

Análisis del Comportamiento Aerodinámico de Perfiles empleados en Aerogeneradores de Baja Potencia

Programa Fuentes Alternas de Energía y Generación
Distribuida

Acrónimo del proyecto FAEyGD

**Tipo (nivel de
distribución)** Público con reservas

Fecha de Entrega , 2009

Reporte Numero Eolo2-7

Estatus y Versión Definitivo, 1.00

Número de Páginas 41

Supervisor Francisco M. González-Longatt

Autor Alejandro J. Carantoña O.

Tabla de Contenido

Contenido	Pag.
Tabla de Contenido	2
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas	4
Introducción	5
Palas de un Aerogenerador	6
Tipo de Perfil Aerodinámico	6
Terminología empleada en perfiles	6
Perfiles usados comúnmente en turbinas de viento.....	7
Selección de Perfiles para Aerogeneradores de Baja Potencia	8
Perfil S-822	8
Perfil E-387	13
Perfil MH-106	17
Perfil SG-6040	21
Perfil S-8036	25
Comparación final entre perfiles.....	30
Conclusión	31
Referencias Documentales.....	32
Anexos	33

Índice de Figuras

Figura 1. Terminología usada en perfiles aerodinámicos.....	7
Figura 2.a. Geometría del Perfil S-822, contorno.....	9
Figura 2.b Geometría del Perfil S-822, Vista interna.....	9
Figura 3. Cl vs. α , para el Perfil S822.....	10
Figura 4. Cd vs. α , para perfil S822.....	10
Figura 5. Relación Cl/Cd vs. α , para perfil S-822.....	10
Figura 6. Comportamiento del perfil en una Corriente de Viento para el Perfil S-822.	11
Figura 7. Distribución de presiones en el perfil S-822.....	12
Figura 8.a. Geometría del Perfil E-387, Contorno	13
Figura 8. b. Geometría del Perfil E-387, Vista interna	14
Figura 9. Cl vs. α , para el Perfil E387.....	14
Figura 10. Cd vs. α , para el Perfil E387.....	15
Figura 11. Relación Cl/Cd vs. α , para el perfil E-387	15
Figura 12. Comportamiento del perfil en una Corriente de Viento para el Perfil E-387.....	16
Figura 13. Distribución de presiones en el Perfil E-387.....	16
Figura 14.a.Geometría del Perfil MH-106, Contorno.....	17
Figura 14.b.Geometría del Perfil MH-106, Vista Interna.....	18
Figura 15. Cl vs. α , para el Perfil MH-106.....	18
Figura 16. Cd vs. α , para el Perfil MH-106.....	19
Figura 17. Relación Cl/Cd vs. α , para el perfil MH-106	19
Figura 18. Comportamiento del perfil en una Corriente de Viento para el Perfil MH-106.....	20
Figura 19. Distribución de presiones en el Perfil MH-106.....	20
Figura 20.a Geometría del Perfil SG 6040, Contorno.....	21
Figura 20.b Geometría del Perfil SG-6040, Vista interna.....	22
Figura 21. Cl vs. α , para el Perfil SG-6040.....	22
Figura 22. Cd vs. α , para el Perfil SG-6040.....	23
Figura 23. Relación Cl/Cd vs. α , para el perfil SG-6040.....	23
Figura 24. Comportamiento del perfil en una Corriente de Viento para el Perfil SG 6040.....	24
Figura 25. Distribución de presiones en el Perfil SG 6040.....	24
Figura 26.a Geometría del Perfil S-8036, Contorno.....	25
Figura 26.b Geometría del Perfil S-8036, Vista interna.....	26
Figura 27. Cl vs. α , para el Perfil S-8036.....	27
Figura 28. Cd vs. α para el Perfil S-8306.....	27
Figura 29. Relación Cl/Cd vs. α , para el perfil S-8306.....	28
Figura 30. Comportamiento del perfil en una Corriente de Viento para el Perfil S-8036.....	29
Figura 31. Distribución de presiones en el Perfil S-8036.....	29

Índice de Tablas

Tabla 1. Resumen de perfiles usados en aerogeneradores de baja potencia	7
Tabla 2. Características del perfil S-822.....	8
Tabla 3. Características del perfil E-387.....	13
Tabla 4. Características del perfil MH-106.	17
Tabla 5. Características del perfil SG 6040.	21
Tabla 6. Características del perfil S-8036.....	25
Tabla 7. Resumen de las características de los perfiles.....	30
Tabla A. Valores de Reynolds para el Perfil S-822.....	33
Tabla B. Valores de Reynolds para el Perfil E-387.....	34
Tabla C. Valores de Reynolds para el Perfil MH-106.....	35
Tabla D. Valores de Reynolds para el Perfil SG-6040.....	36
Tabla E. Valores de Reynolds para el Perfil S-8036.....	37
Tabla F. Valores del Contorno para el Perfil S-822.....	38
Tabla G. Valores del Contorno para el Perfil E387.....	39
Tabla H. Valores del Contorno para el Perfil MH-106.....	40
Tabla I. Valores del Contorno para el Perfil SG-6040.....	41
Tabla J. Valores del Contorno para el Perfil S-8036.....	42

Introducción

El elemento básico de un aerogenerador o turbina de viento es el rotor, que está formado por una o varias hélices o palas. Dichas palas son las que permiten realizar la conversión de la energía contenida en el viento, a energía mecánica en el eje del rotor que finalmente por medio del generador se convertirá en energía eléctrica. Por ello las palas deben poseer ciertas características y especificaciones según la utilización para las cuales son destinadas.

En el presente reporte se muestra el análisis para la selección de cinco perfiles aerodinámicos: S-822, E-387, MH-106, SG-6040 y S-8036; a ser usados en aerogeneradores de baja potencia. A cada perfil se le realizó un estudio de su coeficiente de sustentación C_l , coeficiente de arrastre C_d y la relación entre ambos C_l/C_d , todo esto en función de distintos valores del ángulo de ataque α y para un intervalo de números de Reynolds comprendido entre 100.000 y 500.000.

También se muestra el comportamiento de cada uno de los perfiles dentro de una corriente de viento para un ángulo de ataque determinado, esto se logra mediante el uso del software llamado *javafoil*, el cual está diseñado para evaluar el desempeño de diferentes tipos de perfiles.

Igualmente se presenta como la distribución de las presiones que afectan el desempeño del perfil, ya que según el ángulo de ataque la fuerza de sustentación resultante puede aumentar o disminuir.

Finalmente se presenta un cuadro comparativo donde se resaltan las características más importantes de los cinco perfiles, a fin de facilitar el proceso de selección según las necesidades.

www.fglongatt.org.ve

Palas de un Aerogenerador

En el rotor están situadas las palas, cuyo número es variable según los casos; cada pala tiene un perfil que tiene forma aerodinámica; éstos perfiles tienen un extremo romo, que es el borde de ataque mientras que el otro extremo, de forma afilada, es el borde de salida. Los perfiles tienen distintos nombres según su geometría. Se denominan biconvexos si el intradós y el extradós son convexos y plano-convexos si tienen el extradós convexo y el intradós plano y de doble curvatura si el intradós y el extradós son cóncavos [1].

Tipo de Perfil Aerodinámico

El tipo de perfil aerodinámico es uno de los parámetros de diseño más determinantes en el funcionamiento de las turbinas eólicas. La influencia del perfil sobre el coeficiente de potencia del aerogenerador viene determinada por el llamado *rendimiento aerodinámico* L/D , que es el cociente entre la fuerza de sustentación y la de arrastre. Esta dependencia se aprecia claramente cuando el aerogenerador entra en pérdida ya que el cociente L/D se reduce drásticamente y de igual forma el coeficiente de potencia [2].

Para los aerogeneradores de alta velocidad el rendimiento aerodinámico es un parámetro clave en el diseño del rotor; mientras que para aerogeneradores de baja velocidad el factor de diseño dominante es el número de palas frente al rendimiento aerodinámico, que no juega un papel decisivo [2].

Un perfil empleado en las palas de una turbina de viento son similares a los empleados en una sección del ala de un avión. En el estudio de los perfiles se ignora la configuración en proyección horizontal de la pala, como así también los efectos de extremo de la pala, flecha, alabeo y otras características de diseño [1].

Terminología empleada en perfiles

En el diseño de palas es necesario mantener claro una serie de conceptos [2]:

- La *cuerda* c , es una línea recta que une el borde de ataque y el borde de fuga del perfil. Todas las dimensiones de los perfiles se miden en términos de la cuerda.
- La línea de *curvatura media* es la línea media entre el extradós y el intradós.
- *Curvatura máxima* es la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la línea de cuerda.
- La *posición de la curvatura máxima* X_f , es importante en la determinación de las características aerodinámicas de un perfil.
- *Espesor máximo* X_d , es la distancia máxima entre la superficie superior e inferior (extradós e intradós).
- *Borde de ataque*: es la zona anterior del perfil.
- *Borde de salida*: es la zona posterior del perfil.
- *Extradós*: cara de presión.
- *Intradós*: cara de succión.
- *Radio del borde de ataque* r_N es una medida del afilamiento del borde de ataque.
- Coordenadas $y_o(x)$ e $y_u(x)$, indican las coordenadas del extradós y del intradós respectivamente.

En la Figura 1 se aprecia con mayor claridad los términos antes mencionados.

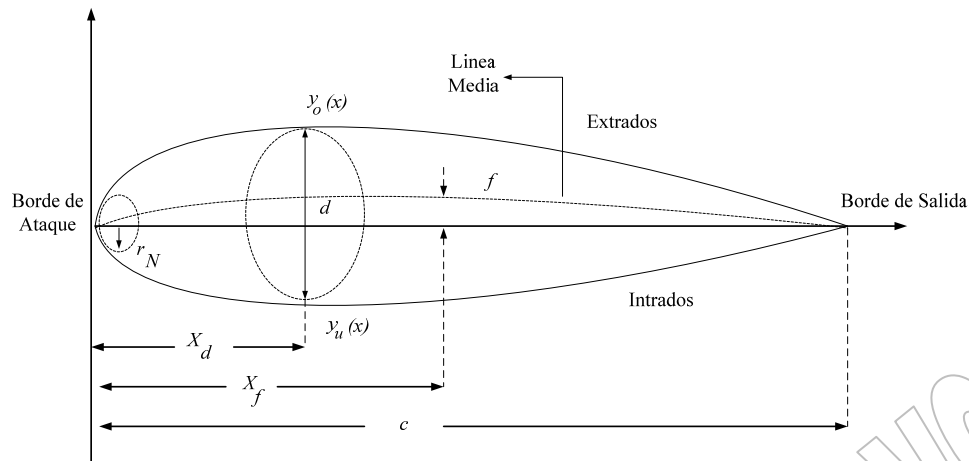


Figura 1. Terminología usada en perfiles aerodinámicos [2].

Perfiles usados comúnmente en turbinas de viento

En la Tabla 1, se presenta un resumen de diferentes tipos de perfiles aerodinámicos que son usados en la actualidad para diseños de aerogeneradores de baja potencia.

Tabla 1. Resumen de perfiles usados en aerogeneradores de baja potencia [3]

Perfil	Grosor	Curva	Max C_l	Angulo para C_l Max	Máximo L/D	Angulo para L/D Max	C_l para el L/D Max
Avistar	14.5%	2.2%	0.686	5.0°	31.665	5.0°	0.686
BW-3	5%	5.8%	1.041	4.0°	47.122	4.0°	1.041
Clark Y	11.7%	3.4%	1.311	9.0°	52.519	6.0°	1.072
DH4009	8.9%	0.2%	0.356	2.0°	26.967	2.0°	0.356
E387	9.1%	3.8%	1.130	7.0°	55.864	5.5°	0.987
E174	8.9%	3.8%	1.133	7.0°	56.127	5.5°	0.989
E176	8.8%	3.3%	1.036	7.0°	52.433	5.0°	0.854
GOE 479	11.7%	3.7%	1.059	6.5°	44.434	4.5°	0.911
GOE 623	12%	3.9%	1.429	12.0°	43.3	4.5°	0.873
MH 106	13.1%	1.0%	0.845	10.5°	33.665	4.5°	0.523
MH 108	12%	1.1%	0.824	10.5°	37.55	5.5°	0.633
MH 110	10%	1.15%	0.588	6.0°	34.148	5.5°	0.564
S3025	9.4%	3.6%	1.235	8.0°	55.555	5.0°	0.981
S6063	7%	1.4%	0.573	4.0°	39.224	3.5°	0.520
S8036	16%	1.9%	1.294	12.5°	43.271	6.0°	0.863
S9037	9%	3.5%	1.142	8.5°	48.42	5.5°	0.902
SD7032	10%	3.7%	1.361	5.0°	53.926	5.0°	1.008
SD7037	9.2%	3.0%	1.254	9.5°	51.724	5.0°	0.938
SG6040	16%	2.5%	1.489	11.5°	52.772	5.5°	1.068
SG6041	10%	2.0%	1.169	8.5°	49.174	3.5°	0.704
SA7035	9.2%	2.6%	1.210	8.5°	42.088	5.5°	0.882
SA7038	9.2%	3.2%	1.258	9.0°	44.301	5.5°	0.979

Para cada perfil se resaltan sus características más importantes como son: grosor o espesor del perfil, la curvatura que posee, el máximo valor del coeficiente de sustentación, así como el ángulo de ataque en el cual logra dicho valor. También se muestra el valor máximo de L/D y el ángulo en el que lo logra; y finalmente el valor de C_l que permite la máxima relación L/D .

Esta relación es fundamental para la existencia de la sustentación en un perfil, tal y como se verá en los análisis posteriores.

Selección de Perfiles para Aerogeneradores de Baja Potencia

El comportamiento aerodinámico de los perfiles alabeados se mide en un túnel de viento a través del registro de sus coeficientes de sustentación y arrastre, para varios ángulos de ataque y al experimentar con una gran variedad de números de Reynolds [4]. Los resultados de estos ensayos permiten identificar el desempeño de los perfiles para condiciones determinadas del flujo al cual son sometidos.

Los criterios y consideraciones que se utilizaron para la selección de un perfil fueron los siguientes:

- 1) Alto valor en la relación existente entre el cociente del coeficiente de sustentación y arrastre C_l/C_d , ya que esto permite que el coeficiente de potencia aumente y a su vez el radio de la turbina disminuya.
- 2) Angulo de ataque α , con un intervalo amplio de valores para los cuales el perfil tenga un numero de Reynolds mayor a 500.000.

Adicionalmente se utilizó el software de simulación de perfiles aerodinámicos *Javafoil*. Este software cuenta con una lista predeterminada de diferentes perfiles, igualmente si el perfil deseado no se encuentra en dicha lista, se puede introducir los valores de espesor máximo, cuerda y el ángulo de ataque, para que en base a esos datos éste pueda crear el perfil.

En este análisis se utilizó el *javafoil* para evaluar el comportamiento de los perfiles estudiados en una corriente de viento para un ángulo de ataque determinado y para observar las presiones existentes a lo largo de la geometría del perfil. Los perfiles utilizados para el análisis son los siguientes:

- Perfil S-882
- Perfil E-387
- Perfil MH 106
- Perfil SG-6040
- Perfil S-8036

Perfil S-822

Este perfil es de la familia perteneciente a la NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), fue diseñada en 1993 para las pequeñas turbinas de velocidad baja y potencia entre 2-20 kW. Las especificaciones de diseño para esta familia indican una región de coeficiente de sustentación máximo ($C_{l \text{ min}}$) de 1,0 y un mínimo arrastre ($C_{d \text{ min}}$), mínimo de 0,010 para un número de Reynolds 600,000 [5].

