

# Tutorial AeroGen: Diseño y optimización aerodinámica de aerogeneradores de eje horizontal

Abraham Vivas Borda

Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos  
Universidad Politécnica de Cartagena

Mayo 2020

# Cuadro de contenido

## 1 Introducción

- Interfaz gráfica

## 2 Análisis de recurso eólico

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

## 3 Dimensionamiento de instalación aislada

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

## 4 Diseño y Análisis adimensional

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

## 5 Diseño y Análisis adimensional

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

# Cuadro de contenido

## 1 Introducción

- Interfaz gráfica

## 2 Análisis de recurso eólico

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

## 3 Dimensionamiento de instalación aislada

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

## 4 Diseño y Análisis adimensional

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

## 5 Diseño y Análisis adimensional

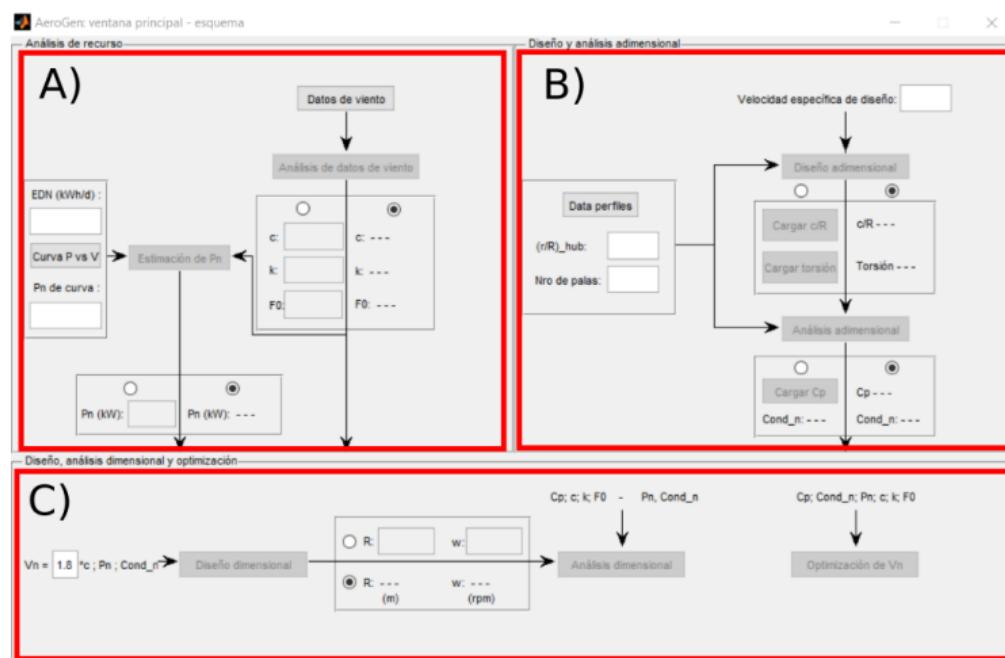
- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

# Capacidades del programa

- **Análisis de recurso eólico:** Obtención de **ajuste de Weibull** con calmas a partir de datos de estación meteorológica
- **Dimensionado para instalación aislada:** Obtención de **potencia nominal** de aerogenerador necesario para cubrir necesidades energéticas a partir de curva de Weibull y aerogenerador comercial
- **Diseño adimensional:** Obtención de **geometría óptima adimensional** a partir de familia de perfiles alares y velocidad específica
- **Análisis adimensional:** Obtención de curva de **coeficiente de potencia vs velocidad específica** a partir de una geometría adimensional
- **Diseño dimensional:** Obtención de **radio y velocidad de giro** a partir de datos de viento y comportamiento adimensional
- **Análisis dimensional:** Obtención de curva de **potencia vs velocidad** a partir de dimensiones, datos de viento, comportamiento adimensional y tipo de control
- **Optimización dimensional:** Obtención de **velocidad de giro óptima y potencia o radio óptimo** dada un tipo de control, un radio o potencia de partida, características de viento y comportamiento adimensional de la turbina.

## Interfaz gráfica

## Ventana principal



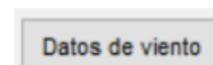
Está dividida en 3 secciones: A) Análisis de recurso eólico y dimensionado para instalación aislada, B) Diseño y análisis adimensional, C) Diseño, análisis y optimización dimensional

# Elementos

- **Flechas:** indican el flujo de información, entrada-salida
- **Botones:** realizan acción, ya sea carga o procesamiento de datos
- **Elementos inactivos:** se activan cuando todos los requisitos de entrada se cumplen
- **Cuadros de selección:** a la derecha muestran el resultado del procesamiento de datos aguas arriba, a la izquierda permiten introducir datos propios y omitir el proceso aguas arriba



(a) Flechas



(b) Botones

Análisis de datos de viento

(c) Elementos inactivos

<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
c: <input type="text"/>	c: ---
k: <input type="text"/>	k: ---
F0: <input type="text"/>	F0: ---

