos, pues funcionan con velocidades de giro superiores a las bombas de pistón y con menor par de arranque.

Bombeo y compresión de aire. El bombeo de aire es otra posible forma de utilización de las turbinas eólicas de características parecidas al bombeo de agua. En este caso la potencia mecánica se manifiesta en la impulsión del fluido o en su compresión. Esta variante permite ampliar el campo de las aplicaciones de la energía eólica y reúne muy buenas características para su almacenamiento.

Las instalaciones de aire son más sencillas y menos costosas que las de agua y requieren menos mantenimiento ya que no tienen problemas de corrosión. La menor densidad y viscosidad del aire respecto al agua reduce considerablemente las pérdidas de presión por rozamiento en conductos y tuberías aunque esta ventaja se compensa con el inferior rendimiento de los compresores y ventiladores.

Bombas de diafragma: Las bombas de diafragma desplazan el agua por medio de diafragmas de un material flexible y resistente. Comúnmente los diafragmas se fabrican de caucho reforzado con materiales sintéticos. En la actualidad, estos materiales son muy resistentes y pueden durar de dos a tres años de funcionamiento continuo antes de requerir reemplazo, dependiendo de la calidad del agua.

Las bombas de diafragma son económicas. Cuando se instala una bomba de este tipo siempre se debe considerar el gasto que representa el reemplazo de los diafragmas una vez cada dos o tres años. Las bombas a diafragma tienen su atractivo en sus excelentes rendimientos y su gran versatilidad de uso. Al ser aptas para todo tipo de trabajos donde se requieran cubrir pequeños y medianos caudales con alturas medias o pequeñas; pero con gran confiabilidad. Las mismas han sido expresamente diseñadas para la utilización en ambientes industriales, agrícolas y doméstico.

Bombas de engranes. Son bombas rotatorias en las cuales hay dos o más engranes para efectuar la acción de bombeo. Es característico que uno de los engranes sea capaz de conducir a los otros. Los contactos mecánicos entre los engranes forman una parte del sello fluido en movimiento entre los orificios de entrada y salida y las puntas exteriores radiales de los engranes y los lados de los engranes, forman una parte del sello fluido en movimiento entre los orificios de entrada y salida y las puntas exteriores radiales de los engranes se mueve a lo largo de las superficies de los dientes y después brinca en forma discontinuada de diente en diente a medida que el

engrane gira. (Estas dos características distinguen a las bombas de engranes, de las bombas de lóbulo, en las cuales los rotores no son capaces de mover el uno al otro y en las cuales el lugar geométrico del contacto del sello fluido entre los lóbulos se mueve continuamente a través de todas las superficies radiales de los lóbulos.)

CAPITULO 3.

Evaluación del régimen eólico en la mesa de los hachos.

3.1 Identificación del área.

La mesa de los hachos está ubicada en el sur del estado Anzoátegui entre las poblaciones del El Tigre y Soledad específicamente en el municipio Independencia, generalmente se puede considerar como una extensión plana entre los 80 y 120 msnm, donde su relieve varia de plano a ondulado a muy quebrado y donde su pendiente, puede ser menor de 4% en ciertas áreas o alcanzar y superar el 30% en otras. Los suelos son predominantemente arenosos (ver Foto 2), lo que implica alta permeabilidad y de baja fertilidad natural, donde un porcentaje mínimo es aprovechado para explotaciones pecuarias o de cultivos, el mayor porcentaje esta dedicado al aprovechamiento forestal con la siembra de pinos y eucaliptos propiedad de la CVGProforca, y el porcentaje restante esta cubierto de vegetación natural o rastrojos.



Foto 2. Se aprecia el tipo de vegetación predominante en la zona y la composición del suelo

La cobertura vegetal natural está representada generalmente por diferentes especies vegetales donde sus características más predominantes son: arbustos de poca altura, follaje de densidad variable y se encuentran de forma dispersa, predomina el chaparro, el manteco y el alcornoque; formación vegetal herbácea donde predomina

la paja peluda y la paja coneja; y el morichal es un tipo de palma la cual se localiza a lo largo del río Morichal largo.

El clima varia entre seco tropical y semiárido (ver Foto 3), donde existen dos períodos bien definidos uno de sequía y otro lluvioso. La temperatura varia entre los 36 °C en el día y los 22 °C por las noches, con un promedio aproximado de 27 °C. La acción eólica es intensa en virtud de los vientos que soplan sobre la zona durante el año en sentido E – O ó provenientes del SE de la zona deltaica del río Orinoco.

El recurso hídrico en la zona es abundante ya que mediante estudios anteriores se comprobó que el área posee acuíferos de alto rendimiento debido a la alta permeabilidad del terreno.



Foto 3. La existencia de árboles alto que no son propios de la zona

La expansión demográfica de la zona está caracterizada por grupos familiares establecidos en extensiones de terrenos que varían en tamaño y que sus moradores denominan fundo, la densidad poblacional es baja, en cada uno de los denominados fundos el grupo familiar puede variar desde una hasta once persona, la poca demanda de trabajo en la zona, las condiciones climáticas y edafológicas son los grandes factores influyentes en la migración de los habitantes de la zona, de los que logran subsistir a las condiciones anteriormente nombradas, una gran mayoría se encuentra en pobreza extrema y dependiendo del trabajo que le puedan ofrecer en los pocos sitios de producción agropecuaria o en la CVGProforca, ya que por la incidencia de

las condiciones conocidas no se pueden dedicar a la siembra ó cría por los altos costos que le implicarían los mismos.

3.2 Instrumentos de medición y metodología utilizada.

Para la realización de las mediciones se utilizaron los siguientes equipos:

- Anemómetro de copa marca: SAP. Modelo 536. Capacidad $1 \cdot 10^6$ Km. Apreciación 0.2 m. (instrumento que nos facilito el profesor Stefan Zarea)
- TRI-SENSE modelo 637-0090 Barmant Company (equipo digital para medir temperatura, humedad relativa y velocidad del viento)
- Cámara digital CANON.

3.2.1 Calibración del anemómetro.

Para la utilización del anemómetro de copa el profesor tutor exigió que se realizara una calibración. Esta calibración consistió esencialmente en hallar la constante del anemómetro y para esta se utilizaron los siguientes equipos e instrumento patron:

- Anemómetro de copa marca Sap.
- TRI-SENSE
- Túnel de viento subsónico.



Foto 4. Vista del túnel de viento subsónico que se encuentra en el galpón de laboratorios de la Escuela

El procedimiento se realizo de la siguiente manera, se coloco el anemómetro de copa dentro del túnel de viento subsónico, se procedió a encender el motor del túnel

de viento dejando por varios minutos que se estabilizara el flujo, seguidamente se comenzaron a tomar las lecturas del desplazamiento cuantificado por el anemómetro, en intervalos de 5 minutos hasta obtener 4 lecturas para los 5 primeros regímenes de velocidad del aire como se muestra en la tabla 1, para realizar el cambio de velocidad se variaban las rpm del motor, con un lapso de espera para la respectiva estabilización del flujo, es de hacer notar que la velocidad del aire dentro del túnel se tomaba con el anemómetro de hilo caliente (trísense).

Tabla 1. Datos de las 5 primeras lecturas tomadas del anemómetros a distintos regímenes de velocidad del aire

V = 8,3 m/s.	V = 14,4 m/s	V = 10,8 m/s	V = 9,5 m/s	V = 4,65 m/s
L (km)	L (km)	L (km)	L (km)	L (Km.)
3.05	4.03	3.92	3.37	1.60
3.05	4.05	3.92	3.38	1.59
3.04	4.04	3.91	3.38	1.60
3.05	4.06	3.91	3.38	1.60

Tabla 2. Promedios de las lecturas de la tabla 1.

V = 8,3 m/s.	V = 14,4 m/s	V = 10,8 m/s	V = 9,5 m/s	V = 4,65 m/s
3.05	4.04	3.92	3.38	1.60

Tabla 3. Longitudes obtenidas a diferentes velocidades y un intervalo de tiempo de 5 min.

V (m/s)	L (Km.)
3.5	1.21
5.85	2.02
6.55	2.229

Esta medición se realizó tomando una hora como intervalo de tiempo, a una velocidad del aire de 3,8 m/s, L =15.31 Km.

Tabla 4. Longitudes obtenidas a una velocidades constante y un intervalo total de tiempo de 60 min. con toma de datos intermedios a lo 30 y 45 min. respectivamente.

V = 5.22 m/s	
t (min)	L (km)
30	10.91
45	16.37
60	21.81

Tabla 5. Longitudes obtenidas a una velocidades constante y un intervalo total de tiempo de 30 min. con toma de datos intermedios a lo 15, 20 y 25 min. respectivamente.

V = 4.78 m/s	
t (min)	L (Km.)
15	5.09
20	6.79
25	8.48
30	10.18



Foto 5. Ubicación del anemómetro dentro del túnel de viento subsonico.

Con los valores obtenidos en las mediciones se realizo el gráfico 1, con ayuda de la herramienta computacional y el programa Excel y de donde se obtuvo la ecuación que rige el comportamiento del anemómetro.

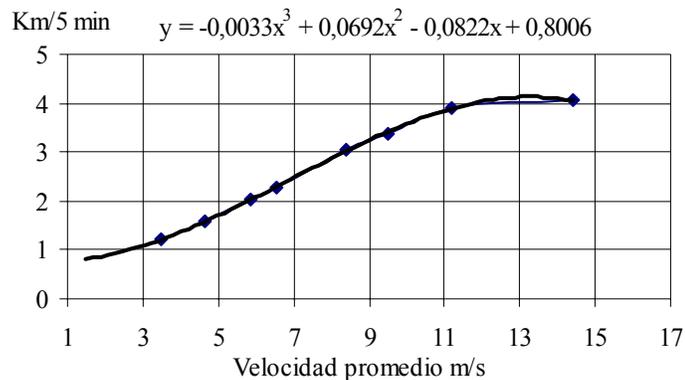


Grafico 1. Ecuación resultante del grafico: $y = -0,0033x^3 + 0,0692x^2 - 0,0822x + 0,8006$

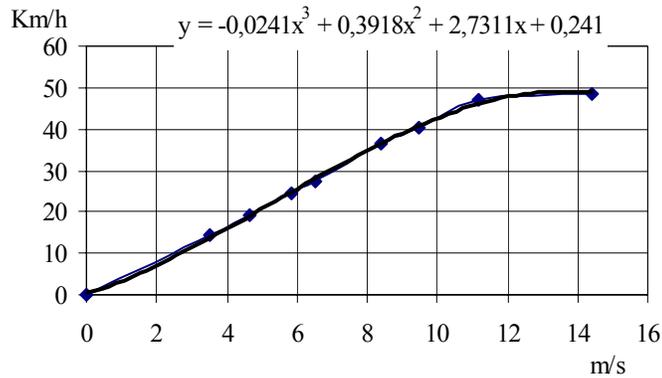


Grafico 2. Grafica transformada del anemómetro.

La ecuación resultante de la transformación de Km/5min a Km/h es la siguiente: $y = -0,0241x^3 + 0,3918x^2 + 2,7311x + 0,241$, donde el valor de la variable y corresponde al valor obtenido en el anemómetro dividido entre el intervalo de tiempo en que se realizó la medición y transformado a Km/h, y la variable x da el resultado real de la velocidad del viento en m/s.

Es de hacer nota que el anemómetro transforma los giros realizados por el efecto de la velocidad del viento en la unidad de longitud (Km). Dicha longitud se divide entre el intervalo de tiempo considerado, para obtener la velocidad promedio del viento. Con la ecuación obtenida en el gráfico 2 se obtiene el valor rectificado de la velocidad del viento.

3.2.2 Metodología utilizada.

La metodología de medición para caracterizar el comportamiento eólico en la zona se obtuvo de la OLADE (ver anexo 2). La aplicación de la metodología es de forma amplia y no restringida, es decir se realizó la respectiva adaptación a los requerimientos estrictamente necesarios. La metodología planteada fue la de realizar mediciones cada hora por las 24 horas del día, de la que se obtuvieron la velocidad promedio del viento por hora, la mayor velocidad instantánea del viento en el momento de realizar la medición, la temperatura y la humedad relativa, además se tomaron las evidencias ecológicas, la referencia de los lugareños y la verificación de los posibles lugares para realizar la medición, para efectuar este procedimiento requirió el traslado y establecimiento en el lugar por 3 días.



Foto 6. Vista del posicionamiento del anemómetro de copas.

La instalación del anemómetro (ver Foto 6) se efectuó una vez establecidos en el lugar, para obtener una mejor medición de la corriente de viento y tratando de sortear las interferencias, se colocó el anemómetro en un extremo de un tubo de aluminio de 3 pulgadas de diámetro y 6 metros de longitud (ver Fotos 7 y 8), y el que está diseñado para el transporte de agua para riego.



Foto 7. Momento del ascenso del anemómetro de copas.

Este conjunto tubo-anemómetro se colocó en 5 sitios distintos dentro de la estación de BIOCENOR. La operación de bajar, subir o trasladar el conjunto tubo-anemómetro, lo realizaba una sola persona, ya que el tubo era suficientemente rígido para mantenerse en posición vertical sin flectarse, por la incidencia del viento, fenómeno que tampoco se presentaba en el momento del ascenso, descenso o traslado del tubo, influenciado por el peso del mismo, más el peso del anemómetro. Es de hacer notar que tanto el tubo como el anemómetro son de poco peso.



Foto 8. Proporcionalidad entre el tamaño de la persona y la altura del soporte de anemómetro de copas.

Para la recolección de la evidencia ecológica (ver Fotos 9, 10 y 11) se realizaron recorridos dentro de la estación, la cual tiene una extensión de 43 hectáreas de terreno y donde coexisten los diferentes tipos de vegetación que predominan en la zona, para la demostración de esta evidencia se recurrió al apoyo de las cámaras fotográfica digital. La referencia oral la obtuvimos en entrevistas realizadas a las personas que laboran dentro de la estación, algunos de ellos viven en la zona.



Foto 9. Deformación en los pinos de la zona originada por el viento.



Foto 10. Deformación producida por el viento en un árbol de hojas perennes.

También se realizaron visitas a la asociación de vecinos los cuales nos aportaron la información referente al número de fundos y habitantes en cada uno de ellos, el tipo de explotación agrícola y como es el suministro de agua potable. De la visita realizada a la escuela se obtuvo el número de estudiantes y profesores, y la forma de la obtención del agua para el consumo requerido.



Foto 11. Efectos del viento sobre algunos arboles.

3.3 Mediciones realizadas.

Tabla 6. Mediciones tomadas el Día 1 (07/05/02).

Hora	Vm (m/s)	T (°C)	HR (%)
11:00 am		32	52
12:00 m	3,097	34	45
1:00 pm	1,973	36	40
2:00 pm	2,263	36	39
3:00 pm	1,968	37	34
4:00 pm	2,195	33	43
5:00 pm	3,034	34	42
6:00 pm	3,121	31	48
7:00 pm	1,895	29	54
8 :00 pm	2,626	28	59
9:00 pm	2,895	27	62
10:00 pm	3,206	26	67
11:00 pm	3,168	25	71
12:00 pm	2,426	24	73
Promedios =	2.605	31	52

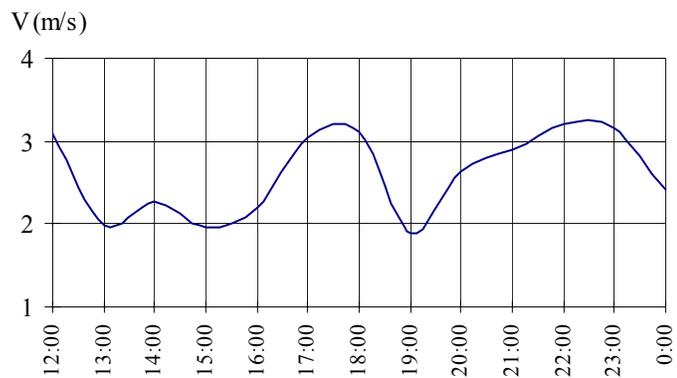


Grafico 3. Velocidad promedio por hora del Día 1 (07/05/02).

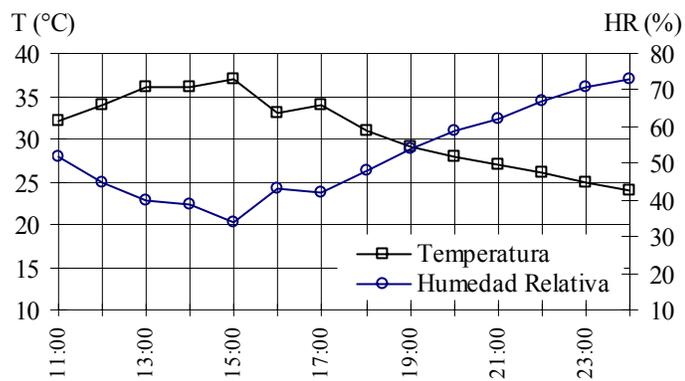


Grafico 4. Temperatura y Humedad relativa por hora del Día 1 (07/05/02).

Tabla 7. Mediciones efectuadas el Día 2 (08/05/02)

Hora	V (m/s)	T (°C)	HR (%)
01:00 am	3,190	24	77
02:00 am	2,278	24	79
03:00 am	2,850	24	80
04:00am	1,569	24	80
05:00 am	2,227	24	81
06:00 am	2,227	24	82
07:00 am	2,462	24	82
08:00 am	3,126	25	78
09:00 am	3,666	26	73
10:00 am	3,570	28	62
11:00 am	3,173	30	56
12:00 m	2,512	31	64
1:00 pm	3,664	33	52
2:00 pm	3,101	33	48
3:00 pm	2,134	32	49
4:00 pm	1,569	31	51
5:00 pm	3,568	30	54
6:00 pm	1,427	29	59
7:00 pm	1,449	28	65
8:00 pm	1,808	27	65
9:00 pm	1,619	27	68
10:00 pm	1,778	26	71
11:00 pm	2,289	26	71
12:00 pm	2,441	25	74
Promedios =	2,487	27	68

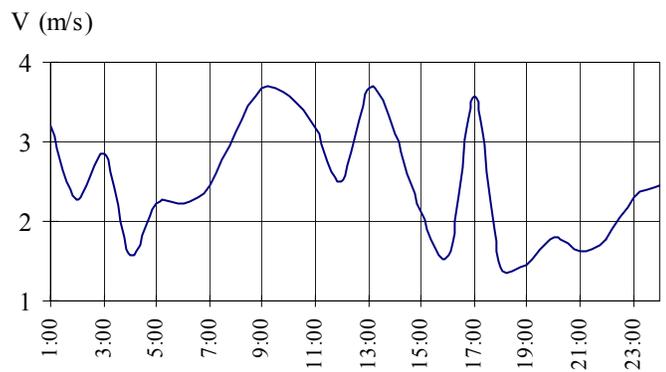


Grafico 5. Velocidad promedio por hora del Día 2 (08/05/02).

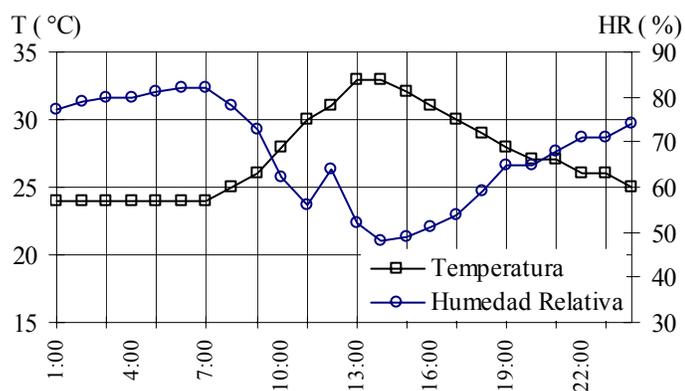


Grafico 6. Temperatura y Humedad relativa por hora del Día 2 (08/05/02).

Tabla 8. Mediciones efectuadas el Día 3 (09/05/02)

Hora	V (m/s)	T (°C)	HR (%)
01:00 am	2,207	24	77
02:00 am	1,516	24	80
03:00 am	1,596	24	81
04:00 am	1,617	24	82
05:00 am	2,388	23	84
06:00 am	1,395	23	84
07:00 am	2,205	24	82
08:00 am	2,154	25	78
09:00 am	2,605	26	73
10:00 am	2,852	28	67
11:00 am	3,459	29	60
12:00 m	3,261	29	64
1:00 pm	3,110	30	57
2:00 pm	3,108	31	53
3:00 pm	3,290	31	50
Promedios =	2,451	26	71

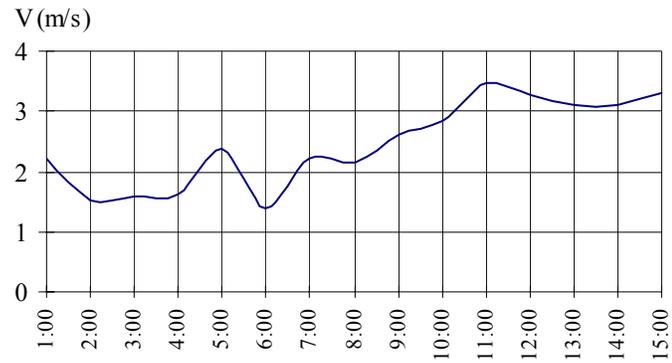


Grafico 7. Velocidad promedio por hora del Día 3 (09/05/02).

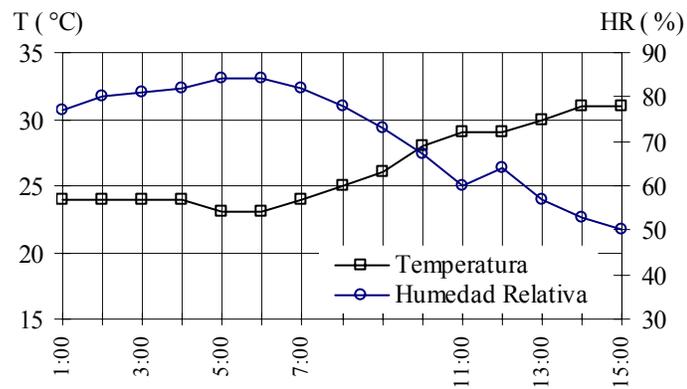


Grafico 8. Temperatura y Humedad relativa por hora del Día 3 (09/05/02).

Tabla 9. Censo población de los HACHOS.

Nº Fundo	Nº de Personas
1	4
2	11
3	7
4	4
5	10
6	6
7	4
8	5
9	1
10	1
11	3
12	5
13	6
14	4
15	6
16	4
17	3
18	4
19	8
20	2
21	4
22	2
23	1
24	3
ESCUELA	25

En cada uno de los 24 fundo existentes en la zona habita una familia en donde la cantidad de personas esta cuantificada en la tabla 9. La extensión de terreno no esta especificada en cuanto a las dimensiones, en la mayoría de los fundos la tierra no está cultivada y la cría de animales está en extinción. En la zona existe una escuela que no tiene servicio de electricidad, ni suministro de agua potable por tubería, la misma es suministrada cada quince días por camiones cisternas, aunque el lapso a veces es mayor. Existe un aeromotor multipalpas acoplado a una bomba de pistón, la que sustrae agua del subsuelo, que deposita en un tanque de tipo Australiano (ver Foto 12), y abastece de agua a la escuela. Para el momento de la visita el molino no se encontraba en funcionamiento.



Foto 12. Tanque Australiano de almacenamiento de agua.

De acuerdo a la encuesta, a una familia compuesta por la madre y sus dos hijos, le suministran 7 pipotes de agua de 200 L c/u, los cuales no cubren las necesidades básicas requeridas para el grupo familiar, contando que la próxima entrega se puede efectuar dentro de los 15 días siguientes, aunque el lapso ha llegado a ser hasta de 30 días.

3.4 Interpretación de resultados.

Los datos climatológicos obtenidos en la zona, se procesaron estadísticamente para obtener un promedio diario y un promedio total, los cuales a continuación se muestra en resultados numéricos por medio de tablas y luego el comportamiento gráfico.

Tabla 10. Promedios de la velocidad del viento, temperatura y Humedad Relativa por cada hora durante los tres días de visita a la zona.

