

# **ANÁLISIS Y DISEÑO DE VENTILADORES DE TECHO DE ALTA EFICIENCIA ORIENTADOS AL AHORRO ENERGÉTICO**

**Daniel J. Grosso<sup>2</sup>, Santiago Pastorino<sup>2</sup>, Esteban Ibarrola<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Departamento Aeronáutica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina*

*<sup>2</sup>Ingeniero Aeronáutico, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina*

**Palabras clave:** ahorro, energía, diseño, ventiladores, eficiencia.

**Resumen.** En este trabajo se analizaron los aspectos aerodinámicos de ventiladores de techo, desarrollando un software para el análisis y diseño de los mismos, con la finalidad de obtener distribuciones geométricas de pala aerodinámicamente eficientes. Para abordar el tratamiento teórico de este tipo de artefactos se recurrió al estudio de hélices de uso aeronáutico y rotores de helicópteros en régimen de “hovering” con efecto suelo, introduciendo las hipótesis necesarias para adaptar la teoría al caso particular analizado.

Basado en la teoría vorticosa de la hélice y de un rotor, que suministran resultados que correlacionan aceptablemente bien con las mediciones y los resultados experimentales, el método desarrollado permite, tanto el análisis a partir de datos geométricos y aerodinámicos de un ventilador de geometría conocida, como el diseño un ventilador de alta eficiencia aerodinámica y la determinación de sus performances, orientados a disminuir el consumo energético del mismo.

## **1 INTRODUCCIÓN**

Este trabajo fue motivado por el interés en contribuir a la solución de un problema alarmante como es la escasez energética.

El objetivo es ofrecer un software que permita a los usuarios realizar el análisis y diseño de ventiladores de techo. El método está basado en la Teoría Vorticosa de Goldstein, que sin ser de alta complejidad, ofrece resultados suficientemente precisos a la hora de realizar cálculos teóricos de primer orden en el estudio y desarrollo de ventiladores de alta eficiencia aerodinámica orientados a disminuir el consumo energético.

El software consta de dos bloques; uno dedicado al análisis de ventiladores de techo, donde a partir de datos geométricos y aerodinámicos se pueden conocer las performances de un ventilador dado, y otro bloque orientado al diseño de ventiladores de techo, en el cual imponiendo metas de diseño, se obtienen las características geométricas que debe reunir el ventilador para satisfacer dichos requerimientos. El diseño de ventiladores de techo no es tratado en la bibliografía específica sobre ventiladores, lo cual llevó a que el trabajo sea el resultado de una investigación realizada por los autores en numerosa bibliografía referida a casos donde la naturaleza del funcionamiento es similar a la de dichos artefactos. Por ello, se recurrió a estudiar el comportamiento de las hélices de aviación y rotores de helicópteros en “hover” con efecto suelo, haciendo las hipótesis necesarias para adaptar la teoría al caso particular estudiado.

En una primera instancia, el software fue utilizado para calcular eficiencia de hélices convencionales. Luego, los datos obtenidos fueron validados comparándolos con datos experimentales, con la única finalidad de validar los resultados obtenidos mediante la programación de la Teoría Vorticosa. Posteriormente, mediante las hipótesis y adaptaciones antes mencionadas, se obtuvo un modelo que represente un rotor fijo en un espacio ilimitado, lo cual posibilitó una aproximación al funcionamiento de un ventilador aislado de obstáculos físicos. Por último se modelizó el efecto del techo, el cual representa un aspecto importante, ya que el mismo introduce modificaciones en las líneas de flujo, alterando las performances de dichos artefactos.

## **2 LA IMPORTANCIA DEL AHORRO ENERGÉTICO**

En la Argentina el uso de ventiladores es un hábito diario en aquellas estaciones del año con temperaturas elevadas. Los ventiladores son una alternativa económica para la ventilación de hogares y muchas empresas manufactureras de los mismos priorizan la construcción económica y rápida por los volúmenes de venta que registran, dejando de lado la eficiencia energética que brindan dichos aparatos. Debido a la falta de información en cuanto a la cantidad de ventiladores instalados y horas de funcionamiento de los mismos se refiere, fue necesario recurrir a estimaciones lógicas, para evaluar el gasto que causan los ventiladores en la red energética provincial y obtener así una idea de los consumos puestos en juego. Los datos censales del año 2008, arrojaron que en la Provincia de Córdoba hay 1.186.624 viviendas. Si se estima que en cada vivienda se tienen al menos 2 ventiladores de techo, en el territorio provincial habría aproximadamente 2.375.000 de éstos aparatos eléctricos. Un ventilador de techo típico posee una potencia nominal de 40W. Considerando que se usa en promedio 8 horas diarias, esto arroja un consumo de 9.6kwh mensuales lo que equivale a 58kwh si se utiliza 4 meses y medio al año, que sería el lapso donde se registran altas temperaturas. Por las cifras estimadas, el consumo que registra la red provincial asciende a más de 137.700.000kwh debido al uso de ventiladores solamente. En cuanto a términos económicos, según datos obtenidos a partir de promedios realizados sobre diversas facturas de

energía que brinda la empresa proveedora de energía eléctrica en la Provincia de Córdoba, el costo del Kilovatio-hora ronda en \$0.32 para usuarios residenciales, lo que estima un gasto aproximado de \$44.065.000 por parte de los usuarios a lo largo de la temporada. Como se observa las cifras de consumo no son menores y hay mucho para trabajar en ello.

La U.S. Environmental Protection Agency y el U.S. Department of Energy han creado en Estados Unidos un programa conjunto llamado *Energy Star* que ayuda al ahorro monetario y al cuidado del medio ambiente a través de productos y prácticas ecientes desde el punto de vista energético. En cuanto a ventiladores de techo (Ceiling Fan), *Energy Star* emite una certificación de calidad a aquellos que superan los niveles mínimos de performances, de ésta manera se informa a los consumidores sobre aquellos productos que cumplen las normas de consumo eficiente de energía. Los requerimientos de *Energy Star* son tomados en éste trabajo como meta de diseño en los ventiladores de techo de modo de cumplir con estándares de calidad internacional en el desarrollo de dichos aparatos.

### 3 TEORÍAS DE CÁLCULO APLICADAS A HÉLICES Y ROTORES

Existen distintas teorías utilizadas en el análisis y diseño de hélices, que plantean diferentes hipótesis a partir de las cuales se realizan los cálculos. De esta manera, y considerando además la complejidad de cada una, los resultados obtenidos pueden diferir entre sí en cuanto a exactitud y precisión se refiere. En el desarrollo de este trabajo se aplicaron los principios y fundamentos de la Teoría Vorticiosa.

En esta teoría se considera el movimiento tridimensional del flujo como consecuencia de la rotación de la hélice y del desprendimiento de la lámina vorticiosa (por ser la hélice de radio finito). Dicha lámina, por efecto de la velocidad de rotación es helicoidal y es considerada rígida, originando una velocidad inducida  $W$ , cuya dirección es normal a la velocidad efectiva  $V_e$  que sumada a la anterior produce un ángulo de ataque inducido  $\alpha_i$ . La Figura 1 muestra el diagrama de velocidades en cuestión.

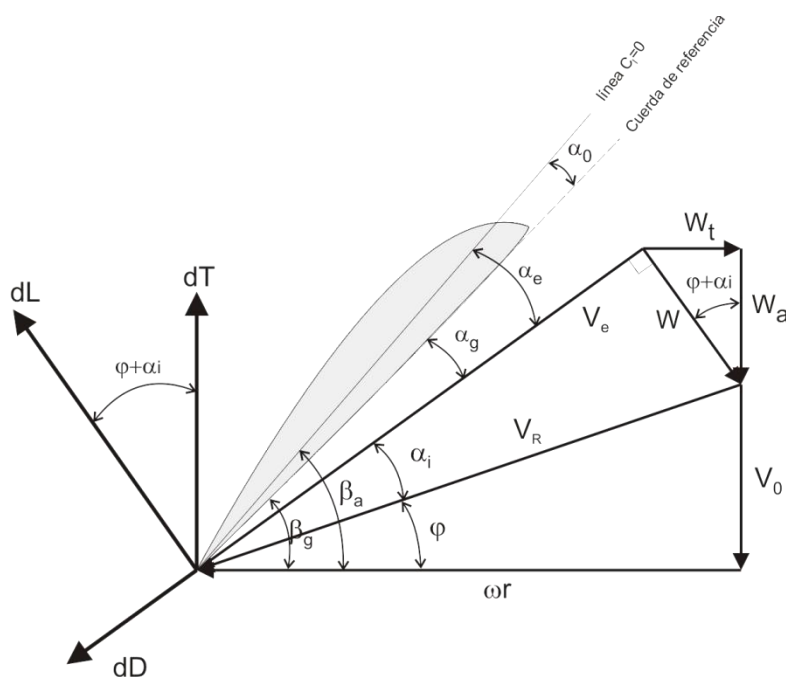


Figura 1: Diagrama de Velocidades

Por otro lado, la teoría vorticiosa plantea que la creación de la sustentación en un ala está ligada a la existencia de un vórtice adherido a la misma. Según la Ley de Kutta 2-D, siendo  $L$

la sustentación,  $\rho$  la densidad del aire,  $V$  la velocidad de avance y  $\Gamma$  la circulación, se tiene la siguiente expresión:

$$L = \rho V \Gamma. \quad (1)$$

La posición de dicho vórtice es al 25 % de la cuerda. Debido a la diferencia de presión entre la superficie superior e inferior, se produce una circulación alrededor de la puntera del ala (Figura 2), formándose una lámina vorticosa, por lo que el campo de movimiento pasa a ser tridimensional. Esta lámina tiende a enrollarse hasta que se forman dos vórtices de igual intensidad y sentido opuesto de rotación.