Una gama de números de Reynolds muy bajos en esta familia contribuye a una mayor Coeficiente de arrastre, y el aumento en la consecución de una alta raíz $C_{i \text{ max}}$ para un número de Reynolds de 400,000 [5].

Tabla 2. Características del perfil S-822 [5]

Parámetro	Cuerda%
Grueso [m]	16
Curvatura [m]	1.89

En la Tabla 2 se muestran el grosor y la curvatura del perfil, donde se destaca el hecho de que con el 16% es uno de los más gruesos se los 5 a estudiar.

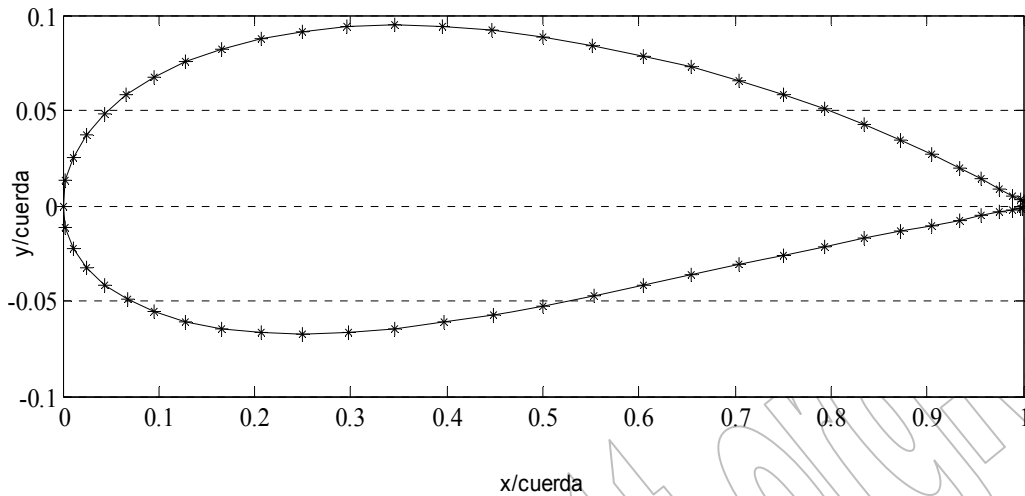


Figura 2.a. Geometría del Perfil S-822, contorno

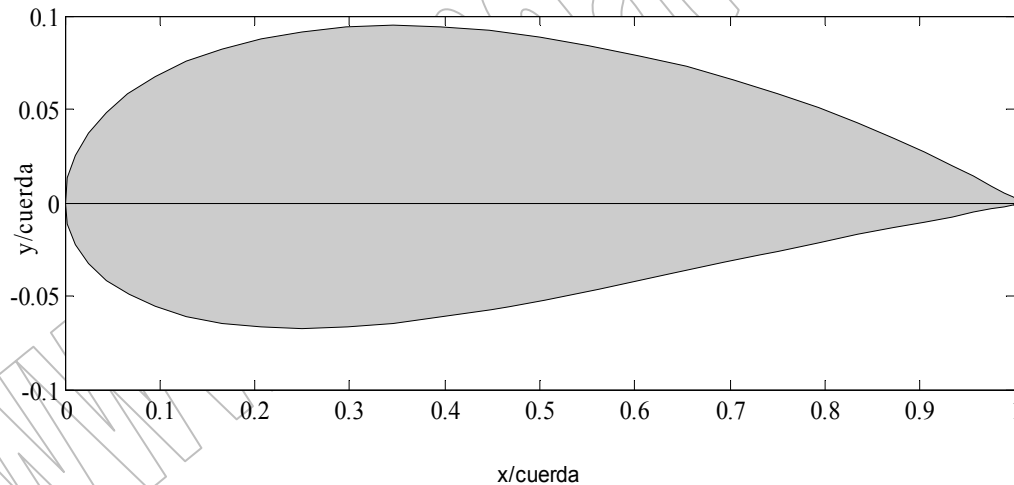


Figura 2.b Geometría del Perfil S-822, Vista interna

Las Figuras 2.a y 2.b, muestran la forma geométrica del contorno y vista interna del perfil S-822, donde se destaca el hecho de que es uno de los perfil más grueso y de menor curvatura, debido a que tiene un 16% y 1,89% de la cuerda respectivamente, tal como se parecía en la Tabla 1.

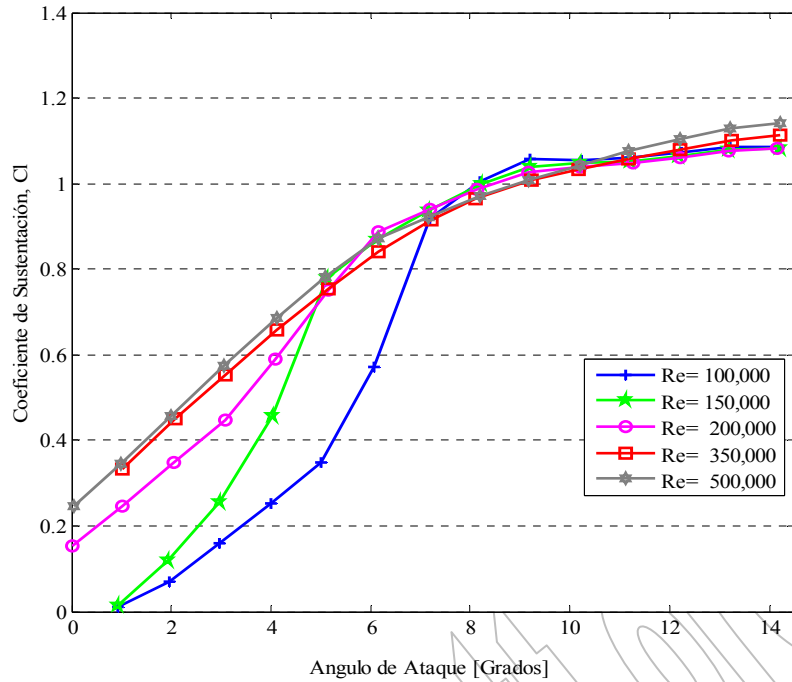


Figura 3. Cl vs. α , para el Perfil S822

Por su parte para el perfil S-822 se obtuvo un $C_{l_{max}} = 1.142$ para la curva de $Re = 500,000$ y un ángulo de ataque de $\alpha = 13^\circ$, como se muestra en la Figura 3; además para $Re > 200,000$ y $\alpha = 8^\circ$ se garantiza que el perfil no entrará en pérdida de sustentación ya que los valores de C_l son altos.

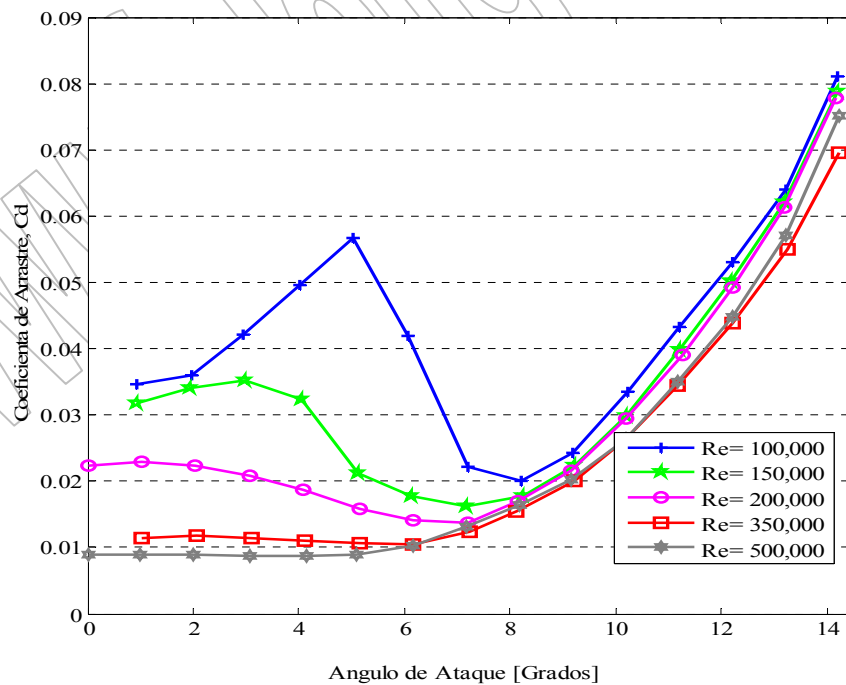


Figura 4. Cd vs. α , para perfil S822

El valor máximo de C_d que presenta el perfil S-822 es de $C_{d \max} = 0.08$ en la curva de $Re = 100,000$ y $\alpha = 14^\circ$, mostrada en la Figura 4. Para la curva de $Re = 500,000$ y $\alpha = 0^\circ$ el $C_d = 0.09$. Este valor es favorable para lograr obtener una relación C_l/C_d alta.

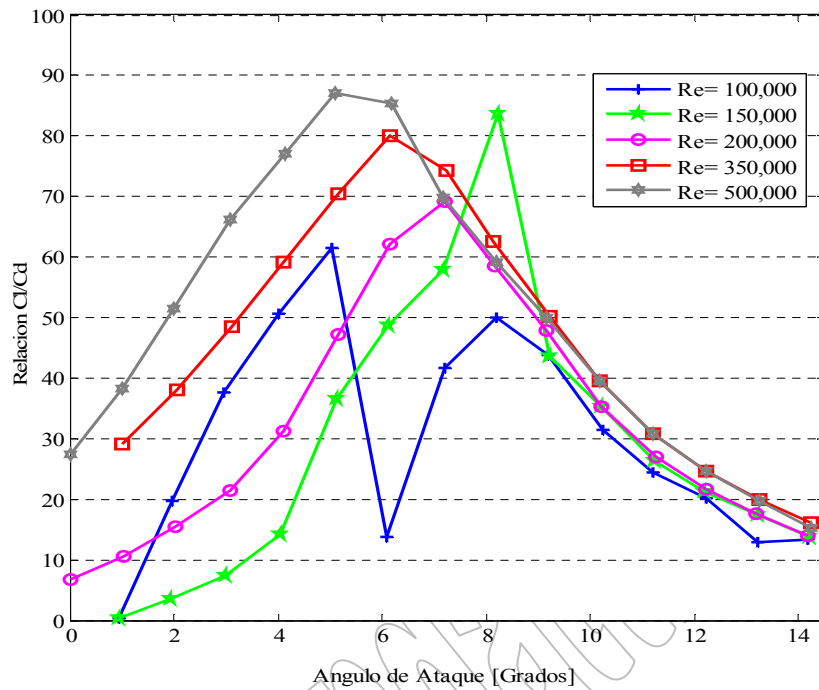


Figura 5. Relación C_l/C_d vs. α , para perfil S-822

La Figura 5 indica que para $Re = 500,000$ y $\alpha = 5^\circ$ se obtiene la máxima relación C_l/C_d con un valor de 87. Analizando de manera más detallada estos valores es importante resaltar la particularidad de los mismos, ya que podría pensarse que la máxima relación C_l/C_d será generada con el $C_{l\max}$ y $C_{d\min}$; pero este pensar es no es necesariamente cierto (relaciones prácticas de C_l/C_d), siendo $C_l = 0.783$ y $C_d = 0.009$ quienes permiten el C_l/C_d máximo para este perfil.

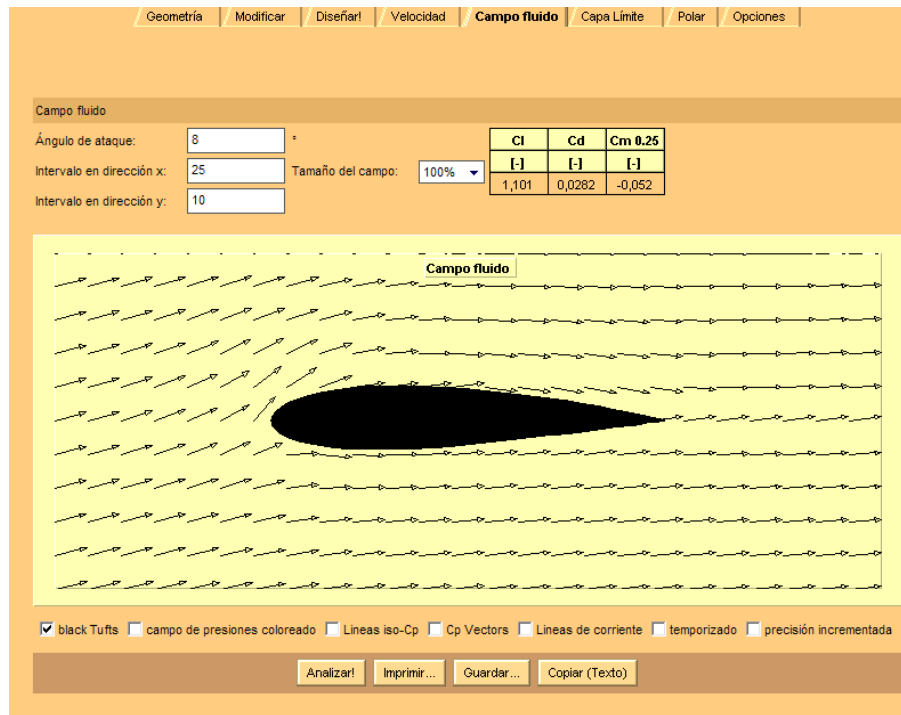


Figura 6. Comportamiento del perfil en una Corriente de Viento para el Perfil S-822

Si se observa la Figura 6, se nota que la corriente de viento que circula sobre el perfil sin ningún inconveniente desde el borde de ataque hasta el de salida, para un $\alpha = 6^\circ$.

Si bien es cierto que el S-822 posee un mayor grosor a los otros perfiles, pero esto no influencia de manera negativa el desempeño del mismo, sino que por el contrario lo favorece ya que tiene una mejor respuesta aerodinámica al no presentar ningún tipo de turbulencia discontinuidad en flujo de viento al cual es sometido.

La distribución de presiones para el perfil S-822 que se muestra en la Figura 7 indica que las mayores presiones se encuentran cerca del borde de ataque, para luego disminuir a medida llegar al borde de salida. También se tiene que estas presiones son generadas para un ángulo de ataque $\alpha = 8^\circ$ a diferencia de los otros 2 que son a un $\alpha = 6^\circ$, esto es porque para $\alpha < 8^\circ$ la sustentación se ve comprometida por que los valores de C_l son pequeños.