Hora	V (m/s)	T (°C)	HR (%)
01:00 am	2,699	24,00	77,00
02:00 am	1,897	24,00	79,50
03:00 am	2,223	24,00	80,50
04:00am	1,593	24,00	81,00
05:00 am	2,308	23,50	82,50
06:00 am	1,811	23,50	83,00
07:00 am	2,334	24,00	82,00
08:00 am	2,640	25,00	78,00
09:00 am	3,136	26,00	73,00
10:00 am	3,211	28,00	64,50
11:00 am	3,316	29,33	60,33
12:00 m	2,957	31,00	53,67
1:00 pm	2,916	32,00	56,00
2:00 pm	2,824	33,00	49,33
3:00 pm	2,464	33,67	45,00
4:00 pm	1,794	32,00	47,00
5:00 pm	2,997	32,00	48,00
6:00 pm	1,981	30,00	53,50
7:00 pm	1,850	28,50	59,50
8:00 pm	2,196	27,50	62,00
9:00 pm	2,373	27,00	65,00
10:00 pm	2,612	26,00	69,00
11:00 pm	2,972	25,50	71,00
12:00 pm	2,709	24,50	73,50
Promedios =	2,492	27	66

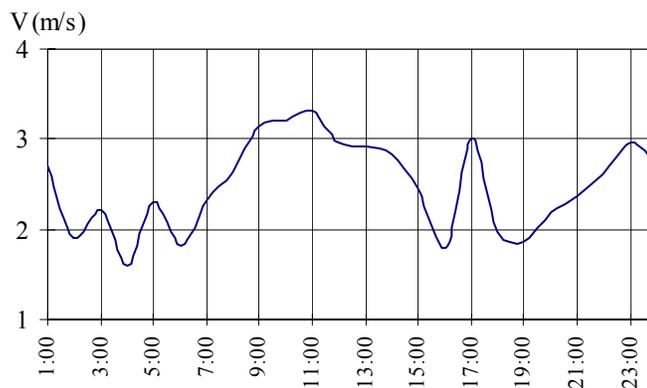


Grafico 9. Promedios de la velocidad del viento por cada hora durante los tres días de visita a la zona.

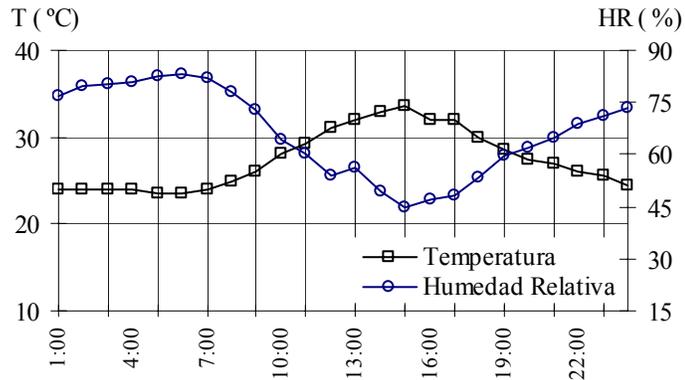


Grafico 10. Promedios de la temperatura y Humedad Relativa por cada hora durante los tres días de visita a la zona.

Tabla 11. Promedios de la velocidad del viento.

	V (m/s)
Día 1	2.61
Día 2	2.50
Día 3	2.50
Promedio total	2.51

Tabla 12. Promedios de la temperatura y humedad relativa.

	T (°C)	HR (%)
Día 1	31	52
Día 2	27	68
Día 3	26	71
Promedio	28	64

En la zona existen 24 fundo, donde el total de habitantes es de 112 personas, de los cuales 25 son niños en edad escolar, como se indico anteriormente, a cada tres personas se le suministra un promedio de 1400 litros de agua cada 15 días, lo que implica que diariamente le corresponde a cada persona 31.1 litros de agua para

satisfacer todas sus necesidades básicas, y por referencia de la Gaceta Oficial Extraordinaria N° 4044 a cada persona se le debe suministrar un promedio de 300 a 400 litros diario de agua.

La deformación que se presenta en los árboles por el efecto del viento, se puede considerar como ligeramente deformado (ver Fotos 6 y 7), como aparece en la figura 1 del anexo 2 y de la tabla 1 del mismo anexo obtenemos un rango de la velocidad promedio del viento, que oscila entre 3.6 y 5.4 m/s. Los efectos sobre el suelo se notan a orillas de la carretera, donde la arena la invade por el efecto de traslación del viento.

La referencia oral indica, que para las personas que habitan en la zona el viento es de fuerte a extremadamente fuerte durante todo el año, considerando que las personas han habitado toda su vida en el mismo sitio o en lugares donde la intensidad del viento es menor, la toponimia no es referida a condiciones climáticas.

De un boletín meteorológico perteneciente a una estación meteorológica, que instalo la CVGProforca, en la zona, desde 1991 hasta parte del 2001, donde indica las condiciones climáticas de la zona y del cual a continuación se tabula un extracto del mismo.

Tabla 13. Datos aportados por La estación climatologica de la CVG-PROFORCA: Nota Radiación solar: Rad. (cal/cm²*min.); Velocidad del viento: V; Humedad Relativa: HR; Temperatura: Temp.

	Temp. °C 91-2000	Temp. °C 2001	HR % 91-2000	HR % 2001	Rad. 91-2000	Rad. 2001	V m/s 91-2000	V m/s 2001
ENE	25.1	25.7	81	80	363	431	3.02	3.39
FEB	25.4	25.3	80	80	415	323	3.56	3.78
MAR	26.5	27.6	75	74	437	540	4.06	4.53
ABR	27.3	27.6	74	76	453	359	4.19	4.39
MAY	27.5	28.3	78	80	439	525	3.80	4.19
JUN	26.4		84		377		3.03	
JUL	26.3		85		397		2.28	
AGO	26.4		82		369		2.11	
SEP	26.8		81		434		2.06	
OCT	26.9		81		409		2.11	
NOV	26.4		85		361		2.44	
DIC	25.6		84		344		2.72	
PROM	26.4	29.9	81	78	388	436	2.89	4.06

Los valores obtenidos de las mediciones de la velocidad del viento aunque no son representativos, no se alejan mucho del valor promedio que muestra la tabla anterior, ya que esta si se puede considerar representativa por haberse realizado mediciones durante 10 años por cada hora.

La referencia oral y la evidencia ecológica sobreestiman el valor real promedio de la velocidad del viento, esto puede ser debido, en el caso de las personas, que su patrón de referencia es esta zona, o sea con mayor intensidad del viento y por lo tanto lo consideran alto, no opinaría igual una persona que venga de la Guajira o de la península de Paraguana. Con respecto a la evidencia ecológica, en especial, los efectos sobre la vegetación, pueden existir varios factores que pueden influir como lo son: la consecutiva quema anual y por ende perdida del follaje, la incidencia del calor en la forma del tronco, muchos de los árboles son de poca altura y muy frondosos, y muchos árboles no son de hojas perennes. El transporte de arena en la carretera puede ser debido al arado indiscriminado a que se somete el terreno para evitar el crecimiento de vegetación.

La temperatura se puede considerar alta, la incidencia de los rayos del sol es directa, ya que no existen barreras naturales de protección, la nubosidad depende del período del año en que se encuentre, pero podemos considerar en muy alto porcentaje un cielo despejado completamente.

El suministro del agua al poblado es completamente deficiente, no es así para la estación de BIOCENOR que gracias a Proforca, que tiene una estación de bombeo en el río Morichal Largo, donde comparten los costos de operación y aseguran el suministro diario por dos horas para los gastos de riego, consumo animal y en muy pequeña proporción para el consumo humano.

El caudal del río es muy bajo (ver Foto 13), para suministrarle un flujo continuo a la zona y satisfacer todas las necesidades de los habitantes, por lo tanto hay que recurrir al recurso hídrico subterráneo, el cual es muy abundante, como ya es sabido, pero el aprovechamiento de ese recurso natural, necesita del aporte de energía, la cual puede ser obtenida del viento.



Foto 13. Toma de agua en el río Morichal Largo.

El diseño del sistema para obtener energía va a depender de un requerimiento mínimo de energía suministrada para comenzar a transformar dicha energía, además ese suministro debe tener cierta periodicidad o continuidad en el tiempo para obtener la cantidad de energía transformada requerida para el uso o satisfacción de un requerimiento. En referencia a lo anterior la cantidad de energía eólica esperada para la zona no cumplió con las expectativas planteadas, o sea es relativamente baja y de intensidad muy variable, como lo muestran las gráficas, lo que implica que para obtener energía se necesitan equipos que se adapten a estas características, entre los cuales y de la clasificación del capítulo anterior se puede seleccionar un aeromotor de baja velocidad, con un torque alto, para los cuales se tienen a los multipalas y al Savonius. Para este ultimo no se encontraron estudios adecuados que avalaran la posible selección del mismo, en cambio para el multipalas se obtuvo el aeromotor para realizarles las pruebas requeridas. El elemento de elevación del agua para el acuífero subterráneo que soporta variabilidad en la entrega de potencia, requiere poco mantenimiento, de bajo costo, alto rendimiento, necesita poca energía para funcionar y de fácil instalación es la bomba de pistón, la cual fue la seleccionada para cumplir las funciones de bombeo en el diseño del grupo eólico.

CAPITULO 4.

Evaluación experimental del aeromotor multipala.

4.1 Determinación de las características geométricas del aeromotor multipala.

La empresa Marullo fabricante del aeromotor multipalas (ver Foto 13) no cuenta con planos de detalle para los componentes de este equipo; La construcción de los mismos se realizaron en base a modelos y moldes. Por esta razón una de las actividades desarrolladas en este trabajo especial de grado consistió en realizar la reingeniería del equipo pieza por pieza.

En la determinación de las características geométricas del aeromotor se consideró como parte primordial al elemento que por su disposición y forma geométrica realiza la transferencia de la energía cinética del viento a energía mecánica y del cual se muestran las principales vistas y medidas en el plano 1. Por la forma de entrada y salida del flujo al momento de pasar por el rotor se puede considerar al aeromotor como una maquina axial, ya que el flujo entra con un ángulo de inclinación de aproximadamente 52° y sale perpendicular al eje de rotación.

La denominación de multipala es por los muchos alabes que tiene el rotor, el aeromotor estudiado tiene 15 alabes sujetos por medio de pernos a la rueda principal. Es de hacer notar que el conjunto alabes y rueda principal forman el rotor, de la rueda principal se detalla su geometría en el plano 2.

Los materiales usados para la construcción de los elementos del rotor son pletinas, ángulos y laminas galvanizada comerciales. Para la rueda se utilizo pletina de 1 pulgada de ancho por $3/8''$ de espesor, para las bases que están soldadas a la rueda, con la forma del alabe, se utilizan pletinas de $1/2$ pulgada y $3/8''$ de espesor y los radios consisten en ángulos de $3/4''$. Los alabes son de laminas de acero galvanizado de espesor 0.20 mm.



Foto 13. Vista frontal de molino de viento fabricado por industrias Marullo

Plano1

Plano2

4.2 Banco de pruebas.

Para la realización de las pruebas al molino de viento exigidas por el profesor tutor, se tuvo que instalar un banco de pruebas ad hoc, para el cual, se puso en marcha el motor que transmite el movimiento a la hélice del túnel de viento (ver Foto 14) del laboratorio de turbomaquinas de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV. Este motor se encontraba en desuso desde algunos años. Esta puesta en marcha se basó exclusivamente en un mantenimiento general y cambio de partes del motor, el cual se realizó con la valiosa guía del Tec. Jose Troconis.



Foto 14. Vista desde afuera del motor, el tanque de gasolina y del túnel de viento de gran diámetro.

Este mantenimiento se le efectuó primero al carburador al cual se le realizó limpieza y cambio del kit, al sistema de lubricación del motor donde inicialmente se le dio movimiento a la bomba de aceite con un taladro sin mover los pistones, ya que el tiempo sin lubricación y la respectiva formación de capas de óxidos fuesen a producir arranque de material de los cilindros, se le realizaron varios cambios de aceite para desechar cualquier partícula sólida suelta que pudiese causar daños en alguno de los cilindros, también se realizó la limpieza al sistema de enfriamiento, y por último al sistema de administración de combustible, donde el tanque y la tubería se encontraban totalmente corroídas por el óxido, además se desmontaron y probaron el arranque y el alternador, igualmente se cambiaron la tapa del distribuidor, los cables y

las bujías, los filtros de aceite , de aires y los de gasolina, por ultimo se le hizo un arreglo general al sistema de control.

Otra parte importante en el banco de prueba es el diseño y construcción de la base de soporte del molino, esto consistió en la búsqueda de diferentes elementos o piezas metálicas y de un elemento lo suficientemente pesado que pudiera soportar las fuerzas producida por el viento generado por la hélice del túnel de viento de manera que no existiese movimientos de rotación, traslación, volcamiento o vibración. El elemento que se utilizo fue un bloque de concreto a el cuál se le sujeto a la bases metálicas como se pueden observar en las siguientes fotos. La base numero uno colocada por debajo y la base numero dos colocada por arriba la cual es la que soporta a el molino y en donde se encuentran las guías de los dinamómetros, ambas unidas entre si por medio de unos tornillos con sus respectivas tuercas. Todas las uniones estructurales de las bases fueron soldadas ya que fueron hechas con diferentes piezas de metal. (ver Fotos 15, 16 y el Plano 3).



Foto 15. Vista lateral de la base con el molino.

Plano 3



Foto 16. Vista posterior del la base con el tambor y las dos balanzas del freno Prony.

Un elemento importante es el tambor del freno Prony (ver Foto 17) el cual se obtuvo del laboratorio de turbomáquinas y al cual se le realizó un acople al molino, primero por medio de un eje que se le inserta al cilindro del tambor con un cierto apriete y una chaveta, y segundo por medio de un tubo mecánico al cual se le colocó una tapa agujereada por donde pasa un tornillo 3/4 pulgadas de diámetro que se enrosca en el eje del molino, además se le realizaron 4 perforaciones transversalmente en ángulo de 90 grados de 3/8 pulgadas de diámetro y a las cuales se le realizó rosca para colocar los perno que sujetarían al eje que se le había acoplado al tambor. Al tornillo que sujeta al conjunto tambor-eje-tubo con el eje del molino se le perforo y se le atravesó con un pasador para evita que se desenroscara, además en la cara de contacto del tubo con el eje se le colocó una guía para evita el giro de una con respecto al otro (ver Foto 17).

La instrumentación utilizada en el banco de prueba se detalla y se dan sus especificaciones técnicas en punto siguiente.



Foto 17. Vista de la forma de acople del conjunto tambor-eje-tubo con el eje del molino.



Foto 18. Vista frontal del tambor del freno Prony.

Al concluir el banco de pruebas, se montó el molino de viento, el cual se fijo con pernos a la base metálica, como se muestra en la foto 19, luego se seleccionó la ubicación adecuada del mismo para realizar las pruebas ya que tenía que ser colocado frente a la salida del túnel de viento en donde se obtuviera el un perfil de velocidad uniforme y que la velocidad del viento fuese adecuada para los requerimientos en los objetivos del trabajo, esto se logro a una distancia de aproximadamente 5 metros.



Foto 19. Sujeción del molino a la base.

4.3 Instrumentación y metodología de medición.

Los equipos e instrumentos utilizados para las pruebas del molino, fueron los siguientes:

- Anemómetro de copa marca SAP, modelo 536
- TRI-SENSE equipo para medir temperatura humedad relativa y velocidad de viento, este ultimo por un sensor de hilo caliente, modelo 637-0090
- Dinamómetros Salter, modelo 235 de 20 kg*100gr.
- Dinamómetros Salter, modelo 235 de 10 kg*50gr.
- Tacómetro Ht modelo 50.
- Tambor.
- Cinta de amianto.
- Molino de viento multipala (15 palas).
- Hélice, marca: sensenich, modelo: M74dm, Diámetro 74 pulg., potencia 160 Hp
- Motor ohv V8 4.27 435 Hp Corvette año 1967.

La metodología utilizada se basó en realizar un numero determinado de mediciones para un definido rango de velocidad del viento de 2.5 a 7 m/s, donde

estuviese incluida la velocidad promedio y la mayor velocidad obtenida en la zona donde se efectuaron las mediciones, a su vez se busco otro rango, esta vez de giro para el motor que mueve la hélice que se encuentra en el túnel de viento, este se definió entre 1000 y 2000 rpm, donde estuviese inscrito el primer rango nombrado. En cada medición a realizar se obtuvieron los valores de las rpm del molino, la fuerza aportada al eje del aeromotor, la temperatura ambiental, la humedad relativa y las velocidades del viento.



Foto.20 .Momento en el que se le esta aplicando carga al dinamómetro y tomando las mediciones de la velocidad del viento

Inicialmente al motor se colocaba a una velocidad de giro determinada, se esperaba un lapso de aproximadamente 5 minutos mientras el motor y el flujo se estabilizaran, con el molino libre de cargas se tomaban los valores de las velocidades del vientos delante del mismo con el tri-sense, con el tacómetro se obtenía las revoluciones que se producían en el eje del molino, luego se aplicaba carga con el dinamómetro y se procedía a tomar nuevas lecturas de velocidad de viento y revoluciones del eje, hasta llegar a una carga que frenara el molino (ver Foto 20 y 21), con el anemómetro de copa que estaba situado a 90 cm delante del aeromotor, se tomaban los valores cada cierto tiempo de manera de comparar la velocidad del viento con la marcada por el tri-sense, este mismo procedimiento se repitió para las diferentes r.p.m. del motor. Además el molino se dividió radialmente en secciones

para las cuales se tomarían las mediciones de la velocidad axial y tangencial del viento respectivamente, los radios considerados fueron: el centro del aeromotor o sea radio 0 (cero), 0.4, 0.62, 0.8 y 1 m.

La metodología anteriormente descrita se aplicó para cuatro tipos de experimentos diferentes, definidos por el profesor Zarea. El primero fue colocando un rectificador de flujo (ver Foto 22), para evitar que el movimiento giratorio que le induce la hélice al viento fuera a influenciar en los resultados obtenidos. Este rectificador se colocó delante de la turbina eólica a una distancia de 4 metros, se tomaron las mediciones nombradas en la metodología más la velocidad del viento a la salida del rectificador en forma similar de como se tomaron delante del aeromotor. Las velocidades de giro que se imprimieron al motor para realizar las mediciones fueron: 1000, 1200, 1500, 1700, 1800 y 1900 rpm respectivamente.



Fotos 21. Medición de las rpm del eje del aeromotor con el tacómetro mecánico.

Para el segundo experimento se dejó que incidiera directamente el flujo que salía de la hélice con el molino, para este experimento como para el anterior se consideraron la velocidad axial y tangencial del viento frente al aeromotor, además se

consideraron tres planos verticales paralelos a la turbina eólica y donde el primero se encontraba a una distancia de 1.5 m del molino y los otros dos a 3 m y 4.5 m respectivamente como se muestra en la figura 3, en cada plano se midieron las componentes de la velocidad del flujo en 4 puntos horizontales y 9 puntos verticales (ver figura 4).

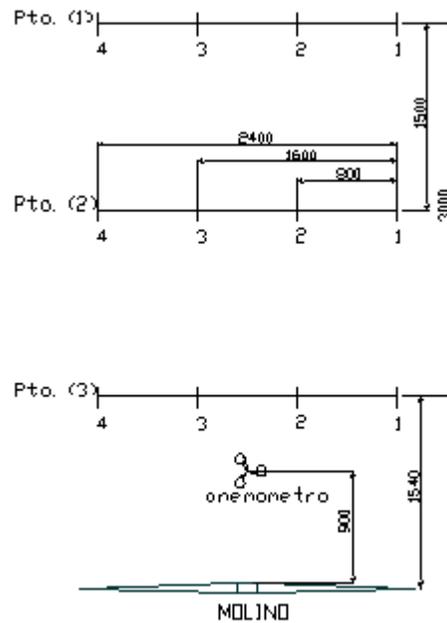


Figura 3. Plano horizontal, ubicación de las secciones transversales donde se realizaron las mediciones de la velocidad del viento

En el siguiente experimento las condiciones son similares al anterior con la diferencia que no se consideraron las velocidades tangenciales y no se realizó la toma de datos del flujo de aire. En el último experimento el procedimiento de toma de datos es igual que el anterior con la variante que el aeromotor no estaba acoplado a la caja de transmisión. Es de hacer notar que cada uno de estos experimentos están detallados en los subcapítulos.

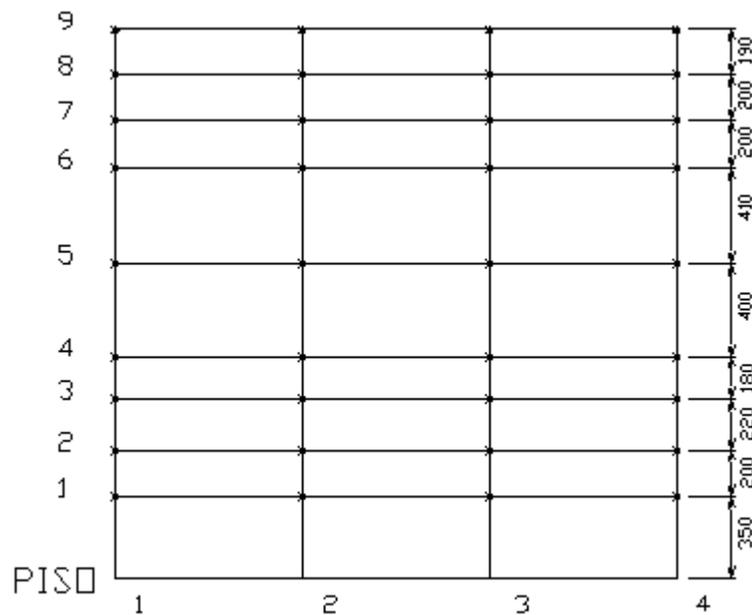


Figura 4. Plano Vertical, ubicación donde se midieron las componentes de la velocidad del viento.

Las ecuaciones utilizadas en el procesamiento de los datos y las cuales fueron recogidas de la revisión bibliográfica se muestran a continuación:

$$\text{Coeficiente de potencia} \quad C_p = \frac{P_{\text{eje}}}{P_{\text{viento}}} \quad (1)$$

$$\text{Potencia en el eje} \quad P_{\text{eje}} = (F_2 - F_1) * R_{\text{tambor}} * \omega \quad (2)$$

donde: F_2 y F_1 ; fuerzas obtenidas de los dinamómetros.

ω velocidad de giro del eje del aeromotor.

$$\text{Potencia del viento} \quad P_{\text{viento}} = \frac{\rho * V_{\text{axial}}^3 * A}{2} \quad (3)$$

donde: ρ = densidad del aire, obtenida de la carta psicrométrica con los valores de la temperatura y la Humedad Relativa medidas al momento de realizar los ensayos.

A = área efectiva de conversión de energía del aeromotor.

$$\text{Relación de velocidades} \quad \lambda_0 = \frac{U}{V_0} \quad (4)$$

donde: U = velocidad tangencial de la punta del álabe = $\omega * R_{\text{aeromotor}}$

V_0 = velocidad de la corriente de aire medido a 20 cm.

Para el cálculo de la potencia del viento considerando la componente tangencial y por sugerencia del profesor tutor se utilizó la siguiente ecuación.

$$\text{Potencia del viento } P_{\text{viento}} = \frac{\rho * V_{\text{axial}}^2 * V_t * A}{2} \quad (5)$$

4.4 Mediciones utilizando un rectificador de flujo

Para la realización de las mediciones inicialmente se tuvo que estudiar el como fabricar un dispositivo que enderezara o linealizara el flujo de aire, ya que, como es sabido la hélice le induce un cierto giro, por lo tanto el flujo de aire no tenía un comportamiento completamente axial. La eliminación de la componente tangencial de la velocidad, permitiría comparar los resultados con otros experimentos donde se toma en cuenta solamente la componente axial, tal como se presenta el viento, normalmente, en condiciones naturales en un espacio abierto.



Foto 22. Posicionamiento del enderezador de flujo con respecto al molino.



Foto 23. Vista posterior del enderezador de flujo.

Con ayuda del profesor tutor, se diseñó un anillo del mismo diámetro que el aeromotor compuesto por pletinas de $\frac{3}{4}$ de pulgadas y otros accesorios de fácil adquisición y se logró un tipo de colmena (ver foto 23) que consiste de tubos de PVC, de 5 pulgadas de diámetro y 30 centímetros de longitud son los utilizados en la entrada del túnel de viento, esto de manera de ahorro de dinero y tiempo ya que lo que se quiere es rectificar el flujo, de manera de disminuir la velocidad tangencial en magnitud. En la foto 22 se puede observar al rectificador de flujo colocado frente a el molino.

Para obtener la velocidad media a considerar en las respectivas ecuaciones, con la mediciones de las velocidades axiales y tangenciales tomadas en radios ya conocidos se procedió a realizar la graficación de los puntos con una hoja de cálculo de Excel y obtener la ecuación, la cual se integra. Con este resultado se consigue el valor del caudal de aire que le llega a la turbina eólica y de este último se calcula la velocidad promedio del viento.

Con las mediciones de los parámetros requeridos, las ecuaciones respectivas, y una hoja de cálculo de Excel se obtuvieron las graficas que indican el comportamiento de la turbina eólica, su potencia, coeficiente de potencia, la velocidad en la punta del alabe y la relación de velocidades, como se indica en los

gráficos siguientes y además del breve análisis del comportamiento del viento en la salida del rectificador de flujo.