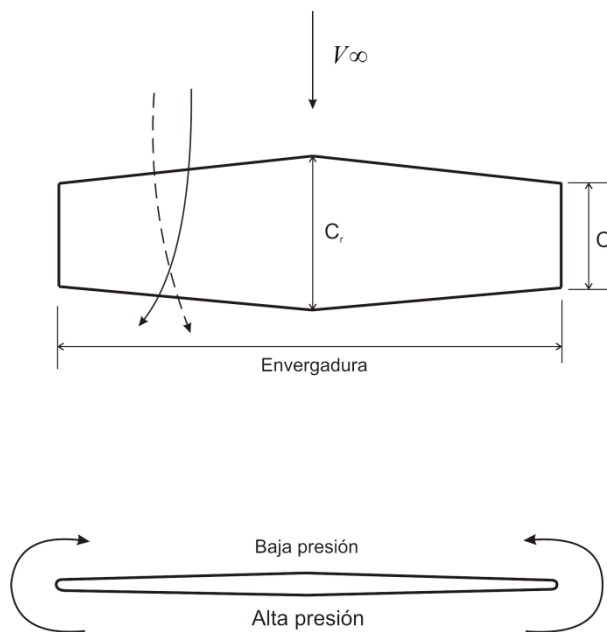


Figura 2: Deflexión de líneas de corriente en puntera

Algo similar ocurre en las palas de las hélices, producto de la velocidad de rotación durante su funcionamiento. Es el desprendimiento de dichos vórtices de puntera el que genera la aparición de velocidades inducidas hacia abajo, también conocidas como *downwash*. En términos generales, la estela inducirá en el plano del rotor una velocidad  $W$ , con componente axial  $W_a$  y tangencial  $W_t$ , tal que la velocidad efectiva  $V_e$  será:

$$V_e = V_R + W = V_0 + \omega r + W. \quad (2)$$

Donde  $\omega$  es la velocidad de rotación de la pala,  $r$  el radio de la estación analizada,  $V_0$  la velocidad de avance y  $V_R$  la velocidad resultante.

Ambas componentes de la velocidad inducida pueden ser calculadas mediante las siguientes expresiones, siendo  $\sigma$  la solidez de la hélice,  $a_0$  la pendiente de sustentación del perfil aerodinámico,  $F$  el factor de corrección por número finito de palas,  $x$  la estación analizada de pala,  $\beta_a$  el alabeo aerodinámico,  $\alpha_i$  el ángulo de ataque inducido:

$$W_t = \frac{\sigma a_0}{8x} \frac{1}{F} V_e [\beta_a - (\varphi - \alpha_i)] \quad (3)$$

$$W_a = \frac{1}{2} \left\{ -V_0 + \left[ V_0^2 + 4W_t(\omega r - W_t) \right]^{1/2} \right\}$$

Definiendo  $\lambda_g$  como la relación entre la velocidad de avance y la velocidad tangencial de puntera de pala, se tiene luego, en el plano de la hélice:

$$\varphi + \alpha_i = \arctan \frac{\lambda_g + \frac{W_a}{V_T}}{x - \frac{W_t}{V_T}} \quad (4)$$

Siendo finalmente la velocidad efectiva:

$$V_e = V_T \left[ \left( x - \frac{W_t}{V_T} \right)^2 + \left( \lambda_g + \frac{W_a}{V_T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

Una vez conocidos los valores de  $V_e$  y  $\alpha_i$  para cada estación  $x$  definida, se puede calcular el ángulo de ataque efectivo de cada sección:

$$\alpha_e = \beta_a - (\varphi + \alpha_i) \quad (6)$$

Con las curvas aerodinámicas del perfil se pueden determinar los coeficientes locales de sustentación  $C_l$  y resistencia  $C_d$  en cada estación de la pala, y su relación  $\varepsilon = C_d / C_l$ , conociendo previamente el número de Reynolds. En cada elemento de la pala se generan una cupla y un empuje elementales,  $dM$  y  $dT$  respectivamente.

$$dT = dL \cos(\varphi + \alpha_i) - dD \sin(\varphi + \alpha_i) \quad (7)$$

$$dM = rd[L \sin(\varphi + \alpha_i) + dD \cos(\varphi + \alpha_i)]$$

Integrando entre 0 y R para las B palas se obtiene la tracción y la potencia:

$$T = \frac{B\rho}{2} \int_0^R V_e^2 C_l C \cos(\varphi + \alpha_i) [1 - \varepsilon \tan(\varphi + \alpha_i)] dr \quad (8)$$

$$P = \frac{B\rho}{2} \int_0^R \omega r V_e^2 C_l C \cos(\varphi + \alpha_i) [\varepsilon + \tan(\varphi + \alpha_i)] dr$$

La influencia del cubo de la hélice puede ser tenida en cuenta, como primera aproximación, tanto en tracción como en potencia, reemplazando el límite inferior de las integraciones de las ecuaciones (9) y (10) por  $r_h$  (radio del cubo).

Se procede con la adimensionalización de la tracción y la potencia, siendo  $n$  las revoluciones por segundo y  $D$  el diámetro de la hélice.

$$C_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (9)$$

$$C_P = \frac{P}{\rho n^3 D^5}$$

Siendo  $J = VnD$  la relación de avance, se calcula el rendimiento de la hélice mediante:

$$\eta = \frac{C_T J}{C_p} \quad (10)$$

### 3.1 Programación para el análisis de hélices

En una primera instancia en el desarrollo del trabajo, se programan las ecuaciones desarrolladas en la Teoría Vorticosa, obteniendo así una herramienta computacional para el análisis de hélices. Los resultados obtenidos son validados con valores empíricos correspondientes a una hélice de tres palas con perfil RAF 6, para luego realizar las modificaciones pertinentes para el análisis de ventiladores de techo. A continuación se muestran los resultados de la validación en cuestión para diferentes valores de relaciones de paso P/D.