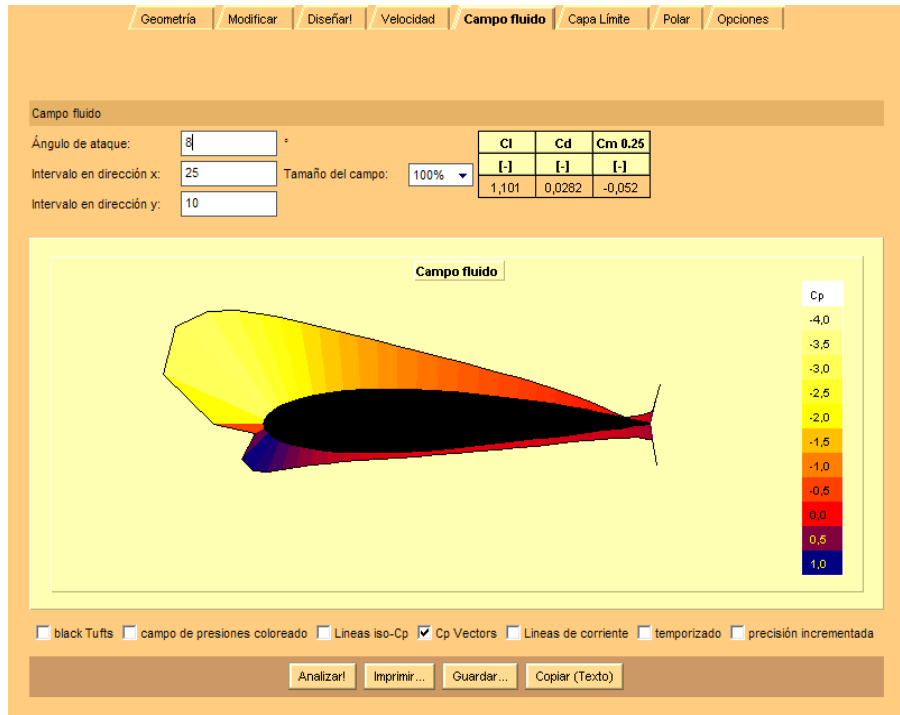


Figura 7. Distribución de presiones en el perfil S-822

Perfil E-387

La superficie de sustentación E-387 fue diseñada en el principio de los años 60 por Richard Eppler para los modelos de aviones sailplane; era rápidamente acertada y todavía se utiliza. Más allá de esto, ha adquirido el papel adicional de convertirse en un perfil de prueba para comparar superficies de sustentación con bajo número de Reynolds a partir de un túnel de viento, con las de otro perfil [4], [5].

De hecho, la superficie de sustentación E-387 es probablemente el perfil más extensamente probado con bajo número Reynolds, siendo probado en los Países Bajos, Stuttgart, Princeton y la NASA Langley

Tabla 3. Características del perfil E-387 [4]

Parámetro	Cuerda%
Grueso [m]	9.03
Curvatura [m]	3.78

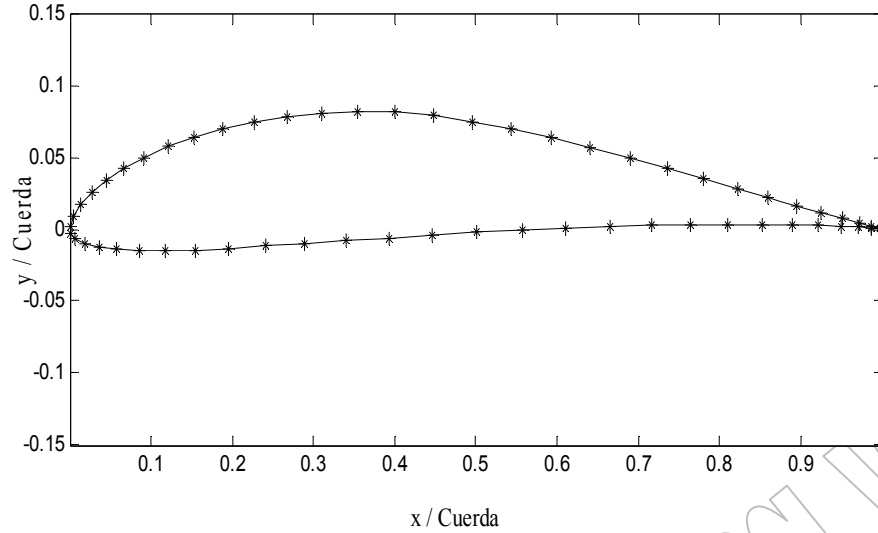


Figura 8.a Geometría del Perfil E-387, Contorno.

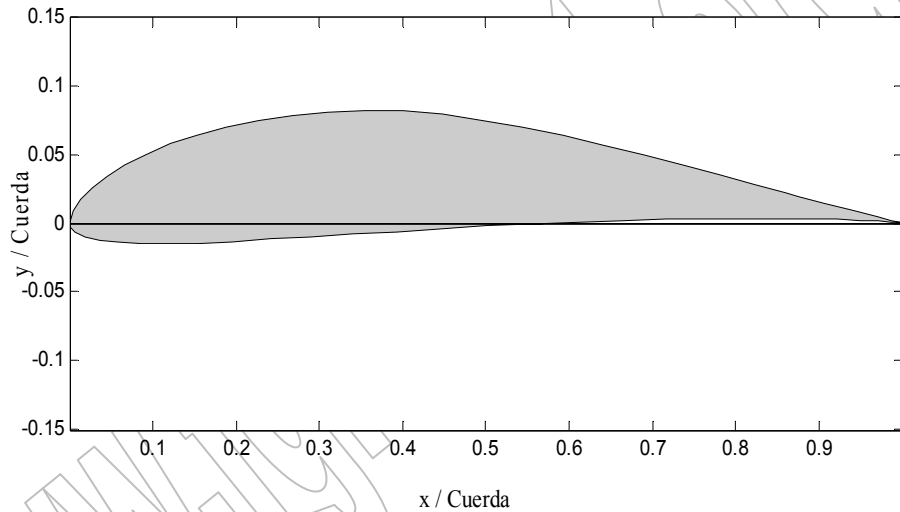


Figura 8.b Geometría del Perfil E-387, Vista interna

Este perfil presenta una un porcentaje de curvatura de 3.78% con un grosor del 9.03% de la cuerda (mostrado en Tabla 3), lo que significa que es el mas delgado de los 5 analizados. Mientras que las Figuras 8.a y 8.b presentan su geometría característica.

Al igual que los dos anteriores presenta buenos valores de C_l , como se aprecia en la Figura 9, donde para ese caso el $C_{l,max} = 1.259$ para $\alpha = 10^\circ$, pero adicionalmente este perfil posee valores de C_l elevados en el rango comprendido $\alpha > 8^\circ$ y $100.000 < Re < 500.000$ lo que se traduce en muy poca probabilidad de que ocurra pérdida de la sustentación.

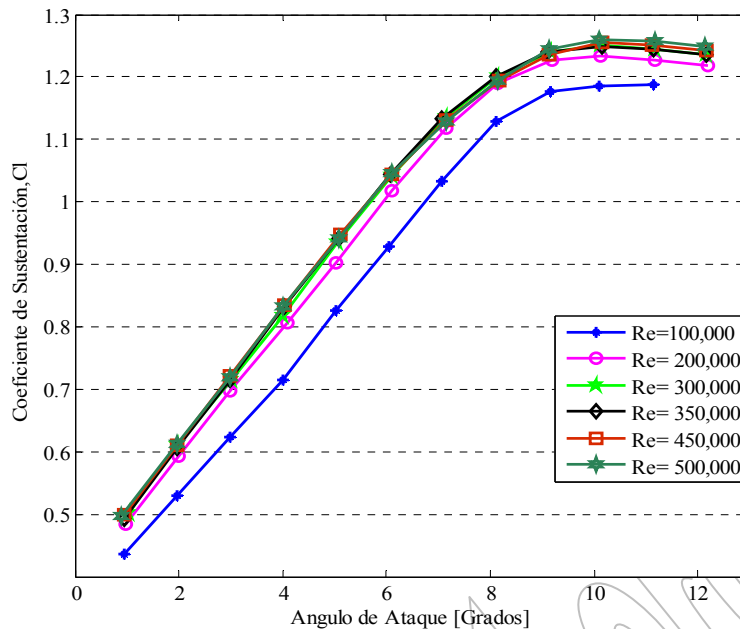


Figura 9. C_l vs. α , para el Perfil E387

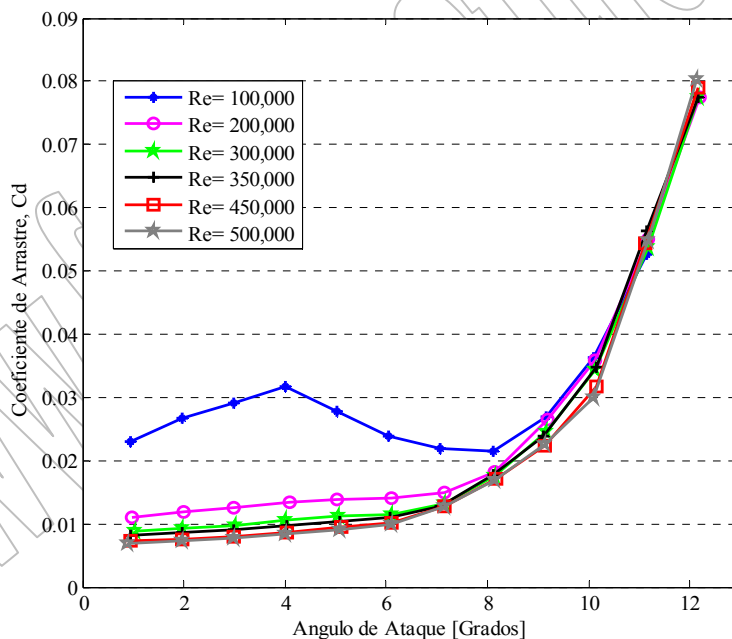


Figura 10. C_d vs. α , para el Perfil E387

Respecto al C_d mostrado en la Figura 10 se tiene que el valor máximo es de 0.08 para $\alpha = 12^\circ$ y el mínimo de 0.006 para $\alpha = 1^\circ$, ambos valores para un $Re = 500,000$. Por último la relación C_l/C_d máxima que este perfil presenta es de 105,76 para $\alpha = 6^\circ$ y $Re = 500,000$ mostrado en la Figura 11, siendo este valor el mas elevado entre los tres perfiles estudiados. También hay acotar el hecho de que para $\alpha > 6^\circ$ la relación comienza a decrecer para cualquier valor de Reynolds.

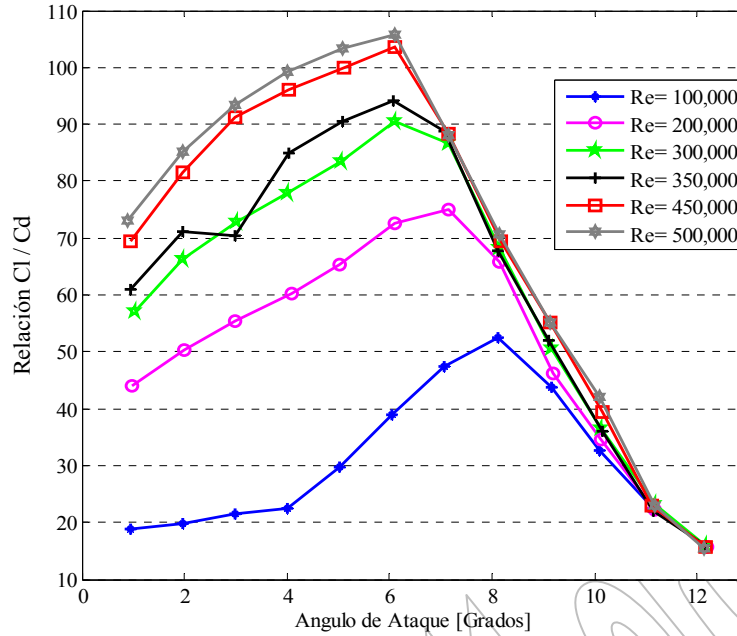


Figura 11. Relación Cl/Cd vs. α , para el perfil E-387

Al igual que el perfil S-822, el E-367 presenta una muy buena aerodinámica respecto a la corriente de viento que circula por su geometría tal como se muestra en la Figura 12, donde el viento que enfrenta al perfil se desliza suavemente siguiendo la curvatura superior e inferior del mismo.

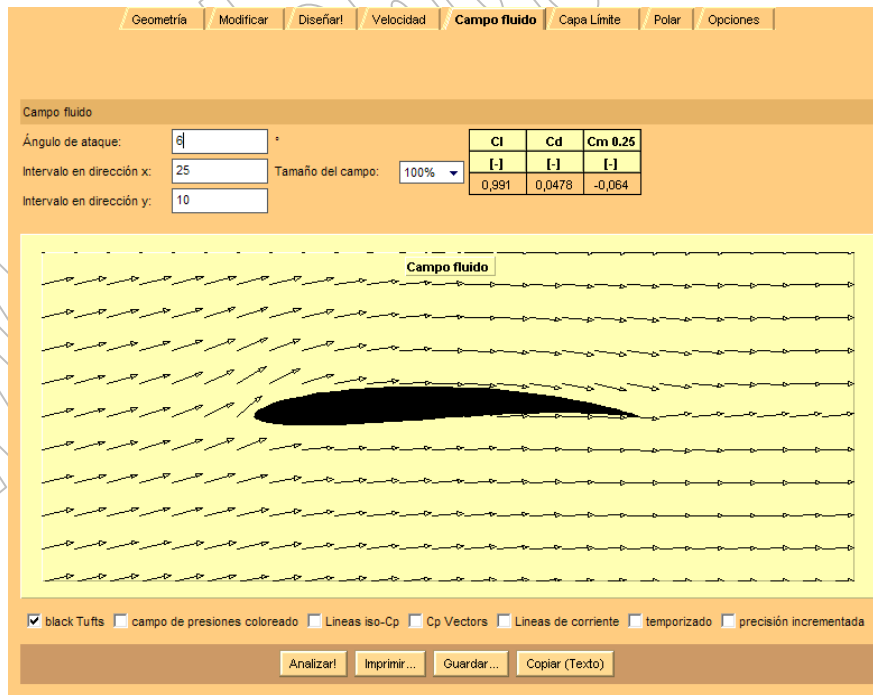


Figura 12. Comportamiento del perfil en una Corriente de Viento para el Perfil E-387

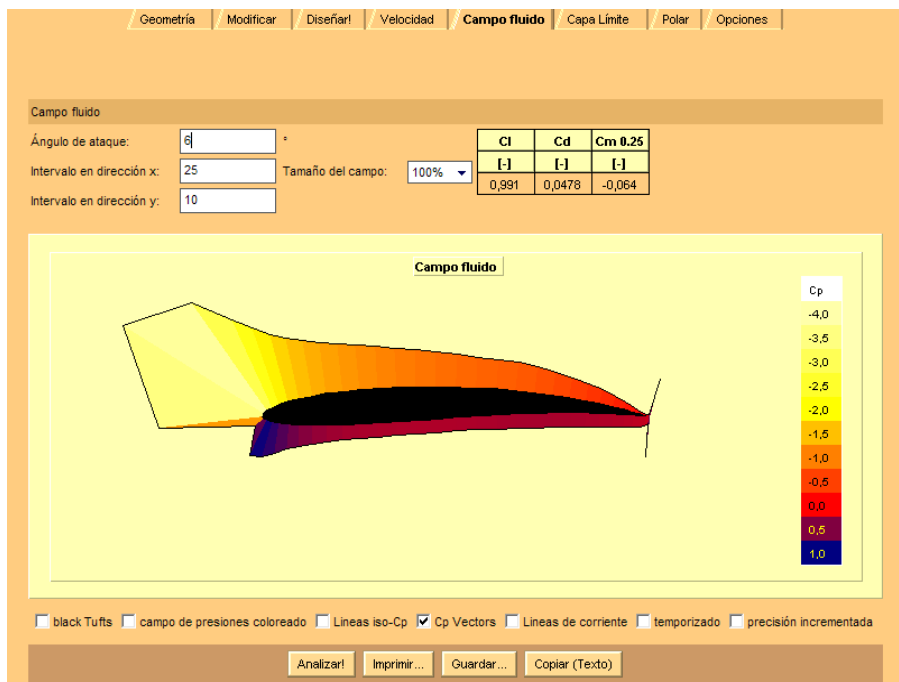


Figura 13. Distribución de presiones en el Perfil E-387

De la misma forma que para el perfil anterior, en la Figura 13 se tienen la distribución de presiones en el E-387 en la cual se aprecia que se cumple el principio básico para la existencia de sustentación, ya que las presiones en la parte inferior del perfil son mayores a las ubicadas en la parte superior. Estas presiones son para un $\alpha = 6^\circ$, ángulo con el cual este perfil logra la máxima relación C_l/C_d , además se puede agregar la particularidad de que si se aumenta $\alpha > 6^\circ$ el perfil no entrará en pérdida de manera inmediata pero si comenzará a menguar la fuerza de sustentación.