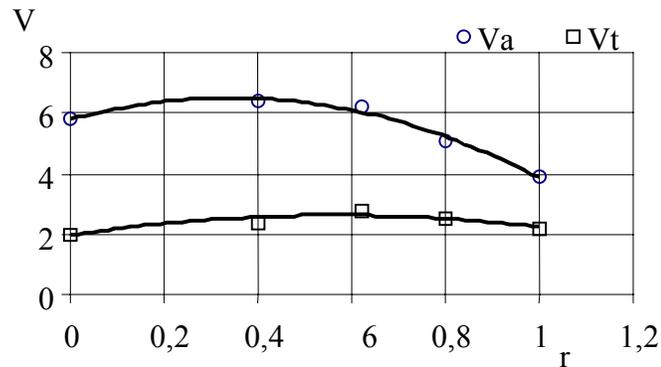


Grafico 11. Comportamiento radial de las velocidades axiales y tangenciales del viento al salir del rectificador de flujo a 1000 rpm del motor.

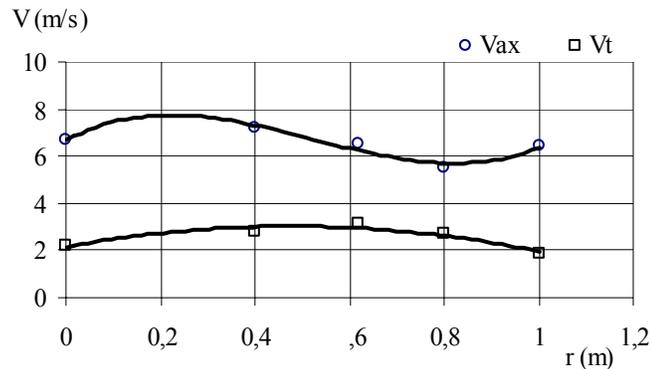


Grafico 12. Comportamiento radial de las velocidades axiales y tangenciales del viento al salir del rectificador de flujo a 1200 rpm del motor.

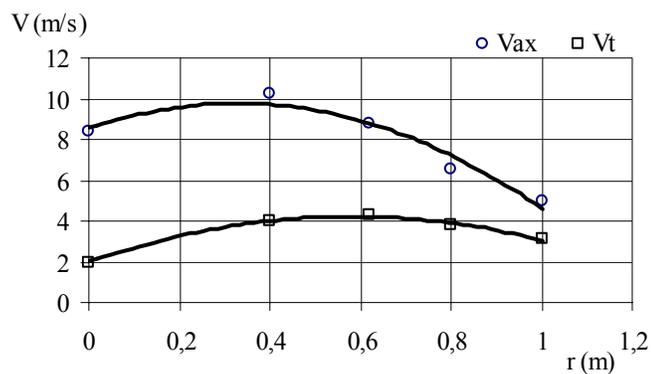


Grafico 13. Comportamiento radial de las velocidades axiales y tangenciales del viento al salir del rectificador de flujo a 1500 rpm del motor.

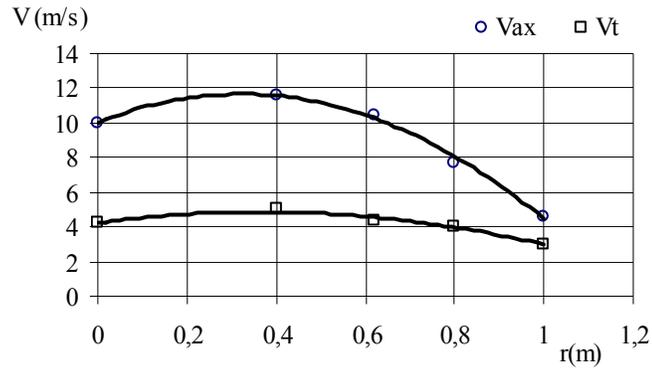


Grafico 14. Comportamiento radial de las velocidades axiales y tangenciales del viento al salir del rectificador de flujo a 1700 rpm del motor.

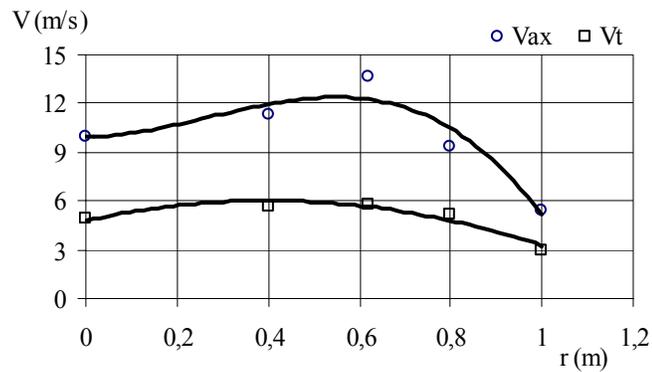


Grafico 15. Comportamiento radial de las velocidades axiales y tangenciales del viento al salir del rectificador de flujo a 1800 rpm del motor.

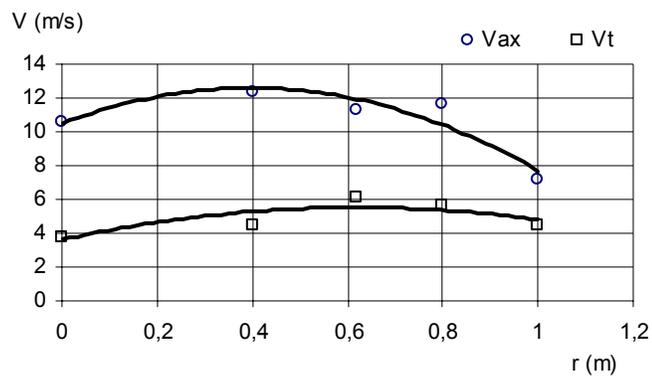


Grafico 16. Comportamiento radial de las velocidades axiales y tangenciales del viento al salir del rectificador de flujo a 1900 rpm del motor.

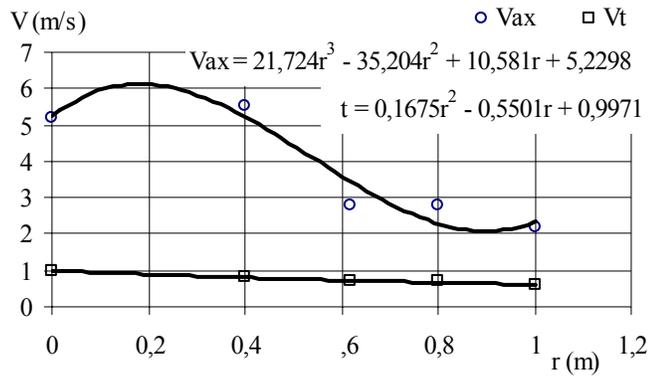


Gráfico 17. Comportamiento radial de la velocidad axial y tangencial tomada a una separación de 0.2 m del aeromotor, velocidad de giro del motor de 1000 revoluciones.

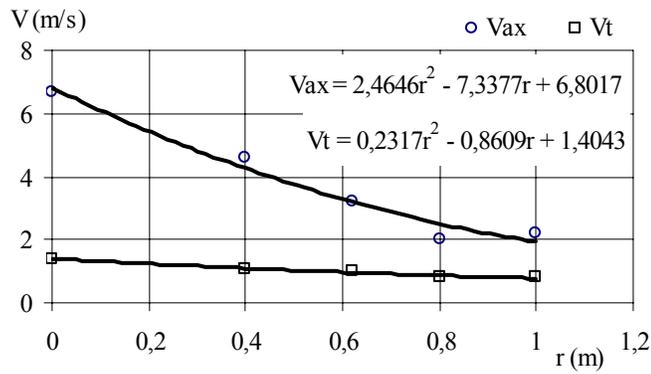


Gráfico 18. Comportamiento radial de la velocidad axial y tangencial tomada a una separación de 0.2 m del aeromotor, velocidad de giro del motor de 1200 revoluciones.

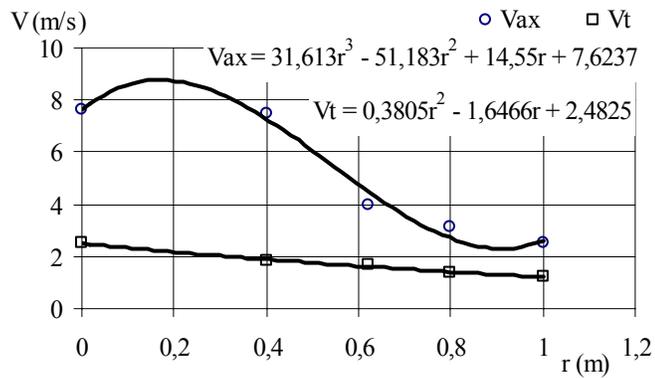


Gráfico 19. Comportamiento radial de la velocidad axial y tangencial tomada a una separación de 0.2 m del aeromotor, velocidad de giro del motor de 1500 revoluciones.

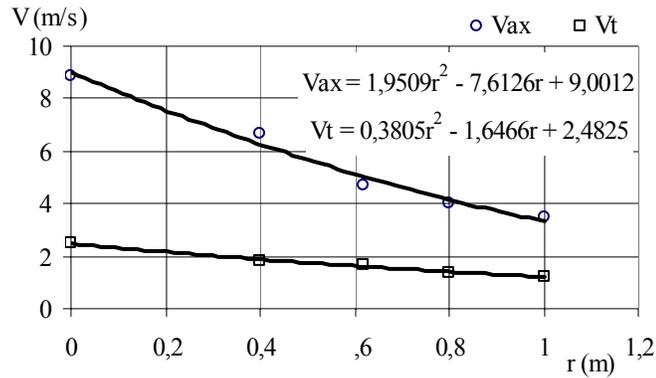


Grafico 20. Comportamiento radial de la velocidad axial y tangencial tomada a una separación de 0.2 m del aeromotor, velocidad de giro del motor de 1700 revoluciones.

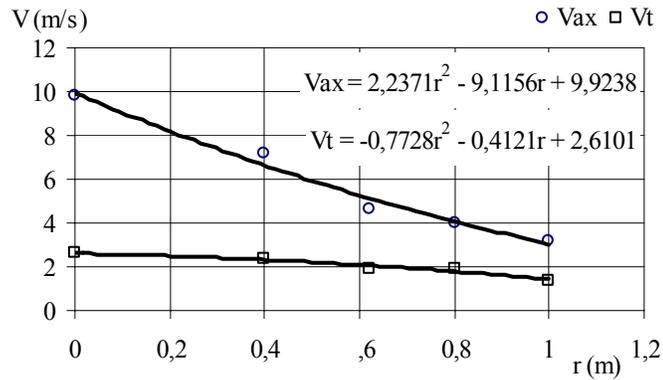


Grafico 21. Comportamiento radial de la velocidad axial y tangencial tomada a una separación de 0.2 m del aeromotor, velocidad de giro del motor de 1800 revoluciones.

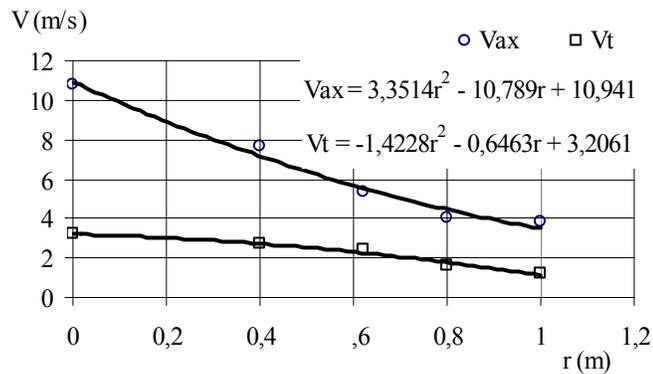


Grafico 22. Comportamiento radial de la velocidad axial y tangencial tomada a una separación de 0.2 m del aeromotor, velocidad de giro del motor de 1900 revoluciones.

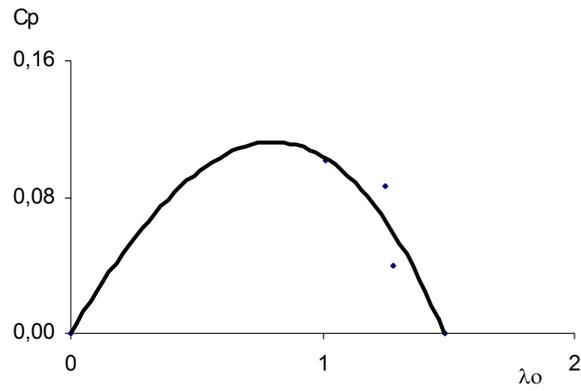


Grafico 23. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 3.7 m/s.

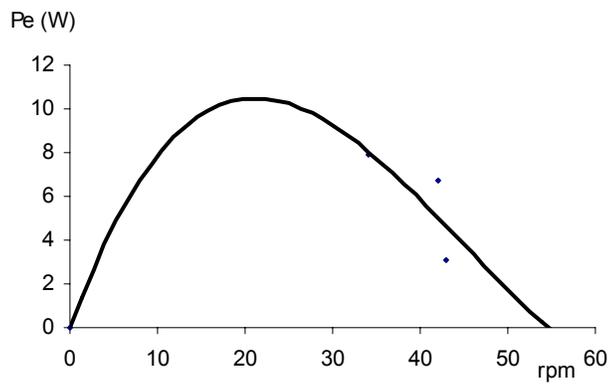


Grafico 24. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 3.7 m/s.

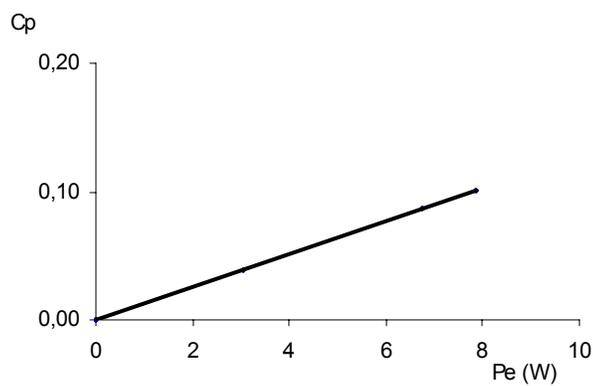


Grafico 25. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 3.7 m/s.

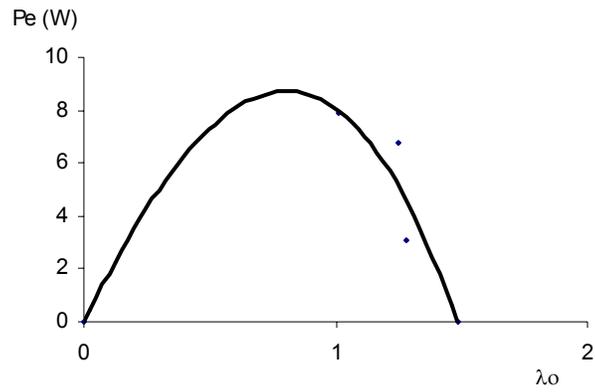


Grafico 26. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 3.7 m/s.

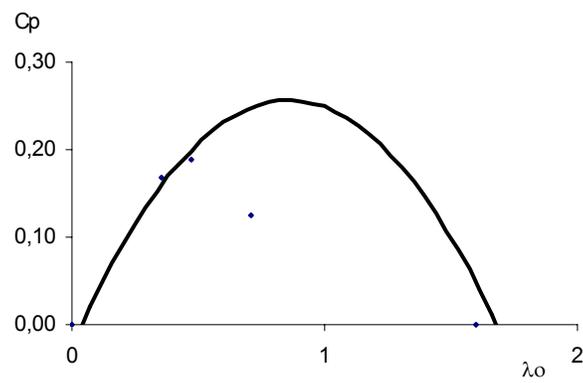


Grafico 27. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 3.74 m/s.

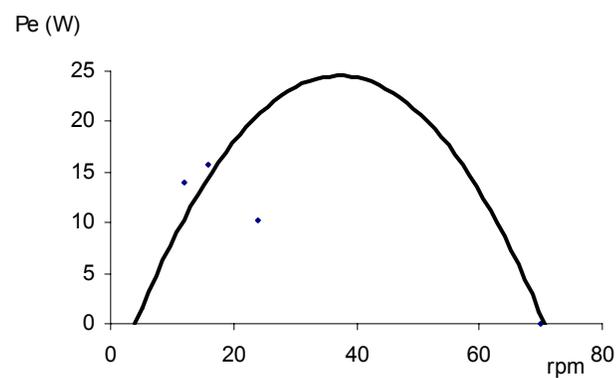


Grafico 28. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 3.74 m/s.

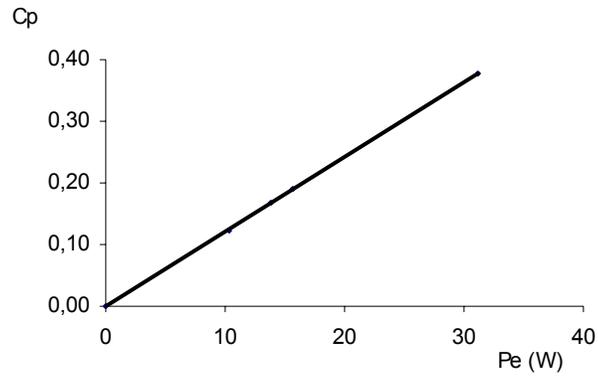


Grafico 29. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 3.74 m/s.

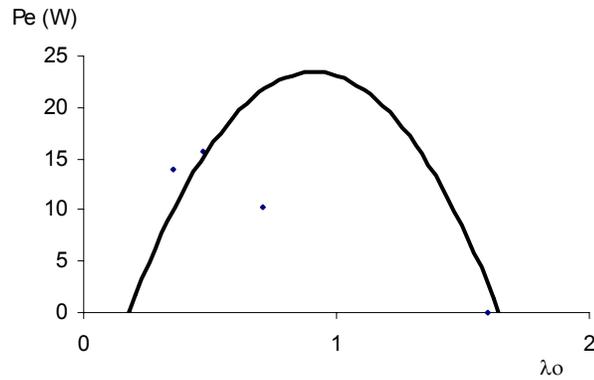


Grafico 30. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 3.74 m/s.

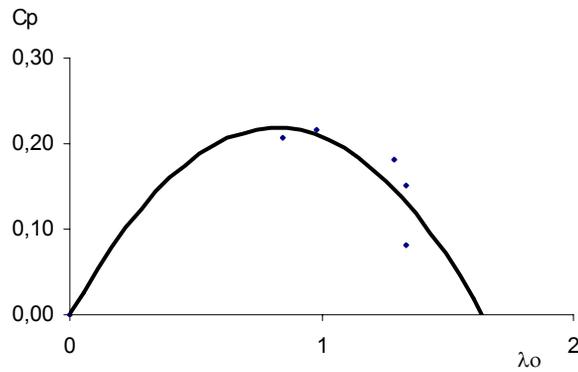


Grafico 31. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 4.94 m/s.

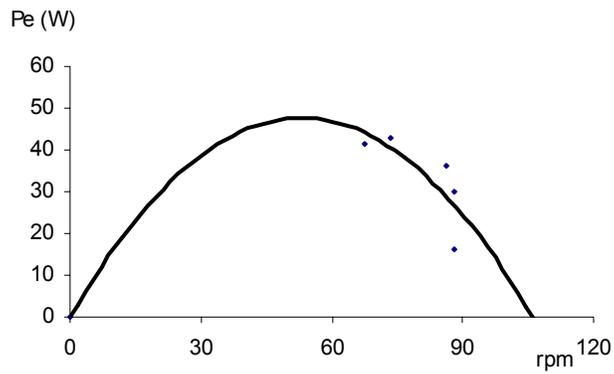


Grafico 32. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 4.94 m/s.

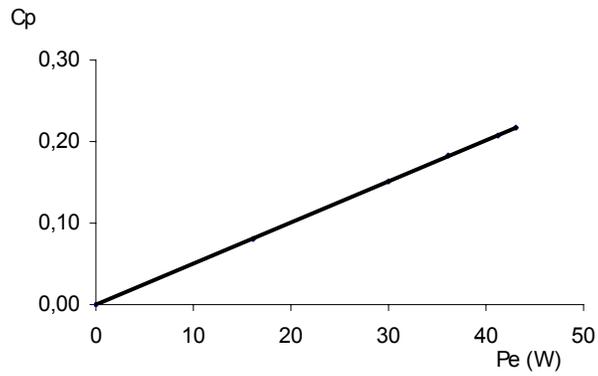


Grafico 33. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 4.94 m/s.

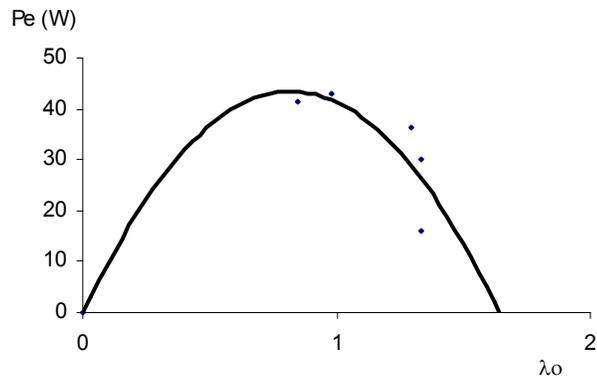


Grafico 34. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 4.94 m/s.

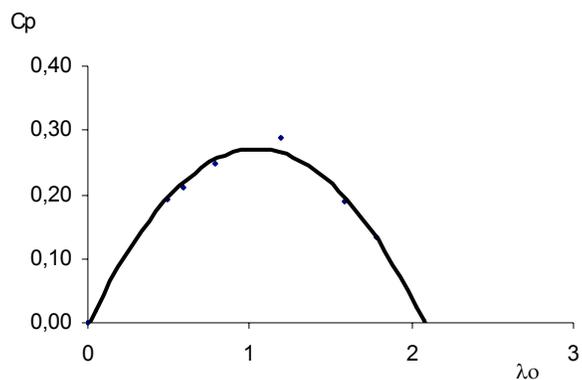


Grafico 35. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 5.56 m/s.

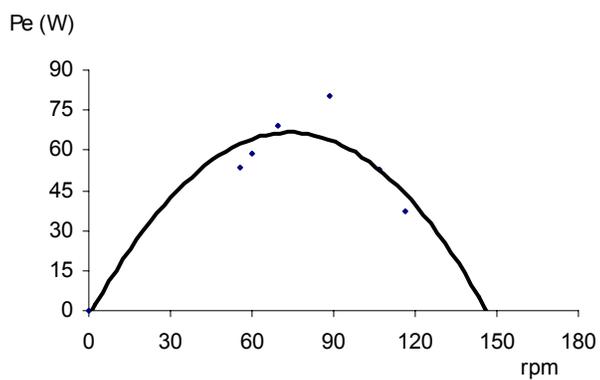


Grafico 36. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 5.56 m/s.

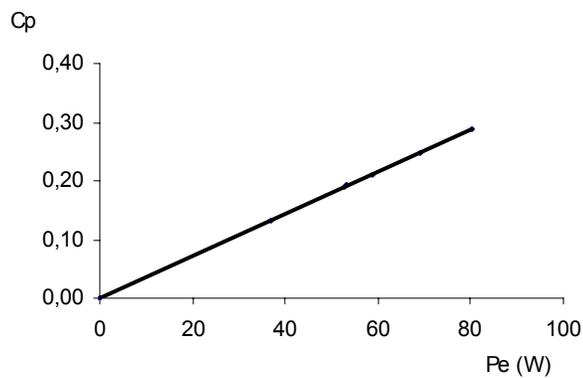


Grafico 37. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 5.56 m/s.

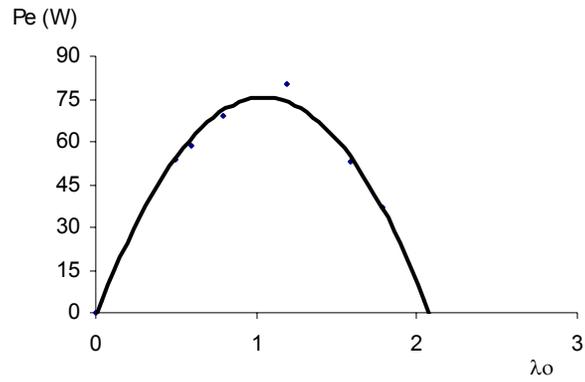


Grafico 38. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 5.56 m/s.

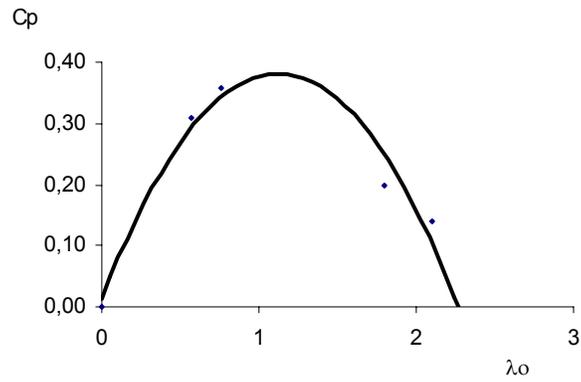


Grafico 39. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 5.76 m/s.