(d) Cuadros de selección

# Cuadro de contenido

## 1 Introducción

- Interfaz gráfica

## 2 Análisis de recurso eólico

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

## 3 Dimensionamiento de instalación aislada

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

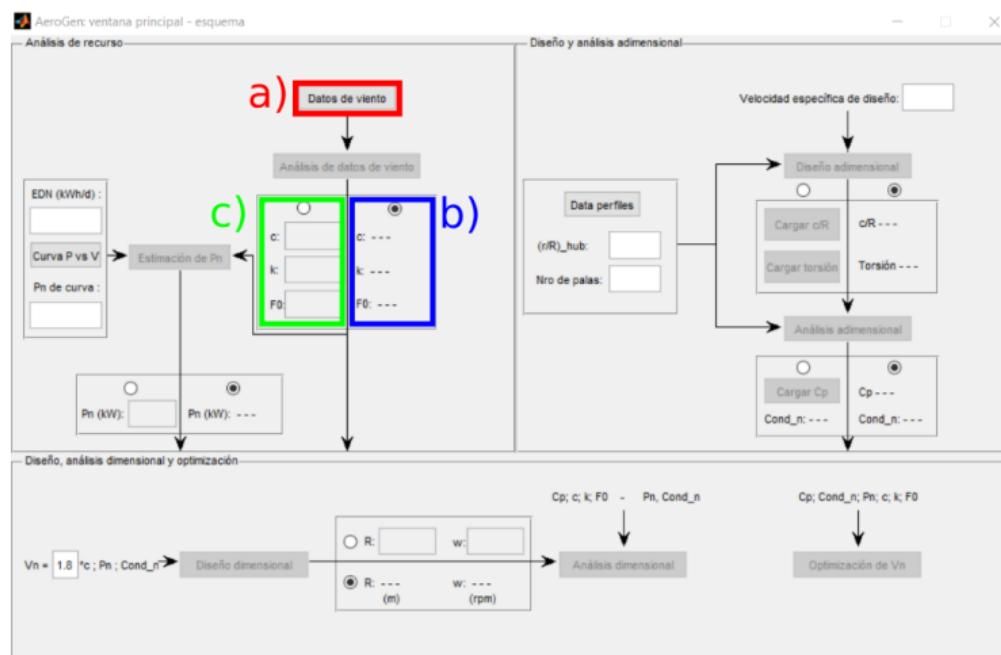
## 4 Diseño y Análisis adimensional

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

## 5 Diseño y Análisis adimensional

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

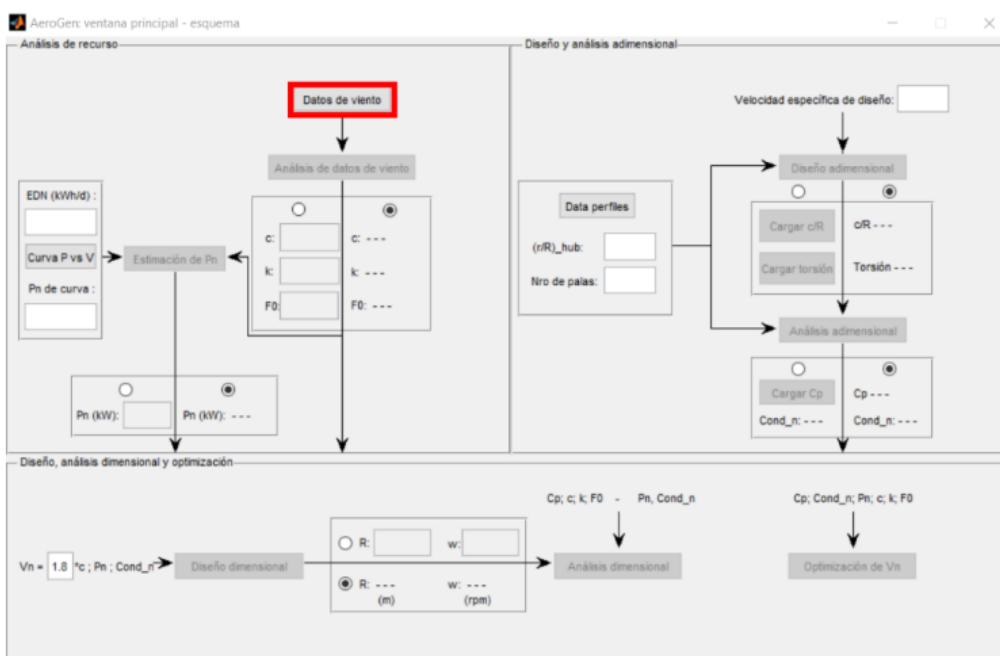
## Datos de viento → ajuste de Weibull



- a) Entrada: carga de datos de viento de estación meteorológica. b) Salida: parámetros de ajuste de Weibull generados. c) Alternativa: introducir parámetros de Weibull

## Ejemplo de aplicación

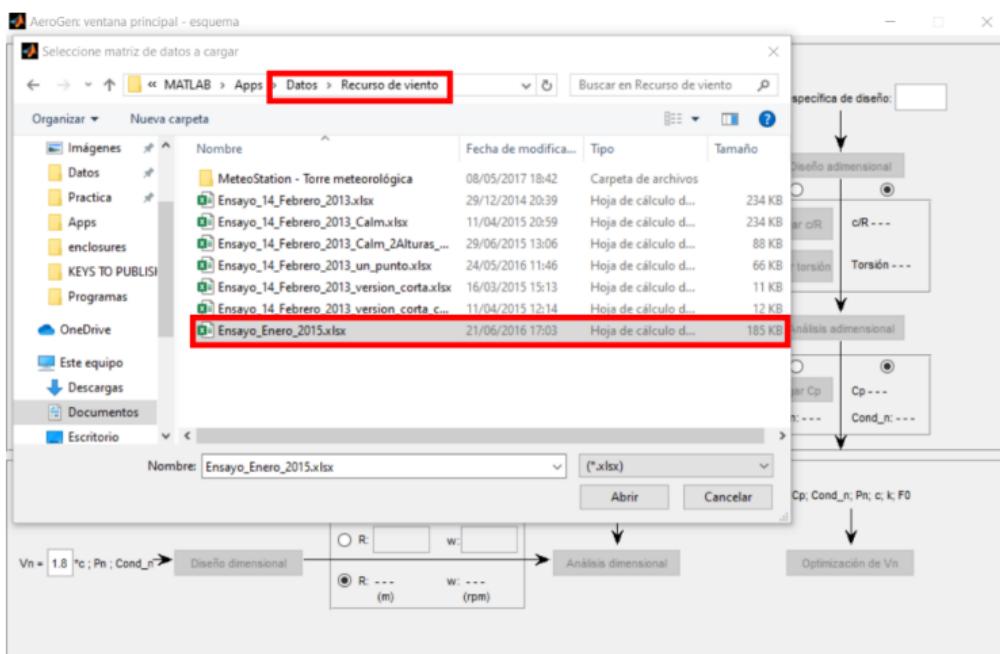
## Entrada



Pinchar en "Datos de viento"

## Ejemplo de aplicación

## Carga de datos



Buscar archivo de excel con los datos de la estación meteorológica en el formato adecuado