Perfil MH-106

Los perfiles MH fueron creados por el Dr. Martín Hepperle de la universidad de Stuttgart en Alemania. Más específicamente la serie MH 100 son ideales para diseños de aerogeneradores de baja potencia, donde además del MH106 se tiene MH 108-110 [6].

En la Tabla 4 se tienen dos Características fundamentales en un perfil como lo son el grosor y la curvatura, donde para el MH 106 la curvatura es mínima siendo el perfil de menor curvatura de los 5 sometidos a estudio.

Tabla 4. Características del perfil MH-106 [6]

Parámetro	Cuerda%
Grosor [m]	13.1
Curvatura [m]	1

La geometría que posee el perfil MH 106 se muestra en las Figuras 14.a y 14.b, donde prestando particular interés en el borde de salida se puede notar que presenta una forma cóncava en su borde de salida, a diferencia de los otros perfiles estudiados donde en los cuales convexo.

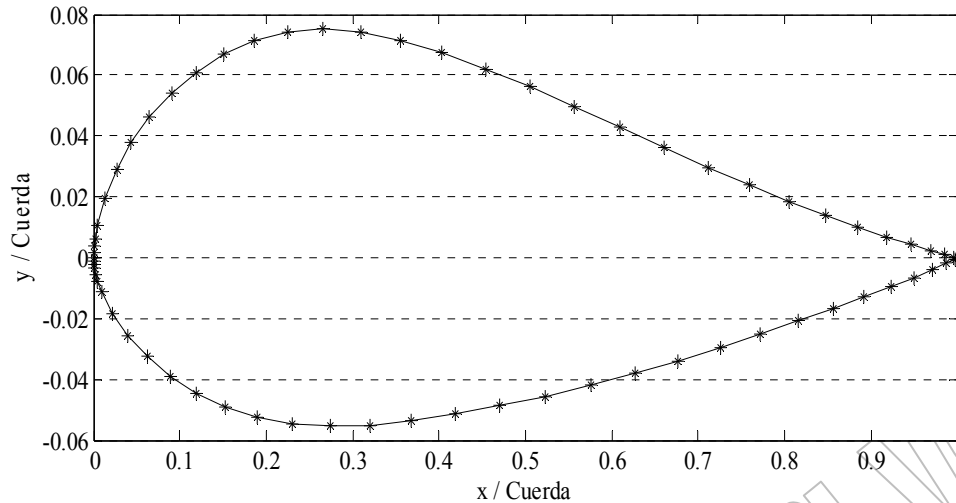


Figura 14.a Geometría del Perfil MH-106, Contorno

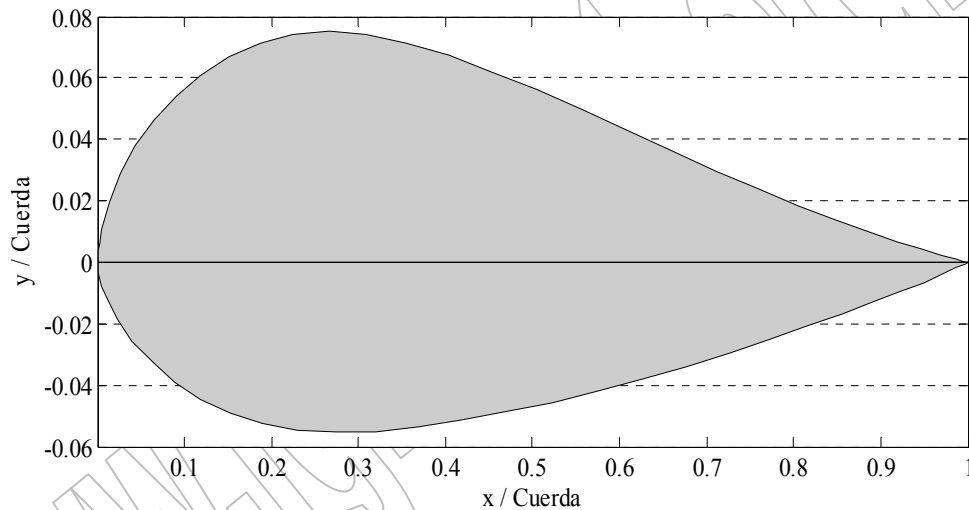


Figura 14.b Geometría del Perfil MH-106, Vista interna

Respecto a los valores del coeficiente de sustentación que puede lograr, en la Figura 15 se observa que no son muy elevados, ya que no pasan de 0,9 siendo este el máximo valor para un $Re = 1.000.000$ y un ángulo de ataque de 9° . También se tiene que $\alpha < 7^\circ$ prácticamente no existe diferencia las curvas de los 3 números de Reynolds.

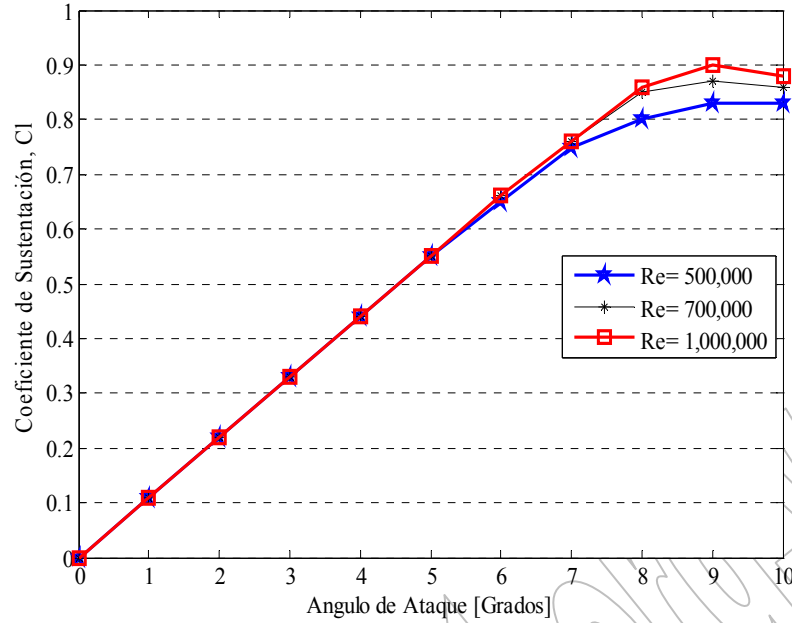


Figura 15. C_l vs. α , para el Perfil MH-106

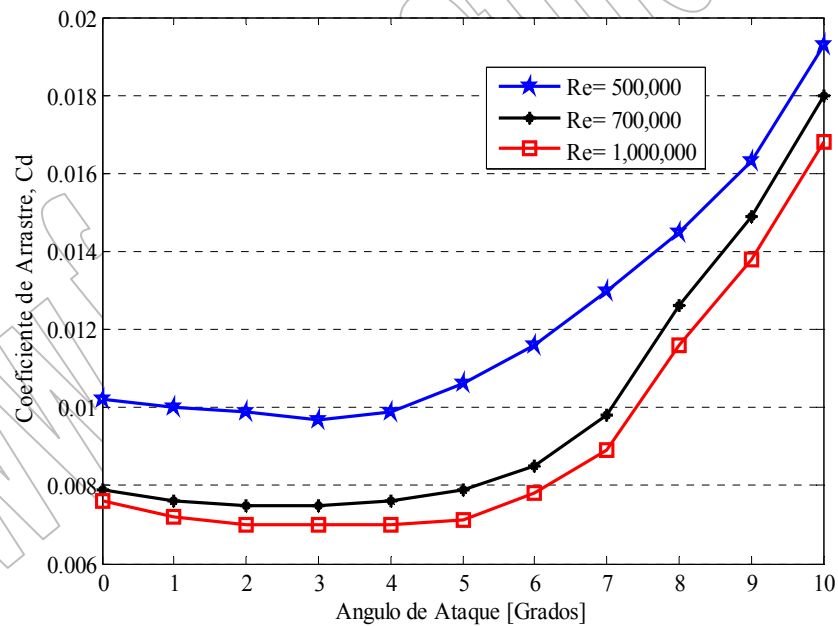


Figura 16. C_d vs. α , para el Perfil MH-106

La Figura 16 muestra que los valores de C_d más bajos son para $Re = 1.000.000$ obteniéndose el valor más pequeño de 0.0076 con $\alpha = 4^\circ$, mientras que para un $Re = 500.000$ el C_d mínimo 0.0079 es de para un $\alpha = 3^\circ$, estos valores son convenientes para la obtención de una relación C_l/C_d

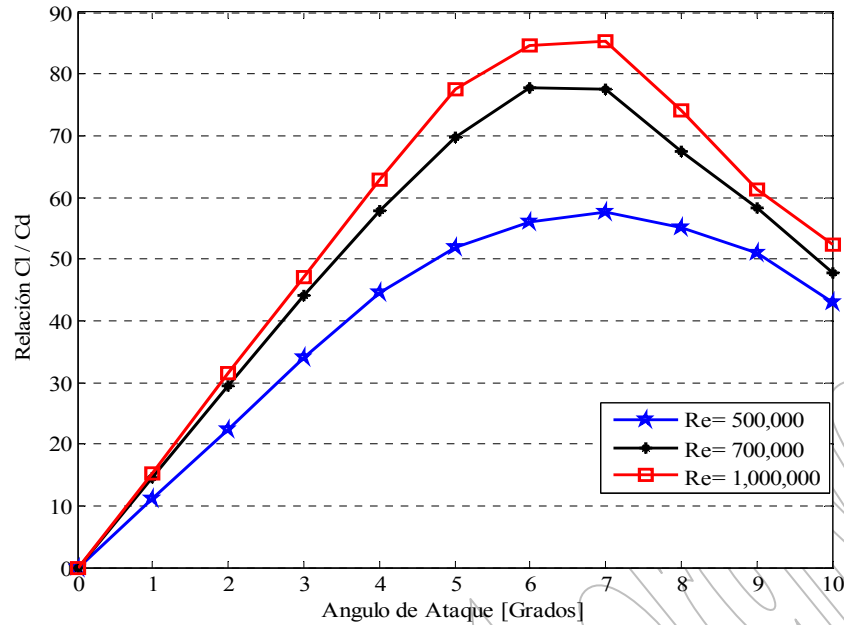


Figura 17. Relación C_l/C_d vs. α , para el perfil MH-106

La relación C_l/C_d para este perfil se muestra en la Figura 17, donde se aprecia que los valores más altos se logran para $Re = 1.000.000$ para el intervalo de $6^\circ < \alpha < 7^\circ$, sin embargo para $Re = 500.000$ los valores no son muy altos, ya que el máximo valor alcanzado es de 57.69 para un $\alpha = 7^\circ$. Este valor no es bueno si se compara con el de los dos perfiles anteriores, ya que se requiere que sean los más altos posible para que la sustentación sea grande.

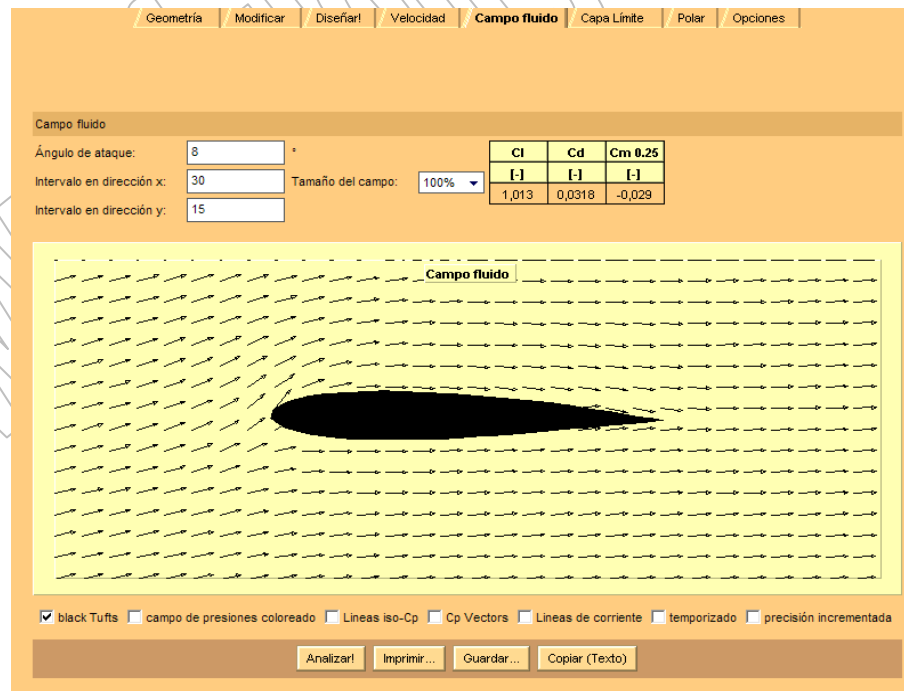


Figura 18. Comportamiento del perfil en una Corriente de Viento para el Perfil MH-106

La simulación del perfil MH-106 inmerso en una corriente de viento se muestra en la Figura 18. Es posible apreciar que para un $\alpha = 8^\circ$ en el borde de ataque se presenta una pequeña discontinuidad en el flujo de viento, pero a medida que avanza por la superficie del perfil esta desaparece y al llegar al borde de salida fluye sin ningún inconveniente.

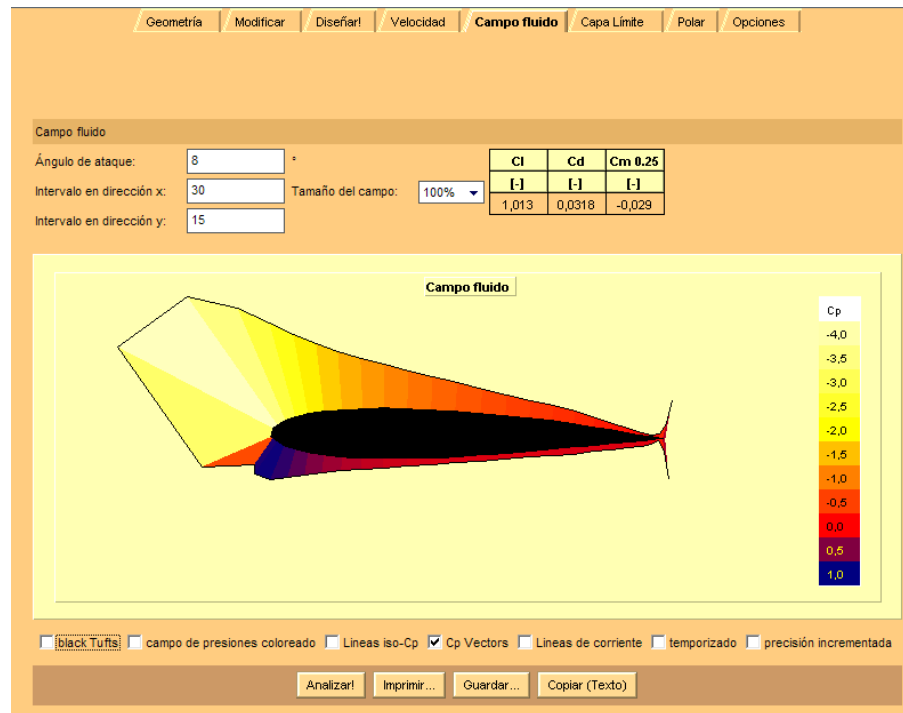


Figura 19. Distribución de presiones en el Perfil MH-106

La distribución de presiones de este perfil se presenta en la Figura 19, donde se tienen la incidencia de las presiones a lo largo de la geometría del perfil. Además se observa con claridad que en el borde de ataque es donde se obtiene la mayor incidencia de presiones, lo cual es causado por la discontinuidad en el flujo de aire de la Figura 18. Aunque a pesar de que esto afecta un poco la sustentación del perfil, aun puede usarse para un aerogenerador.