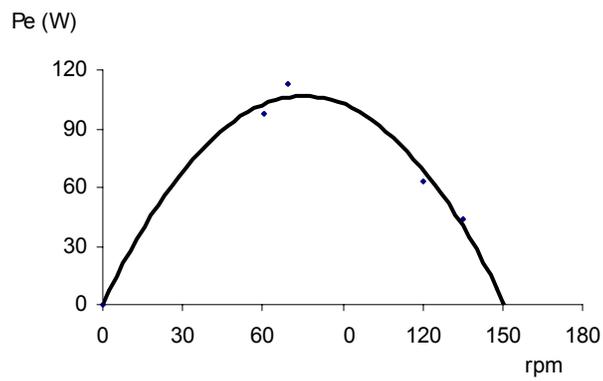


Grafico 40. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 5.76 m/s.

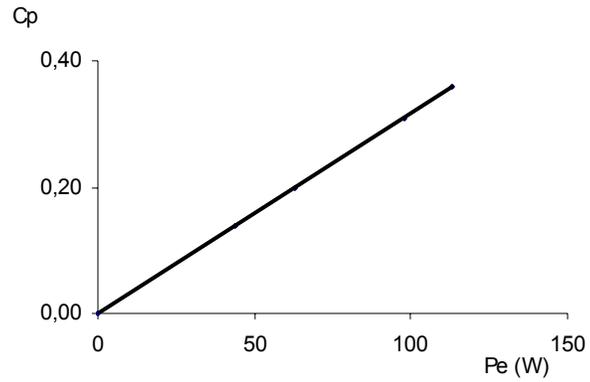


Grafico 41. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 5.76 m/s.

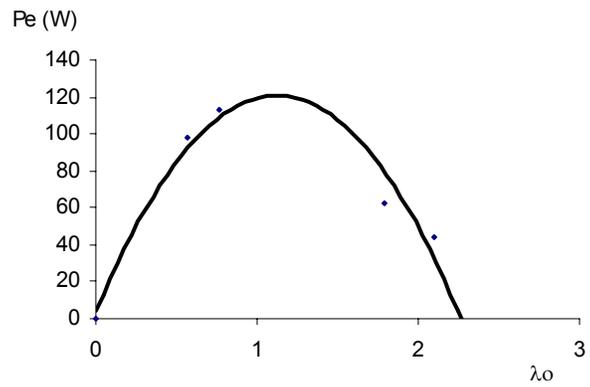


Grafico 42. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 5.76 m/s.

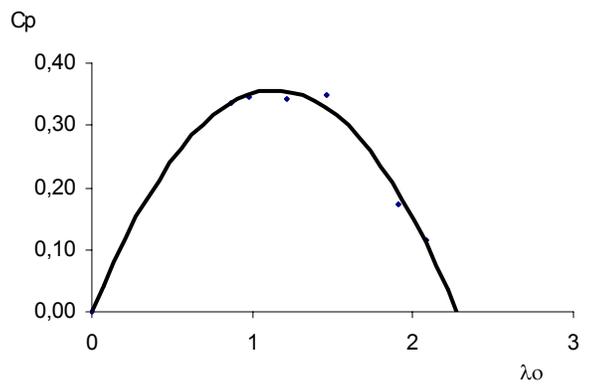


Grafico 43. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 6.32 m/s.

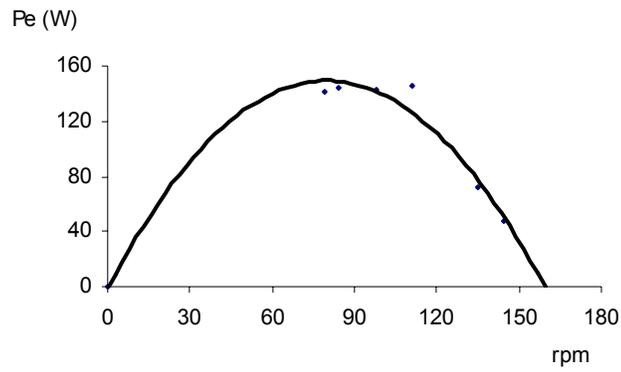


Grafico 44. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 6.32 m/s.

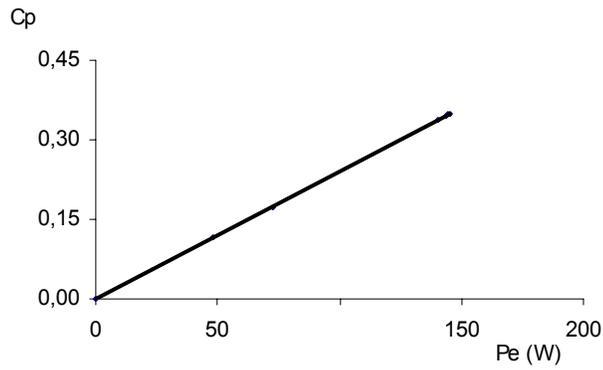


Grafico 45. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 6.32 m/s.

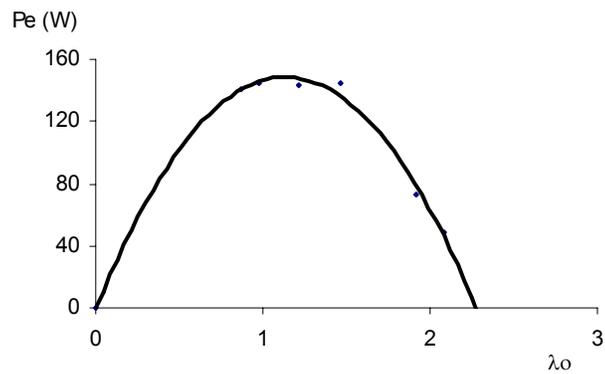


Grafico 46. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 6.32 m/s.

4.5 Mediciones considerando la componente axial y tangencial de la velocidad del viento.

En la realización de esta medición no se utilizó el enderezador de flujo, en cambio se consideraron los planos anteriormente mostrados en la figura 3 y 4, con la finalidad de obtener los valores de las velocidades axiales y tangenciales en diferentes puntos de la trayectoria del flujo y poder comprender el comportamiento de flujo entre la salida del túnel y el aeromotor, a continuación se muestran los valores obtenidos en las secciones transversales de medición y la representación gráfica del comportamiento del flujo

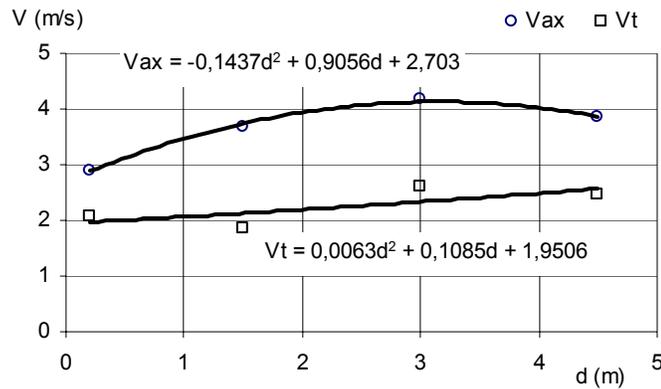


Gráfico 47. Velocidad axial y tangencial vs distancia de aproximación del flujo de aire a una velocidad de giro del motor de 1000 revoluciones.

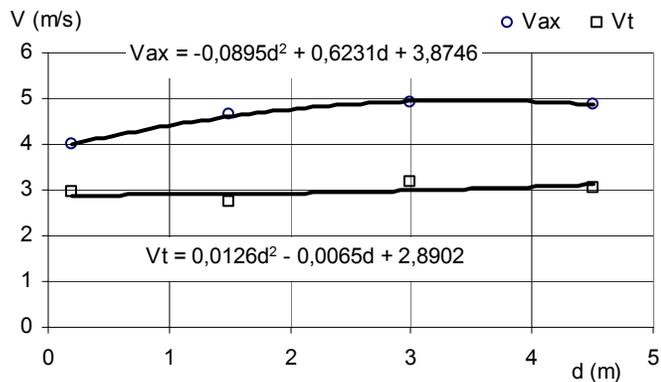


Gráfico 48. Velocidad axial y tangencial vs distancia de aproximación del flujo de aire a una velocidad de giro del motor de 1200 revoluciones.

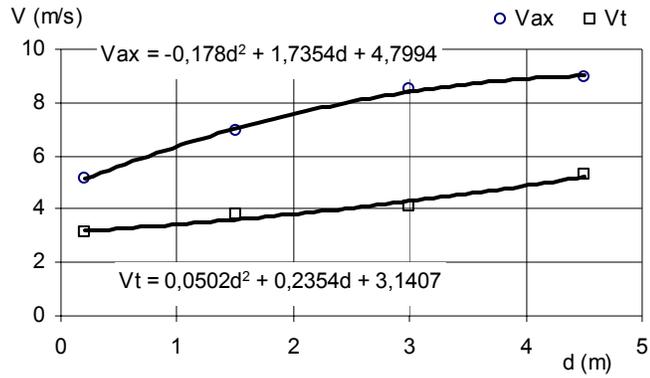


Gráfico 49. Velocidad axial y tangencial vs distancia de aproximación del flujo de aire a una velocidad de giro del motor de 1500 revoluciones.

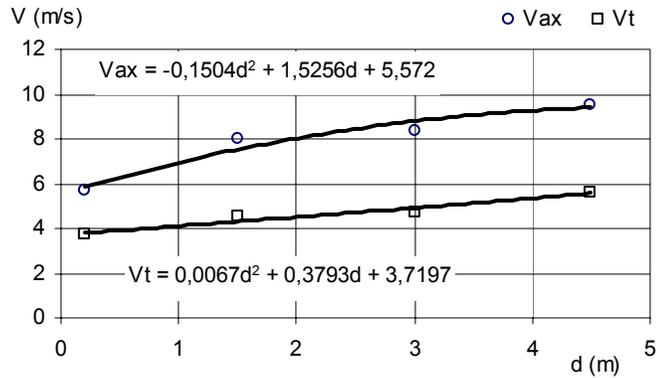


Gráfico 50. Velocidad axial y tangencial vs distancia de aproximación del flujo de aire a una velocidad de giro del motor de 1700 revoluciones.

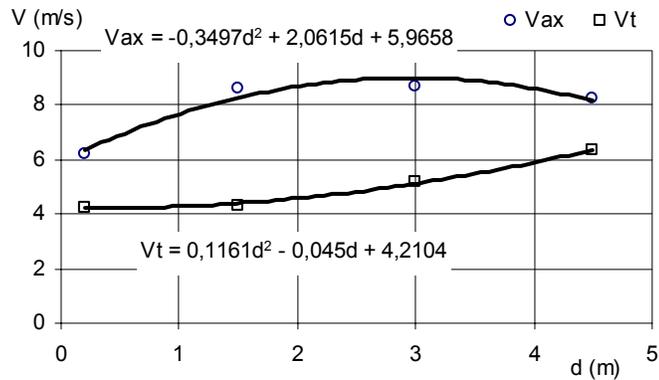


Gráfico 51. Velocidad axial y tangencial vs distancia de aproximación del flujo de aire a una velocidad de giro del motor de 1800 revoluciones.

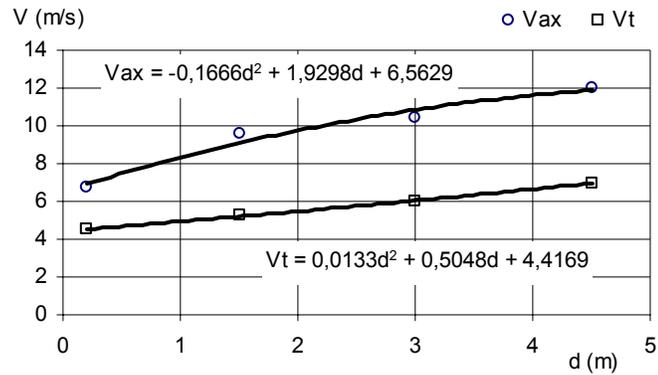


Gráfico 52. Velocidad axial y tangencial vs distancia de aproximación del flujo de aire a una velocidad de giro del motor de 1900 revoluciones.

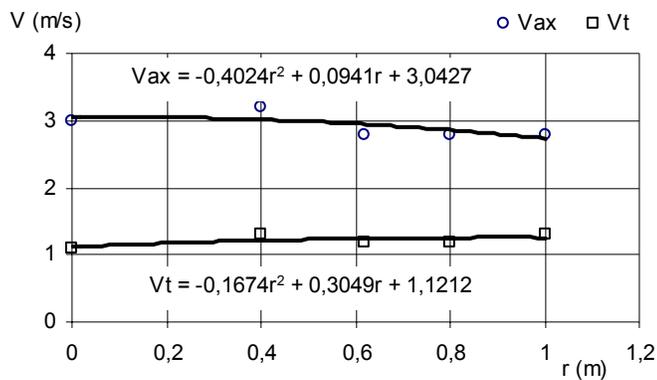


Gráfico 53. Velocidad axial y tangencial vs el radio del aeromotor, tomada a una separación de 0.2 m, velocidad de giro del motor de 1000 revoluciones.

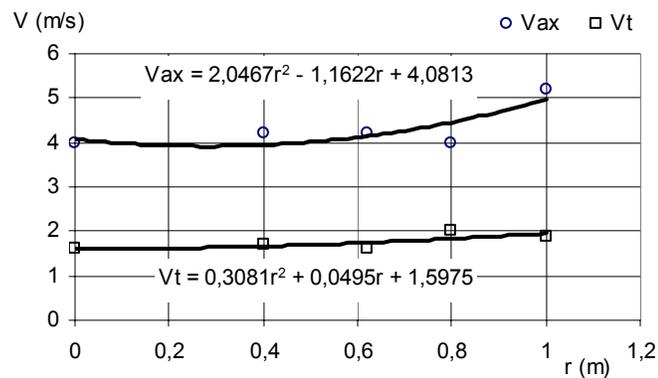


Gráfico 54. Velocidad axial y tangencial vs el radio del aeromotor, tomada a una separación de 0.2 m, velocidad de giro del motor de 1200 revoluciones.

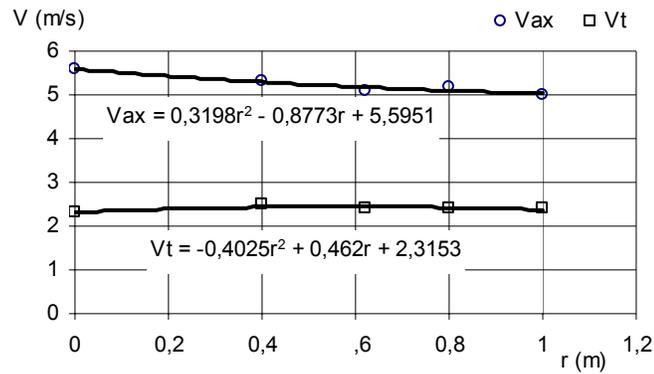


Gráfico 55. Velocidad axial y tangencial vs el radio del aeromotor, tomada a una separación de 0.2 m, velocidad de giro del motor de 1500 revoluciones.

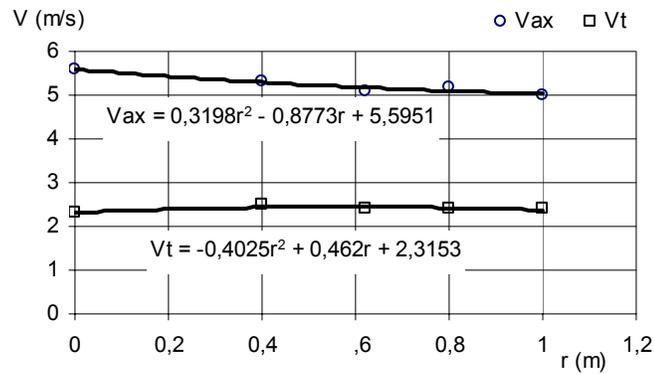


Gráfico 56. Velocidad axial y tangencial vs el radio del aeromotor, tomada a una separación de 0.2 m, velocidad de giro del motor de 1700 revoluciones.

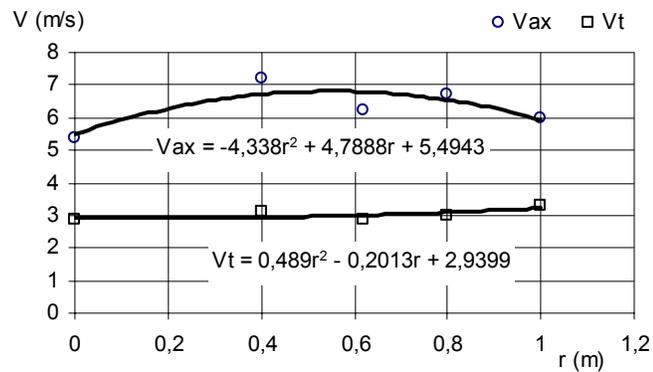


Gráfico 57. Velocidad axial y tangencial vs el radio del aeromotor, tomada a una separación de 0.2 m, velocidad de giro del motor de 1800 revoluciones.

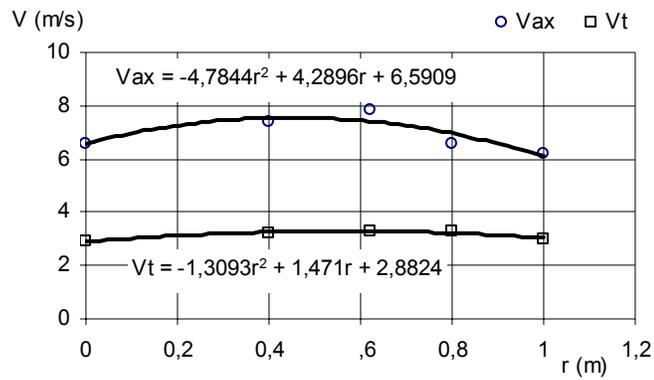


Grafico 58. Velocidad axial y tangencial vs el radio del aeromotor, tomada a una separación de 0.2 m, velocidad de giro del motor de 1900 revoluciones.

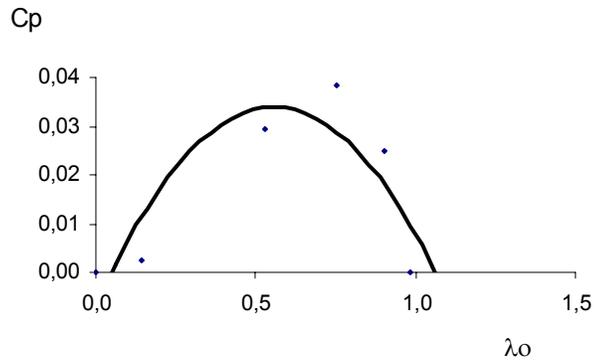


Grafico 59. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 2.89 m/s.

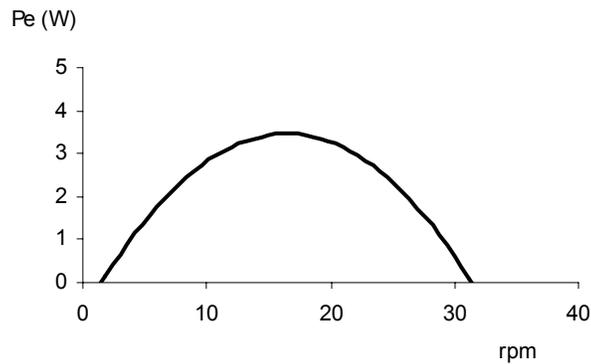


Grafico 60. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 2.89 m/s.

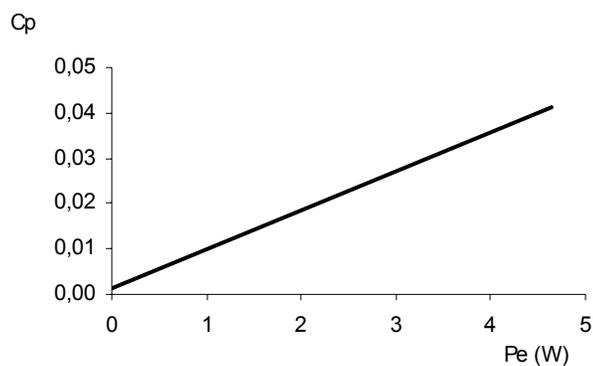


Grafico 61. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 2.89 m/s.

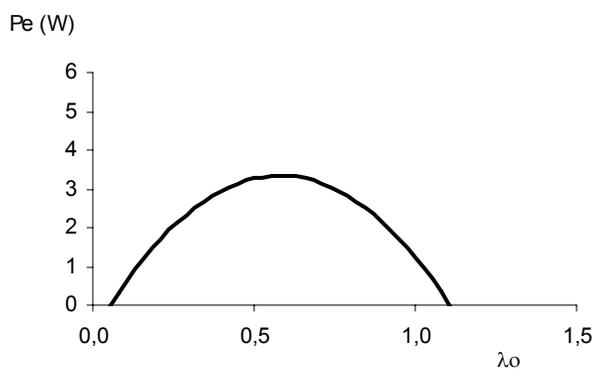


Grafico 62. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 2.89 m/s.

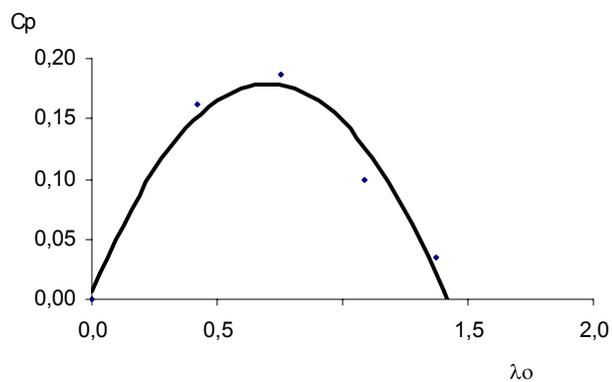


Grafico 63. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 3.94 m/s.

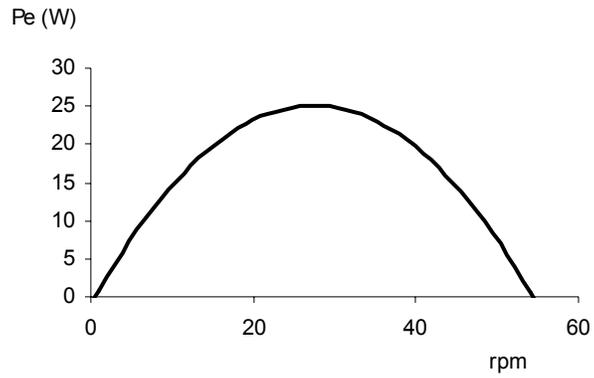


Gráfico 64. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 3.94 m/s.

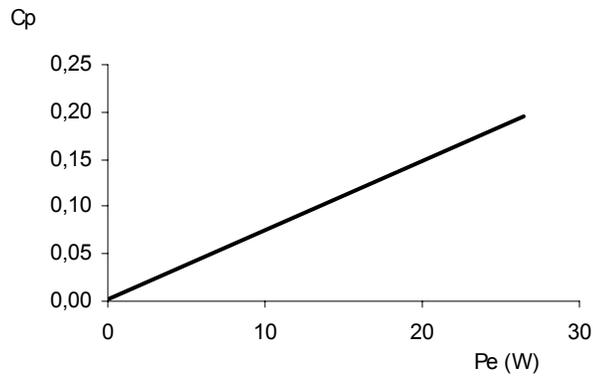


Gráfico 65. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 3.94 m/s.

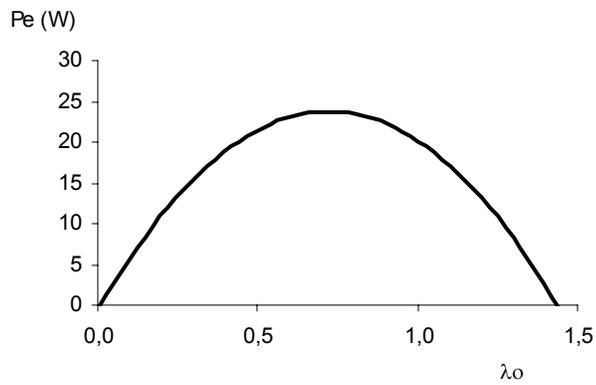


Gráfico 66. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 3.94 m/s.

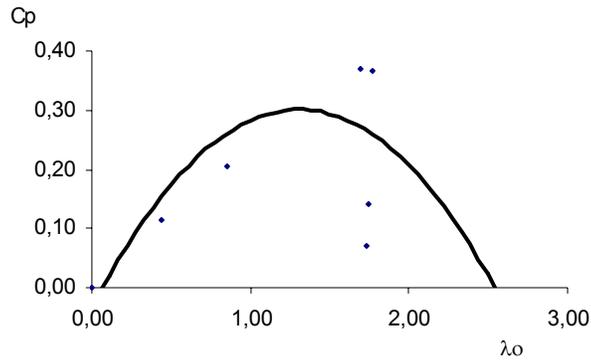


Grafico 67. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 5.15 m/s.