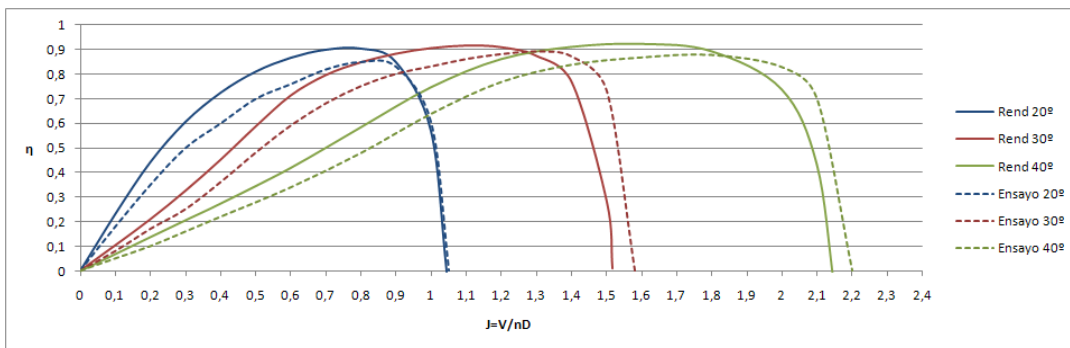


Figura 3: Comparación de rendimientos

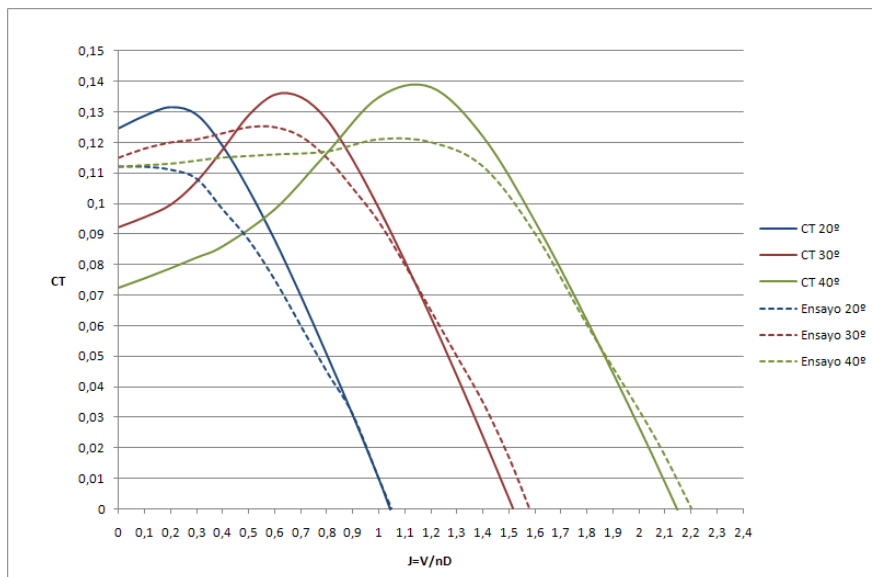


Figura 4: Comparación de CT

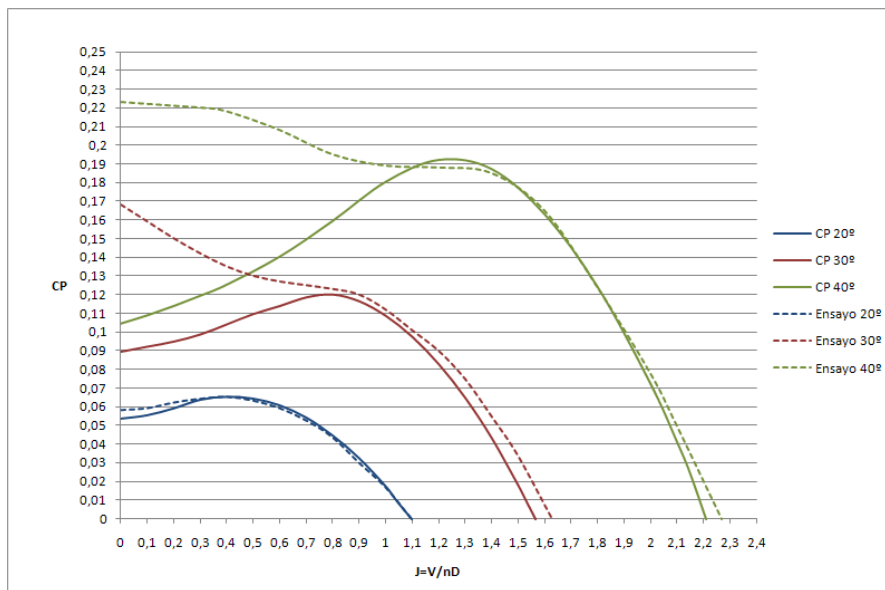


Figura 5: Comparación de  $C_p$

En estos gráficos se puede observar que la diferencia entre resultados teóricos y experimentales es considerable en aquellas palas en las cuales los alabeos son grandes a lo largo de las mismas, siendo por el contrario mínimas cuando se analizan palas de relaciones  $P/D$  pequeñas, y por ende menores ángulos de pala  $\beta_a$ , como sucede con la hélice de 20° al 0,75R. Por lo tanto, siempre que se mantengan ángulos de pala relativamente bajos (inferiores a 20° al 75% de la pala), los resultados obtenidos empleando la herramienta de cálculo desarrollada como parte de este trabajo, se mantienen dentro de un rango de tolerancia aceptable, siendo los errores o discrepancias máximas del 10%, aproximadamente.

## 4 ANÁLISIS DE VENTILADORES DE TECHO

### 4.1 Adaptación de la teoría vorticosa al análisis de ventiladores de techo

Luego de haber aplicado la teoría vorticosa al estudio de hélices, se procede a la aplicación de la misma al análisis de ventiladores de techo.

La diferencia fundamental que separa el tratamiento de una hélice de un ventilador de techo, es que en éste último la velocidad de avance es nula. Ésta condición de velocidad de avance nula, además hace  $\varphi = 0$  y  $\lambda_g = 0$ , por ende las formulaciones de la teoría vorticosa presentan algunos cambios en sus expresiones.

#### 4.1.1 Caudal e Índice de eficiencia.

La finalidad de los ventiladores de techo es generar un flujo de aire, con el cual se logra refrigerar o acondicionar, en cierta medida, la temperatura ambiente de una habitación. Es por este motivo que la relación entre el movimiento de aire (caudal generado por el ventilador) y la potencia consumida para producir el mismo (cfm/Watts, siendo cfm/cubic feet per minute (pie cúbico por minuto)), resulta ser un índice de eficiencia, ya sea desde el punto de vista funcional como económico.

Para estimar el caudal de aire mencionado anteriormente ( $Q$ ) se utiliza la siguiente fórmula en función de  $W_a$  que es la velocidad axial inducida por el ventilador durante su funcionamiento (velocidad del aire que se percibe al estar ubicado debajo de uno de estos artefactos) y el área transversal del disco ( $A$ ) formado por las palas del ventilador:

$$Q = AW_a \quad (11)$$

#### 4.1.2 Influencia del techo

El efecto del techo debe ser tenido en cuenta en el cálculo de las performances. La distancia entre el plano de giro respecto al punto de fijación de los mismos, varía de un lugar a otro.

Se propone despreciar el efecto de un obstáculo fijo cuando la distancia adimensionalizada con el radio del ventilador, entre el plano de rotación y el obstáculo  $H/R$ , es mayor a 2 (Johnson, W., 1980). Por lo mencionado, el efecto del suelo no se tiene en cuenta, puesto que en las condiciones de instalación normal,  $H/R$  siempre es mayor a 2.

Tener en cuenta la presencia de un obstáculo fijo es importante ya que las líneas de flujo se ven obligadas a cambiar de dirección lo que provoca la modificación de las velocidades incidentes sobre la pala y con ello los ángulos de ataque efectivos a los cuales trabaja la misma son diferentes.

Para introducir el efecto del techo en las líneas de corriente, se debe imponer matemáticamente la condición de que el techo sea superficie de corriente. La condición anteriormente mencionada se logra a partir de un método llamado "Método de las Imágenes", que consiste en la creación de una imagen especular respecto a la pared del ventilador analizado. El ventilador imagen induce velocidades en el ventilador real, haciendo que en el mismo se alteren los ángulos efectivos y con ello, los caudales generados sean distintos a los producidos sin la presencia del techo.

La teoría vorticosa no permite la aplicación directa del método de las imágenes debido a que no brinda información acerca de las singularidades que generan el campo de movimiento. Se propone un método práctico (Castles, W. y De Leeuw, J., 1953) para estimar las velocidades inducidas en las cercanías del ventilador a partir de la velocidad inducida generada por un anillo vorticoso ubicado en la posición que ocupa el rotor imagen.



Dado que la naturaleza del funcionamiento de un rotor y de un ventilador es similar, se puede extender dicho método práctico al caso en estudio. El método propone conocer las velocidades inducidas  $V_i$  adimensionalizadas con la velocidad inducida en el centro del rotor  $v$  como:

$$\frac{V_i}{v} = f\left(\frac{X}{R}, \frac{Z}{R}\right) \quad (12)$$

#### **4.1.3 Aplicación de la Teoría del Chorro Libre para estimar el caudal a una distancia dada**

En un chorro el caudal es variable a lo largo de su eje porque va incorporando continuamente al movimiento, parte del aire en reposo relativo que le rodea, debido a la viscosidad del mismo.

El régimen turbulento se caracteriza por la transferencia transversal de vórtices, los cuales, al salir de los límites del chorro, comunican su cantidad de movimiento a las capas de aire estacionario de los alrededores, que se empiezan a mover en sentido del chorro. En esta forma, las partículas que son expulsadas del chorro principal son reemplazadas por partículas del aire circundante, con lo que disminuye la velocidad de las capas del contorno. El resultado es que aumenta la masa y la amplitud del chorro, mientras disminuyen las velocidades.

La teoría se basa en un solo coeficiente  $a$ , también conocido como factor de turbulencia, que se determina experimentalmente. Este coeficiente depende de la construcción y forma de la abertura de salida y determina el grado de turbulencia. Con lo que respecta a la aplicación de ésta teoría al estudio de ventiladores de techo, los mismos al tener un ángulo de propagación considerable en este tipo de artefactos, se adopta como factor de turbulencia para los cálculos  $a = 0,24$ . Ver Abramovich, G. N.

#### **4.2 Proceso de cálculo**

La programación del software se puede desglosar en tres etapas importantes, una primera etapa en donde el objetivo es encontrar los ángulos de ataque y velocidades inducidas en cada una de las estaciones a considerar y con ello, calcular los ángulos de ataque efectivos en las mismas, la segunda etapa en la cual se buscan las performances aerodinámicas de cada estación a partir de los ángulos determinados en la etapa anterior y por último, la obtención de los caudales en el plano del rotor, y si se desea, fuera del mismo y los índices de eficiencia correspondientes a dichos caudales.

Para alcanzar los objetivos de la primera etapa, se procede a proponer un valor inicial de  $\alpha_1$  el cuál a partir de un proceso iterativo permite obtener las velocidades inducidas y ángulos de ataque efectivos en cada estación de la pala.

En la segunda etapa se determinan a partir de los ángulos de ataques efectivos calculados anteriormente, las prestaciones aerodinámicas de la pala. Para ello, mediante el método de interpolación por splines de MATLAB, se encuentra el correspondiente  $C_l$ ,  $C_d$  y  $\epsilon$  de cada estación. Dichos parámetros sirven para cuantificar las performances aerodinámicas del ventilador y para el cálculo de la tracción generada por el mismo.

La tercera y última etapa corresponde al cálculo de caudales e índices de eficiencia de los artefactos que se analizan. Para conocer el caudal movido por el ventilador, es necesario determinar antes la perturbación que produce el techo, si es que el mismo existe en el análisis.