Perfil SG-6040

La familia de perfiles SG-6040 fue desarrollada por el Dr. Michael Selig conjuntamente con el centro de investigaciones aerodinámicas *Göttingen* en Alemania [3]. En la Tabla 5 se tienen los valores de grosor y curvatura de este perfil.

Tabla 5. Características del perfil SG 6040 [3]

Parámetro	Cuerda%
Grueso [m]	12
Curvatura [m]	2.5

Al igual que en los otros casos, se tienen la geometría del perfil tanto el borde como la vista interna, los cuales se muestran en las Figuras 20.a y 20.b

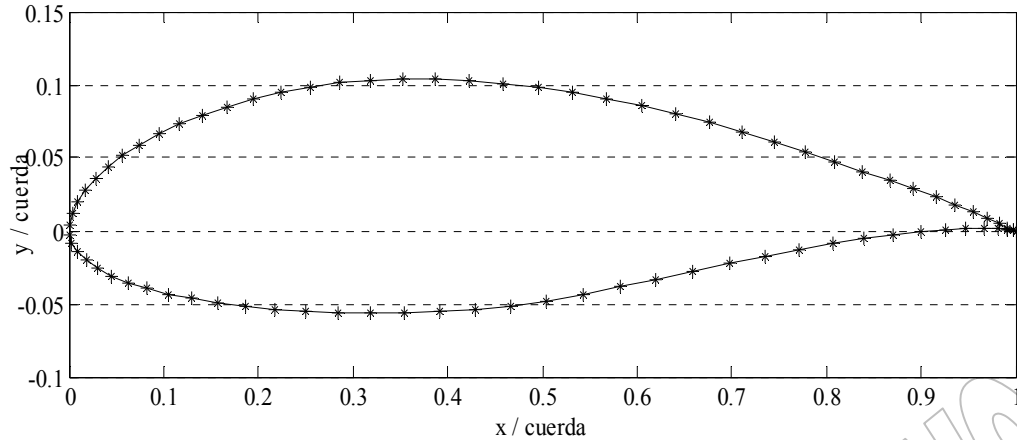


Figura 20.a Geometría del Perfil SG 6040, Contorno

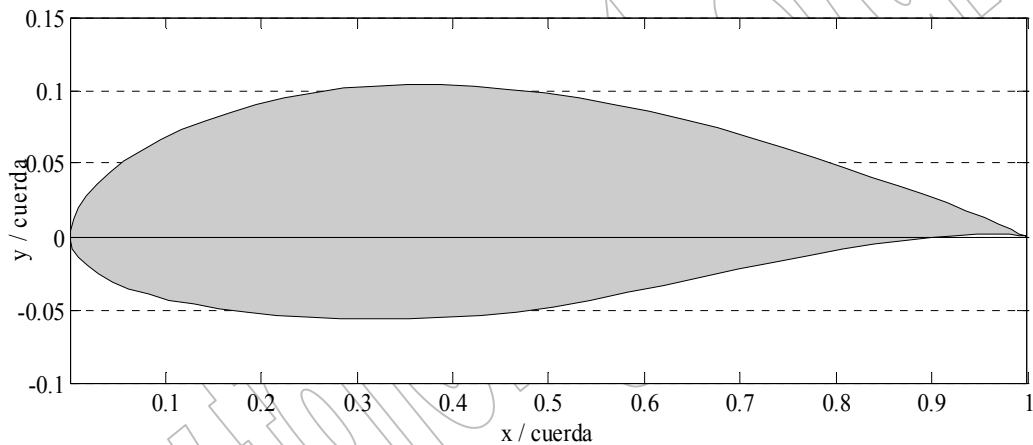


Figura 20.b Geometría del Perfil SG-6040, Vista interna

De la Figura 21 es posible mencionar que, el coeficiente de sustentación máximo que alcanza ese perfil es de 1.337 para un $Re = 300.00$ y $\alpha = 14.3^\circ$, mientras que para $Re = 500,000$ y $\alpha = 12.7^\circ$ se tiene un valor de 1.334. Además posee un buen rango de ángulos de ataque que proporcionan valores de C_l elevados, comprendido entre $8^\circ < \alpha < 14.5^\circ$ siendo este intervalo el mas amplio de los perfiles estudiados.

En lo referente al coeficiente de arrastre mostrado en la Figura 22, se presenta que el menor valor de C_d es de 0.009 para un $Re = 500.000$ y un ángulo de ataque cercano a 0° , siendo mas especifico 0.11° como se observa en la Tabla D de los anexos.

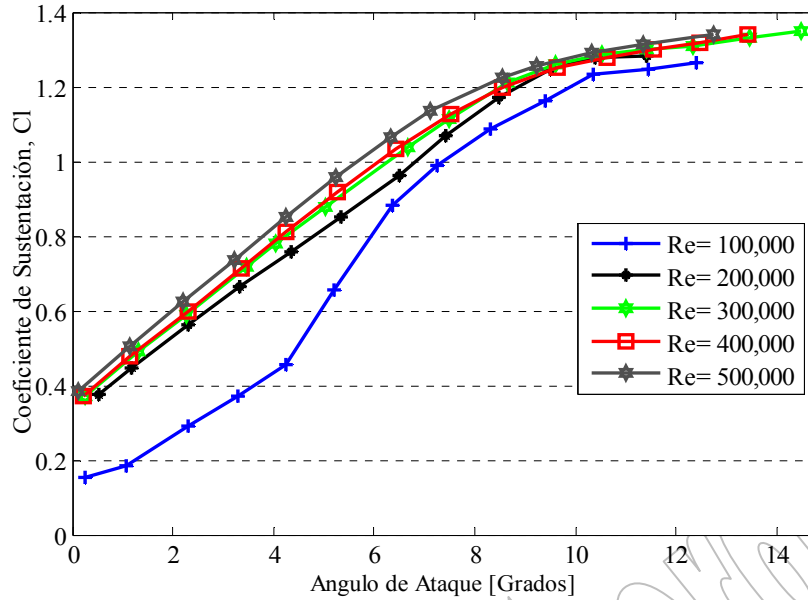


Figura 21. C_l vs. α , para el Perfil SG-6040.

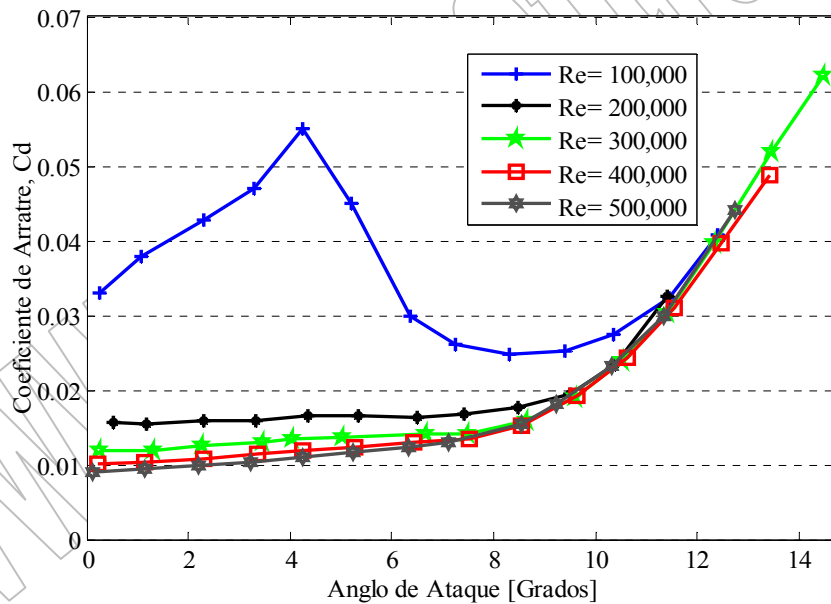


Figura 22. C_d vs. α , para el Perfil SG-6040

En la Figura 22 se tiene los valores de la relación C_l/C_d donde se puede apreciar que para un $Re=500,000$ y un ángulo de ataque $\alpha = 7^\circ$ se obtiene el máximo valor de dicha relación para este perfil el cual resulta ser de 86.5, siendo este valor bueno para garantizar el predominio de la fuerza de sustentación. Otro aspecto importante que se puede notar en la Figura 23 es que para valores de $\alpha > 8^\circ$ la relación C_l/C_d comienza a disminuir lo que se traduce en menor fuerza de sustentación.

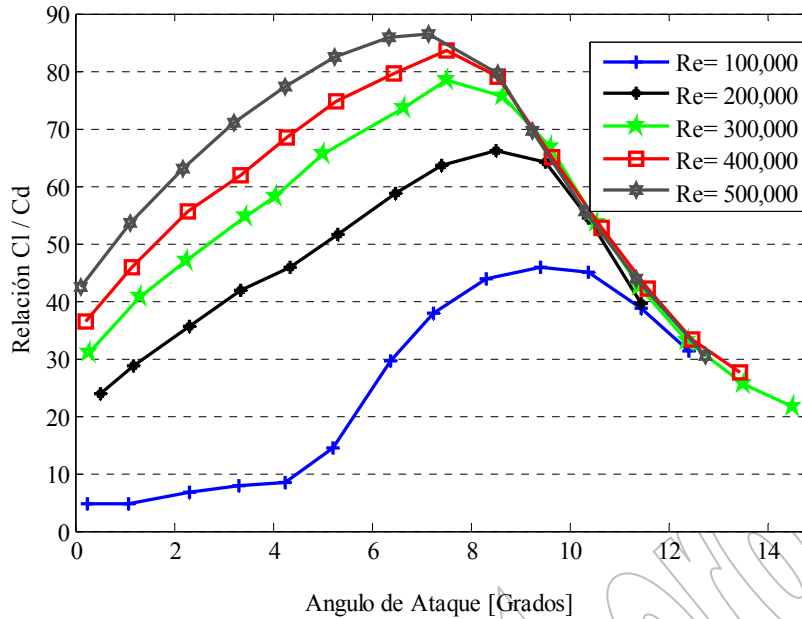


Figura 23. Relación Cl/Cd vs. α , para el perfil SG-6040

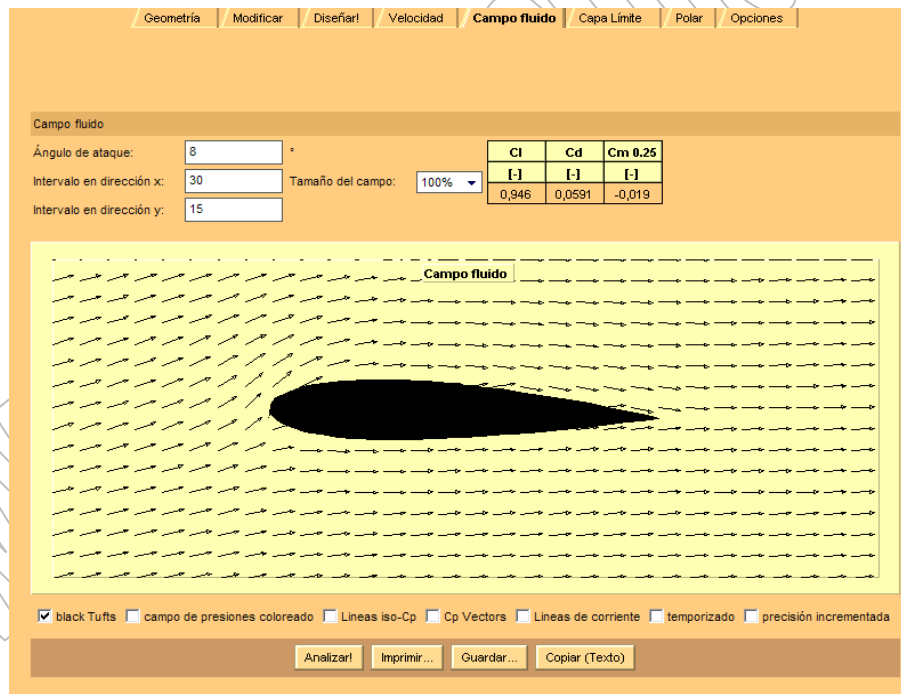


Figura 24. Comportamiento del perfil en una Corriente de Viento para el Perfil SG 6040.

Este perfil presenta discontinuidades o pequeñas turbulencia a lo largo de su superficie, como se aprecia en la Figura 24, donde es posible notar que un poco después del borde de ataque, en el medio y luego en el borde de salida, el flujo del viento no es uniforme. Aunque estas discontinuidades no son tan graves como para que el perfil entre en pérdida de sustentación si afectan de manera negativa el desempeño del mismo.

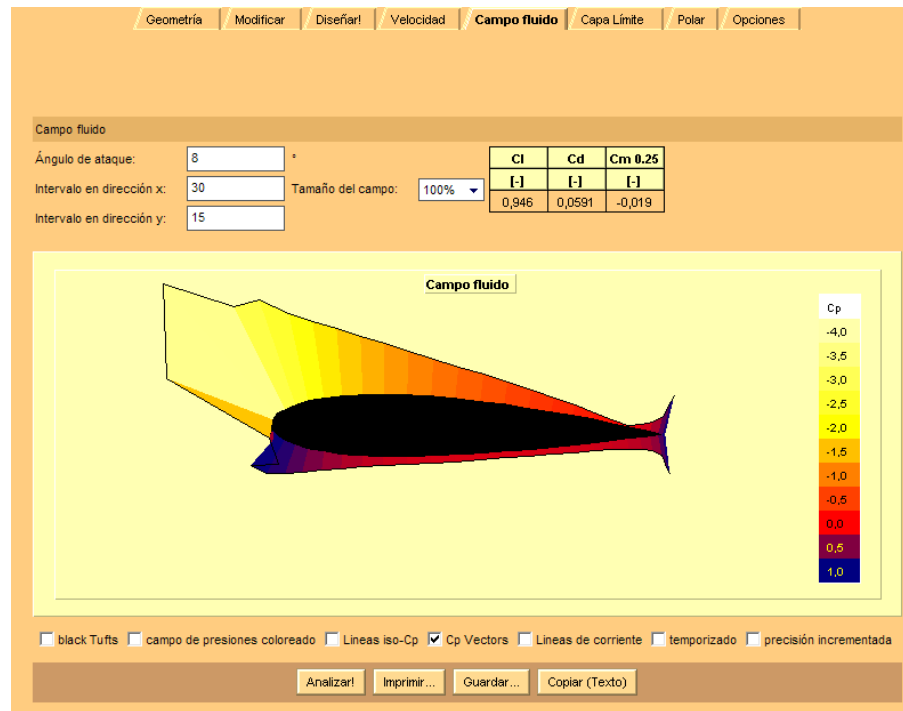


Figura 25. Distribución de presiones en el Perfil SG 6040.