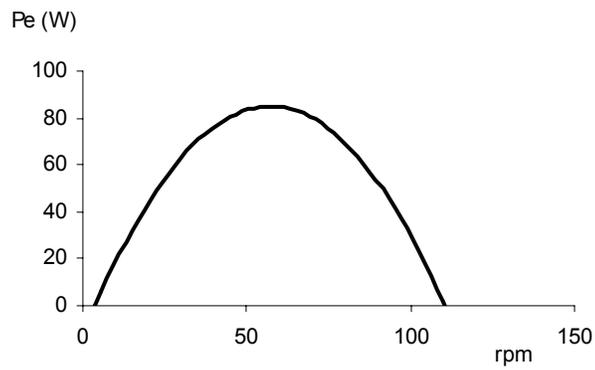


Grafico 68. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 5.15 m/s.

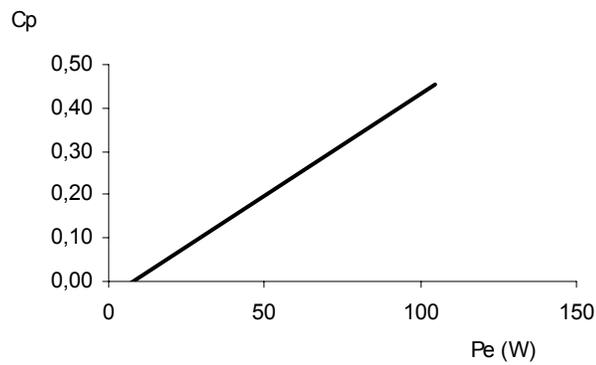


Grafico 69. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 5.15 m/s.

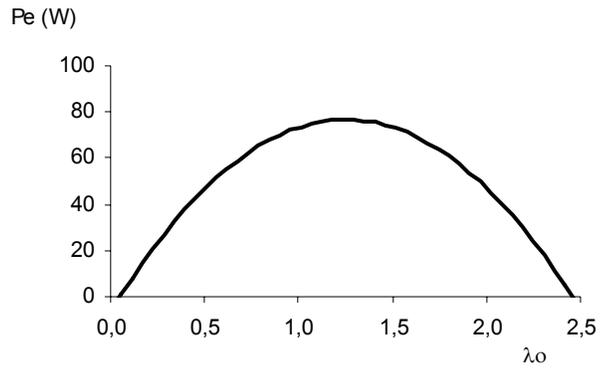


Grafico 70. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 5.15 m/s.

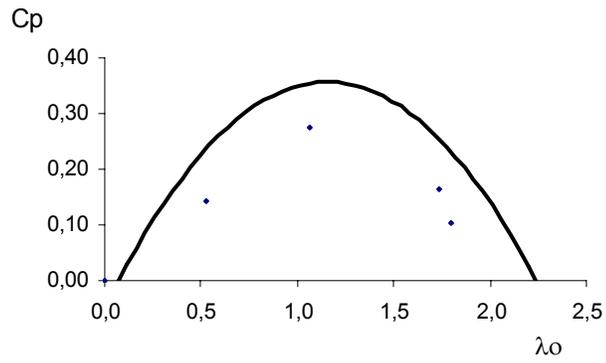


Grafico 71. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 5.63 m/s.

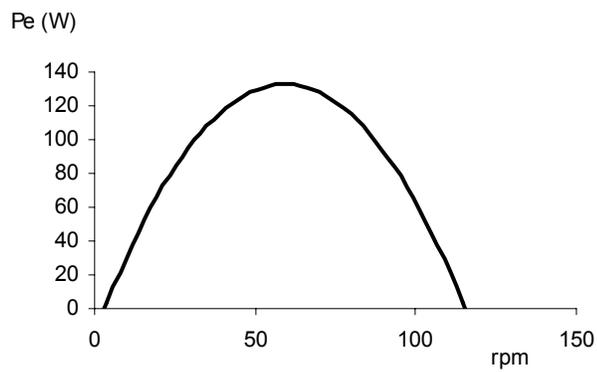


Grafico 72. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 5.63 m/s.

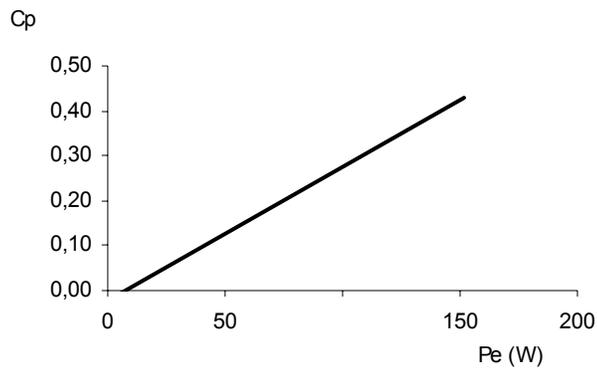


Grafico 73. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 5.63 m/s.

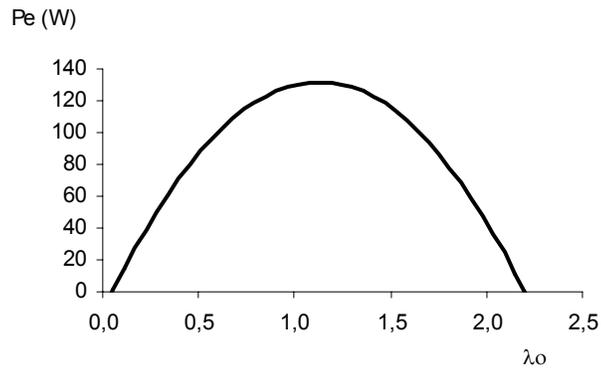


Grafico 74. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 5.63 m/s.

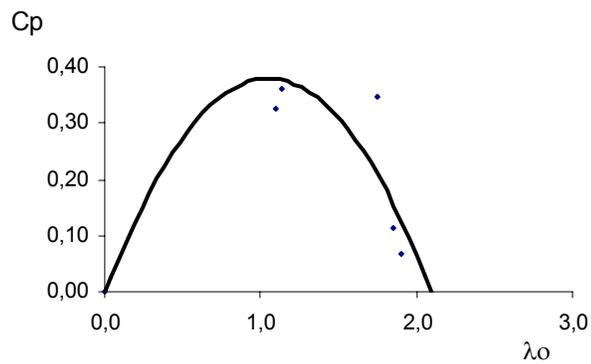


Grafico 75. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 6.63 m/s.

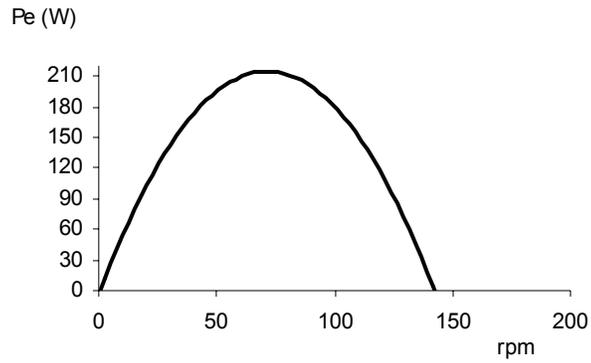


Grafico 76. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 6.63 m/s.

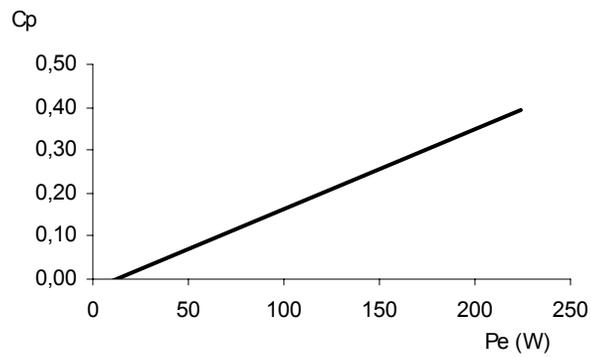


Grafico 77. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 6.63 m/s.

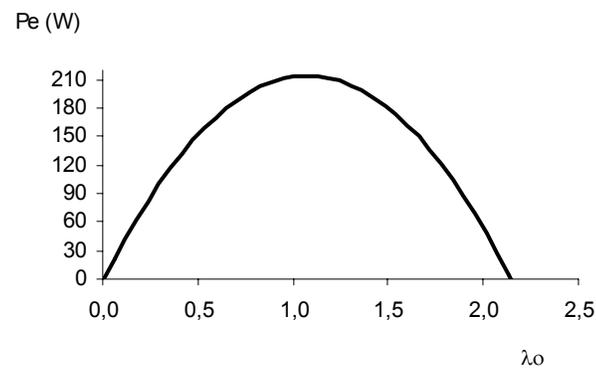


Grafico 78. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 6.63 m/s.

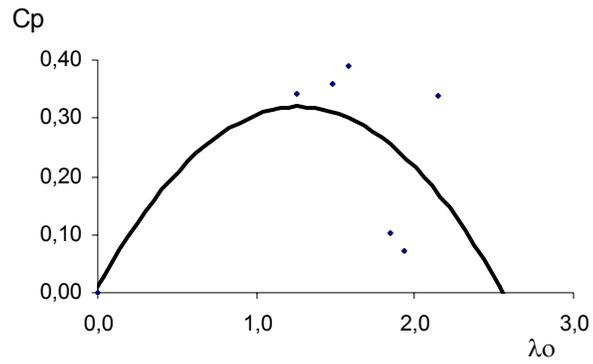


Grafico 79. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 6.80 m/s.

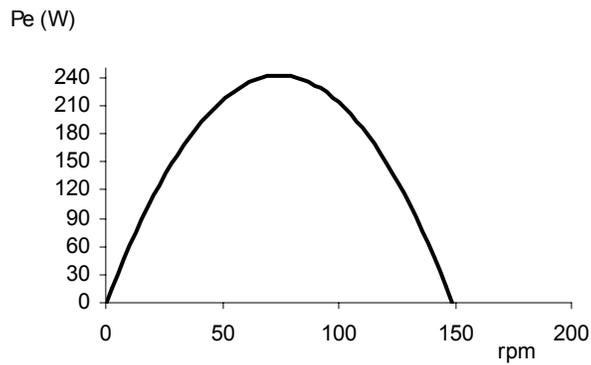


Grafico 80. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 6.80 m/s.

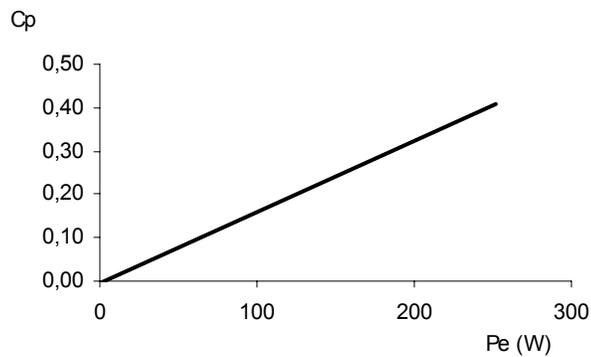


Grafico 81. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 6.80 m/s.

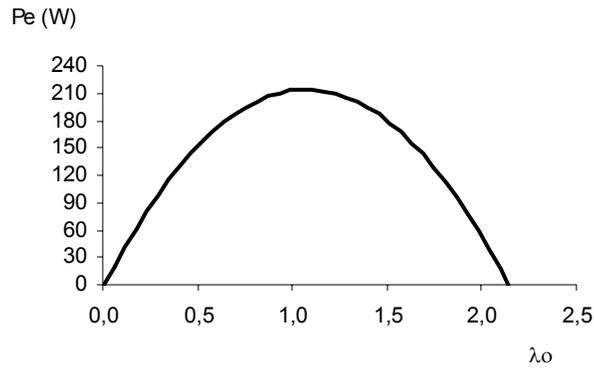


Gráfico 82. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 6.80 m/s.

4.6 Mediciones considerando solamente la componente axial del flujo.

Mediciones efectuadas considerando la componente axial de la velocidad del viento, sin realizar estudio previo al comportamiento del flujo a medida que se aproxima al molino, ya que los estudios realizados en las pruebas anteriores determinaron dicho comportamiento, por lo tanto seguidamente se muestran las graficas obtenidas del procesamiento de los datos con las respectivas ecuaciones donde se consideran los parámetros característicos.

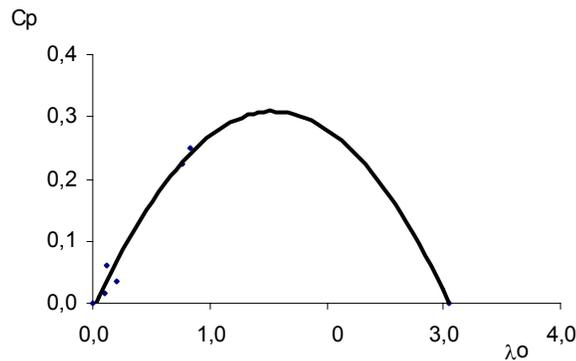


Gráfico 83. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 2.74 m/s.

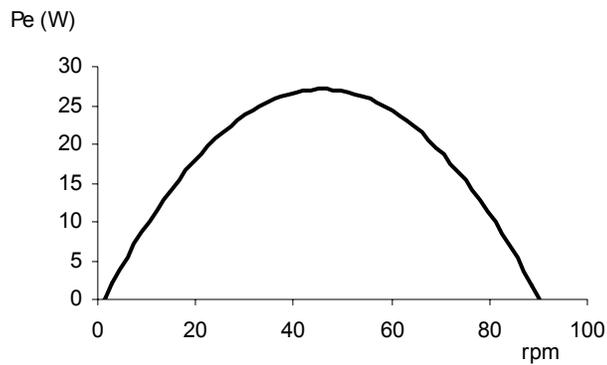


Grafico 84. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 2.74 m/s.

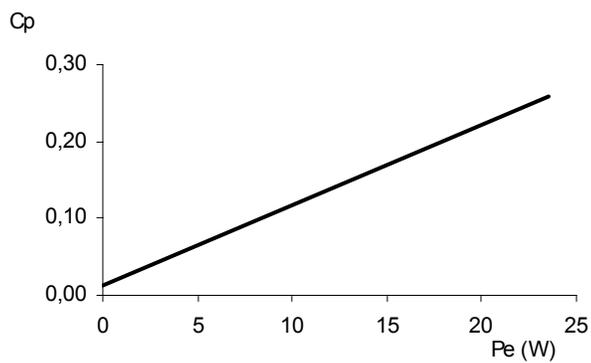


Grafico 85. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 2.74 m/s.

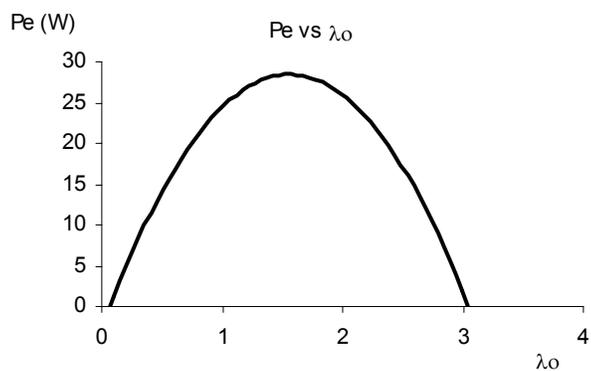


Grafico 86. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 2.74 m/s.

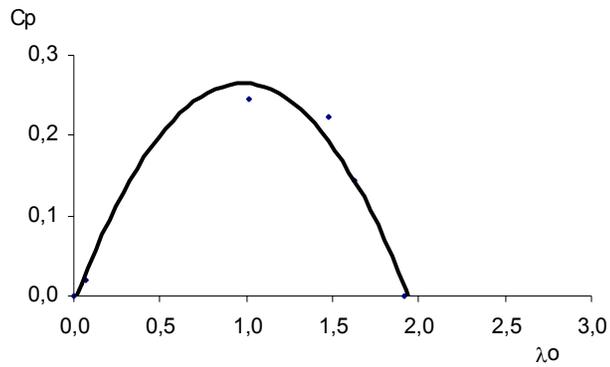


Grafico 87. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 3.70 m/s.

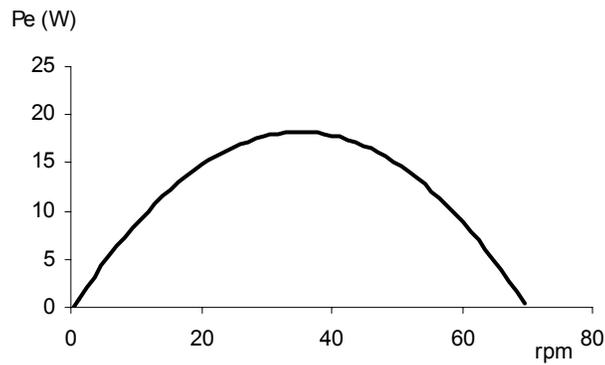


Grafico 88. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 3.70 m/s.

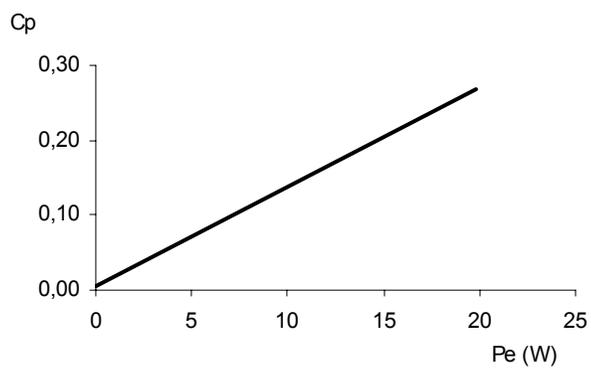


Grafico 89. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 3.70 m/s.

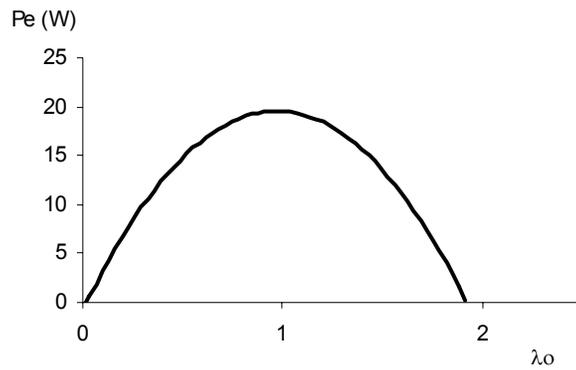


Grafico 90. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 3.70 m/s.

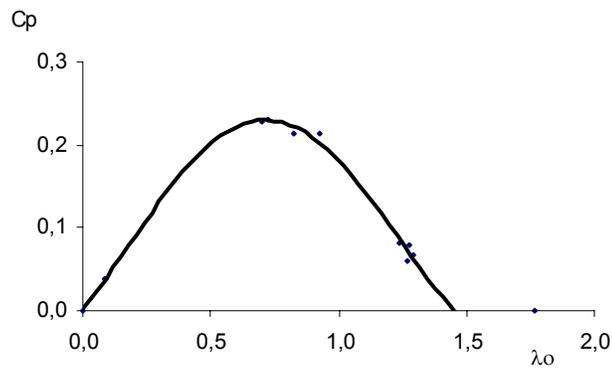


Grafico 91. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 5.20 m/s.

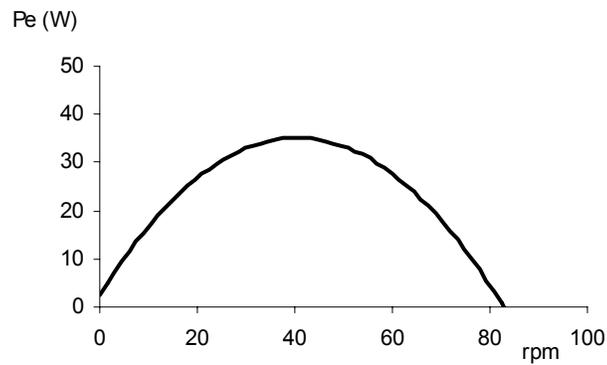


Grafico 92. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 5.20 m/s.

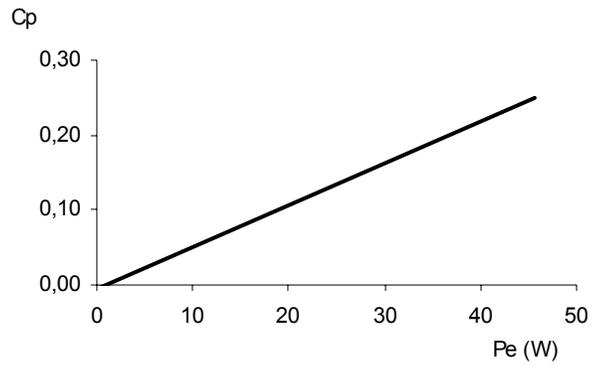


Grafico 93. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 5.20 m/s.

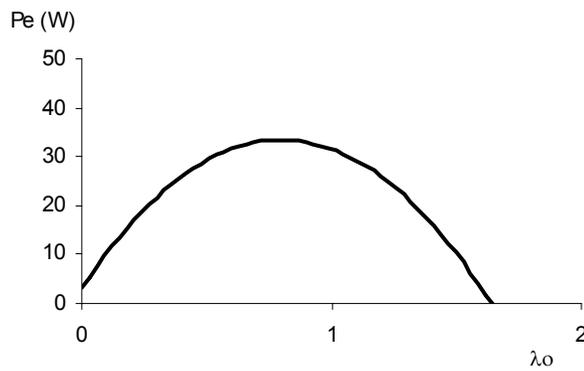


Grafico 94. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 5.20 m/s.

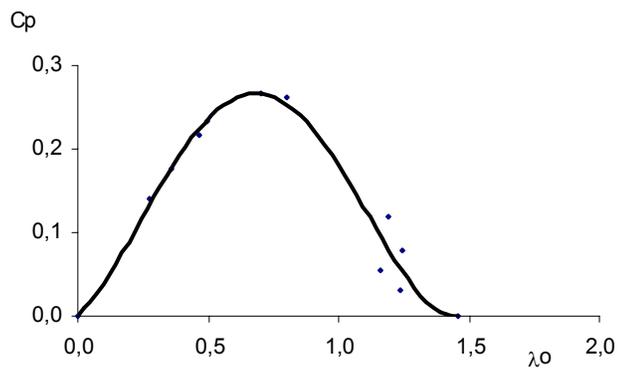


Grafico 95. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 5.35 m/s.

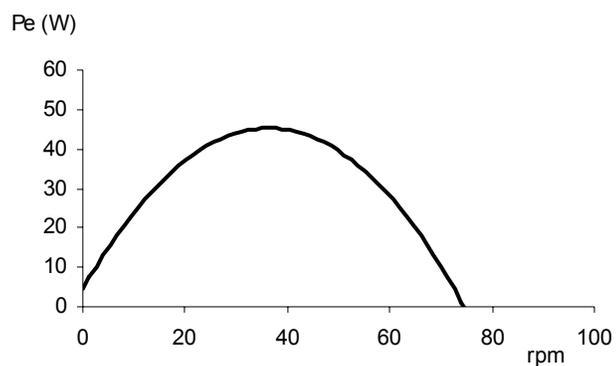


Grafico 96. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 5.35 m/s.

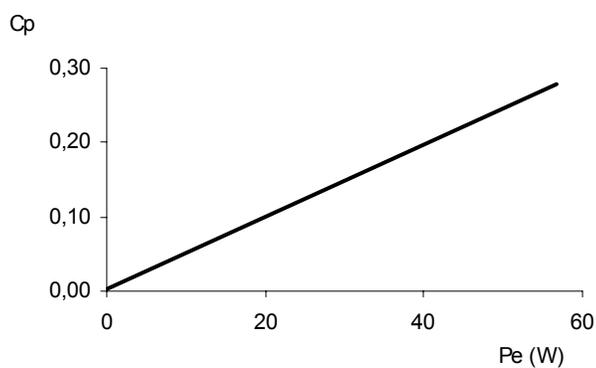


Grafico 97. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 5.35 m/s.

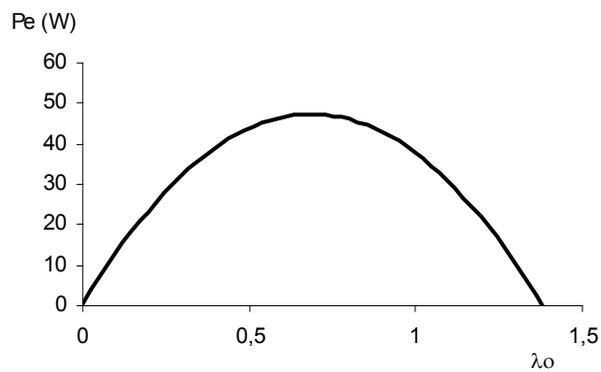


Grafico 98. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 5.35 m/s.