#### **4.3 Validación del módulo de análisis**

Es importante conocer el grado de exactitud de los resultados obtenidos mediante el

módulo de análisis del programa Aerys. Para esto se emplean informes acerca de ensayos de ventiladores, en donde se realizan mediciones de velocidades, caudales e índices de eficiencia. Para validar el cálculo de caudales se trabajó con un ventilador convencional, ensayado por “Florida Solar Energy Center” (Sonne, J. y Parker, D., 1998). El artefacto corresponde al modelo Emerson CF705, es un ventilador disponible comercialmente, y representa un diseño estándar dentro de la industria. Sus palas son planas, rectangulares y con inclinación constante a lo largo de la misma. Las dimensiones del artefacto se presentan a continuación:

- ancho de pala = 13cm
- largo de pala = 50;8cm
- diámetro = 1;32cm
- ángulo de pala = 8°

#### Velocidades y Consumos

- 67r.p.m. → 9,6Watts
- 105r.p.m. → 24,3Watts
- 153r.p.m. → 50,2Watts.

Los resultados de la validación se presentan en la Tabla 1 que es expuesta a continuación.

Emerson CF705	Aerys	Ensayos
67 r.p.m.		
Caudal de aire (cfm)	1360	1087
Índice de Eficiencia (cfm/W )	142	113
105 r.p.m.		
Caudal de aire (cfm)	2345	2476
Índice de Eficiencia (cfm/W )	98	102
153 r.p.m.		
Caudal de aire (cfm)	3370	3110
Índice de Eficiencia (cfm/W )	67	62

Tabla 1: Comparación de caudales e Índices de eficiencia

De la comparación anterior, se tiene que, tanto los caudales volumétricos como los índices de eficiencia calculados se aproximan de manera satisfactoria a las mediciones realizadas. Por lo tanto se puede decir que el módulo de análisis del programa Aerys es válido para realizar una buena estimación de éstos parámetros, lo que permite conocer las capacidades de los ventiladores de techo.

## 5 DISEÑO DE VENTILADORES

Los tres principales factores que afectan la eficiencia de los ventiladores son: tamaño del motor, calidad del motor y diseño aerodinámico de palas. Este capítulo representa un enfoque

del último aspecto.

La mayoría de los ventiladores emplean palas de placa plana con un ángulo inclinación constante a lo largo del radio para generar el flujo de aire. Esto resulta muy poco eficiente desde el punto de vista aerodinámico. Con solo colocar ángulos de pala adecuados se pueden lograr operaciones con eficiencias más altas. Por otro lado, las mejoras en relación al funcionamiento eficiente pueden ser mayores si además se diseñan las palas utilizando perles aerodinámicos adecuados según cada régimen de trabajo.

### 5.1 Programación del módulo de diseño de Aerys

Quizás el aspecto fundamental que diferencia una hélice de un ventilador de techo es la velocidad de avance  $V_0$ , la cual es nula en éste último. Con esto, el campo de velocidades se modifica tal y como se muestra en figura siguiente:

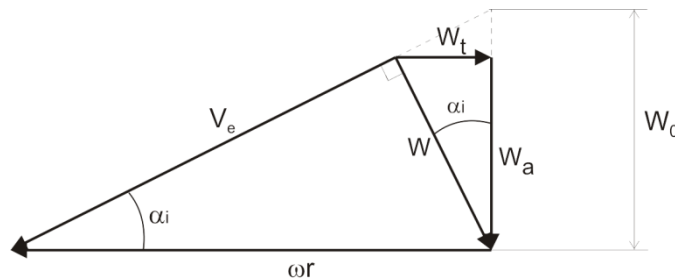


Figura 5: Comparación de  $C_p$

Por lo tanto, es totalmente factible el empleo de las formulaciones antes citadas.

### 5.2 Datos de entrada y metas de diseño

El programa requiere una serie de datos iniciales, los cuales son: número de palas ( $B$ ), revoluciones por minuto (r.p.m.), número de divisiones de la pala ( $N$ ), altura sobre el nivel del mar ( $H$ ), diámetro del ventilador ( $D$ ), diámetro del cubo ( $D_h$ ), datos aerodinámicos del perfil seleccionado ( $C_l$ ,  $C_d$ ).

El diseño se lleva a cabo manteniendo fija una meta de diseño, la cual corresponde a generar un caudal de aire deseado. Conociendo el caudal de aire deseado, se puede calcular la velocidad axial inducida media, la cual se denomina  $v_h$ .

$$v_h = \frac{Q_{req}}{A} \quad (13)$$

Aplicando la teoría de cantidad de movimiento para un rotor en hover, se tiene:

$$v_h = \sqrt{\frac{T}{2\rho A}} \quad (14)$$

De la ecuación (14) se puede despejar el valor de tracción requerida asociado a un caudal de aire deseado. A mayor tracción la velocidad inducida, y por ende el caudal de aire, también lo serán.

Se debe controlar que la potencia requerida para la generación de un caudal determinado sea menor o igual a la disponible, la cual varía según las r.p.m. de funcionamiento.

No solo es importante lograr un caudal de aire deseado, sino que además se debe buscar que la relación caudal/potencia sea mayor que la de los requerimientos impuestos en las Energy Star Specifications.

### 5.3 Proceso de cálculo

Lo que se hace en la estructura del programa es proponer diferentes valores de  $W_0$ . Luego para cada valor de  $W_0$  y para cada estación ( $x = r/R$ ) la, se calculan los siguientes parámetros:  $\alpha_i$ ,  $W_a$ ,  $W_t$ ,  $V_e$  y  $R_e$ .

Se procede con el cálculo de tracción y potencia, para cada  $W_0$  propuesto. Como se puede apreciar, es necesario conocer la relación  $\varepsilon = C_d / C_l$  a lo largo de la pala del ventilador. La misma se obtiene de las curvas aerodinámicas del perfil seleccionado. A menores relaciones  $C_d / C_l$  la tracción producida es mayor y la potencia requerida disminuye. Cuanto mayor sea la tracción, también lo será el caudal generado.

De esta manera se tienen dos condiciones a satisfacer: mínima relación  $C_d / C_l$  a lo largo de la pala y  $P_{req} \leq P_{disp}$ .

La primera se impone inicialmente en el proceso de diseño, mientras que la segunda debe ser corroborada al final del mismo.

Se tienen luego, diferentes valores de tracción y potencia para cada  $W_0$  propuesto, con los que se confeccionan dos curvas:  $T$  vs.  $W_0$  y  $P$  vs.  $W_0$ . Conociendo la tracción requerida para generar un caudal deseado, se obtiene mediante interpolación su correspondiente  $W_{0req}$  para satisfacer las metas de diseño.

Con  $W_{0req}$  se repiten los pasos de cálculo anteriores para cada estación. Lo siguiente es calcular la ley de variación cuerdas que tendrá la pala. Para esto se plantea:

$$\Gamma = \frac{1}{2} CC_l V_e \quad (15)$$

Puede determinarse la carga aerodinámica  $CC_l$  en cada estación. Conociendo la distribución de sustentación que minimiza la relación  $C_d / C_l$ , se obtiene finalmente la ley de distribución de cuerdas  $C(x)$ .

Sin embargo, el cálculo de la variación de cuerdas no es directo, debido a que los valores de  $Cl$  que maximizan la tracción son función del número de Reynolds, y éste a su vez depende de la cuerda a lo largo de la pala. Esta mutua dependencia de parámetros, obliga a recurrir a un método iterativo de resolución. El mismo consiste en proponer cuerdas iniciales y a partir de éstas, se calculan los números de Reynolds en cada estación. Con estos se generan las curvas  $Cl$  vs.  $\alpha$  y  $Cl$  vs.  $Cd$ ., de donde se pueden estimar los  $\varepsilon$  mínimos en cada una de las secciones de pala establecidas que hacen máxima la tracción y por ende el caudal de aire generado. Posteriormente se realizan los siete pasos del procedimiento, se calcula la circulación y por último la cuerda a lo largo de la pala, con las que se recalcula el número de Reynolds en cada sección de la misma. Todo este procedimiento se repite hasta llegar a una convergencia en los valores de los números de Reynolds a lo largo de la pala.

Otro aspecto fundamental a la hora de diseñar una pala para satisfacer metas de diseño, es el alabeo de la misma. En cada estación se conoce de los cálculos anteriores el ángulo de ataque geométrico  $\alpha_g$  e inducido  $\alpha_i$ , con los cuales se obtiene:

$$\beta_g(x) = \alpha_g(x) + \alpha_i(x) \quad (16)$$

Expresión que representa el alabeo geométrico o simplemente ley de alabeo de las palas del ventilador, con la que se obtienen las condiciones de funcionamiento impuestas en las metas de diseño.

El diseño de la hélice consiste entonces en determinar la ley de variación de cuerdas y la distribución de ángulos geométricos de pala.

#### **5.4 Validación del módulo de diseño**

No existen ensayos con los que se puedan cotejar los resultados obtenidos con el módulo de diseño del programa Aerys. Sólo fue posible realizar la comparación de resultados con otra herramienta de cálculo existente llamada Helidi. Se observó que los resultados obtenidos en ambos casos son muy aproximados.

Sin embargo, como se verá más adelante en la sección de resultados obtenidos con el programa Aerys, fue posible realizar un procedimiento de validación a partir de los resultados obtenidos con el módulo de análisis del mismo software. Se puede decir que para el módulo de diseño se tiene una validación indirecta.