## Ejemplo de aplicación

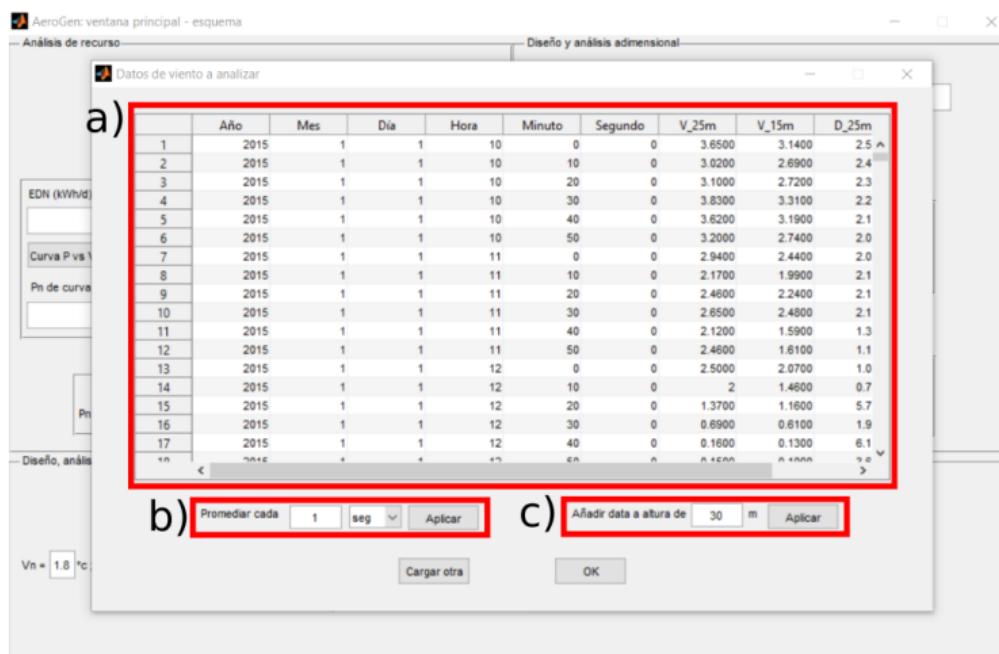
## Formato de datos de viento

	A	B	C	D	E
1	Fecha	V_25m	V_15m	D_25m	D_15m
2	01/01/2015 0:00	3,99	2,86	336,85	329,32
3	01/01/2015 0:10	4,00	2,91	341,43	323,76
4	01/01/2015 0:20	4,12	2,90	324,21	325,89
5	01/01/2015 0:30	4,93	3,51	341,78	331,43
6	01/01/2015 0:40	4,96	3,65	346,29	326,63
7	01/01/2015 0:50	4,36	3,11	346,23	311,46
8	01/01/2015 1:00	4,35	2,97	336,45	326,02
9	01/01/2015 1:10	4,31	3,30	333,28	346,58
10	01/01/2015 1:20	4,32	3,23	336,50	326,07
11	01/01/2015 1:30	4,17	2,94	330,77	319,83
12	01/01/2015 1:40	4,04	2,87	336,88	335,15
13	01/01/2015 1:50	4,03	2,96	331,12	312,53
14	01/01/2015 2:00	4,10	2,98	338,86	162,11
15	01/01/2015 2:10	3,97	2,86	322,20	326,06
16	01/01/2015 2:20	4,11	3,11	329,97	307,99
17	01/01/2015 2:30	3,78	2,79	343,44	322,96
18	01/01/2015 2:40	3,42	2,53	310,41	332,85
19	01/01/2015 2:50	3,92	2,83	323,90	310,52
20	01/01/2015 3:00	3,95	2,91	327,33	323,41
21	01/01/2015 3:10	3,95	2,88	338,37	326,54
22	01/01/2015 3:20	3,96	2,95	315,24	324,62
23	01/01/2015 3:30	4,15	3,09	311,68	320,02
24	01/01/2015 3:40	4,27	3,16	308,96	314,27
25	01/01/2015 3:50	4,20	3,15	320,90	329,68
26	01/01/2015 4:00	4,12	3,00	326,44	321,10
27	01/01/2015 4:10	3,48	2,50	324,77	321,32
28	01/01/2015 4:20	4,12	2,79	341,16	322,73
29	01/01/2015 4:30	4,53	3,15	349,33	338,96

Formato: Tiempo|Velocidades|Direcciones : a) Columnas de velocidades de viento en m/s. Encabezado V\_XXm donde XX es la altura en metros. b) Direcciones de viento en grados, en el mismo orden que las velocidades. Encabezado análogo al de velocidades

## Ejemplo de aplicación

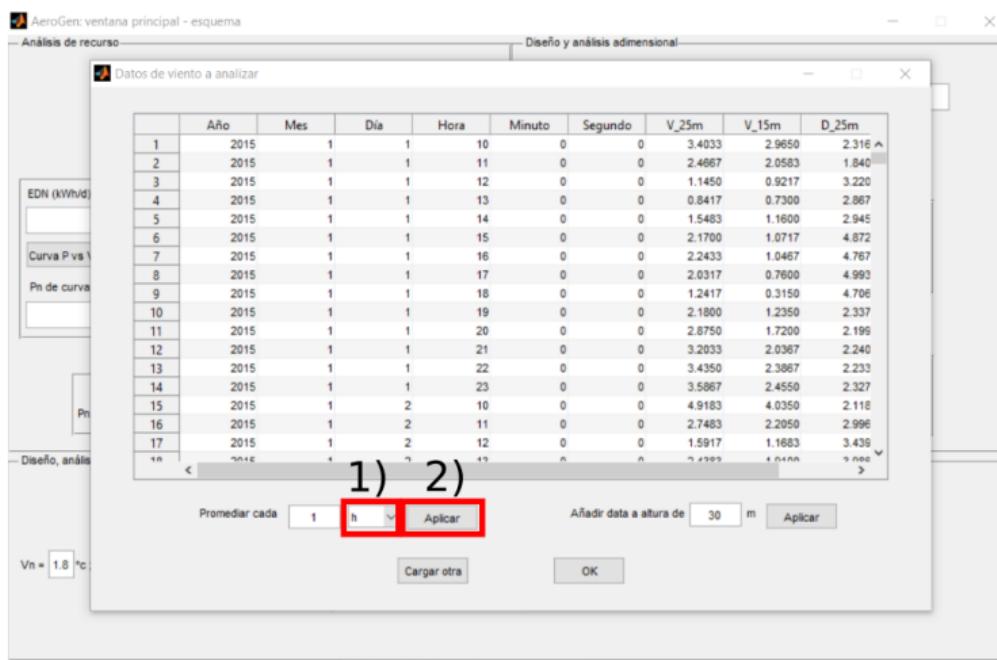
## Ventana de datos cargados



- a) Tabla de datos cargados. b) Permite promediar cada X unidades de tiempo las velocidades y direcciones de viento. c) Permite extrapolar a una nueva altura velocidades y direcciones de viento