Ahora bien, respecto a la distribución de presiones en la Figura 25 se tiene que motivado por la pequeñas discontinuidades en el flujo de viento, la forma como se distribuyen dichas presiones es un poco fuera de lo común, ya que se observa como cerca del borde de ataque hay ciertos picos pero como e menciono anteriormente estos no producen perdida de la sustentación.

Perfil S-8036

Este perfil es de la familia desarrollada por el DR. Michael Selig en la *UIUC (University of Illinois, Urban Champaign)* también pertenece a la *NREL*, Entre sus características mas resaltantes se tiene que es junto con el perfil S-822 los que poseen mayor grosor con un 16% de la cuerda y una curvatura de 1.9%, tal y como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Características del perfil S-8036 [3].

Parámetro	Cuerda%
Grueso [m]	16
Curvatura [m]	1.9

Así mismo la geometría que describe la forma de este perfil se muestra en las Figuras 26.a y 26.b

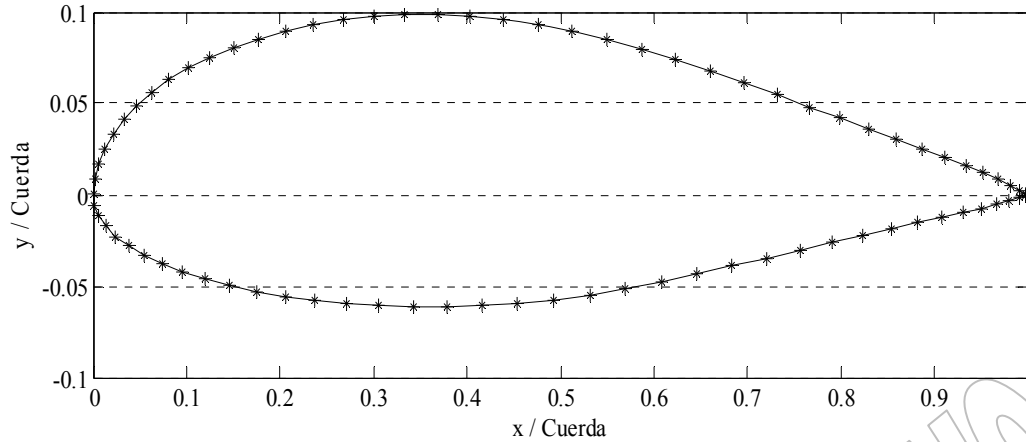


Figura 26.b Geometría del Perfil S-8036, Contorno

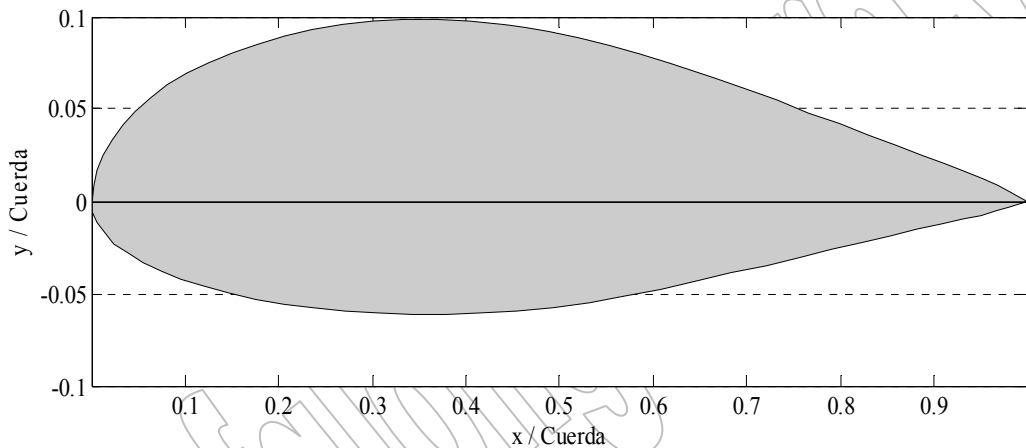


Figura 26.b Geometría del Perfil S-8036, Vista interna

Si se observa la Figura 27 es posible apreciar los valores de coeficiente de sustentación que puede tener este perfil dependiendo de el ángulo de ataque y el número de Reynolds. En este caso el C_l máximo tiene un valor de 1.21 con un $\alpha = 12.5^\circ$ y $Re = 400.000$. Mientras que para un $Re = 500.000$ se obtiene un valor máximo de C_l de 1.197 y $\alpha = 12^\circ$.

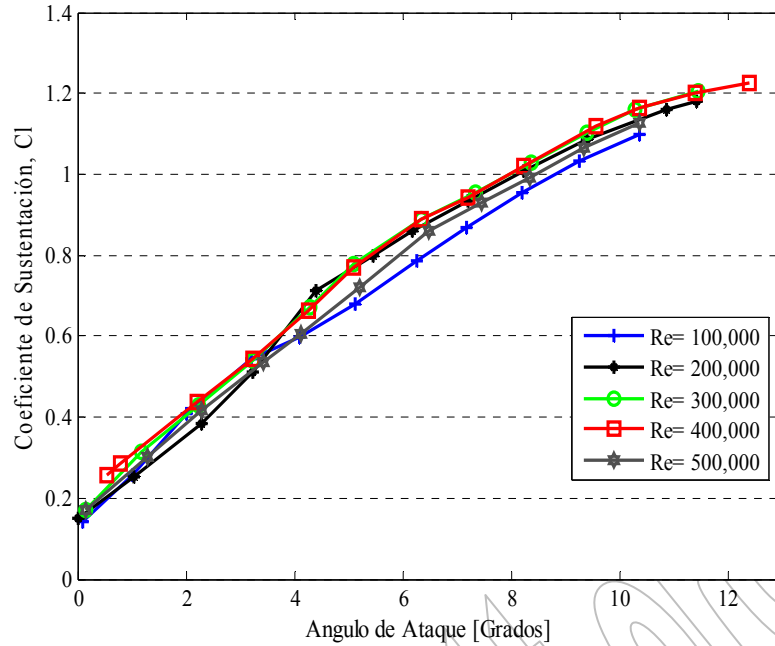


Figura 27. C_l vs. α , para el Perfil S-8036

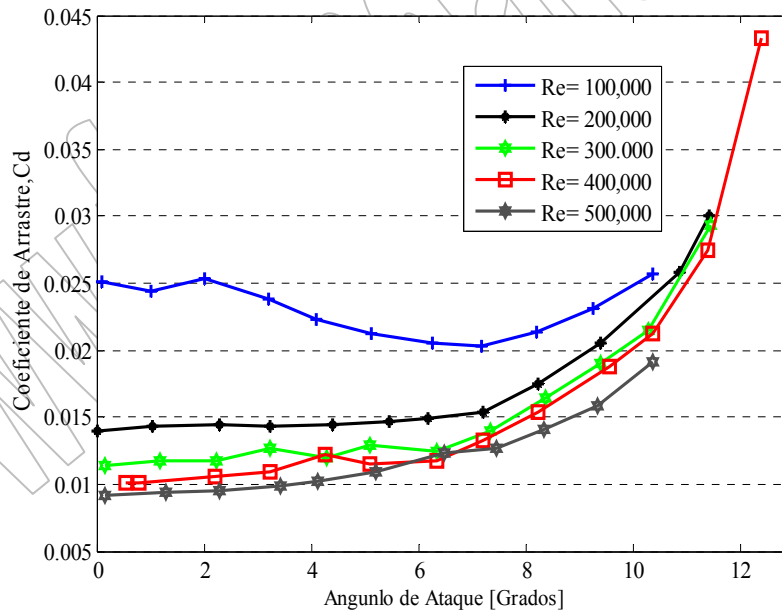


Figura 28. C_d vs. α para el Perfil S-8306

El valor mas pequeño que este perfil puede tener es de $C_{lmin} = 0.097$ para un $\alpha = 0^\circ$ y un $Re = 500.000$, como se aprecia en la Figura 28, siendo este valor muy beneficioso para obtener una relación C_l/C_d alta.

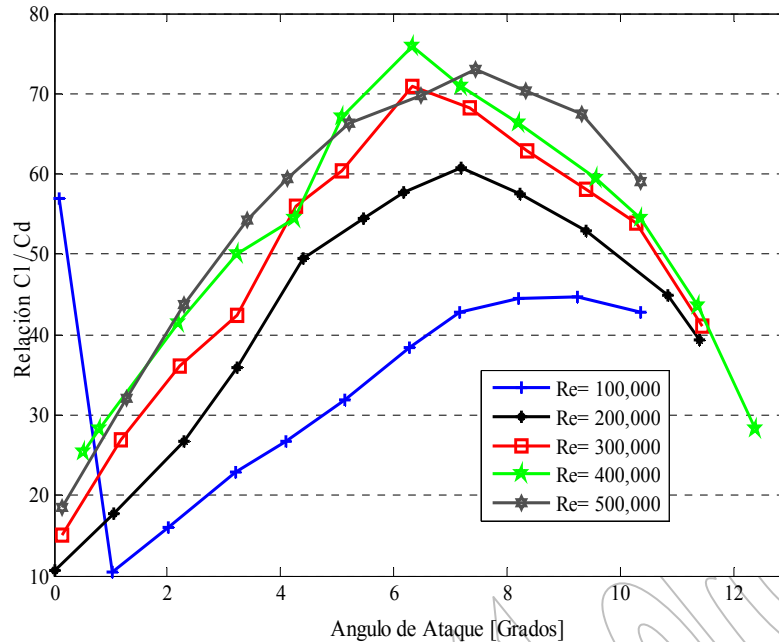


Figura 29. Relación C_l/C_d vs. α , para el perfil S-8306

Según lo mostrado en la Figura 29, el valor máximo para la relación C_l/C_d que puede alcanzar este perfil es de 75.9 para un ángulo de ataque de 6° y $Re = 400,000$. Sin embargo para $Re = 500,000$ también se logra un valor alto de 73 a un $\alpha = 7^\circ$. Adicionalmente haya que tener en cuenta que para $\alpha > 7.5^\circ$ los valores de la relación C_l/C_d comienzan a disminuir lo cual no resulta beneficioso.

El comportamiento del perfil en una corriente de viento se muestra en la Figura 30, donde se observa que existe una pequeña discontinuidad en el flujo de viento poco después del borde de ataque, y en el centro del perfil, pero al llegar al borde de salida estos desaparecen, por lo cual no generan consecuencias mayores a la fuerza de sustentación del perfil.

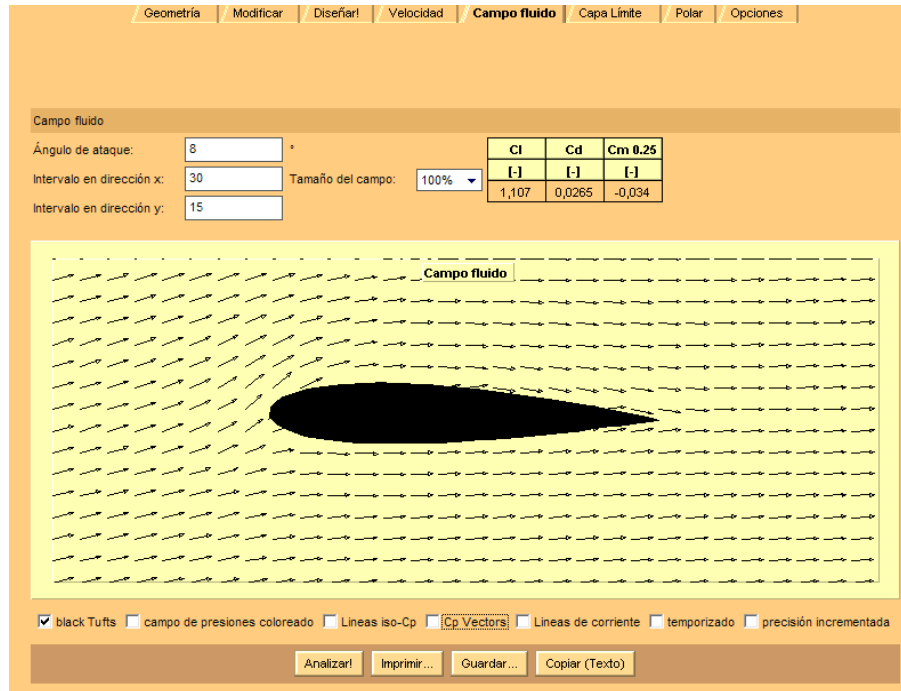


Figura 30. Comportamiento del perfil en una Corriente de Viento para el Perfil S-8036

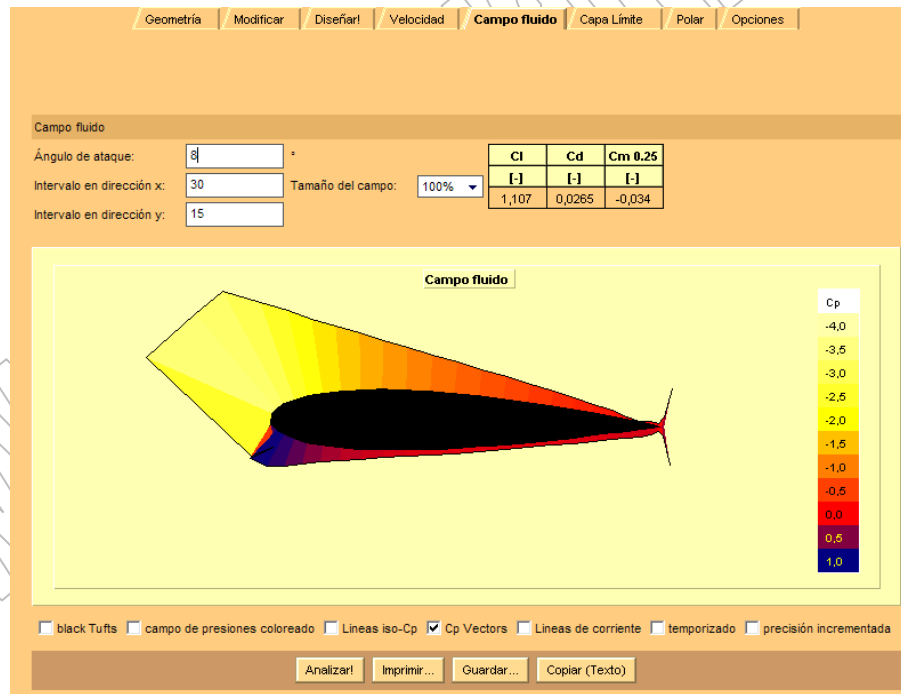


Figura 31. Distribución de presiones en el Perfil S-8036

La distribución de presiones en este perfil es completamente normal, a pesar de las pequeñas discontinuidades en el flujo de viento. Esto significa que las presiones en el extradós son menores a las del intradós garantizando así que la fuerza resultante sea de elevación, como se muestra en la Figura 31.

Comparación final entre perfiles

Una vez analizadas las relaciones entre C_l , C_d y C_l/C_d para diferentes ángulos de ataque α es posible hacer un resumen de las características más resaltantes de los 3 perfiles tal y como se muestra en la Tabla 7, a fin de poder seleccionar el más indicado según los criterios antes mencionados.