### **6 RESULTADOS OBTENIDOS**

En ésta oportunidad se aborda la utilización de las herramientas computacionales aplicadas a dos casos particulares. Por un lado, se analizan las performances de funcionamiento de un ventilador de techo convencional instalado, y por otro lado, se desarrolla el diseño de un ventilador aerodinámicamente eficiente. Por último se realiza la comparación de capacidades de funcionamiento (caudal e índice de eficiencia) entre el ventilador comercial y el prototipo diseñado, a fin de obtener información acerca del ahorro energético que implicaría la utilización del ventilador optimizado.

#### **6.1 Análisis de un ventilador convencional**

En ésta sección se trabaja sobre un ventilador de techo instalado en una habitación de un hogar de la ciudad de Córdoba. Se midieron y determinaron todos los parámetros necesarios para correr el software, y obtener con este las performances de funcionamiento del mismo.

##### **6.1.1 Datos de entrada**

Para la obtención del comportamiento desde el punto de vista aerodinámico y energético del ventilador, es preciso definir la geometría del mismo. La veracidad de los resultados obtenidos está ligada a la fidelidad de los datos introducidos.

A continuación se exponen todas las características que reúne dicho ventilador

- se trata de un ventilador con cinco palas de madera. El perfil de las mismas no presenta complejidad alguna, ya que solo se trata de una placa plana
- el diámetro del ventilador es de 1.28 metros.
- el diámetro del cubo es de 0.32 metros.
- la ciudad de Córdoba se encuentra a 437 metros sobre el nivel del mar. Con ésta altura se determina la densidad del aire que mueve el ventilador, afectando los Reynolds de trabajo y estos, el desempeño aerodinámico de la pala.
- las lecturas de las velocidades de funcionamiento a partir de un tacómetro óptico registraron valor de 175rpm. para la máxima velocidad, 110rpm para velocidades medias y 66rpm para velocidades de giro bajas.
- se eligieron 50 estaciones, en las cuales se calculan todos los factores aerodinámicos que repercuten en la generación de los caudales de aire movidos por el artefacto.
- el consumo de un ventilador de techo varía con las r.p.m. de operación. El artefacto en estudio, en su plaqueta de identificación, especifica que la potencia nominal del

mismo es de 70 Watts. Para velocidades medias el consumo promedio ronda en los 24 Watts, mientras que para velocidades bajas es de 9.6 Watts, aproximadamente. Estas potencias son utilizadas en el cálculo de los índices de eficiencia del ventilador.

- el caudal de aire generado por el ventilador se calcula en el plano del rotor y a una distancia de 1.38 metros. Ésta distancia corresponde a los puntos de medición de caudal en los ensayos de otros ventiladores comerciales (Sonne, J. y Parker, D., 1998). Existen requerimientos mínimos de caudal y eficiencia, propuestos por el programa de certificación Energy Star para ventiladores de techo. Los mismos se conocen como Tier I, y pueden observarse en la Tabla 2

<i>Fan Speed</i>	<i>Minimun Airflow</i>	<i>Efficiency Requirement</i>
<i>Tier I</i>		
Low	1.250 cfm	155 cfm/Watt
Medium	2.500 cfm	110 cfm/Watt
High	5.000 cfm	75 cfm/Watt

Tabla 2: Requerimientos mínimos

Los valores de la Tabla 2 corresponden a la distancia al plano de rotación antes mencionada.

- la distancia del plano de rotación al techo es de 0.3 metros, dato que sirve para tener en cuenta la influencia del obstáculo fijo en la generación del caudal.
- para una correcta definición de la geometría de la pala, se creó un modelo 3D en una herramienta CAD. En la Tabla 3 se presentan los datos relevados de la pala en estudio

Nº Estación	(r/R)	(C/R)	( $\beta_g$ ) [rad]
1	0.2500	0.1572	0.1571
2	0.3250	0.1665	0.1571
3	0.4000	0.1700	0.1571
4	0.4750	0.1734	0.1571
5	0.5500	0.1769	0.1571
6	0.6250	0.1803	0.1571
7	0.7000	0.1838	0.1571
8	0.7750	0.1873	0.1571
9	0.8500	0.1907	0.1571
10	0.9250	0.1942	0.1571
11	0.9594	0.1864	0.1571
12	0.9750	0.1452	0.1571
13	0.9825	0.1038	0.1571
14	1.000	0.000	0.1571

Tabla 3: Datos geométricos del ventilador analizado

- el ángulo de inclinación de pala es constante a lo largo de la misma y su valor es de 9 grados.
- en cuanto a datos aerodinámicos se refiere, se obtuvieron las polares y las curvas de sustentación de la placa plana para los diferentes números de Reynolds a los cuales se encuentra trabajando la misma.

### 6.1.2 Resultados

Para la obtención de las performances del ventilador estudiado, el software desarrollado tiene en cuenta la interacción entre parámetros del tipo aerodinámicos, geométricos, atmosféricos, además del consumo. Una vez definidos los mismos, se corrió el programa para las tres velocidades de funcionamiento consideradas. Los caudales e índices de eficiencia calculados se presentan en los gráficos de la Figura 6 y Figura 7

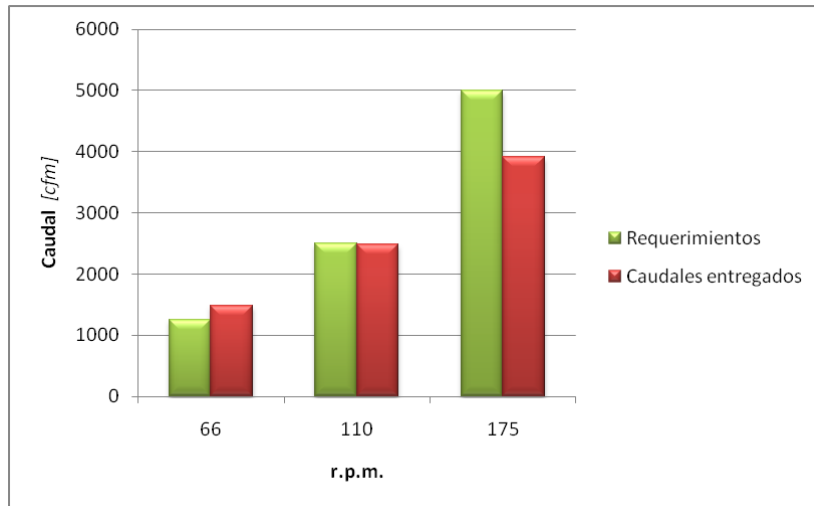


Figura 6: Comparación entre los caudales volumétricos obtenidos y requeridos

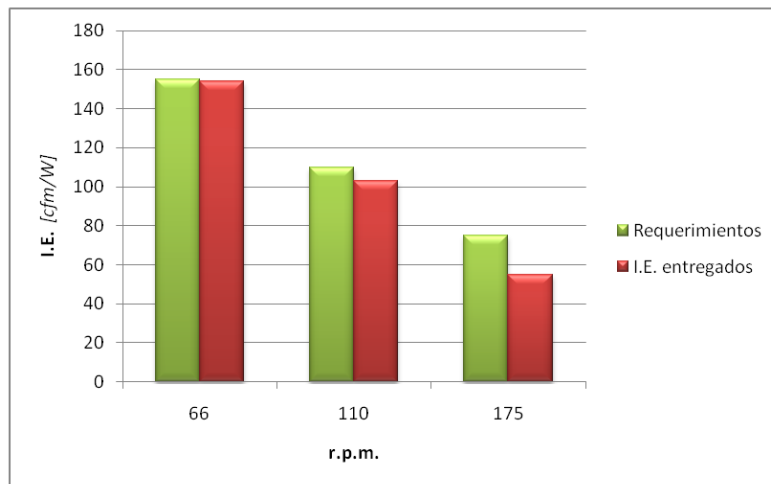


Figura 7: Comparación entre los índices de eficiencia obtenidos y requeridos

Como se puede observar el artefacto analizado no cumple con la totalidad de los requerimientos Energy Star para ventiladores de techo. A medida que aumentan las r.p.m. las performances del ventilador se alejan de los desempeños de un ventilador eficiente desde el punto de vista energético y aerodinámico.

### 6.2 Diseño de un ventilador aerodinámicamente optimizado

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en el diseño de ventiladores de alta eficiencia, empleando diferentes perfiles aerodinámicos. Se busca para cada caso la ley de

variación de cuerdas y alabeo que permitan entregar un caudal de aire deseado.

El criterio de diseño es mantener a lo largo de la pala la relación  $Cl=Cd$  máxima, con lo cual se logra el mayor flujo de aire posible, debido a la relación directa que existe entre este último y la tracción generada.

Como se mencionó anteriormente, la eficiencia de un ventilador se asocia a la cantidad de flujo de aire que es capaz de generar a expensas de un cierto nivel de consumo.

Los parámetros que influyen tanto en las cuerdas como en los ángulos de inclinación de pala son; las r.p.m. de funcionamiento, número de palas, perfil aerodinámico de pala, distribución de  $C_l$  a lo largo de la pala, entre otros.

En la optimización del diseño de ventiladores se busca que los mismos logren satisfacer los requerimientos mínimos mencionados anteriormente.

### **6.2.1 Perfiles utilizados**

Si bien existe un gran número de esta clase de perfiles, a los fines prácticos del trabajo se seleccionaron solo tres, calculando para cada uno la ley de distribución de cuerdas y alabeos para velocidades de rotación medias (105 r.p.m.)