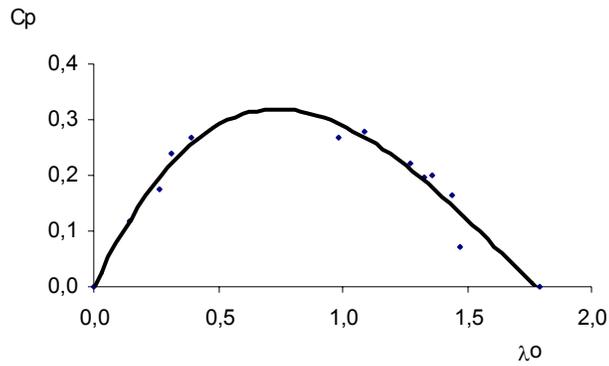


Grafico 99. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 6.21 m/s.

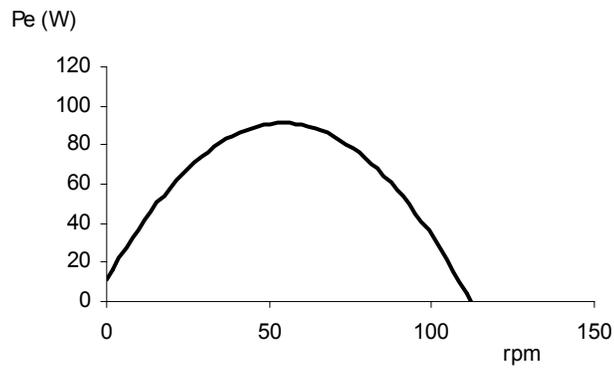


Grafico 100. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 6.21 m/s.

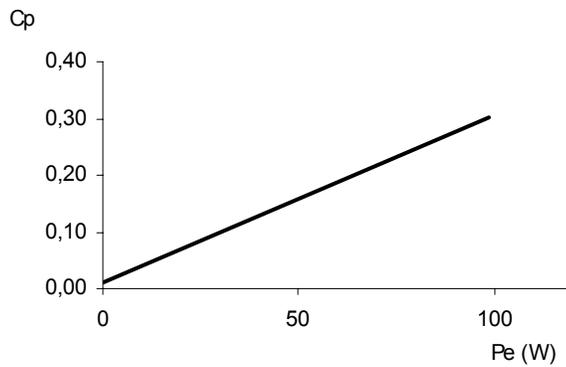


Grafico 101. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 6.21 m/s.

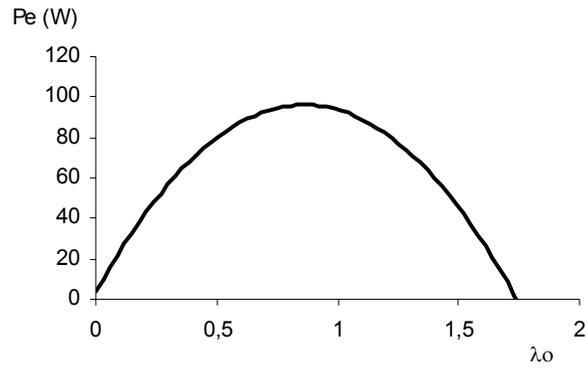


Grafico 102. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 6.21 m/s.

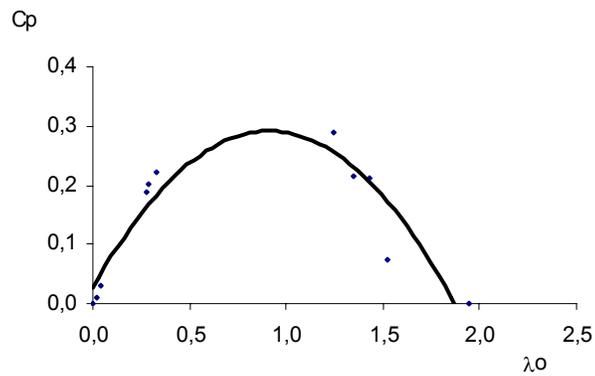


Grafico 103. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 6.24 m/s.

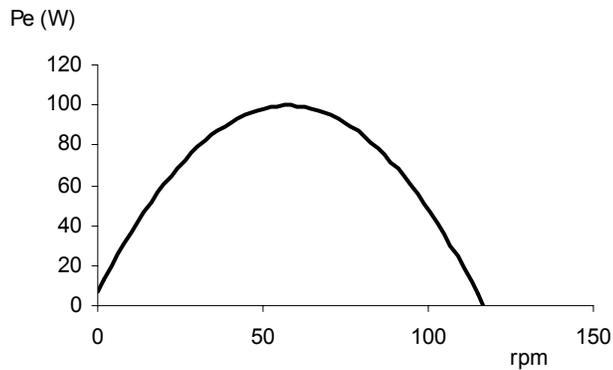


Grafico 104. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 6.24 m/s.

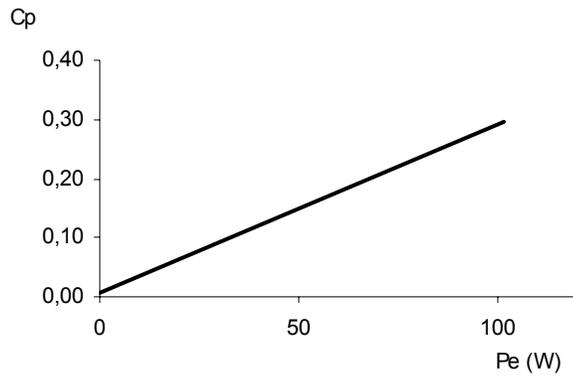


Grafico 105. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 6.24 m/s.

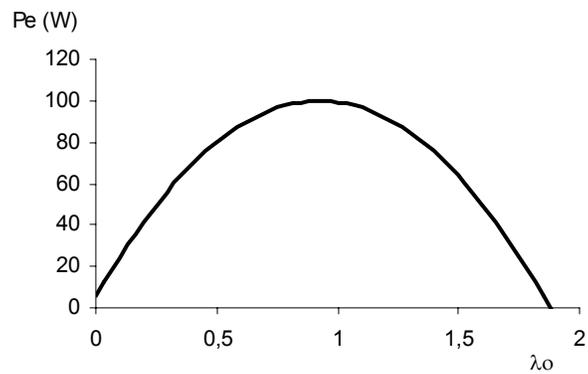


Grafico 106. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 6.24 m/s.

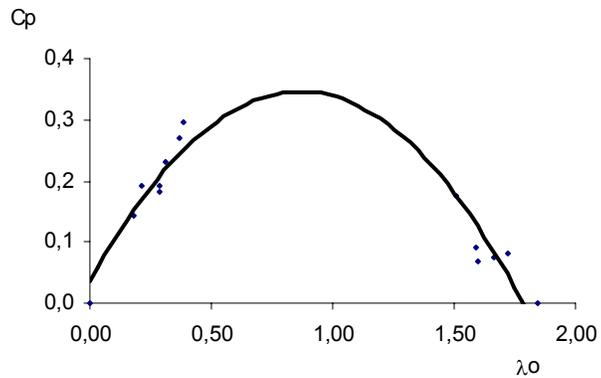


Grafico 107. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 6.59 m/s.

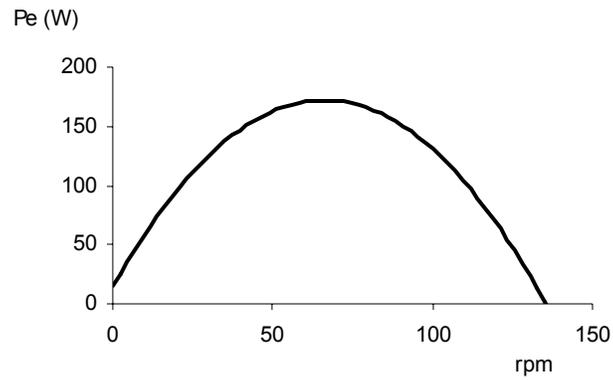


Grafico 108. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 6.59 m/s.

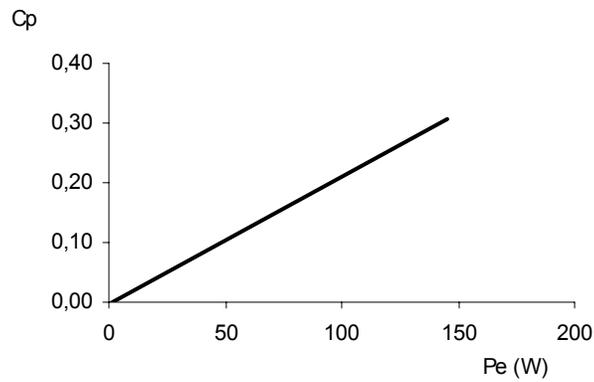


Grafico 109. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 6.59 m/s.

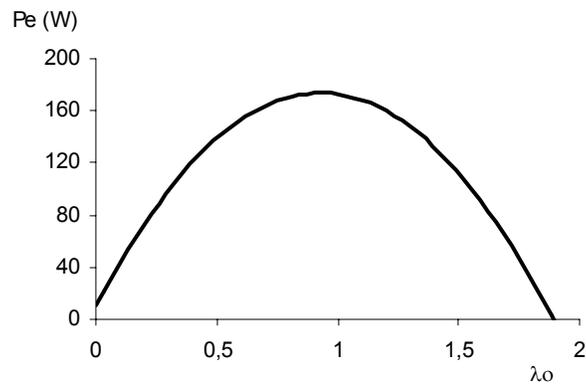


Grafico 110. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 6.59 m/s.

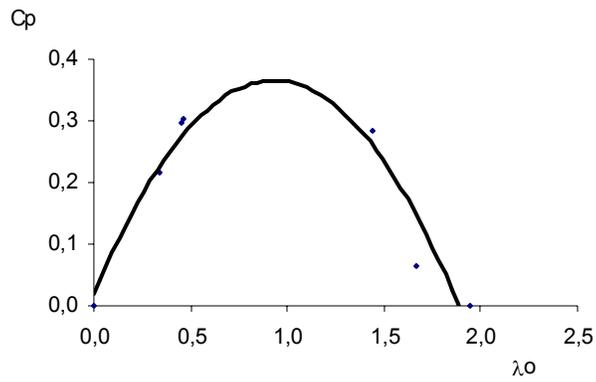


Grafico 111. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 7.17 m/s.

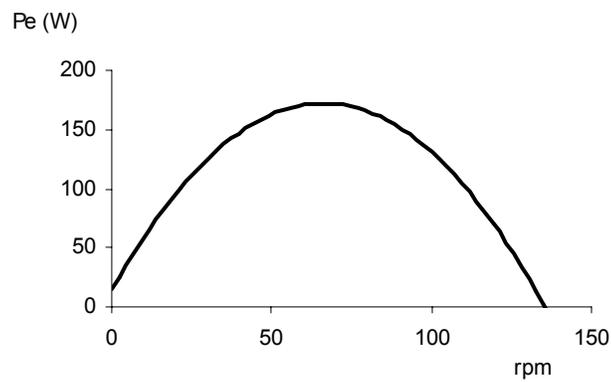


Grafico 112. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 7.17 m/s.

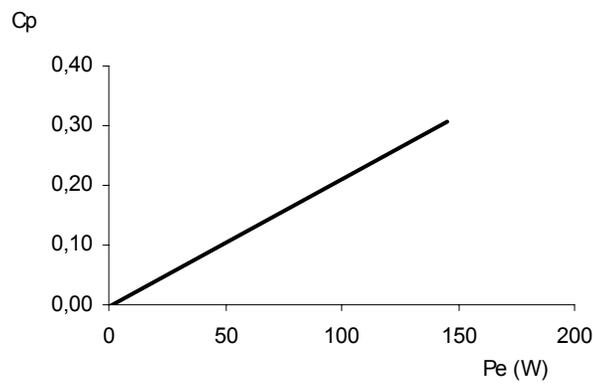


Grafico 113. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 7.17 m/s.

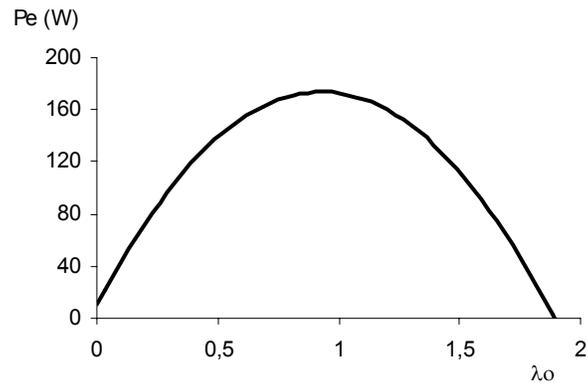


Grafico 114. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 7.17 m/s.

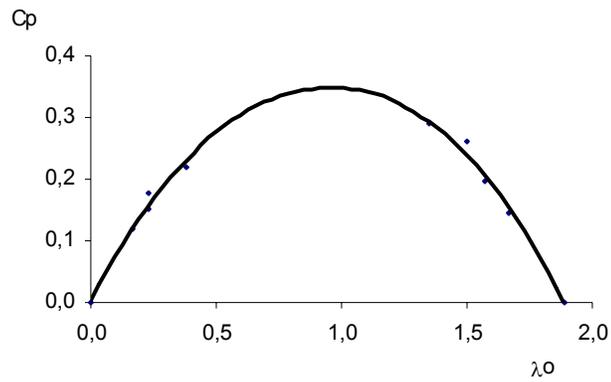


Grafico 115. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 7.71 m/s.

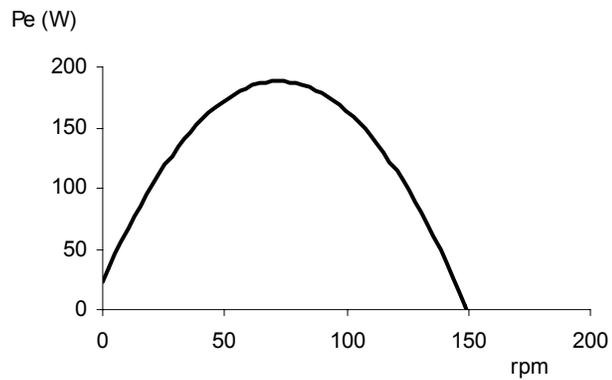


Grafico 116. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 7.71 m/s.

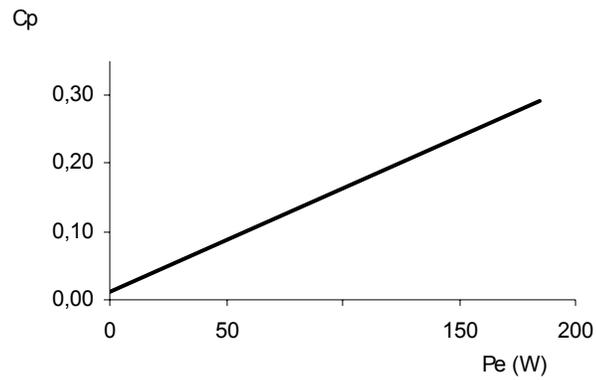


Grafico 117. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 7.71 m/s.

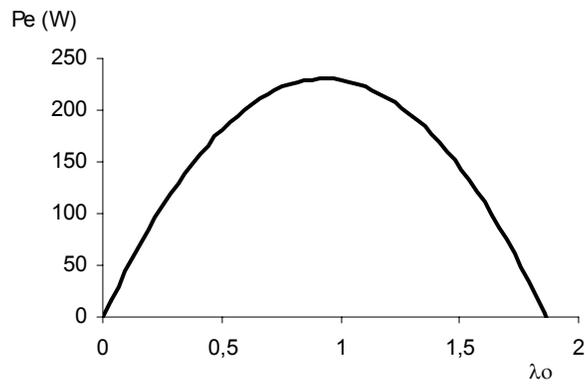


Grafico 118. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 7.71 m/s.

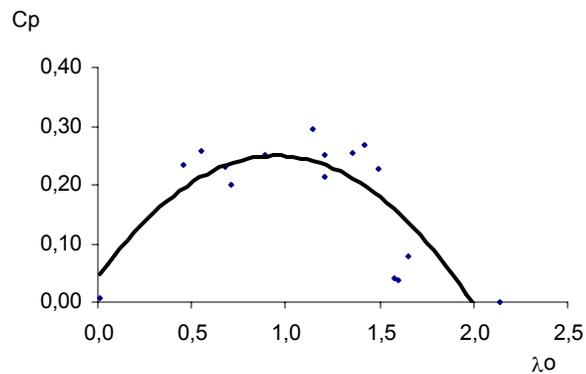


Grafico 119. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 8.85 m/s.

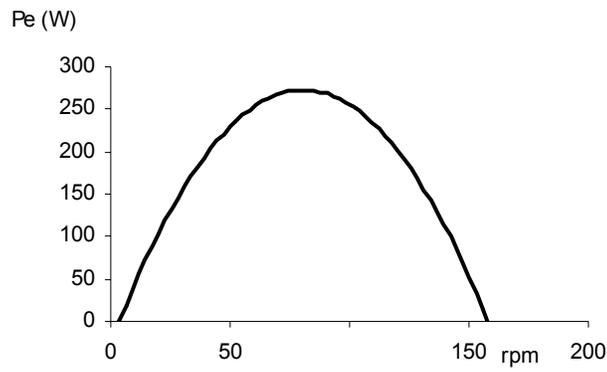


Grafico 120. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 8.85 m/s.

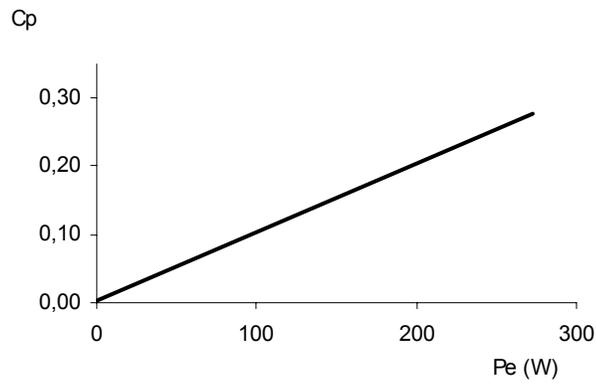


Grafico 121. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 8.85 m/s.

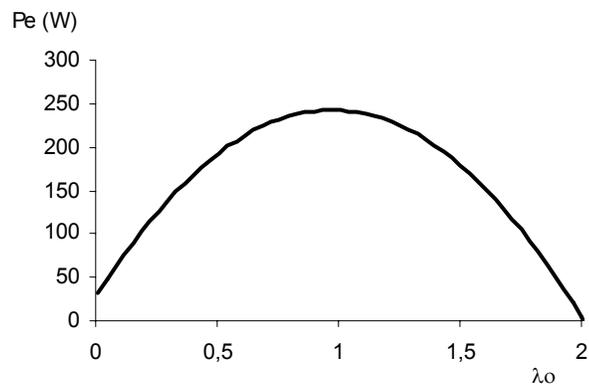


Grafico 122. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 8.85 m/s.

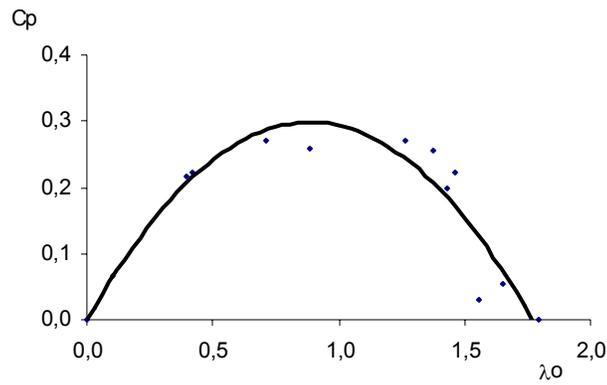


Grafico 123. Coeficiente de potencia contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 9.38 m/s.

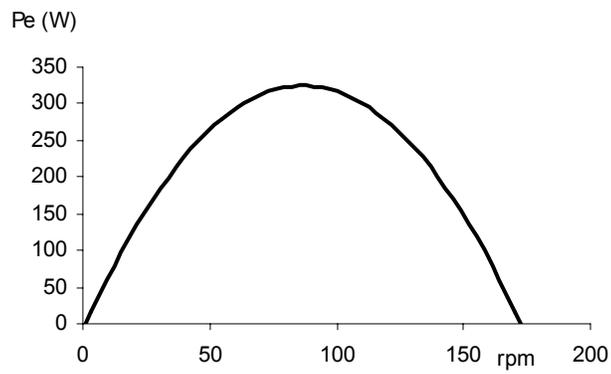


Grafico 124. Potencia en el eje contra rpm para la velocidad axial promedio de 9.38 m/s.

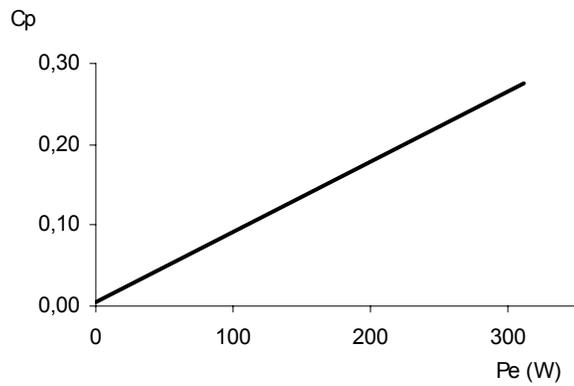


Grafico 125. Coeficiente de potencia contra Potencia en el eje para la velocidad axial promedio de 9.38 m/s.

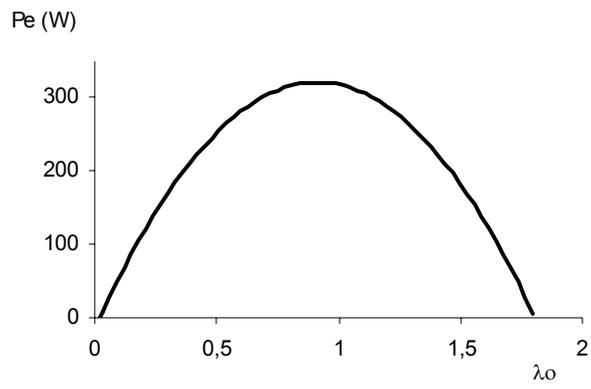


Grafico 126. Potencia en el eje contra relación de velocidades para la velocidad axial promedio de 9.38 m/s.

4.7 Análisis comparativo de resultados.

El comportamiento del flujo de aire generado por la rotación de la hélice del túnel de viento en los distintos regímenes de funcionamiento puso en evidencia la notable variación de las componentes axiales y tangenciales de la velocidad del viento.

El enderezador de flujo como era de esperarse disminuyó significativamente la componente tangencial de la velocidad, efecto que se demostró por las mediciones efectuadas.

A mediada que el flujo de aire se aproxima al aeromotor se aprecia la disminución de la velocidad tangencial, después de haber pasado por el enderezador de flujo, efecto que no sucede en igual magnitud cuando se obtuvieron las mediciones sin el enderezador.

Según los datos obtenidos en el arreglo sin el enderezador cuando se realizaron las mediciones en las secciones transversales se pudo observar la irregularidad en el perfil de velocidades a la salida del túnel y a la llegada del aeromotor, por los efectos de interferencia producido por el motor y su base.

También se puede apreciar que el valor de la relación de velocidades $\lambda_o=2.14$ que se obtuvo en los tres arreglos experimentales.

Para velocidades axiales del viento mayores a 4 m/s se obtuvo la máxima potencia en el eje para valores de revoluciones que oscilan entre 50 y 100 rpm, para valores menores de velocidad axial de viento se encontró que el aeromotor gira en un rango de 30 a 60 rpm.

El valor máximo del coeficiente de potencia resultó ser $C_p = 0.33$, comparable con los datos existentes en la literatura.

El coeficiente de potencia máximo se obtuvo en el experimento donde se colocó el enderezador de flujo, para la velocidad axial de 5.76 m/s y la velocidad tangencial de 2.04 m/s. En el experimento donde se consideraron las velocidades axiales y tangenciales, sin el enderezador, el máximo coeficiente de potencia puntual fue de 0.39 para las velocidades axial de 6.66 m/s y tangencial de 4.43 m/s. En el

ultimo experimento donde solamente se considero la velocidad axial sin enderezador el coeficiente de potencia fue de 0.39 para la velocidad axial de 7.17 m/s.

CAPITULO 5. Diseño del sistema de bombeo para la mesa de los hachos.

5.1 Esquema del sistema de bombeo.

En la siguiente figura se muestra la disposición de los elementos que componen el sistema eólico de bombeo.