Tabla 7. Resumen de las características de los perfiles

Tipo de Perfil	Características
S-822	<ul style="list-style-type: none"> Amplio rango de valores de ángulo de ataque, $8^\circ < \alpha < 14^\circ$, para $Re = 500.000$ en donde se mantiene la sustentación. Valor de C_d bajo para $Re = 500.000$ Relación C_l/C_d elevada con un valor de 87 Buen aerodinámica ante corrientes de viento.
E-387	<ul style="list-style-type: none"> Buen rango de valores de α para $Re = 500.000$, comprendido entre $8^\circ < \alpha < 12.5^\circ$, en donde se mantiene la sustentación. Posee el C_d más pequeño de los 5 perfiles, con un valor de 0.006 para $Re = 500.000$. Presenta la relación C_l/C_d más alta para $Re = 500.000$ con un valor de 105,76. Buen aerodinámica ante corrientes de viento.
MH-106	<ul style="list-style-type: none"> Rango reducido de valores de ángulo de ataque $8^\circ < \alpha < 10^\circ$ para $Re = 500.000$. Valores de C_l por debajo de 1. El C_d mínimo no se logra con $Re = 500,000$ El valor máximo de de la relación C_l/C_d para $Re = 500.000$ es de 57.69 lo cual resulta muy pequeño. Aunque presenta unas pequeñas discontinuidades en el flujo de viento, posee buena aerodinámica.
SG-6040	<ul style="list-style-type: none"> Posee el rango de ángulos de Ataque más amplio de los 5 perfiles estudiados, $8^\circ < \alpha < 14.5^\circ$ para $Re = 500.000$. El C_d mínimo es de 0.09 para $Re = 500.000$. La relación máxima de C_l/C_d es de 86.5 con un $\alpha = 7^\circ$ y $Re = 500.000$. Aunque presenta unas pequeñas discontinuidades en el flujo de viento, posee buena aerodinámica.
S-8036	<ul style="list-style-type: none"> Rango de valores del ángulo de ataque para obtener calores altos de C_l buenos, comprendido entre 8° y 12° El valor de la relación C_l/C_d es de 73 para $Re = 500,00$. Este valor se considera bastante aceptable. Aunque presenta unas pequeñas discontinuidades en el flujo de viento, posee buena aerodinámica.

Finalmente considerando las características más resaltante de los perfiles, y teniendo como norma para la selección los criterios antes mencionados, se elige el perfil **E-387** como el idóneo para un aerogenerador de baja potencia, por ser el que cumple con mayor fidelidad los criterios.

Conclusión

Teniendo en cuenta los análisis y criterios utilizados en este reporte es posible mencionar las siguientes conclusiones:

La relación C_l/C_d debe tener el valor mas grande posible, lo que implica que C_l debe ser mucho más grande que C_d , aunque según lo visto, la relación C_l/C_d máxima no viene dada necesariamente por los valores máximos de C_l y C_d . Otra ventaja que genera un valor alto de esta relación es que aumenta el coeficiente de potencia, lo que a su vez disminuye el radio del aerogenerador.

El ángulo de ataque α debe ser pequeño (entre 6° y 8°) para generar una sobre presión en la parte inferior de la pala y una depresión por arriba, al ocurrir esto se tiene una fuerza que tiende a elevarla, es decir la sustentación. Mientras que de ser muy grande generara una sobrepresión en la parte delantera de la pala y vientos turbulentos, debido a la depresión en la parte superior.

El estudio del comportamiento del perfil en una corriente de viento es fundamental para predecir el rendimiento y correcto desempeño de la turbina, ya que se puede apreciar si existe algún tipo de turbulencia a lo largo de la geometría del perfil, al igual que conocer el ángulo de ataque máximo que puede tener sin caer en perdida de la sustentación.

Finalmente, todos los análisis, criterios, consideraciones y comparaciones anteriores permitieron elegir al perfil **E-387**, como el mas indicado para ser usado en un aerogenerador de baja potencia.

Referencias Documentales

- [1] Francisco M. Gonzales Longatt. *Perfiles Aerodinámicos empleados en Turbinas de Viento, Introducción para No Cultos*. Año 2007.
- [2] Rodríguez, J., Arnalte, S., Burgos, J., “*Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica*”. Madrid; Editorial Rueda.
- [3] Summary of low-Speed Airfoil Data, disponible en www.ae.uiuc.edu/m-selig/uiuc.Lsa/bookannouncement3.html
- [4] Michael S. Selig and Bryan D. McGranahan. *Wind Tunnel Aerodynamic Tests of Six Airfoils for Use on Small Wind Turbines*. Period of Performance: October 31, 2002–January 31, 2003.
- [5] D.M. Somers, *The S822 and S823 Airfoils, October 1992–December 1993*.
- [6] Familia de Perfiles MH-1XX, disponible en www.mh-aerotoools.de/airfoil.html
- [7] Números de Reynolds para perfiles, disponible en www.ae.uiuc.edu/m-selig/Pub/Lsats.html

Anexos

Tabla A. Valores de Reynolds para el Perfil S-822 [3]

Re = 100,000				Re = 150,000			
α	Cl	Cd	Cl/Cd	α	Cl	Cd	Cl/Cd
0.93	0.011	0.0347	0.317	0.93	0.015	0.0318	0.3068
1.97	0.071	0.0360	1.9722	1.94	0.119	0.0340	3.5
2.96	0.159	0.0422	3.7678	2.98	0.256	0.0353	7.2521
4.01	0.251	0.0497	5.0553	4.04	0.457	0.0324	14.1049
5.02	0.349	0.0567	6.1552	5.13	0.780	0.0213	36.6197
6.08	0.573	0.0419	13.6754	6.13	0.868	0.0178	48.764
7.19	0.919	0.0221	41.5837	7.16	0.938	0.0162	57.9012
8.20	1.004	0.0201	49.9502	8.23	0.998	0.0178	83.7288
9.20	1.058	0.0242	43.719	9.21	1.040	0.0223	43.6368
10.24	1.055	0.0335	31.4925	10.21	1.050	0.0298	35.2349
11.20	1.060	0.0433	24.4804	11.22	1.051	0.0399	26.3409
12.23	1.073	0.0530	20.2453	12.19	1.065	0.0501	21.2575
13.21	1.086	0.0640	12.9286	13.20	1.078	0.0621	17.3591
14.19	1.085	0.0811	13.3785	14.21	1.081	0.0787	13.7357
Re = 200,000				Re = 350,000			
α	Cl	Cd	Cl/Cd	α	Cl	Cd	Cl/Cd
0.01	0.154	0.0224	6.8036	1.01	0.334	0.0115	29.0435
1.03	0.245	0.0230	10.6522	2.07	0.450	0.0118	38.1356
2.04	0.347	0.0223	15.56.05	3.10	0.553	0.0114	48.5088
3.08	0.449	0.0209	21.4833	4.11	0.657	0.0111	59.1892
4.09	0.589	0.0188	31.3298	5.15	0.755	0.0107	70.5607
5.16	0.751	0.0159	47.2327	6.15	0.840	0.0105	80
6.16	0.887	0.0141	62.1986	7.22	0.915	0.0123	74.3902
7.19	0.941	0.0138	69.1912	8.12	0.965	0.0154	62.6623
8.15	0.988	0.0169	58.4615	9.23	1.008	0.0201	50.1493
9.17	1.027	0.0215	47.7674	10.18	1.034	0.0261	39.6169
10.21	1.040	0.0295	35.2542	11.19	1.058	0.0344	30.7558
11.26	1.049	0.0390	26.8974	12.21	1.080	0.0439	24.6014
12.21	1.062	0.0492	21.5854	13.25	1.101	0.0550	20.0182
13.19	1.077	0.0614	17.5407	14.23	1.114	0.0696	16.0057

Re = 500,000			
α	Cl	Cd	Cl/Cd
0.03	0.246	0.0090	27.3333
1.00	0.345	0.0090	38.3333
2.00	0.458	0.0089	51.4606
3.07	0.576	0.0087	66.2069
4.13	0.687	0.0088	77.0455
5.09	0.783	0.0090	87
6.17	0.871	0.0102	85.3922
7.16	0.923	0.0132	69.9242
8.19	0.972	0.0164	59.2683
9.17	1.008	0.0202	49.901
10.19	1.042	0.0263	39.6198
11.19	1.075	0.0350	30.7143
12.22	1.105	0.0448	24.6052
13.23	1.129	0.0571	19.7723
14.23	1.142	0.0751	15.2064

Tabla B. Valores de Reynolds para el Perfil E-387 [3]

Re = 100,000				Re = 200,000			
α	Cl	Cd	Cl/Cd	α	Cl	Cd	Cl/Cd
0.95	0.435	0.0229	18.9956	0.97	0.483	0.0110	43.9091
1.96	0.530	0.0266	19.9248	2.01	0.593	0.0118	50.2542
3.00	0.623	0.0290	21.4828	3.00	0.698	0.0126	55.3968
4.00	0.715	0.0317	22.5552	4.09	0.806	0.0134	60.1493
5.04	0.825	0.0278	29.6763	5.02	0.902	0.0138	65.3623
6.04	0.928	0.0239	38.8285	6.09	1.017	0.0140	72.6429
7.07	1.032	0.0218	47.3394	7.14	1.119	0.0149	75.1007
8.11	1.130	0.0215	52.5581	8.15	1.191	0.0181	65.8011
9.17	1.176	0.0269	43.7175	9.18	1.226	0.0265	46.2642
10.11	1.185	0.0363	32.6446	10.12	1.234	0.0358	34.4693
11.14	1.188	0.0526	22.5856	11.18	1.227	0.0550	22.3091
---	---	---	---	12.20	1.218	0.0774	15.7364
Re = 300,000				Re = 350,000			
α	Cl	Cd	Cl/Cd	α	Cl	Cd	Cl/Cd
1.02	0.502	0.0088	57.0465	0.94	0.493	0.0081	60.8642
1.96	0.610	0.0092	66.3043	1.97	0.605	0.0085	71.1765
3.02	0.714	0.0098	72.8571	3.00	0.714	0.0091	70.4615
4.00	0.817	0.0105	77.8095	4.03	0.833	0.0098	85
5.06	0.935	0.0112	83.4821	5.08	0.942	0.0104	90.5769
6.11	1.041	0.0115	90.5217	6.08	1.045	0.0111	94.1491
7.15	1.135	0.0131	86.6412	7.08	1.134	0.0128	88.6938
8.14	1.201	0.0176	68.2386	8.11	1.200	0.0177	67.7966
9.15	1.241	0.0246	50.4472	9.11	1.240	0.0238	52.1000
10.12	1.250	0.0343	36.4431	10.14	1.249	0.0347	35.9942
11.16	1.245	0.0537	23.1844	11.15	1.245	0.0564	22.0745
12.17	1.236	0.0774	15.9690	---	---	---	---
Re = 450,000				Re = 500,000			
α	Cl	Cd	Cl/Cd	α	Cl	Cd	Cl/Cd
0.96	0.500	0.0072	69.4444	0.88	0.497	0.0068	73.0882
1.98	0.611	0.0075	81.4667	1.97	0.613	0.0072	85.1389
3.00	0.721	0.0079	91.2658	2.98	0.720	0.0077	93.5065
4.03	0.835	0.0087	95.977	4.02	0.833	0.0084	99.1667
5.12	0.948	0.0094	100.051	5.08	0.941	0.0091	103.407
6.09	1.045	0.0101	103.465	6.11	1.047	0.0099	105.758
7.15	1.132	0.0128	88.4375	7.15	1.129	0.0128	88.2031
8.18	1.195	0.0172	69.4767	8.14	1.195	0.0169	70.7101
9.12	1.236	0.0224	55.1786	9.14	1.244	0.0226	55.0442
10.14	1.255	0.0318	39.4654	10.09	1.259	0.0300	41.9667
11.12	1.252	0.0543	23.0571	11.17	1.257	0.0548	22.9380
12.16	1.242	0.0790	15.7215	12.13	1.248	0.0804	15.5224

Tabla C. Valores de Reynolds para el Perfil MH-106 [7]

<i>Re = 500,000</i>				<i>Re = 700,000</i>			
α	<i>Cl</i>	<i>Cd</i>	<i>Cl/Cd</i>	α	<i>Cl</i>	<i>Cd</i>	<i>Cl/Cd</i>
0.00	0.00	0.0102	0	0.00	0.00	0.0079	0
1.00	0.11	0.0100	11.0000	1.00	0.11	0.0076	14.4737
2.00	0.22	0.0099	22.2222	2.00	0.22	0.0075	29.3333
3.00	0.33	0.0097	34.0206	3.00	0.33	0.0075	44.0000
4.00	0.44	0.0099	44.4444	4.00	0.44	0.0076	57.8947
5.00	0.55	0.0106	51.8868	5.00	0.55	0.0079	69.6203
6.00	0.65	0.0116	56.0345	6.00	0.66	0.0085	77.6471
7.00	0.75	0.0130	57.6923	7.00	0.76	0.0098	77.5510
8.00	0.80	0.0145	55.1724	8.00	0.85	0.0126	67.4306
9.00	0.83	0.0163	50.9202	9.00	0.87	0.0149	58.3893
10.00	0.83	0.0193	43.0052	10.00	0.86	0.0180	47.7778

<i>Re = 1,000,000</i>			
α	<i>Cl</i>	<i>Cd</i>	<i>Cl/Cd</i>
0.00	0.00	0.0076	0
1.00	0.11	0.0072	15.2778
2.00	0.22	0.0070	31.4286
3.00	0.33	0.0070	47.1429
4.00	0.44	0.0070	62.8761
5.00	0.55	0.0071	77.4648
6.00	0.66	0.0078	84.6154
7.00	0.76	0.0089	85.3933
8.00	0.86	0.0116	74.1379
9.00	0.90	0.0138	61.2174
10.00	0.88	0.0168	52.3810

Tabla D. Valores de Reynolds para el Perfil SG-6040 [7]

Re= 100,000				Re= 200,000			
α	C_l	C_d	C_l/C_d	α	C_l	C_d	C_l/C_d
0.25	0.152	0.0331	4.592145015	0.53	0.374	0.0156	23.974359
1.08	0.183	0.0379	4.828496042	1.18	0.447	0.0155	28.8387097
2.31	0.292	0.0427	6.838407494	2.30	0.563	0.0158	35.6329114
3.30	0.369	0.0471	7.834394904	3.34	0.664	0.0159	41.7610063
4.23	0.456	0.0549	8.306010929	4.34	0.758	0.0165	45.9393939
5.20	0.657	0.0451	14.56762749	5.32	0.851	0.0165	51.5757576
6.37	0.883	0.0298	29.63087248	6.48	0.961	0.0164	58.597561
7.25	0.987	0.0261	37.81609195	7.40	1.070	0.0168	63.6904762
8.30	1.085	0.0247	43.92712551	8.49	1.173	0.0177	66.2711864
9.38	1.163	0.0253	45.96837945	9.51	1.246	0.0194	64.2268041
10.36	1.235	0.0274	45.0729927	10.37	1.278	0.0235	54.3829787
11.43	1.248	0.0323	38.6377709	11.42	1.284	0.0325	39.5076923
12.40	1.266	0.0408	31.2941176	-----	-----	-----	-----
Re= 300,000				Re= 400,000			
α	C_l	C_d	C_l/C_d	α	C_l	C_d	C_l/C_d
0.27	0.369	0.0119	31.0084	0.23	0.373	0.0102	36.5686275
1.31	0.489	0.0120	40.75	1.14	0.476	0.0104	45.7692308
2.26	0.587	0.0125	46.96	2.29	0.599	0.0108	55.462963
3.45	0.716	0.0131	54.5802	3.35	0.713	0.0115	62
4.05	0.779	0.0134	58.1443	4.26	0.813	0.0119	68.3193277
5.02	0.878	0.0137	65.5224	5.26	0.918	0.0123	74.6341463
6.65	1.037	0.0141	73.5461	6.43	1.034	0.0130	79.5384615
7.50	1.114	0.0142	78.4507	7.51	1.127	0.0135	83.4814815
8.63	1.210	0.0160	75.6250	8.54	1.199	0.0152	78.8815789
9.60	1.262	0.0189	66.7725	9.64	1.250	0.0192	65.1041667
10.53	1.287	0.0240	53.6250	10.62	1.280	0.0243	52.6748971
11.39	1.298	0.0303	42.5413	11.55	1.301	0.0309	42.1035599
12.34	1.311	0.0396	33.1061	12.46	1.320	0.0396	33.3333333
13.47	1.330	0.0519	25.6262	13.43	1.341	0.0487	27.5359343
14.49	1.347	0.0621	21.6908	-----	-----	-----	-----