## Ejemplo de aplicación

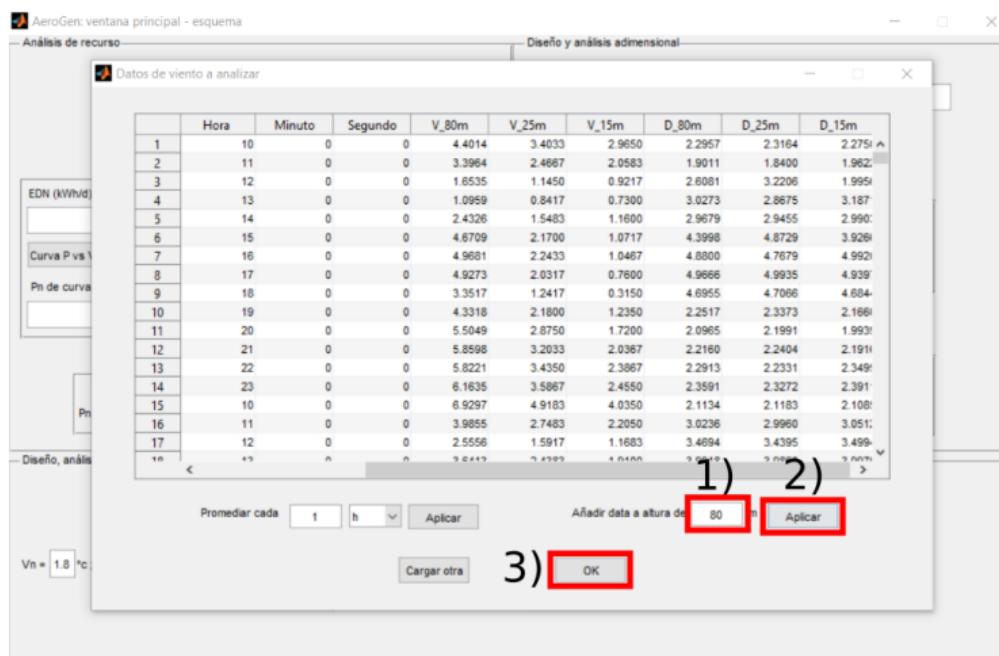
Promediado de datos cada hora



- 1) Seleccionar "h" en el menú desplegable. 2) Pinchar en "Aplicar"

## Ejemplo de aplicación

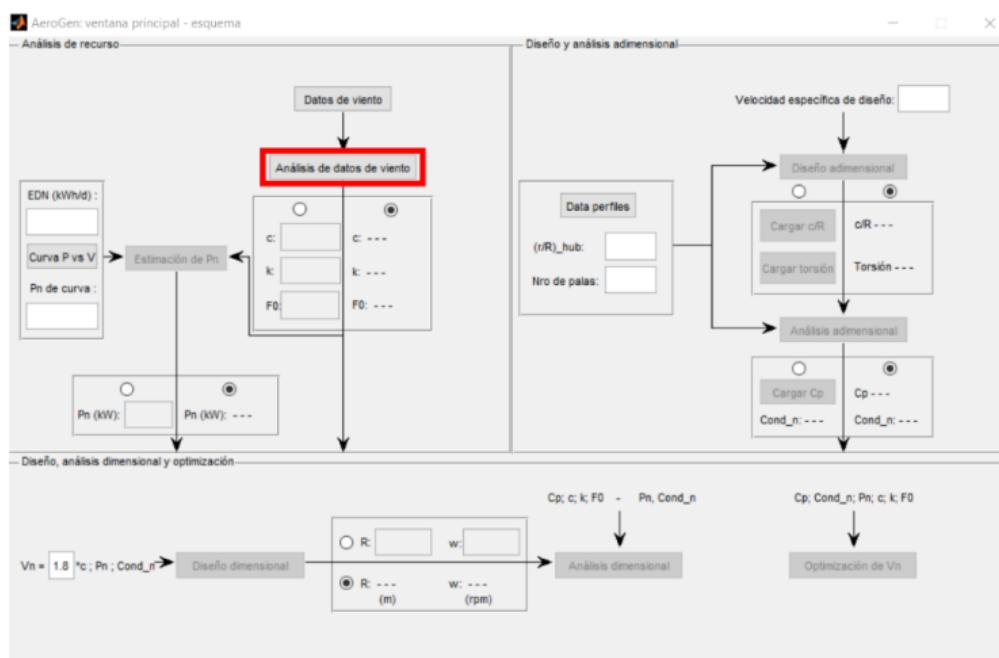
## Extrapolación de datos a una altura de 80 metros



- 1) Escribir "80" para indicar la altura de interpolación/extrapolación.
- 2) Pinchar en "Aplicar".
- 3) Pinchar en "OK" para cerrar el cuadro y guardar los datos cargados modificados

## Ejemplo de aplicación

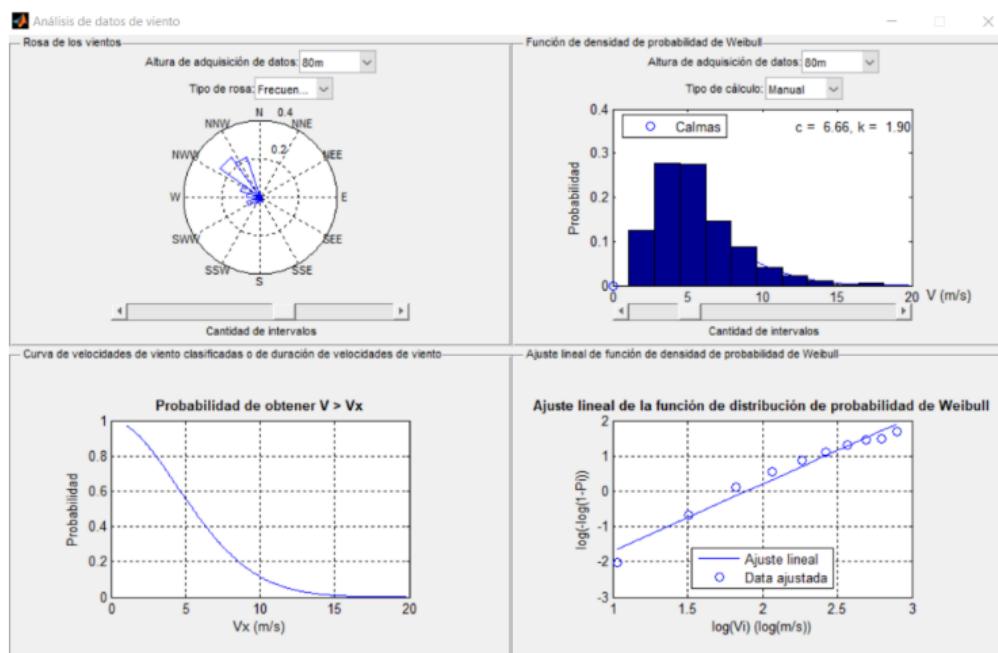
## Interfaz general actualizada



Pinchar en el recién activado botón de "Análisis de datos de viento"