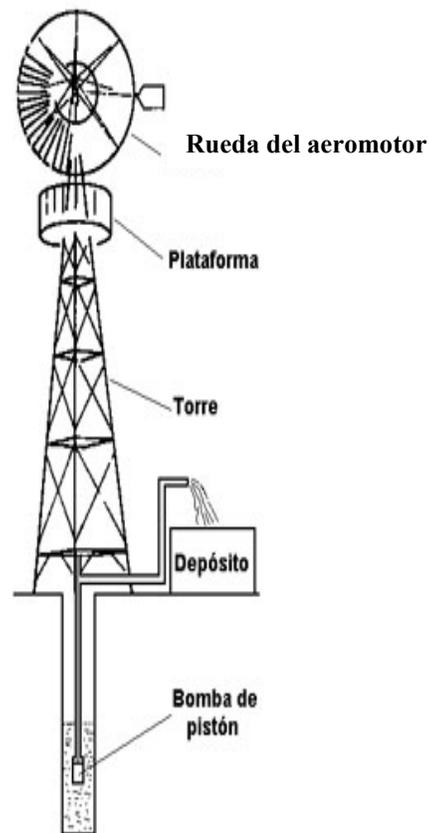


Figura 5. Disposición del sistema de bombeo con los diferentes elementos y equipos.

El esquema anterior es la solución obtenida para la región en estudio, con todas las especificaciones técnicas de los elementos como bomba y molino en los anexos, para la torre y depósito del agua se recomienda usar lo aportado por la empresa fabricante del sistema de bombeo.

5.2 Calculo del caudal de agua para distintos regímenes del viento.

A continuación se muestra el calculo de el caudal producido por la acción del viento de los cuales se realizara una comparación entre estos y la demanda obtenida en la zona de manera de realizar una selección de bomba adecuada para el sistema de bombeo.

En la zona de la mesa de los hachos el viento tiene una velocidad promedio que varia entre 3 m/s y 6 m/s

Cálculos de los caudales

El caudal de la bomba varia directamente proporcional con la velocidad de giro de la biela y depende de la velocidad de giro del aeromotor que esta condicionado por la velocidad del viento.

N_1 = Revoluciones del eje principal del molino.

N_2 = Revoluciones del eje que acciona la biela de la bomba

$$\text{En donde } N_2 = \frac{N_1 \cdot Z_1}{Z_2} \quad (6)$$

Z_1 = número de dientes del piñón menor e igual a 14 dientes.

Z_2 = número de dientes del engrane mayor de transmisión al sistema biela-manivela es igual a 46 dientes.

Tabla 14. Velocidades de giro del aeromotor y del eje de salida de la caja reductora.

N1 (rpm)	N2 (rpm)
30	9.13
40	12.17
50	15.22
60	18.26
70	21.30
80	24.35

Cálculos los caudales teóricos y reales para diferentes revoluciones del molino.

Q_t = caudal teórico.

Q_r = caudal real.

$$Q_t = \frac{\pi}{4} * D^2 * 2 * R * \frac{N1}{60} \quad (7)$$

$$Q_r = Q_t * \eta_v \quad (8)$$

$\eta_v = 0.9$ (eficiencia volumétrica).

$S = 190$ mm (desplazamiento), en donde $2 \cdot R = S$ y R es el radio de la biela bomba.

En las tablas 15, 16 y 17 se procesan los valores del caudal teórico y el real en m^3/s y el Litros/días para seis valores de la velocidad de giro del aeromotor

Tabla 15. Caudales teórico y real para la bomba de 4 pulg. de diámetro.

N1 (rpm)	$Q_t (m^3/s)$	$Q_r (m^3/s)$	$Q_r (L/D)$
30	0,0002344	0,00021096	18226,973
40	0,00031253	0,00028128	24302,6306
50	0,00039067	0,0003516	30378,2883
60	0,0004688	0,00042192	36453,946
70	0,00054693	0,00049224	42529,6036
80	0,00062507	0,00056256	48605,2613

Tabla 16. Caudales teórico y real para la bomba de 3 pulg. de diámetro.

Ni (rpm)	$Q_t (m^3/s)$	$Q_r (m^3/s)$	$Q_r (L/D)$
30	0,00013191	0,00011872	10257,3832
40	0,00017588	0,00015829	13676,5109
50	0,00021985	0,00019787	17095,6387
60	0,00026382	0,00023744	20514,7664
70	0,00030779	0,00027701	23933,8941
80	0,00035176	0,00031659	27353,0219

Tabla 17. Caudales teórico y real para la bomba de 2.1/2 pulg. de diámetro.

N1 (rpm)	Qt(m ³ /s)	Qr (m ³ /s)	Qr (L/D)
30	0,00549376	0,00494438	427194,679
40	0,00732501	0,00659251	569592,905
50	0,00915626	0,00824064	711991,132
60	0,01098752	0,00988877	854389,358
70	0,01281877	0,01153689	996787,584
80	0,01465002	0,01318502	1139185,81

La relación entre la velocidad de giro, N1; del aeromotor y la velocidad del viento depende, en el caso de un grupo de bombeo, de la altura, tal como resulta del balance energético:

$$P_A * \eta_T = P_B \quad (9)$$

donde:

$$P_A = \frac{\rho}{2} * A * V^3 \quad (10)$$

$$P_A = \omega_A * T_A \quad (11)$$

$$P_B = \frac{\gamma * Q * H}{\eta_B} \quad (12)$$

$$\omega_A = \frac{\pi * N1}{30} \quad (13)$$

T_A – Torque en el eje del aeromotor.

H - Altura de bombeo.

γ – Peso específico.

P – Densidad.

η_T – Eficiencia de la transmisión.

η_B – Eficiencia de la bomba.

En consecuencia en las tablas 15 – 17 no se puede indicar el valor de la velocidad del viento asociado a la velocidad de giro N1 del aeromotor. Para el caso concreto estudiado, al evaluar la altura de bombeo se puede determinar la correlación entre V y N1.

Calculo de la potencia de la bomba

Como se esta trabajando con diferentes caudales para poder determinar cual es la mejor opción en cuanto a la escogencia final de los elementos que van a conformar el sistema de bombeo a continuación se realizara un breve análisis de la potencia de la bomba.

Se va a trabajar en función a las bombas existentes en la empresa que fabrica el sistema de bombeo (INDUSTRIAS MARULLO), los diámetros de estas bombas son de 2.1/2”, 3” y 4”.

La potencia al eje de la bomba es:

$$P_B = \frac{Q * H * \gamma}{\eta_B} \quad (14)$$

En donde:

Q es el caudal bombeado.

H la altura de bombeo (altura geométrica más las perdidas de carga de la tubería).

γ peso específico del agua.

η_B eficiencia de la bomba.

Como se observa se realizaran seis cálculos de la potencia, debido a que se tomaron igual cantidad de caudales y los valores de las variables son los siguientes.

En el caso de la Mesa de los Hachos

H = 23 metros

$$\gamma = 9800 \text{ N/m}^3$$

$$\eta_B = 0.9$$

Tabla 18. Resultados para la bomba de 4 pulg. de diámetro.

P_B (W)	N1 (rpm)	Q (m3/s)	H (m)	V_{ax} (m/s)
52.83	30	0.00021096	23	3.7
70.44	40	0.00028128	23	3.74
88.05	50	0.0003516	23	4.94
105.66	60	0.00042192	23	5.56
123.27	70	0.00049224	23	5.76
141.65	80	0.00056256	23	6.32

Tabla 19. Resultados para la bomba de 3 pulg. de diámetro.

P_B (W)	N1 (rpm)	Q (m3/s)	H (m)	V_{ax} (m/s)
29.73	30	0.00011872	23	3.7
39.64	40	0.00015829	23	3.74
49.55	50	0.00019787	23	4.94
59.46	60	0.00023744	23	5.56
69.37	70	0.00027701	23	5.76
79.28	80	0.00031659	23	6.32

Tabla 20. Resultados para la bomba de 2 1/2 pulg. de diámetro.

P_B (W)	N1 (rpm)	Q (m3/s)	H (m)	V_{ax} (m/s)
20.63	30	0.00494438	23	3.7
27.51	40	0.00659251	23	3.74
34.39	50	0.00824064	23	4.94
41.27	60	0.00988877	23	5.56
48.15	70	0.01153689	23	5.76
55.03	80	0.01318502	23	6.32

De acuerdo a estos resultados, la potencia requerida en los tres casos analizados esta asegurada por la potencia generada por el eje del molino y de acuerdo

a la escogencia de la misma hay que tomar en cuenta los costos de las bombas por lo cuál se recomienda la bomba de 2" ½ de diámetro ya que la misma cubre la demanda necesaria y a su vez es mas económica que las otras dos. Hay que tomar en cuenta que estos cálculos son para el molino de 2 metros de diámetro a el cuál se le realizo el estudio, ya que el producido por la empresa comercialmente más frecuentemente es el de 3 metros de diámetro por lo cuál se deben hacer unas modificaciones.

Transposición de los resultados obtenidos para el aeromotor de tres metros.

Para la transposición de los resultados sobre el modelo a los aeromotores industriales, se utilizan las leyes de semejanza dinámica, considerando que los dos aeromotores tienen la misma eficacia:

$$\left(\frac{P}{P_1}\right) = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 * \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5 \quad (15)$$

$$\left(\frac{D_1 * N_1}{V_{01}}\right) = \left(\frac{D_2 * N_2}{V_{02}}\right) \quad (16)$$

eliminando el cociente $\frac{N_1}{N_2}$ entre ambas ecuaciones se tiene lo siguiente:

$$\left(\frac{P_1}{P}\right) = \left(\frac{V_{01}}{V_{02}}\right)^3 * \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad (17)$$

Donde el sub-índice 1 se refiere al aeromotor industrial mientras que las magnitudes del modelo de 2 metros es de sub-índice 2. La potencia (P), representa la obtenida en las pruebas del aeromotor a escala de 2 metros de diámetro, con las especificaciones anteriores.

La potencia para el molino de 3 metros es:

$$P_1 = \left(\frac{V_{01}}{V_{02}} \right)^3 * \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 * P \quad (18)$$

La velocidad del viento necesaria resulta ser:

$$V_{01} = \left(\frac{D_1 * N_1}{D_2 * N_2} \right) * V_{02} \quad (19)$$

Bajo las siguientes condiciones óptimas de funcionamiento del aeromotor consideramos los siguientes parámetros de referencia para realizar el calculo:

Velocidad del viento = 5.7 m/s

Potencia del eje = 113 W

Velocidad de giro = 70 r.p.m.

Tabla 21. Potencias para un aeromotor de 3 metros de diámetro, obtenida con las relaciones de semejaza

Potencia real (W)	Velocidad del viento (m/s)
254.25	3.7
283.00	4.93
392.95	5.5
929.56	5.7

5.3 Breve análisis económico.

El sistema seleccionado requiere de varios elementos como lo son la torre de 6 metros, el molino con el sistema de engranajes de biela-manivela, tuberías, deposito de agua o tanque, bomba de pistón, el pozo perforado y asentamiento de bases para colocación de la torre. Se debe destacar que este estudio se realizó para el bombeo de agua subterránea para riego y consumo humano, pero debido a la disposición de los fundos en la zona en donde estos se encuentran uno respecto a otro a distancias relativamente grandes y la zona no posee altos relieves ya que es muy llana, el mejor sistema ya que es mas económico es de disponer de un tanque principal para almacenar el agua y desde éste repartirla a los fundos, utilizando algún tipo de transporte ya que por bombeo es imposible porque no existe electricidad, o ubicar un deposito lo suficientemente alto para que caiga por gravedad sale muy costoso.

Tubos y conexiones: tubos de 1” y 2”, con una longitud de 6.40 metros ASTM, con un precio unitario de Bs. 24.471 y Bs. 52.490 respectivamente mas el I.V.A.

Ungredda: tubos de 1” y 2”, con una longitud de 6.40 metros ASTM, con un precio unitario de Bs. 30.645 y Bs. 65.760 respectivamente mas el I.V.A.

Tabla 22. Especificaciones y costos de los Tanques Australianos. Los costos en bolívares son en base a un valor del dólar de 1380 Bs.

Volumen (Litros)	Diámetros (m.)	Precio (Bs.)	Altura Total (m.)	Costos (\$)
57.020	9.10	1.701.609	0.86	1233.05
55.879	6.37	2.121.101,4	1.75	1537.03
61.581	5.46	3.077.275,8	2.62	2229.91
57.020	4.55	4.152.475,2	3.50	3009.04

El costo total del grupo eólico con un tanque Australiano a 12 metro de distancia de la ubicación del pozo es de 3.650.551 Bs sin incluir la perforación del pozo, para el cual el precio oscila entre 5 y 6 millones de bolívares.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La velocidad del viento en la zona de la Mesa de los Hachos es relativamente baja lo que influyó en la escogencia del sistema de bombeo eólico.

El sistema de bombeo escogido consiste en una bomba de pistón con un diámetro de 2.5", un aeromotor multipalas con un diámetro de 2 m y 15 palas, la torre de 12 m de altura, una caja reductora de velocidad una tubería de 2" y 12 m de longitud y un tanque australiano.

La metodología de ensayo permitió obtener los parámetros que caracterizan al flujo generado por la hélice y los de la turbina eólica del tipo multipala.

El flujo de aire a la salida de la hélice mostró un comportamiento helicoidal que se determinó con la toma de datos, la variación de los parámetros de medición y el respectivo análisis, situación que comprobó la correcta suposición de colocar un rectificador de flujo.

La uniformización del flujo se realizó colocando un enderezador de flujo con la finalidad de normalizar el ensayo efectuado al aeromotor, además poder hacer las respectivas comparaciones con los otros estudios realizados a aeromotores de este tipo.

Las dos series de mediciones sin enderezador de flujo permite cuantificar la influencia de la componente giratoria del flujo sobre la eficiencia del aeromotor.

El coeficiente de potencia obtenido para este tipo de aeromotor es un tanto elevado en comparación con otros resultados obtenidos en otros experimentos que aparecen en la bibliografía.

Las curvas características trazadas permiten la selección del aeromotor para situaciones concretas de aplicación en sistemas de bombeo.

La potencia generada por el aeromotor satisface la potencia requerida por la bomba para las velocidades de viento que superan los 3 m/s.

El costo que acarrea la instalación de un sistema de bombeo para la Mesa de los hachos es del orden de 3 millones de Bs, pero la perforación del pozo alcanza los 5 millones de Bs.

RECOMENDACIONES.

Continuar la recuperación del laboratorio del túnel de viento, sustituyendo la hélice actual y el motor de combustión interna por una hélice de menor potencia y accionada por un motor eléctrico provisto de un variador de frecuencia electrónico.

Colocarle al túnel la instrumentación requerida para obtener el perfil de velocidades, la caída de presión y la temperatura dentro del túnel con tecnología confiable y actualizada.

Realizar al aeromotor experimentos dentro del túnel de viento para comparar con el coeficiente de potencia obtenido en este trabajo y poder ampliar las especificaciones técnicas, donde se incluya el estudio del perfil de los álabes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

[1] ALARCON, Thais; SECADA, Gregori. **“Calculo, diseño y construcción de un aeromotor de dos aspas”** Tesis. Caracas, UCV, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. 1982. Tutor. Prof. Stefan Zarea.

[2] ANGULO, José; CHONG, Lai. **“Diseño y pruebas de un aeromotor de aspas dobles desfasadas en condiciones de viento natural”**. Tesis. Caracas, UCV, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. 1982. Tutor. Prof. Stefan Zarea.

[3] ARCURI, Santos; PARADA, Mario. **“Diseño y construcción de un aeromotor de alabes inclinados”**. Tesis. Caracas, UCV, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. 1983. Tutor. Prof. Stefan Zarea.

[4] BASTIANÓN Ricardo. **“Energía del viento y diseño de turbinas eólicas”** Ediciones Tiempo de Cultura. Buenos Aires. 1994

[5] BAZZANI, Roberto; Tovar J. **“Pruebas de una turbina eólica de 1.2 Kw.”**.Tesis. Caracas, UCV, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. 1982. Tutor. Prof. Stefan Zarea.

[6] CADIZ D, Juan C. **“La energía eólica tecnología e historia”**. Editorial Unigraf. España 1984.

[7] CAMINO, Grabiél; GABASA, Raúl **“Diseño, construcción y pruebas de un aeromotor de aspas dobles desfasadas”**. Tesis. Caracas, UCV, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. 1984. Tutor. Prof. Stefan Zarea.

[8] CARRILLO Jesús, NAVARRO Luis. **“Proyecto de turbina eólica para ser acoplada en una chimenea solar con el fin de producir fuerza motriz”**. Tesis. Caracas, UCV, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. 1983. Tutor. Prof. Stefan Zarea.

[9] CHITTY, Alejandro. **“Compendio de información eólica de Venezuela”**. Caracas. Ministerio de Energía y Minas, Dirección de Electricidad, Carbón y Otras Energías. 1982

[10] DOMINGUEZ, Andrés; ACOSTA, Guillermo. **“Construcción y pruebas de un aeromotor rodete contrarrotativo”**. Tesis. Caracas, UCV, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. 1984.

[12] DOUNIA, Miguel; MATTIA, Vincenzo **“Diseño y Construcción de un aeromotor de tres aspas”** Tesis. Caracas, UCV, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. 1982. Tutor. Prof. Stefan Zarea.

[13] FERNÁNDEZ P. Carlos. **“Diseño y construcción del modelo de una turbina eólica de eje vertical”**. Tesis. Caracas, UCV, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. 1982. Tutor. Prof. Stefan Zarea.

[14] FLORES, Guillermo; CLEMENTE, Vladimir. **“Estudio del modelo de un aeromotor tipo Darrieus”**. Tesis. Caracas, UCV, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. 1982. Tutor. Prof. Stefan Zarea.

[15] FLORES De Allueva Ada. **“Efectos y tendencias del proceso de ocupación del espacio en la subregión de las mesas de Anzoategui”**. Tesis. Caracas, UCV, Facultad de Humanidades, Escuela de Geografía. 1979.

[16] Gaceta Oficial de la Republica de Venezuela N° 4044 Extraordinaria. Caracas. 1988

[17] LEDESMA D. Bausis. **“Estudio hidrogeológico preliminar región Mesa de Guanipa”**. Tesis, Caracas, UCV, Facultad de Ingeniería, Escuela de Minas y Geología. 1973.

[18] MARULLO Industrias. **“Catalogo de especificaciones del molino de viento”**, Barquisimeto. 2001

[19] LIMONGI, Enrique **“Estudio de la energía solar y eólica para su utilización en los asentamientos rurales y costeros de Venezuela”** tesis. Caracas, UCV, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica.1985

[20] MILANI M. Rodolfo. **“Diseño para nuestra realidad”** editorial USB. Baruta, Venezuela. 1995.

[21] MINISTERIO DEL AMBIENTE.. **“Datos meteorológicos de las Estaciones del Tigre y Ciudad Bolívar”** Caracas Dirección de hidrometeorología 2001

[22] MINISTERIO DE MINAS E HIDROCARBUROS **“2^{do} Congreso Latinoamericano de Geología”**. Caracas Boletín Geología Publicación especial N° 7 tomo V. 1973.

[23] OLADE. **“Prospección, Evaluación y Caracterización de la Energía Eólica”**. Quito Ecuador.1980.

[24] OLADE. **“Aerogeneracion de Energía”**. 2^{da} Edición. Quito Ecuador.1982.

[25] OGAWA Takenori. **“Theoretical of fluids on the flow about Savonius rotor”**
Journal of fluids Engineering, transactions of de ASME Vol 106/85. 1984

[26] OLIVEROS D. A. **“Comportamiento de sistemas eólicos para bombeo, dimensionamiento del sistema y diseño conceptual. Diseño de un sistema de bombeo”** Lima Perú 1981

[27] OROPEZA C: Gustavo, y, MONTILLA M. V. **“Rediseño, construcción y pruebas de aeromotores de alas rectangulares”**. Tesis. Caracas, UCV, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. 1.987. Tutor. Prof. Stefan Zarea.

[28] SANHUEZA L.G. **“Diseño hidráulico de bombas para elevar agua subterránea por medio de molinos de viento”**.Argentina. 1981.

[29] SHIGLEY. Joseph, y, MISCHKE, Charles. **“Diseño en Ingeniería Mecánica”**. Editorial Mc Graw-Hill, 5ª Edición, México. 1990.

[30] TAHA K, Aldos; KOTB, Mohamed. **“Aerodynamics loads on a stationary Savonius rotor”** JSME International Journal series II. Vol 34. N° 1. 1991.

[31] RITTENHOUSE, David. **“La Energía Eólica”**. Editorial Fraterna. Argentina.1984.

[32] RIVAS José, y, ANDARCIA Alfredo. **“Rediseño, construcción y pruebas de un aeromotor de eje vertical y alabes rectos”**. Tesis. Caracas, UCV, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. 1987. Tutor. Prof. Stefan Zarea.

Direcciones web consultadas:

www.windpower.dk/es/tour/wres/calculat.htm
http://www.microsoft.com/ie_intl/es/start/default.asp
www.uacj.mx/Publicaciones/sf/num5/velociag.htm
www.shoa.cl/shoa/meteonavegacion/tema5.htm
www.wfu.edu/albatross/espanol/atwork/dynamic_soaring.htm
www.geocities.com/silvia_larocca/Temas/Met18.htm
www.etsimo.uniovi.es/gma/gauss1_3.htm
www.shoa.cl/shoa/meteonavegacion/tema2.htm
www.ciencianet.com/p44.html
www.cnienlinea.com.mx/cnimclima.asp
www.geocities.com/CapeCanaveral/Launchpad/5249/aerodinamica/vientorelativo.htm
www.eolicasdelsil.com/ESILSA_FUNCIONAERO.htm
www.speedtech.com/es/detail.asp
www.wrh.noaa.gov/sandiego/termino.html
www-istp.gsfc.nasa.gov/Education/Msolwind.html
www.met.igp.gob.pe/cpntc/miscelanea/glosario/
www.igeofcu.unam.mx/posgrado/tesis/tesis1.html
www.agrored.com.mx/agrocultura/64-viento.html
www.cida.ve/meteorol.html
www.astrosen.unam.mx/~jbb/apendice1.html
www.itcr.ac.cr/Gruposdeinteres/Meteorologia/atmosferaspage/ Climatologia.htm
www.geocities.com/cesol999
www.plata.uda.cl/minas/apuntes/Geologia/hidrogeol/01000cont.htm
www.igm.pt/departam/hidro/default.htm
www.ucm.es/info/estratig/chnll
www.eti-geochemistry.com/asica/hidro.html
www.hidrogeo.uma.es/PaginaEspana/Grupo448/Grupo448.htm
www.unesco.org.uy/phi/libros/congreso
www2.uhu.es/dgeo/enlaces/hidro.htm
www.dama.gov.co/aire/abril/abril1.htm
www.meteonet.com.ar/biblioteca/vientos.htm
www.senamhi.gob.pe/instrumental.html
www.elpais.es/suplementos/negocios/20010415/10molinos.html
<http://www.geocities.com/sermetfav/>

ANEXOS

[Anexo 1:](#) Reconocimiento generacional de los sistemas de aprovechamiento eólico.

[Anexo 2:](#) Metodología de medición de la velocidad del viento.

[Anexo 3:](#) Tablas de datos de las mediciones realizadas en la zona de la Mesa de los Hachos.

[Anexo 4:](#)

4.1 Mapa político del estado Anzoátegui.

4.2 Mapa físico de Venezuela.

4.3 Mapa radia solar de Venezuela.

4.4 Sistema de bombeo solar.

4.5 Especificaciones tanques Australianos.

4.6 Especificaciones tanque acero.

4.7 Especificaciones de precios de traslado de agua por medio de camiones cisternas en el estado Zulia.

Anexo 1.

Reconocimiento generacional de los sistemas de aprovechamiento eólico.

Aunque el aprovechamiento de la energía eólica data de las épocas más remotas de la humanidad (los egipcios ya navegaban a vela en el año 4.500 a. c.) la primera noticia que se tiene se refiere a un molino que Heron de Alejandría construyó en el siglo II a. c. para proporcionar aire a su órgano. Los molinos más antiguos que se conocen eran de eje vertical. (referencia bibliográfica 23 y 24)

Hacia el siglo VIII aparecieron en Europa, procedentes del este, grandes molinos de eje horizontal con cuatro aspas. Su fabricación en gran número, en particular por los holandeses, les hizo alcanzar una gran firmeza, pese a que, debido a las dimensiones de sus aspas distaban mucho de recoger en máximo de potencia. Necesitaban una regulación de la orientación de la tela. Siempre sucede esto en los molinos de viento de eje horizontal que han de trabajar siempre frente al viento. Estos molinos eran muy adecuados para vientos del orden de 5 m/s (20 Km/h).

Es a partir de los siglos XII-XIII cuando empieza a generalizarse el uso de los molinos de viento para la elevación de agua y la molienda de grano, los más antiguos aparecieron en Turquía, en Irán y en Afganistán. A principios del siglo XII, Europa se llenó a su vez de molinos, sobre todo en Bélgica y en los Países Bajos. Los molinos de Holanda tienen 4 aspas de lona, mientras que los de Baleares y Portugal tienen 6 aspas, y los de Grecia 12 aspas. Los molinos con gran número de palas determinan velocidades de rotación relativamente bajas y un funcionamiento útil a partir de velocidades del viento del orden de 2 m/s.