Re=500,000			
<i>a</i>	<i>Cl</i>	<i>Cd</i>	<i>Cl/Cd</i>
0.11	0.385	0.0091	42.3076923
1.13	0.504	0.0094	53.6170213
2.19	0.624	0.0099	63.030303
3.21	0.737	0.0104	70.8653846
4.25	0.850	0.0110	77.2727273
5.25	0.956	0.0116	82.4137931
6.34	1.066	0.0124	85.9677419
7.12	1.134	0.0131	86.5648855
8.53	1.224	0.0154	79.4805195
9.23	1.257	0.0181	69.4475138
10.30	1.292	0.0232	55.6896552
11.33	1.313	0.0299	43.9130435
12.73	1.339	0.0442	30.2941176

Tabla E. Valores de Reynolds para el Perfil S-8036 [7]

Re=100,000			
α	C_l	C_d	C_l/C_d
0.10	0.143	0.0251	5.69721116
1.02	0.257	0.0244	10.5327869
2.01	0.407	0.0254	16.023622
3.20	0.543	0.0238	22.8151261
4.10	0.598	0.0223	26.8161435
5.12	0.680	0.0213	31.9248826
6.26	0.788	0.0205	38.4390244
7.16	0.867	0.0203	42.7093596
8.20	0.953	0.0214	44.5327103
9.24	1.034	0.0231	44.7619048
10.34	1.099	0.0257	42.7626459

Re=200,000				Re=300,000			
α	C_l	C_d	C_l/C_d	α	C_l	C_d	C_l/C_d
0.02	0.149	0.0140	10.6428571	0.14	0.171	0.0114	15
1.05	0.253	0.0143	17.6923077	1.18	0.316	0.0117	27.008547
2.30	0.384	0.0144	26.6666667	2.22	0.427	0.0118	36.1864407
3.24	0.513	0.0143	35.8741259	3.24	0.539	0.0127	42.4409449
4.40	0.712	0.0144	49.4444444	4.27	0.673	0.0120	56.0833333
5.45	0.800	0.0147	54.4217687	5.08	0.780	0.0129	60.4651163
6.18	0.860	0.0149	57.7181208	6.32	0.887	0.0125	70.96
7.19	0.936	0.0154	60.7792208	7.33	0.956	0.0140	68.2857143
8.23	1.007	0.0175	57.5428571	8.36	1.030	0.0164	62.804878
9.38	1.085	0.0205	52.9268293	9.38	1.104	0.0190	58.1052632
10.84	1.161	0.0258	45	10.28	1.158	0.0215	53.8604651
11.40	1.181	0.0300	39.3666667	11.43	1.205	0.0293	41.1262799
Re=400,000				Re=500,000			
α	C_l	C_d	C_l/C_d	α	C_l	C_d	C_l/C_d
0.53	0.256	0.0101	25.3465347	0.14	0.171	0.0092	18.5869565
0.80	0.285	0.0101	28.2178218	1.28	0.302	0.0094	32.1276596
2.20	0.439	0.0106	41.4150943	2.29	0.415	0.0095	43.6842105
3.22	0.546	0.0109	50.0917431	3.42	0.537	0.0099	54.2424242
4.25	0.665	0.0122	54.5081967	4.13	0.606	0.0102	59.4117647
5.09	0.771	0.0115	67.0434783	5.21	0.722	0.0109	66.2385321
6.33	0.888	0.0117	75.8974359	6.47	0.859	0.0123	69.8373984
7.19	0.944	0.0133	70.9774436	7.44	0.928	0.0127	73.070866
8.21	1.021	0.0154	66.2987013	8.33	0.992	0.0141	70.3546099
9.56	1.119	0.0188	59.5212766	9.32	1.066	0.0158	67.4683544
10.34	1.162	0.0213	54.5539906	10.34	1.128	0.0191	59.0575916
11.37	1.200	0.0275	43.6363636	11.35	1.169	0.0246	47.5203252
12.37	1.224	0.0433	28.2678984	12.52	1.197	0.0394	30.3807107

Tabla F. Valores del Contorno para el Perfil S-822 [3]

x/c	y/c	x/c	y/c
1.00018682	0.00232163	0.00275928	-0.01119268
0.99744546	0.00309189	0.01096765	-0.02208771
0.98925147	0.00535456	0.02453539	-0.03225759
0.97569465	0.00906307	0.04331312	-0.04132280
0.95692389	0.01401812	0.06709482	-0.04914107
0.93314505	0.02007054	0.09561972	-0.05562555
0.90461908	0.02698496	0.12857500	-0.06068459
0.87165890	0.03452490	0.16559939	-0.06426319
0.83462608	0.04243732	0.20628709	-0.06634790
0.79392681	0.05046745	0.25019224	-0.06697436
0.75000742	0.05836613	0.29683386	-0.06622631
0.70334955	0.06589113	0.34570107	-0.06423069
0.65446486	0.07278482	0.39625867	-0.06114730
0.60388923	0.07886899	0.44795303	-0.05716178
0.55217673	0.08412994	0.50021807	-0.05246388
0.49989399	0.08848454	0.55248140	-0.04720636
0.44761415	0.09175887	0.60417084	-0.04162737
0.39591020	0.09381226	0.65472080	-0.03608375
0.34534882	0.09450917	0.70357786	-0.03079470
0.29648413	0.09374216	0.75020688	-0.02584391
0.24985154	0.09144412	0.79409705	-0.02129082
0.20596193	0.08759366	0.83476754	-0.01716402
0.16529605	0.08221978	0.87177273	-0.01347821
0.12829920	0.07540289	0.90470718	-0.01024592
0.09537642	0.06727024	0.93321002	-0.00747268
0.06688804	0.05798914	0.95696897	-0.00517586
0.04314582	0.04775353	0.97572368	-0.00336855
0.02440961	0.03671383	0.98926864	-0.00204729
0.01088402	0.02522787	0.99745549	-0.00126595
0.00271748	0.01331019	0.99981096	-0.00099874
0.00000000	-0.00000000	-----	-----

Tabla G. Valores del Contorno para el Perfil E387 [3]

x/c	y/c	x/c	y/c
1.00000	0.00000	0.01423	0.01726
0.99677	0.00043	0.00519	0.00931
0.98729	0.00180	0.00044	0.00234
0.97198	0.00423	0.00091	-0.00286
0.95128	0.00763	0.00717	-0.00682
0.92554	0.01184	0.01890	-0.01017
0.89510	0.01679	0.03596	-0.01265
0.86035	0.02242	0.05827	-0.01425
0.82183	0.02866	0.08569	-0.01500
0.78007	0.03540	0.11800	-0.01502
0.73567	0.04249	0.15490	-0.01441
0.68922	0.04975	0.19599	-0.01329
0.64136	0.05696	0.24083	-0.01177
0.59272	0.06390	0.28892	-0.00998
0.54394	0.07020	0.33968	-0.00804
0.49549	0.07546	0.39252	-0.00605
0.44767	0.07936	0.44679	-0.00410
0.40077	0.08173	0.50182	-0.00228
0.35505	0.08247	0.55694	-0.00065
0.31078	0.08156	0.61147	0.00074
0.26813	0.07908	0.66472	0.00186
0.22742	0.07529	0.71602	0.00268
0.18906	0.07037	0.76475	0.00320
0.15345	0.06448	0.81027	0.00342
0.12094	0.05775	0.85202	0.00337
0.09185	0.05033	0.88944	0.00307
0.06643	0.04238	0.92205	0.00258
0.04493	0.03408	0.94942	0.00196
0.02748	0.02562	0.97118	0.00132
0.01423	0.01726	0.98705	0.00071
0.00519	0.00931	0.99674	0.00021
0.00044	0.00234	1.00000	0.00000

Tabla H. Valores del Contorno para el Perfil MH-106 [6]

x/c	y/c	x/c	y/c
1	0	0.00010756	-0.00112503
0.99633896	0.00013538	0.00055967	-0.00234500
0.98572712	0.00081905	0.00133663	-0.00361403
0.96892525	0.00231554	0.00297835	-0.00558815
0.94642367	0.00436480	0.00513535	-0.00763363
0.91836006	0.00685652	0.00962388	-0.01106732
0.88503080	0.00997739	0.02257288	-0.01833048
0.84699594	0.01384794	0.04024689	-0.02560254
0.80487420	0.01847791	0.06232892	-0.03260747
0.75933341	0.02382341	0.08853194	-0.03907257
0.71107117	0.02978175	0.11858805	-0.04471630
0.66080012	0.03620038	0.15229113	-0.04928617
0.60923092	0.04288363	0.18946321	-0.05259526
0.55705830	0.04960002	0.22996674	-0.05458014
0.50494863	0.05609305	0.27356298	-0.05533977
0.45352913	0.06209195	0.31988227	-0.05499133
0.40338113	0.06731599	0.36851477	-0.05367172
0.35503575	0.07151328	0.41896127	-0.05156813
0.30907144	0.07437120	0.47063693	-0.04884164
0.26580358	0.07534795	0.52291335	-0.04562226
0.22506456	0.07420479	0.57515779	-0.04198170
0.18681819	0.07124411	0.62679552	-0.03799545
0.15136966	0.06678403	0.67724636	-0.03378661
0.11904212	0.06102631	0.72590864	-0.02947190
0.09013672	0.05417502	0.77219558	-0.02515173
0.06493704	0.04641532	0.81554287	-0.02092181
0.04366599	0.03792242	0.85541258	-0.01687058
0.02646761	0.02891578	0.89129875	-0.01307891
0.01345480	0.01968641	0.92273025	-0.00962032
0.00469764	0.01063397	0.94927172	-0.00653679
0.00188777	0.00623331	0.97060783	-0.00384979
0.00081003	0.00381469	0.98649788	-0.00172690
0.00016743	0.00154754	0.99652470	-0.00043016
0.00000165	0.00014605	1	0

Tabla I. Valores del Contorno para el Perfil SG-6040 [3]

x/c	y/c	x/c	y/c
1	0.000000	0.000720	0.004490
0.997880	0.000480	0.000270	-0.002680
0.991830	0.002070	0.000270	-0.002680
0.982330	0.004770	0.002890	-0.008840
0.969770	0.008450	0.009060	-0.014500
0.954420	0.012830	0.018290	-0.020230
0.936370	0.017660	0.030270	-0.025800
0.915590	0.022850	0.044830	-0.031030
0.892210	0.028450	0.062020	-0.035660
0.866470	0.034460	0.081930	-0.039710
0.838610	0.040800	0.104460	-0.043360
0.808870	0.047390	0.129390	-0.046570
0.777520	0.054150	0.156550	-0.049370
0.744820	0.060940	0.185740	-0.051720
0.711040	0.067590	0.216770	-0.053610
0.676320	0.073940	0.249430	-0.055030
0.640810	0.079920	0.283490	-0.055940
0.604770	0.085410	0.318730	-0.056320
0.568370	0.090320	0.354900	-0.056130
0.531800	0.094610	0.391770	-0.055280
0.495260	0.098150	0.429160	-0.053710
0.458910	0.100890	0.466910	-0.051320
0.422970	0.102790	0.504790	-0.048010
0.387580	0.103780	0.542980	-0.043680
0.352860	0.103860	0.581640	-0.038630
0.319030	0.102990	0.620490	-0.033230
0.286190	0.101160	0.659250	-0.027720
0.254490	0.098430	0.697620	-0.022310
0.224050	0.094790	0.735260	-0.017180
0.194960	0.090280	0.771810	-0.012500
0.167340	0.085060	0.806900	-0.008400
0.141370	0.079210	0.840160	-0.004970
0.117190	0.072830	0.871200	-0.002280
0.094960	0.065980	0.899630	-0.000330
0.074810	0.058750	0.925110	0.000900
0.056860	0.051230	0.947280	0.001480
0.041230	0.043470	0.965870	0.001540
0.027980	0.035590	0.980630	0.001220
0.017250	0.027710	0.991320	0.000700
0.009130	0.019870	0.997820	0.000220
0.003620	0.012120	1	0.000000

Tabla J. Valores del Contorno para el Perfil S-8036 [3]

x/c	y/c	x/c	y/c
1	0	0.000010	0.000540
0.997590	0.000460	0.000010	0.000540
0.990950	0.002170	0.000980	-0.005880
0.981050	0.005010	0.005480	-0.011530
0.968270	0.008430	0.013380	-0.017200
0.952470	0.012040	0.024330	-0.022730
0.933540	0.015940	0.038110	-0.028040
0.911630	0.020270	0.054680	-0.033040
0.886970	0.025050	0.073950	-0.037730
0.859840	0.030270	0.095760	-0.042080
0.830470	0.035900	0.119990	-0.046050
0.799160	0.041890	0.146480	-0.049640
0.766180	0.048160	0.175040	-0.052830
0.731830	0.054630	0.205490	-0.055580
0.696410	0.061190	0.237600	-0.057860
0.660220	0.067710	0.271200	-0.059620
0.623570	0.074020	0.306090	-0.060840
0.586680	0.079860	0.342040	-0.061460
0.549690	0.085090	0.378870	-0.061470
0.512790	0.089630	0.416380	-0.060870
0.476110	0.093280	0.454350	-0.059590
0.439720	0.095980	0.492650	-0.057650
0.403810	0.097760	0.530990	-0.055020
0.368480	0.098530	0.569370	-0.051650
0.333800	0.098380	0.607780	-0.047720
0.299990	0.097350	0.645940	-0.043480
0.267220	0.095470	0.683590	-0.039070
0.235640	0.092800	0.720430	-0.034640
0.205450	0.089390	0.756160	-0.030280
0.176810	0.085280	0.790480	-0.026090
0.149880	0.080530	0.823090	-0.022150
0.124840	0.075200	0.853700	-0.018520
0.101840	0.069340	0.882020	-0.015230
0.081040	0.062960	0.907750	-0.012300
0.062510	0.056100	0.930640	-0.009700
0.046380	0.048850	0.950440	-0.007390
0.032710	0.041150	0.966980	-0.005190
0.021410	0.033050	0.980370	-0.003020
0.012560	0.024830	0.990700	-0.001200
0.006120	0.016490	0.997540	-0.000200
0.001930	0.008230	1	0