## Ejemplo de aplicación

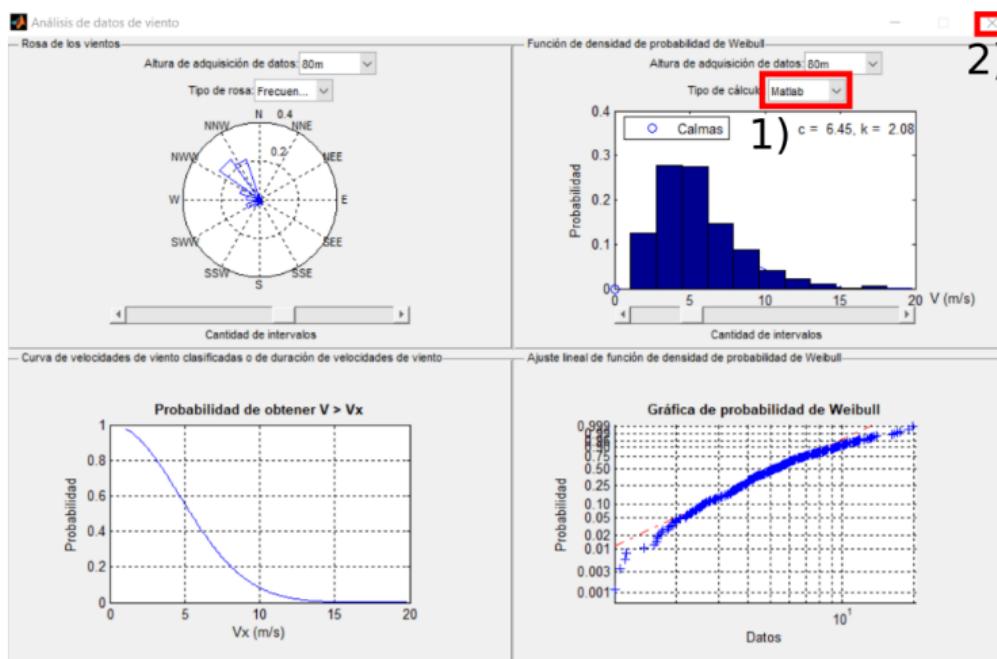
## Gráficas y ajustes generados a partir de los datos de viento



Gráficas generadas: Rosa de los vientos, ajuste de Weibull, curva de velocidades de viento clasificadas y ajuste lineal de ajuste de Weibull ya sea manual o automático (con el criterio de Matlab)

## Ejemplo de aplicación

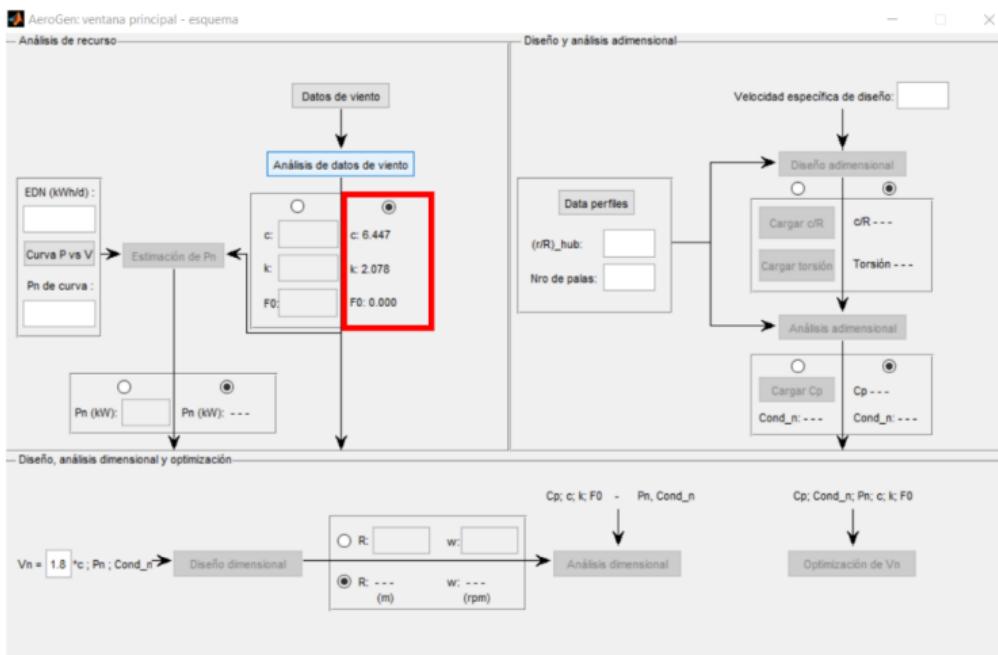
## Ajuste automático por criterio estadístico de Matlab



Dado que los parámetros del ajuste de Weibull pueden variar según la elección del número de intervalos, existe la opción de hacer el ajuste a través de un algoritmo de Matlab: 1) Seleccionar en el menú desplegable "Matlab". 2) Cerrar la ventana para guardar los parámetros generados

## Ejemplo de aplicación

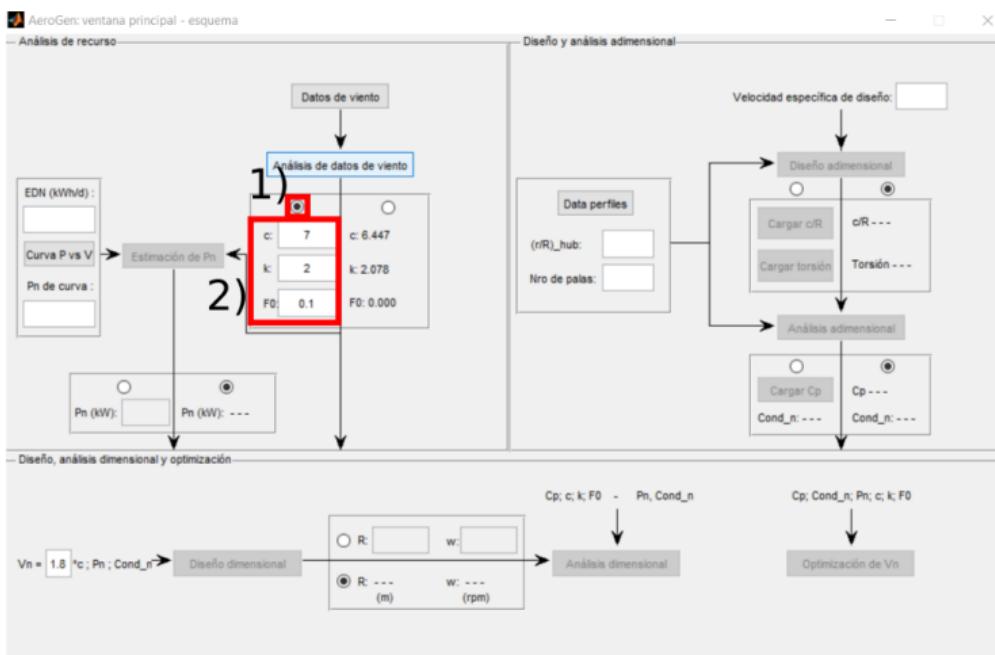
## Interfaz general actualizada: parámetros de ajuste de Weibull generados



Automáticamente al salir de la ventana anterior se guardan los parámetros del ajuste de Weibull y se muestran a la izquierda del cuadro de selección correspondiente