Todos estos molinos se mantendrán hasta bien entrado el siglo XIX. El desarrollo de los molinos de viento se interrumpe con la revolución industrial y la utilización masiva de vapor, la electricidad y los combustibles fósiles como fuentes de energía motriz. Es sin embargo en la segunda mitad del siglo XIX cuando tiene lugar uno de los más importantes avances en la tecnología del aprovechamiento del viento, con la aparición del popular "Molino multipalas tipo americano", utilizado

para bombeo de agua prácticamente en todo el mundo, y cuyas características habrían de sentar las bases para el diseño de los modernos generadores eólicos.

Fue entre las guerras mundiales cuando aparecieron, como consecuencia de los progresos técnicos de las hélices de aviación, y con ellas los proyectos de grandes aerogeneradores de dos o tres palas. Se tendió a construir casi únicamente los de dos palas, ya que resultan más baratos. Incluso se pensó en utilizar una única pala equilibrada con un contrapeso. Actualmente predominan los molinos tripalas. Estos aerogeneradores giran más rápidamente que los multipalas, lo que constituye una ventaja cuando se trata de alimentar máquinas de gran velocidad de rotación como los alternadores eléctricos.

Los aeromotores de eje vertical tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección del viento. Por ello se los llama panémonos (todos los vientos). No precisan dispositivos de orientación. En su forma más moderna derivan todos ellos del inventado en 1925 por el ingeniero francés Darrieus, patentado en Estados Unidos y luego caído en un olvido casi total. Su estudio volvió a iniciarse en Canadá en 1973 y en Estados Unidos a partir de 1975

El bajo precio del petróleo determinó entonces la suspensión total de los grandes proyectos en todo el mundo. Pero en los años 70, coincidiendo con la primera crisis del petróleo, se inicia una nueva etapa en el aprovechamiento de la energía del viento. Las aplicaciones de las modernas tecnologías, y en especial de las desarrolladas para la aviación, ha dado como resultado la aparición de una nueva generación de máquinas eólicas muy perfeccionadas, y que permiten su explotación, bajo criterios de rentabilidad económica, en zonas de potencial eólico elevado.

En la década de los noventa comienza el desarrollo de esta energía cuando se toma conciencia de la necesidad de modificar el modelo energético basado en los combustibles fósiles y la energía nuclear, por los problemas que estos causan al medio ambiente.

En los últimos diez años del Siglo XX y, gracias a un desarrollo tecnológico y a un incremento de su competitividad en términos económicos, la energía eólica ha

pasado de ser una utopía marginal a una realidad que se consolida como alternativa futura y, de momento complementaria, a las fuentes contaminantes.

Anexo 2.

Metodología de medición de la velocidad del viento.

La exploración del viento puede establecerse a tres niveles de resolución: la regionalización del viento, la prospección de zonas con buen potencial eólico y la localización de sitios para un aprovechamiento óptimo. (Referencia bibliográfica 23 y 24)

Para la regionalización de los vientos, indudablemente que la red meteorológica de un país y su información histórica son de vital importancia.

Por otra parte, es necesario desarrollar una metodología de análisis sobre cartas, que permita con vientos, determinando la correlación adecuada entre factores topográficos y asociados a una zona de vientos predominantes relativamente constantes o de periodicidad bien definida.

A nivel de localización de sitio, la inspección visual de la topografía local, la evidencia ecológica y la colocación de anemómetros en diferentes sitios para mediciones simultáneas, permitirá localizar el sitio adecuado.

La determinación del sitio adecuado, es relativa a la aplicación que se pretenda hacer de la energía eólica dada su magnitud y los requerimientos a satisfacer. No es lo mismo localizar una aerobomba para un pozo artesiano, donde es el pozo lo que determina el punto de aplicación, a la localización de un aerogenerador de 1 MW de capacidad instalada interconectado a una línea de subtransmisión o de distribución eléctrica.

Aquí es donde surgen cuestiones asociadas a la factibilidad del aprovechamiento de la energía eólica, ellas son:

- a) ¿En que lugares existe viento con la suficiente intensidad como para ser económicamente útil?
- b) ¿Cuáles son las cantidades anuales de energía del viento que pueden ser esperadas en lo sitio?
- c) ¿Cómo se distribuye el tiempo, durante el día, el mes o el año y aún en largos?

d) ¿Cuáles son las duraciones probables de vientos de alta velocidad o de períodos de calma y sus frecuencias durante un determinado tiempo?

Deslindado esto, ¿Cuáles son las características del viento y en consecuencia las influencias topográficas que interesan para su aprovechamiento energético?

Por cuanto a su dirección, el que los vientos dominantes prevalezcan un gran porcentaje de tiempo la uniformidad de los gradientes de presión que los origina; cambios constantes de dirección alrededor de la dominante, son indicativas de turbulencia local que lo demerita. Por lo que a la velocidad respecta, es necesario conocer la distribución estadística de velocidades en períodos diarios, mensuales y anuales. El dato de la velocidad media anual es indicativo de lo que puede esperarse.

La localización de estos sitios se puede hacer en base a cartas topográficas y climatológicas, ya que fuertes desniveles e isobaras muy juntas son indicativos de fuertes gradientes de presión responsables de vientos de naturaleza regional. En el sitio específico, la evidencia ecológica es importante, ya que se manifiesta como deformaciones en los árboles al estar sujetos a esfuerzos continuos ocasionados por los vientos dominantes, siendo el grado de esta deformación indicativa de su velocidad media.

Por otra parte, un buen punto para aprovechamiento eólico tiene que sobresalir sobre las irregularidades del terreno u otros obstáculos: edificios, árboles, rocas, o estar alejados al menos 100 metros, si se requiere de un flujo lo menos turbulento posible.

Localizado un sitio importante y hecha su medición, la curva anual de duración de velocidades se convierte en una curva anual de duración de potencias, al obtener los cubos para los distintos valores de las ordenadas y aplicar la constante de proporcionalidad.

Además de estas mediciones, es necesario conocer las velocidades instantáneas de rachas de viento, que si bien no contribuyen en nada a la energía que se obtiene del viento, dada la inercia de los equipos conversores, es importante conocerlas para considerar los esfuerzos instantáneos a que se sujetan tales equipos. Ya que estos pueden estar localizados a una altura diferente de 10 metros sobre el

suelo, o las mediciones se hacen a la altura deseada o se establece el patrón vertical de distribución de velocidades para ese punto.

Por lo mencionado en la parte anterior, se infiere la necesidad de una metodología de prospección de este recurso. Ahora bien, dada la importancia del aprovechamiento energético que se pretende realizar, será la extensión, profundidad y precisión con que se hará este estudio. Para el presente estudio se realizó la siguiente metodología de la prospección y evaluación de sitios, con las siguientes seis etapas:

Etapa, 1. Obtención y Análisis de Datos

A) Datos meteorológicos existentes*

- 1) Temperaturas
- 2) Precipitación
- 3) Viento en superficie
- 4) Viento en la atmósfera libre
- 5) Registros horarios de viento
 - ✓ Intensidad
 - ✓ Persistencia

* Mensuales, estacionales y anuales.

B) Mapas topográficos de la zona en estudio

Etapa 2. Investigación de Campo. Esta etapa está orientada a realizar una compilación de información sobre la región en estudio, sobre los siguientes aspectos:

- ✓ Uso potencial del suelo
- ✓ Modalidades de propiedad de la tierra
- ✓ Vías de comunicación
- ✓ Recursos naturales
- ✓ Distribución de la población
- ✓ Otros aspectos de interés

Etapa 3. Prospección del Recurso Eólico en un Área Definida. Una región interesante desde el punto de vista de su potencial eólico, puede quedar físicamente limitada a áreas restringidas, como resultado del análisis de la etapa anterior. Así, las

áreas potencialmente aprovechables serán estudiadas para determinar la distribución espacial del viento, esto se hará con una red de anemómetros de relativo bajo costo.

Etapas 4. Verificación de Área. Habiendo localizado los lugares de interés, se procederá a caracterizar el viento en esos lugares. Esto se hará utilizando equipo de mayor calidad y costo. Si las primeras tres etapas se orientaron a determinar intensidad, duración y variación estacional del viento para detectar aquellos lugares de mayor interés energético, en esta etapa se recaba información de interés en relación con el caracterizar el viento en el área.

En términos generales las técnicas de localización de áreas y sitios de interés por su posible potencial energético eólico, las podemos dividir en dos grupos: indirectas y directas, que enumeramos a continuación:

Prospección indirecta.

a- Servicio Meteorológico Nacional. La información histórica de los parámetros climatológicos que los Servicios Meteorológicos de cada país han compilado durante muchos años, es indudablemente el punto de partida para una evaluación de este recurso en cada país de la región; sin embargo, la experiencia ha mostrado que se debe ser cuidadoso al manejar esta información, asegurándose primero de su consistencia y confiabilidad antes de proceder a su análisis.

b- Mapas Climatológicos. El análisis de mapas climatológicos, es un paso preliminar a la prospección directa, por el cual es posible delimitar zonas con probabilidad de vientos aprovechables. Esto se basa en que las zonas de transición de un clima a otro, en razón de topografía, orografía, precipitación, humedad, etc., que determinen una respuesta termodinámica diferente al ciclo diario de insolación, lo que dará lugar a vientos locales de carácter advectivo, similares a brisas mar / tierra en función de la diferencia de temperatura en las capas inferiores de la atmósfera durante el día.

c- *Topónimos y Referencia Oral.* Una investigación de topónimos (nombres de sitios) puede significar una buena referencia de áreas con viento fuerte, cuando al ser significativo este fenómeno, de alguna manera se asocia al nombre del lugar. La referencia oral, no es otra cosa que "dicen que hay mucho viento en tal lugar" para lo

cual el personal que trabaja en instituciones gubernamentales o ministerios, que tienen que realizar trabajos en las zonas rurales, puede ser una fuente de información de mucho valor.

1. Prospección directa.

a. *Encuesta.* La encuesta consiste en la búsqueda sistemática y en la región bajo estudio, de la referencia oral acerca de lugares o zonas donde el viento puede ser interesante desde el punto de vista energético.

b. *Evidencia Ecológica.* La evidencia ecológica es básicamente el conjunto de efectos ocasionados por el viento sobre el terreno y la vegetación en un determinado lugar. Dentro de la investigación para la selección de sitios considerados como probables para el aprovechamiento de la energía eólica, la observación de la evidencia ecológica resulta útil para la obtención de información acerca del comportamiento del viento.

El principal objetivo de la inspección ecológica es la obtención del rango de velocidades y dirección del viento dominante, dado el ahorro de tiempo de investigación que esto puede significar ya que no es empleada ninguna clase de instrumento. Este tipo de análisis involucra una serie de observaciones acerca del terreno y vegetación bajo el efecto de vientos de determinado rango de velocidades, contando que dichos efectos pueden variar según el lugar y que esta inspección es sólo un paso preliminar de estudios más precisos sobre el mismo.

La evidencia ecológica se puede clasificar como:

- ✓ Efectos sobre el terreno
- ✓ Efectos sobre la vegetación

Dentro de los efectos ocasionados sobre el terreno debido a su exposición al viento, podemos contar la erosión y la formación de dunas sobre un medio desértico.

La erosión consiste en el desgaste por rozamiento del viento sobre el terreno, aunque esto no puede ser el único agente físico que la ocasione.

La formación de dunas es la acumulación de arena en montecillos por efecto del viento en zonas desérticas, las que se distribuyen como grandes surcos en forma perpendicular a la dirección del viento dominante.

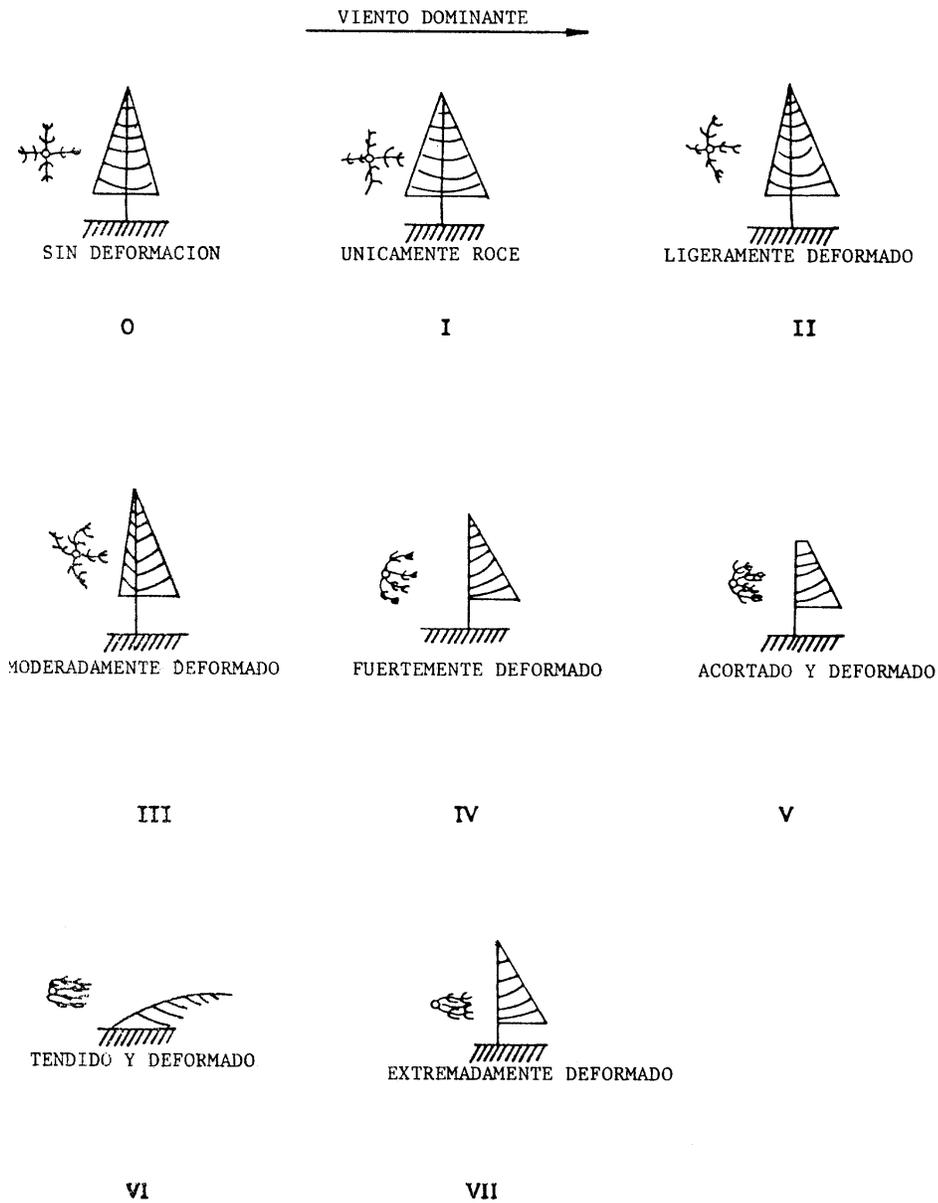


Figura A2-1. Esquema según la escala de viento usada en la deformación de los árboles.

Tabla A2-1. Velocidad media anual según la deformación de los árboles

Esquema de Deformación	I	II	III	IV	V
Rango de deformación media anual probable, mph	6-10	8-12	11-15	12-19	13-22

Los efectos en la vegetación causados por exposición al viento son los siguientes:

- ✓ Cepillado
- ✓ Deformado
- ✓ Tendido

El primer efecto consiste, en el simple roce del viento con la vegetación, vientos con velocidad media anual entre (6 y 10 mph) 2.7 y 4.5 m/s. El segundo consiste, en la deformación con tendencia al viento dominante entre (8 y 10 mph) 3.6 y 8.5 m/s, y por último el tendido que es básicamente una deformación extrema a solo una escasa distancia del suelo con (22 mph) 9.83 m/s.

Existen métodos para llevar a cabo la evaluación de la velocidad en un determinado lugar a partir de los efectos en la vegetación tales como:

- ✓ Observación de la deformación del árbol
- ✓ Cálculo de la relación de deformación.

El primer método es simplemente la observación de la forma del árbol y su comparación con los esquemas que aparecen en la figura de ahí obtenemos el rango de velocidad media anual especificada en la tabla 3.

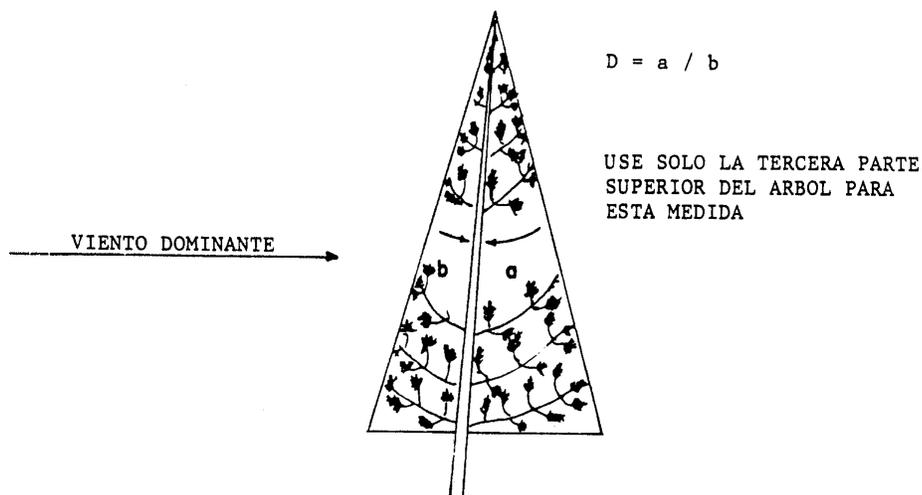


Figura A2-2. Relación de deformación.

Tabla A2-2. Velocidad media anual según la relación de deformación.

Relación de deformación	I	II	III	IV	V	VI	VII
Rango de velocidad media anual probable, mph	4-8	7-10	10-12	12-15	14-18	15-21	16-24

La otra manera es calculando la relación de deformación a partir de una fotografía del árbol tomado en forma perpendicular a la dirección del viento dominante, según la figura 4, en base a ese valor obtenemos el rango de velocidad que le corresponde según la tabla 4

Una precaución que debe tomarse al emplear este tipo de indicadores, es que la ausencia de deformación en un árbol no indica necesariamente que en ese lugar prevalecen vientos débiles, ya que dichos árboles no pueden ser susceptibles a deformación o posiblemente estén expuestos a vientos fuertes en toda dirección. Los árboles empleados para este tipo de análisis, deben ser árboles de hojas perennes, los de variedades caducifolias no sirven para este tipo de análisis, ya que introducen mayor grado de incertidumbre al evaluar el viento.

b. Mediciones In Situ.

i. *Selección de sitios.* Antes de empezar a medir la velocidad del viento, es necesario seleccionar el mejor sitio posible para instalar el anemómetro. Para este fin será útil reiterar algunos conceptos básicos.

Todos los vientos son básicamente el resultado de diferencias de temperatura en la atmósfera y la influencia de las características superficiales del planeta. Los vientos que son significativos para su aprovechamiento energético, pueden ser divididos en dos categorías: los vientos planetarios y los vientos locales.

Los sistemas de vientos planetarios, conocidos normalmente como vientos prevalecientes, son aquellos grandes movimientos que dominan áreas enteras y muestran características direccionales constantes, variando solamente con el movimiento de sistemas de alta y baja presión y con las estaciones del año. En muchos lugares, ellos son los vientos dominantes, y los buenos lugares para un aprovechamiento energético, son aquellos que toman máxima ventaja de los vientos

prevalecientes. Las lomas expuestas al viento, líneas costeras expuestas a vientos prevalecientes, una planicie abierta o una meseta, un valle abierto que corre paralelo a vientos prevalecientes, o el lado expuesto al viento de una colina de flancos con suave pendiente.

Los vientos locales, por el contrario son causados por diferencias de temperatura creadas por condiciones topográficas-locales.

Las brisas tierra-mar, por ejemplo, que soplan del mar hacia la tierra durante el día, y de la tierra hacia el mar durante la noche son debidas simplemente a que la temperatura sobre la tierra es más susceptible de cambiar que sobre el océano. Las brisas de valles y montañas son causadas por los mismos efectos locales y en un día tibio y soleado, los vientos pueden desatarse fuertemente del fondo de un valle a lo largo de las pendientes de colinas adyacentes.

Seleccionar el mejor sitio en áreas donde los vientos locales son dominantes, o son al menos suficientemente fuertes para modificar el efecto de los prevalecientes, es claramente más difícil; además antes de hacer una selección final del sitio, podrán ser requeridas pruebas frecuentes en varios puntos apropiados.

Independientemente de los vientos que sean dominantes, deberá tenerse cuidado para seleccionar un sitio que tenga la mínima cantidad de obstrucciones para el libre flujo del viento. Grandes obstrucciones como cerros, son propicias para crear "sombras de viento", reduciendo la disponibilidad total de viento. Las obstrucciones pequeñas tales como casas, árboles, lomas pequeñas, o lomas con abrupta elevación detrás del sitio de interés, pueden causar interferencia o turbulencia, inutilizando el flujo de viento aprovechable.

Para la instalación del anemómetro, es necesario fijar las condiciones de emplazamiento despejado, a fin de obtener medidas representativas de la zona, es decir que todo obstáculo, (árboles, casas, etc.) deben estar a cierta distancia de la base del instrumento superior a diez veces la altura del obstáculo.

ii. *Altura de medición.* Habiendo localizado el sitio de medición, será necesario establecer la altura mínima para la medición. Convencionalmente esta altura será de 10 metros aunque si la localización de sitios de interés es para fines de

aerogeneración eléctrica, y la presencia de árboles y otros obstáculos pequeños condicionarían una altura del aerogenerador superior a 10 metros, entonces la medición se hará a mayor altura. La turbulencia producida por los obstáculos pequeños no solo reducen la disponibilidad de energía eólica, sino que es nociva para los sistemas conversores de energía eólica al propiciar diferencias de presión y esfuerzos no uniformemente distribuidos en las aspas del rotor.

Un método simple de detectar turbulencia en el sitio de interés, es fijar primero en la punta del mástil del anemómetro uno o dos listones de 1.5 metros. Durante una buena brisa, si los listones flotan rectos y estables, el flujo del viento es uniforme. Pero si bambolean mucho, existe turbulencia y la medición tendrá que hacerse en otro sitio o a mayor altura.

iii. Mediciones. El registro continuo de la velocidad del viento para obtener gráficas de distribución de la velocidad, el uso de compiladores electrónicos para obtener el histograma de velocidades y el de rumbo o energía durante el período, o el uso de anemómetros totalizadores (anemómetro-odómetro) de los que se obtiene velocidad media durante el período, sirven para realizar las primeras evaluaciones energéticas.

Teniendo el anemómetro en funcionamiento, es conveniente cotejar esta información con la del observatorio meteorológico más cercano y establecer alguna forma de comparación para verificar si existe alguna correlación. Si es posible establecer este factor de correlación mes a mes, es posible llegar rápidamente a establecer el comportamiento anual. De no ser así, es necesario prolongar las observaciones por un período largo que permita evaluar variaciones estacionales.

Anexo 3

Tablas de datos de las mediciones realizadas en la zona de la Mesa de los Hachos.

FECHA:				
Hora	Rev.	Velocidad	Temperatura	Humedad
01:00				
02:00				
03:00				
04:00				
05:00				
06:00				
07:00				
08:00				
09:00				
10:00				
11:00				
12:00				
13:00				
14:00				
15:00				
16:00				
17:00				
18:00				
19:00				
20:00				
21:00				
22:00				
23:00				
24:00				

Dirección predominante del viento. _____

Efectos sobre el terreno.

Efectos sobre la vegetación.

ENCUESTA	fecha:	
-----------------	--------	--

N° de Encuesta:

Número de personas:

Adultos: Niños:

Tipo de vivienda:

Mampostería:

Rancho

Servicios básicos:

Agua:

Tratada:

Natural:

Electricidad: Si No

Cría de Animales: Si No

Animales:	N°
Caballos	
Toros o Novillos	
Vacas lecheras	
Cerdos	
Ovejas o Chivos	
Aves (gallinas, patos, etc.)	
Pavos	
Otros	

Cultivos: Si No

Tipo de cultivo	Extensión	Periodo

¿Como considera la intensidad del viento?:

Fuerte

Regular

Suave

En que mes del año considera al viento más fuerte:

En que mes del año considera al viento más suave:

Utilizan el viento en la zona: Si No

¿El viento le afecta la siembras? Si No

¿Cómo?

¿El viento le afecta el suelo? Si No

Anexo 4

- 4.1 Mapa político del estado Anzoátegui.
- 4.2 Mapa físico de Venezuela.
- 4.3 Mapa radia solar de Venezuela.
- 4.4 Sistema de bombeo solar.
- 4.5 Especificaciones tanques Australianos.
- 4.6 Especificaciones tanque acero.
- 4.7 Especificaciones de precios de traslado de agua por medio de camiones cisternas en el estado Zulia.