Los perfiles seleccionados para el diseño y comparación de resultados son:

- SOAVE 61
- AG 11
- Neumann
- Placa plana

Cada uno de estos es analizado en el software XFLR5, para determinar las curvas aerodinámicas al Reynolds correspondiente. Para obtener polares representativas en el software XFLR5, se impuso una transición de flujo laminar a turbulento del 5 %, debido a que el comportamiento de estos perfiles a bajos números de Reynolds mejora en dicho régimen (Grosso, Daniel J. y Pastorino, Santiago, 2010).

### **6.2.2 Resultados para diferentes perfiles aerodinámicos**

En el diseño de pala a partir de los perfiles seleccionados, los siguientes parámetros son comunes para todos los casos de diseño:

- revoluciones por minuto r:p:m: = 105
- caudal deseado  $Q = 4000\text{cfm}$
- altura sobre el nivel del mar  $H = 500\text{m}$
- número de palas  $B = 4$
- diámetro de ventilador  $D = 1;4\text{m}$
- diámetro de cubo  $D_h = 0;31\text{m}$

A partir de los parámetros anteriores se obtuvieron los siguientes resultados en cuanto a cuerda y alabeo se refiere:



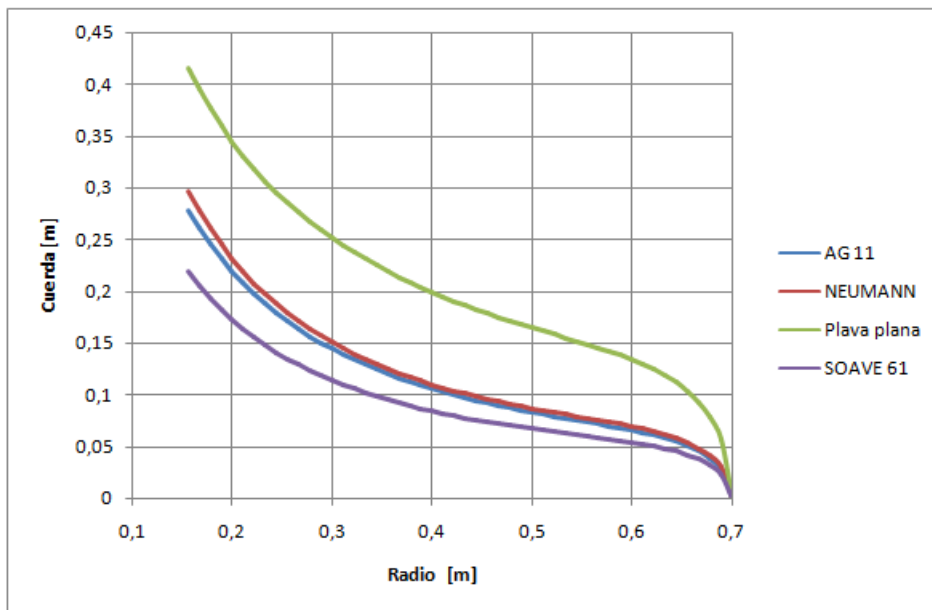


Figura 8: Distribución de cuerdas

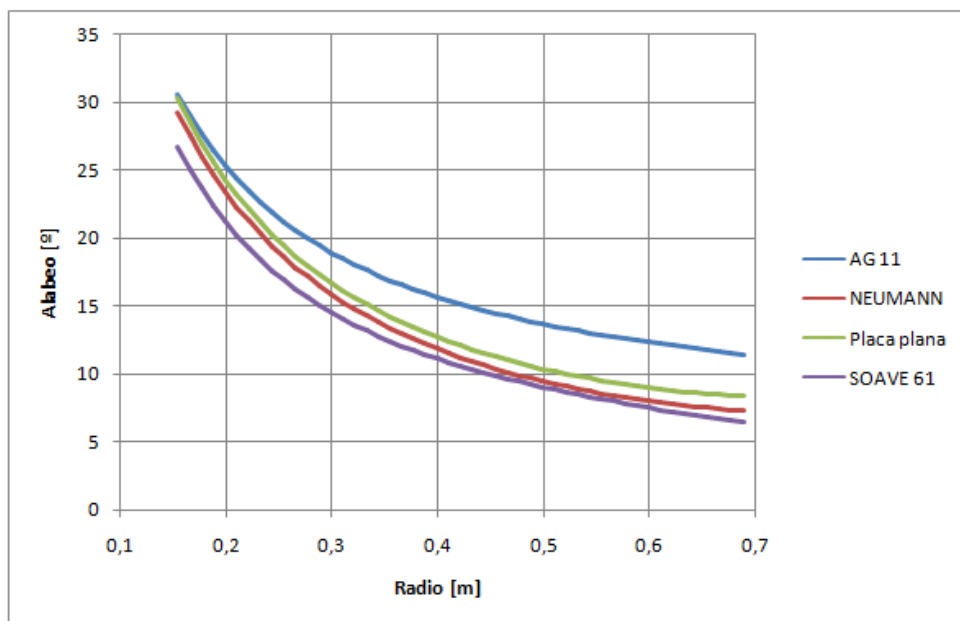


Figura 9: Alabeo geométrico

El diseño correspondiente al perfil SOAVE 61 es el que presenta menor distribución de cuerdas y alabeo geométrico para producir el caudal de aire establecido, lo que implica una menor complejidad constructiva. En las figuras siguientes, se puede tener una idea más clara de la forma de la pala diseñada a partir del perfil SOAVE 61.

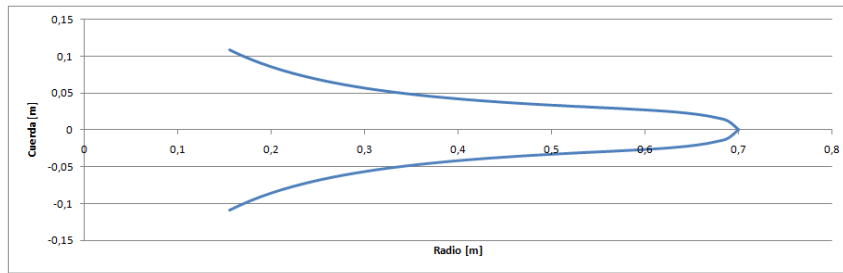


Figura 10: Forma de pala con perfil aerodinámico SOAVE 61

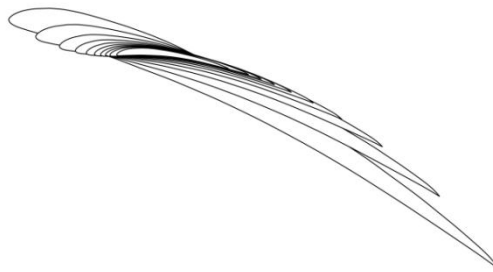


Figura 11: Alabeo geométrico de pala con perfil aerodinámico SOAVE 61

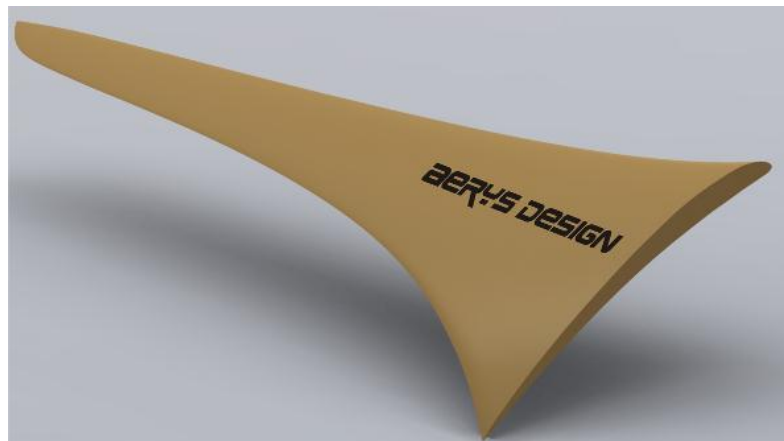


Figura 12: Diseño eficiente de pala

La fabricación de un prototipo con una pala como la anterior puede resultar costosa, especialmente por la complejidad constructiva que representa incluir un perfil aerodinámico al modelo. Debido a esto se propone un diseño alternativo, más económico y simple, utilizando una placa plana para el diseño. Si bien esto lleva a una disminución en la eficiencia del ventilador, se impone como condición o meta de diseño satisfacer los requerimientos mínimos de caudal generado.

Luego, los parámetros a ingresar para el nuevo diseño en cuestión son los siguientes:

- revoluciones por minuto r:p:m: = 105
- caudal deseado  $Q = 2500\text{cfm}$
- altura sobre el nivel del mar  $H = 500\text{m}$
- número de palas  $B = 5$
- diámetro de ventilador  $D = 1;4\text{m}$
- diámetro de cubo  $d_h = 0;31\text{m}$

Como se observa, se agrega una pala al modelo, y se reduce el caudal deseado. En la Figura 13 se puede ver la distribución de cuerdas a lo largo de la pala, la cual se puede decir que mantiene dimensiones razonables si se las compara con palas de ventiladores convencionales.