## Ejemplo de aplicación

## Introducción manual de parámetros de ajuste de Weibull



En caso de que se deseen introducir valores encontrados en la literatura o bases de datos: 1) Pinchar en el círculo de selección derecho. 2) Escribir los parámetros c, k, F0 correspondientes, en este ejemplo: 7, 2 y 0.1 respectivamente

# Cuadro de contenido

## 1 Introducción

- Interfaz gráfica

## 2 Análisis de recurso eólico

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

## 3 Dimensionamiento de instalación aislada

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

## 4 Diseño y Análisis adimensional

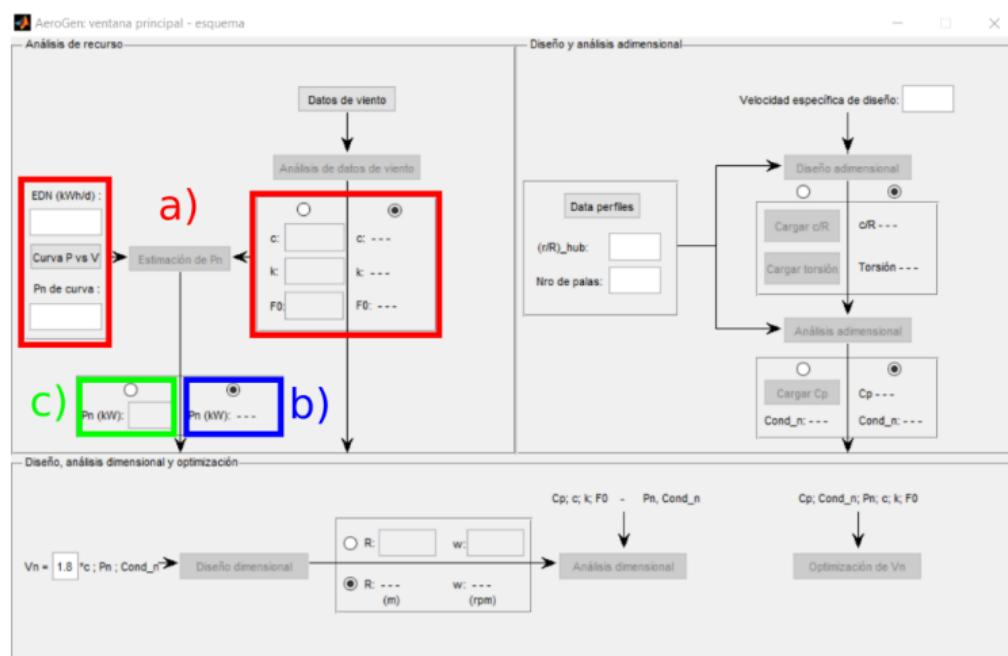
- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

## 5 Diseño y Análisis adimensional

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

# Parámetros de Weibull + necesidades energéticas y turbina de referencia

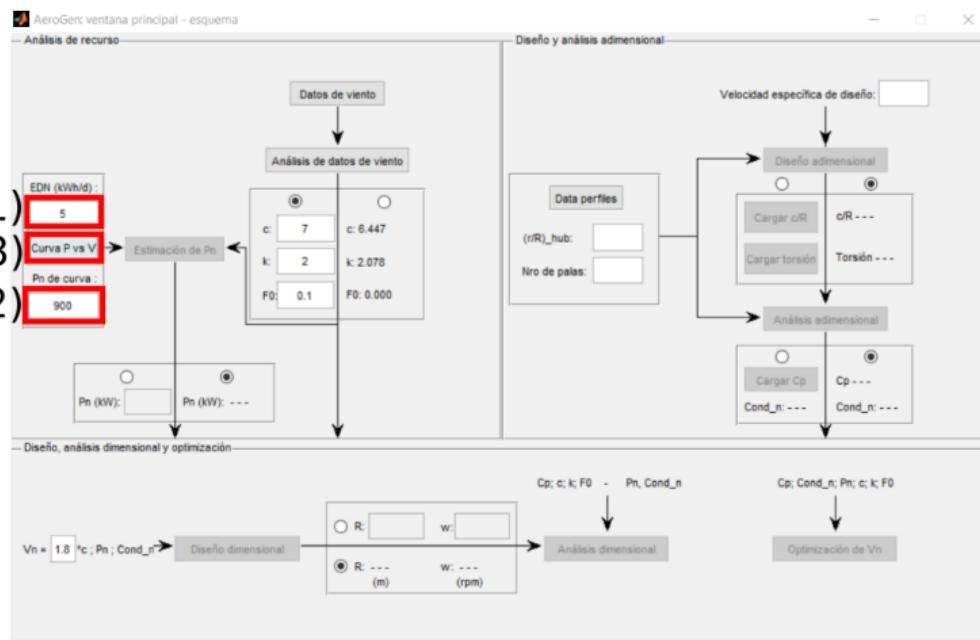
→ Potencia nominal de turbina necesaria



- a) Entrada: Parámetros de Weibull, energía diaria necesaria (EDN), curva y pot. nominal en kW. b) Salida: potencia nominal de turbina necesaria. c) Alternativa: introducción manual

## Ejemplo de aplicación

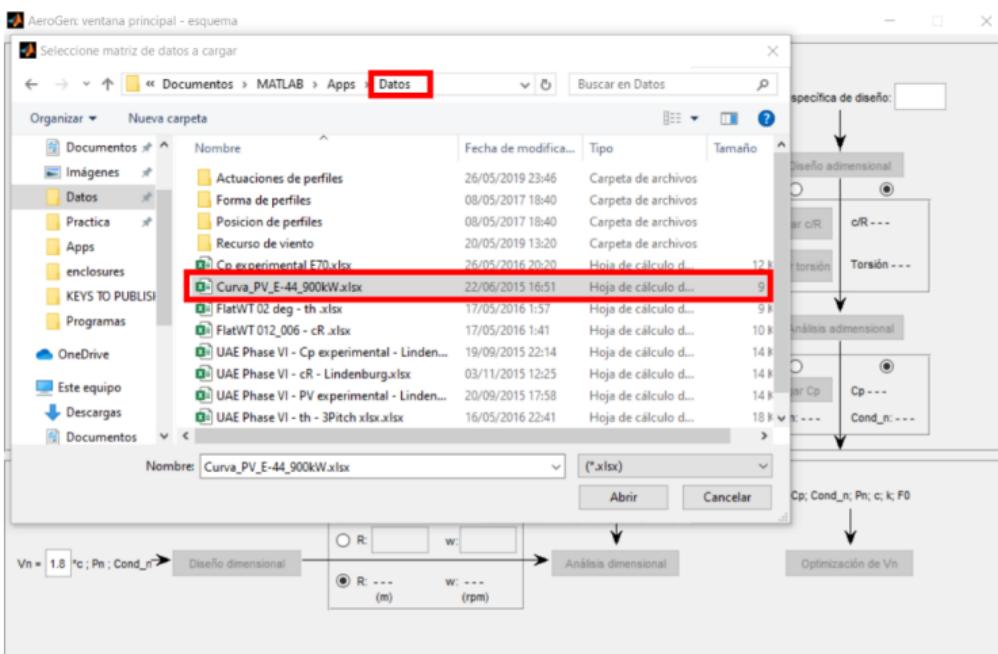
Introducción de datos de necesidades energéticas diarias y de turbina de referencia



- 1) Escribir "5" kWh/día de necesidades energéticas. 2) Escribir "900" kW de potencia nominal de turbina de referencia. 3) Pinchar en "Curva P vs V"

## Ejemplo de aplicación

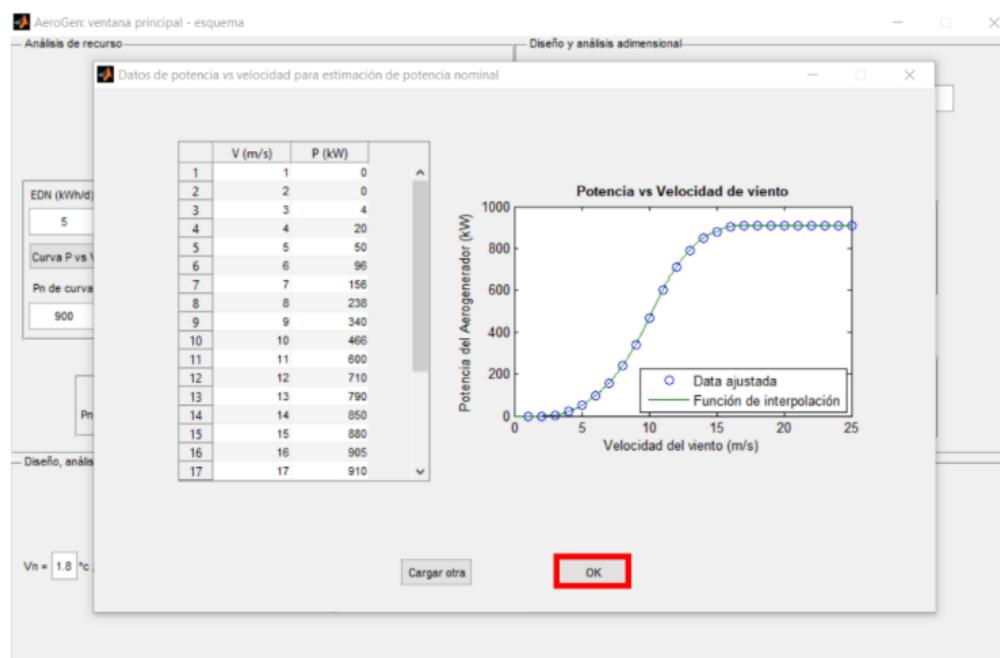
## Cargar datos de curva de potencia vs velocidad de turbina de referencia



Buscar archivo de excel con los datos de la curva de P vs V de la turbina de referencia

## Ejemplo de aplicación

## Datos cargados y función de interpolación generada



Pinchar en "OK" para guardar la función de interpolación de la curva de la turbina de referencia

## Ejemplo de aplicación

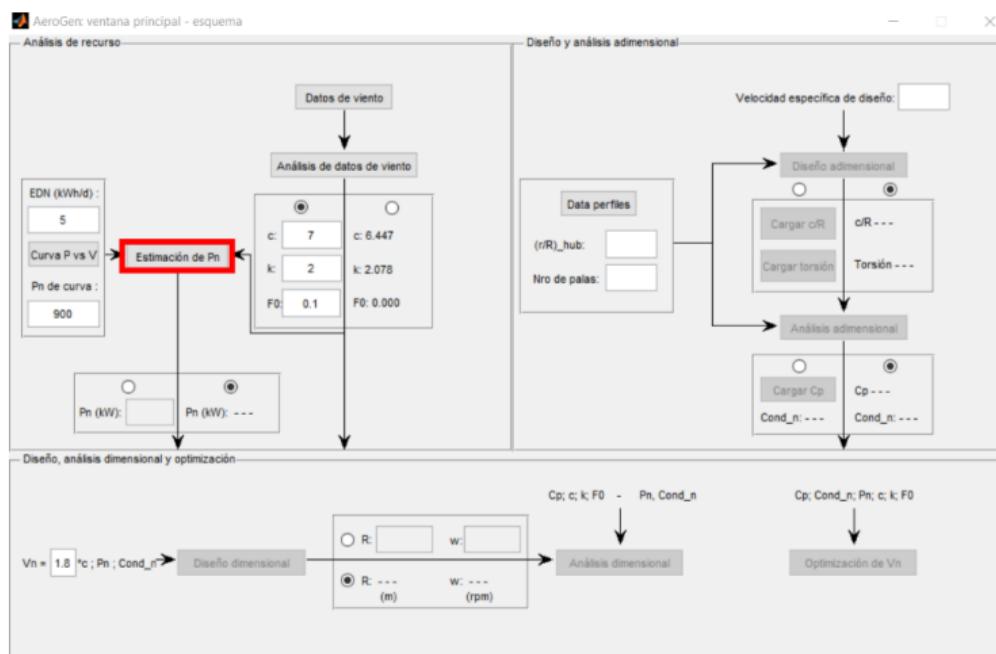
## Formato de curva de P vs V

	A	B
1	V (m/s)	P (kW)
2	1	0
3	2	0
4	3	4
5	4	20
6	5	50
7	6	96
8	7	156
9	8	238
10	9	340
11	10	466
12	11	600
13	12	710
14	13	790
15	14	850
16	15	880
17	16	905
18	17	910
19	18	910
20	19	910
21	20	910
22	21	910
23	22	910
24	23	910
25	24	910
26	25	910
27		
28		
29		