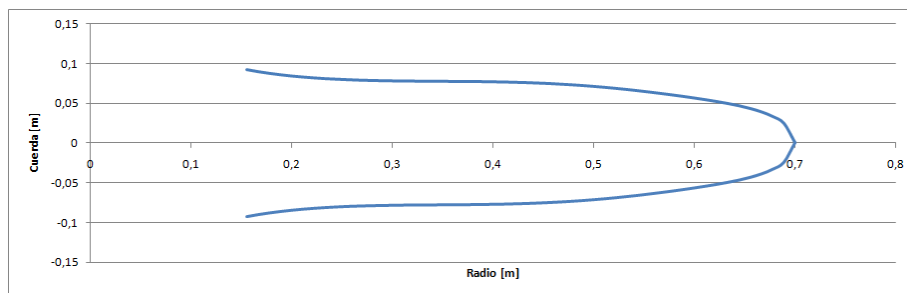


Figura 13: Diseño económico empleando placa plana

En la figura siguiente se muestra el alabeo geométrico correspondiente al diseño alternativo en cuestión.

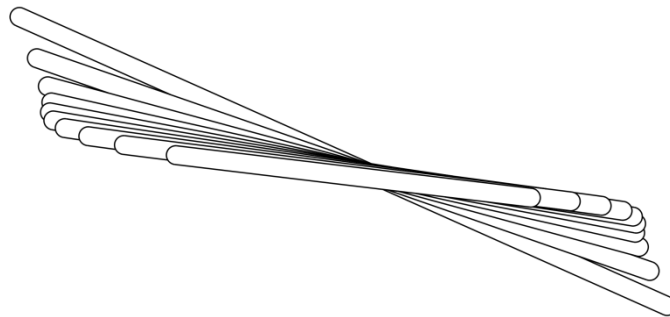


Figura 14: Alabeo geométrico de pala con placa plana

La forma final de pala se puede ver en la Figura 15.

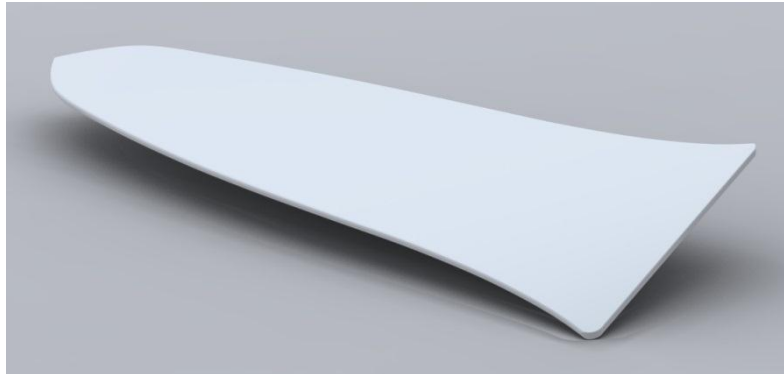


Figura 15: Diseño eficiente de pala con placa plana

Comparando las cuerdas de ambos diseños se observa que, empleando una placa plana, las cuerdas son mayores que las obtenidas a partir de un perfil SOAVE 61 para generar un caudal determinado, lo que indica el grado de ineficiencia aerodinámica que posee la primera, aún si ésta posee una torsión adecuada.

Por otro lado, el modelo diseñado empleando el perfil aerodinámico SOAVE 61, es el que permite alcanzar el caudal establecido con las menores cuerdas y alabeos geométricos, con lo cual se puede decir que es el diseño de mayor eficiencia.

Con resultados obtenidos con la herramienta de diseño para ambos ventiladores, con perfil SOAVE 61 y placa plana, se exportaron y se utilizaron como datos de entrada del módulo de análisis para ver la respuesta de las performances desarrolladas por los ventiladores aerodinámicamente optimizados fuera de las condiciones de funcionamiento óptimo, esto es, a las velocidades de giro distintas para las cuales habían sido diseñados, obteniendo los siguientes resultados;

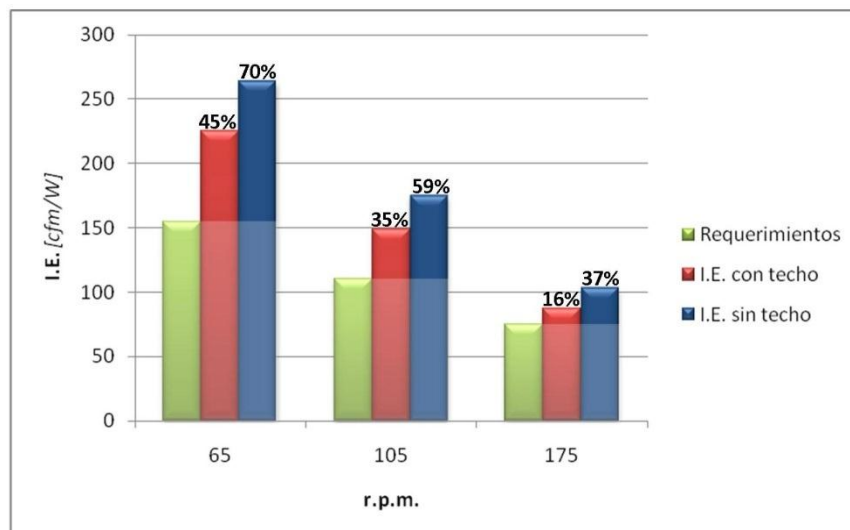


Figura 16: Comparación de los I.E. del ventilador diseñado con perfil SOAVE 61 y los requerimientos Energy Star

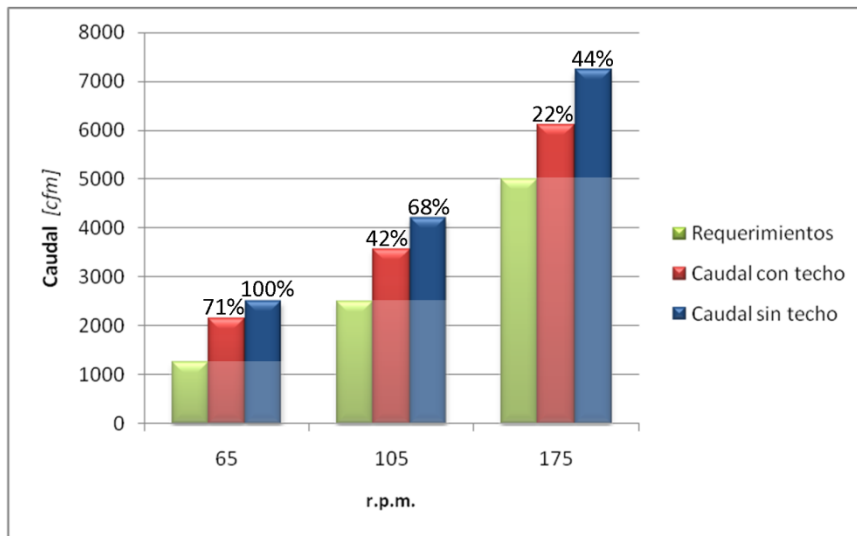


Figura 17: Comparación de los caudales del ventilador diseñado con perfil SOAVE 61 y los requerimientos Energy Star

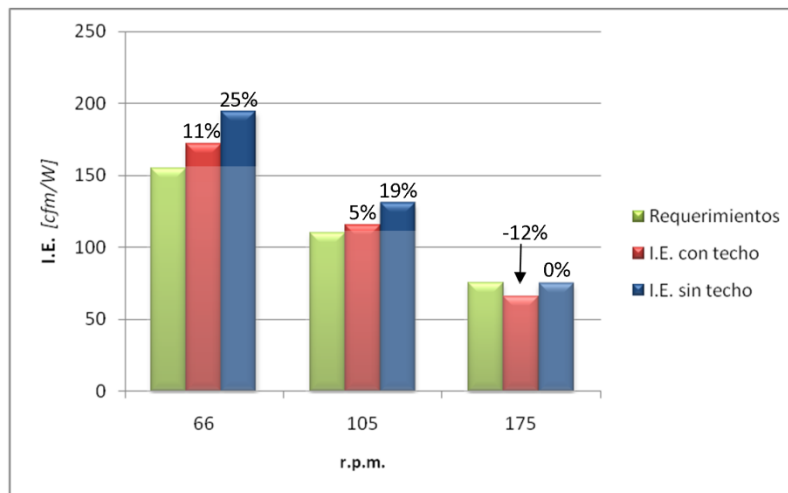


Figura 18: Comparación de los I.E. del ventilador diseñado con una placa plana y los requerimientos Energy Star

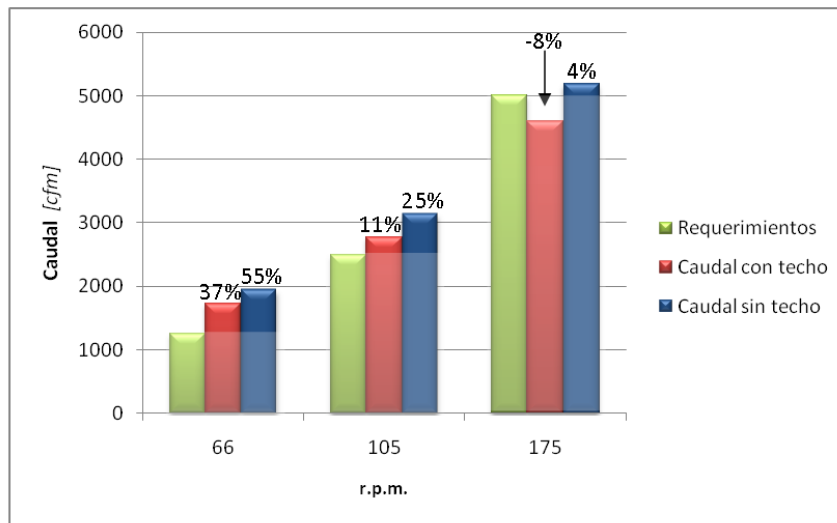


Figura 19: Comparación de los caudales del ventilador diseñado con una placa plana y los requerimientos Energy Star

Los porcentajes que aparecen en los gráficos indican el incremento de los parámetros en estudio respecto a los mínimos establecidos por los requerimientos Energy Star.

Queda claro que la presencia del techo es notoria en los resultados y se debería buscar en las instalaciones, que el plano de rotación del artefacto esté lo más alejado posible del obstáculo fijo a fin de aprovechar al máximo las cualidades del ventilador.

Salvando los costos de producción del diseño con perfil SOAVE 61 y de la placa plana, el porcentaje de aumento de eficiencia del primero con éste último es muy notorio.

Por otro lado, se puede observar en las Figuras 17 y 18 que los caudales obtenidos con el módulo de análisis para velocidades medias son muy aproximados a los valores de caudal establecidos como meta de diseño en la etapa de diseño, con lo cual se puede decir que los resultados arrojados por el módulo de diseño son válidos.

### 6.3 Comparación de las performances del ventilador convencional con el prototipo diseñado con perfil SOAVE 61

En los resultados obtenidos del módulo de análisis se puede observar cómo el modelo de ventilador diseñado utilizando el perfil aerodinámico SOAVE 61 permite lograr caudales superiores a las mismas r.p.m. que trabajan ventiladores comunes. Esto conduce a la posibilidad de reducir las velocidades de funcionamiento de los mismos y aún satisfacer con los requerimientos de Energy Star. Lo anterior implica un nivel de consumo menor de potencia, ya que este es directamente proporcional a las r.p.m. de trabajo.

Se presentan a continuación, una comparación de los consumos entre un ventilador de techo común y el prototipo diseñado con el perfil SOAVE 61

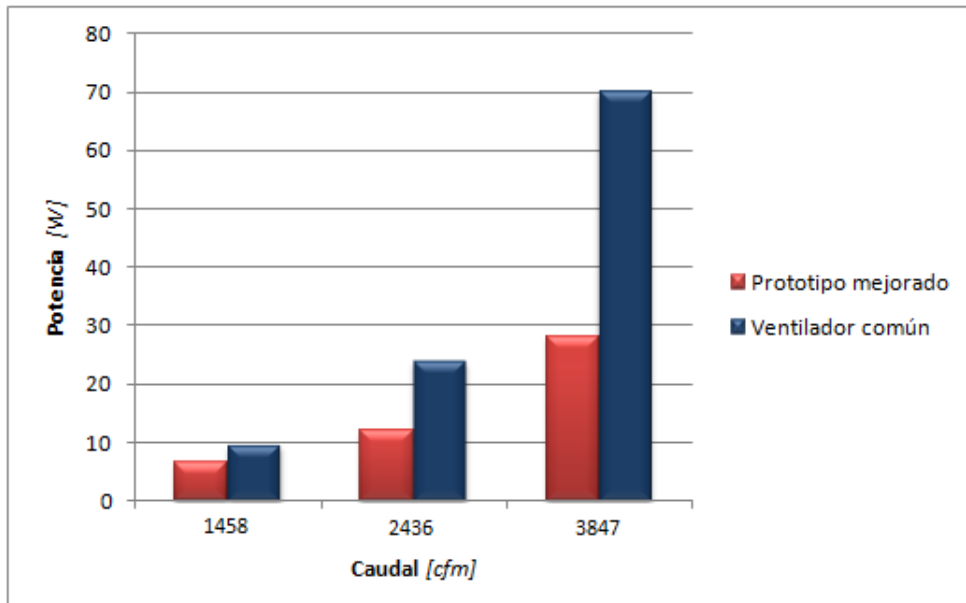


Figura 20: Comparación de consumos entre ventilador común y prototipo diseñado con perfil aerodinámico SOAVE 61

Para cada nivel de velocidades se tendrán los siguientes porcentajes de ahorro energético al reemplazar un ventilador común por el prototipo diseñado:

r.p.m.	Bajas	Medias	Altas
Ahorro de potencia[W ]	3.1	11.9	52
Porcentaje de energía ahorrada	32.3 %	49.6 %	65 %

Tabla 4: Ahorro energético a diferentes r.p.m.

Resta por conocer el ahorro económico como consecuencia de la reducción en el consumo de potencia del prototipo diseñado con un perfil aerodinámico.

Al comienzo del informe, se estimó un consumo anual en la provincia de Córdoba de 137.700.000 Kwh, lo que implica un gasto de \$44.065.000 por parte de los usuarios. Estas cifras resultan de considerar un consumo promedio por ventilador de 40 Watts.

A partir de la reducción de consumo obtenida, se calcula que la demanda media de un ventilador de techo optimizado aerodinámicamente es de 20Watts, con lo cual es fácil observar que la misma se reduce a la mitad. Se estaría hablando así de un ahorro económico para los habitantes de la ciudad de Córdoba que supera los 22 millones de pesos.

## 7 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado una herramienta de cálculo que permite analizar las performances de ventiladores de techo convencionales y diseñar palas aerodinámicamente eficientes que conlleven a una disminución de la energía consumida por estos artefactos. Esto se ha logrado mediante la implementación computacional de la Teoría Vorticosa en combinación con la teoría de los helicópteros en *hover* y la teoría de los chorros libres que, adaptadas a los ventiladores de techo, permiten conocer los caudales generados por los mismos.

Los resultados obtenidos con el módulo de análisis muestran que la presencia del techo en los ventiladores instalados resulta ser un factor influyente en el funcionamiento del artefacto, ya que los caudales de aire generados disminuyen a medida que la distancia techo-ventilador es menor. Asimismo el análisis teórico deja manifiesto que el ventilador convencional analizado no cumple con los estándares de calidad fijados por el programa Energy Star, lo que indica además el grado de ineficiencia aerodinámica que posee una placa plana.

Por otro lado, el módulo de diseño se utilizó para obtener palas de ventiladores optimizadas aerodinámicamente, con el objetivo de mover flujos de aire mayores y reducir los costos eléctricos. Lo anterior se consiguió utilizando un perfil aerodinámico de bajo Reynolds, combinado con una adecuada distribución de cuerdas y alabeos. Al remplazar la placa plana empleada comúnmente por un perfil aerodinámico, se logran superar los estándares de calidad y al mismo tiempo obtener ventiladores de techo más confortables y silenciosos. El diseño optimizado por el software Aerys aporta así, una reducción del consumo de energía del 60% para altas r.p.m. en relación a los ventiladores convencionales de techo.

Pese a que resta una constatación experimental de los resultados obtenidos, el presente trabajo permite una primera aproximación en el desarrollo de ventiladores de techo de alta eficiencia orientados a disminuir el consumo energético.

## TRABAJOS FUTUROS

Se plantean temas que pueden ser emprendidos en proyectos integradores futuros, de modo tal de lograr cierto complemento con el trabajo actual y así aportar un poco más al ahorro energético.

- Construcción de los prototipos obtenidos en el módulo de diseño del programa Aerys
- Ensayo para medición de velocidades inducidas y consumo energético de los modelos eficientes antes mencionados, de modo de corroborar y validar los resultados correspondientes al módulo de diseño del programa Aerys
- Verificar y mejorar la eficiencia de sistemas de control de velocidad de ventiladores de techo, y así lograr menores pérdidas de potencia.



## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Abramovich, G. N., *“Teoría del chorro libre”*, 1936
- [2] Bonvin, E. y Serra, *“Aerodinámica I”*, Cooperativa CEICIN, 2005.
- [3] Calvi, T., *“Mecánica de los Fluidos”*.
- [4] Castles, W. y De Leeuw, J., *“The Normal Component of the Induced Velocity in the Vicinity of a Lifting Rotor and Some Examples of its Application”*, NACA TN No. 2912, 1953.
- [5] Davis Energy Group, *“Analysis of Standards Options for Ceiling Fan”*, Pacific Gas and Electric Company, California, 2004.
- [6] Grosso, Daniel J. y Pastorino, Santiago *“Análisis y Diseño de Ventiladores de Techo de Alta Eficiencia”*, 2010.
- [7] Johnson, W., *“Helicopter Theory”*, Princenton University Press, New Jersey, 1980.
- [8] McCormick, Barnes W., *“Aerodynamics of V/STOL Flight”*, 1967
- [9] Sonne, J. y Parker, D., *“Measured Ceiling Fan Performance and Usage Patterns: Implications for Efficiency and Comfort Improvement”*, Florida Solar Energy Center/University of Central Florida, Florida, 1998.
- [10] Tamagno, J., *“Apuntes Aerodinámica II”*, Cooperativa CEICIN, Córdoba, 1992.
- [11] Theodorsen, T, Stickle, G y Brevoort, J, *“Characteristics of Six Propellers Including the High-Speed Range”*, NACA REPORT No. 594, 1937.