Formato: Velocidad|Potencia, con sus respectivos encabezados

## Ejemplo de aplicación

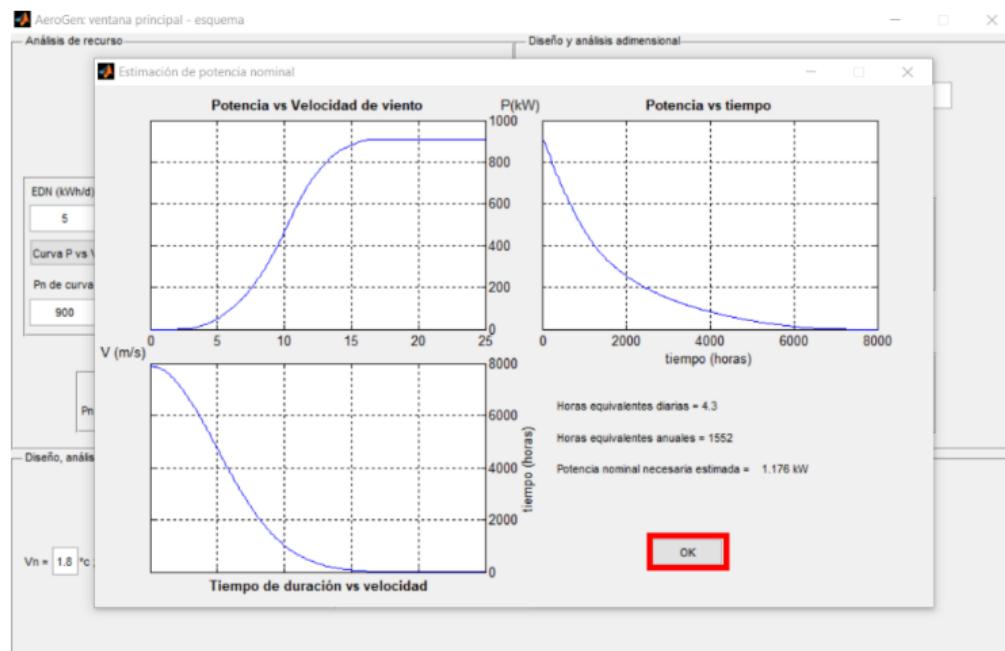
## Interfaz general actualizada



Pinchar en el recién activado botón de "Estimación de Pn"

## Ejemplo de aplicación

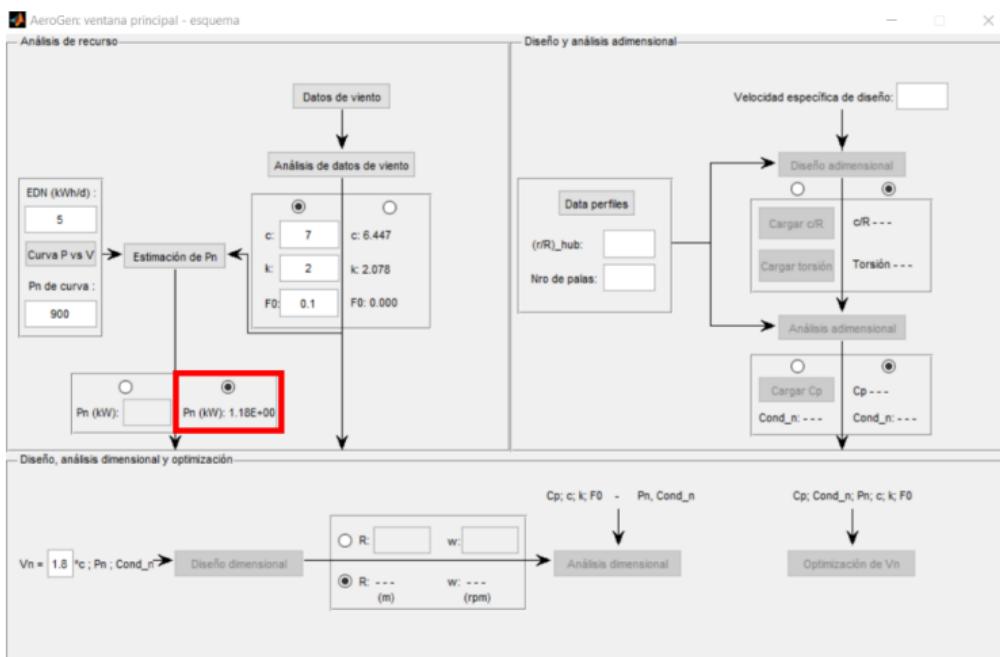
## Curvas para cálculo de horas equivalentes y estimación de potencia nominal



Pinchar en "OK" para guardar la potencia nominal estimada

## Ejemplo de aplicación

Interfaz general actualizada: potencia nominal estimada



Finalmente al salir de la ventana anterior se guarda la potencia nominal estimada necesaria y se muestra a la izquierda del cuadro de selección correspondiente

# Cuadro de contenido

## 1 Introducción

- Interfaz gráfica

## 2 Análisis de recurso eólico

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

## 3 Dimensionamiento de instalación aislada

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

## 4 Diseño y Análisis adimensional

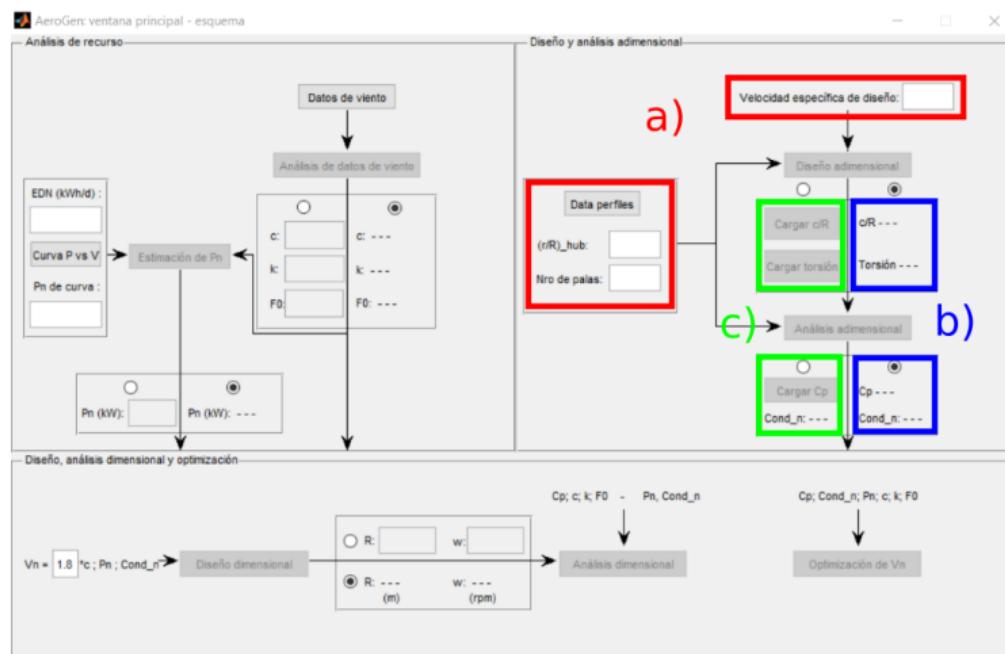
- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

## 5 Diseño y Análisis adimensional

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

Entrada - salida

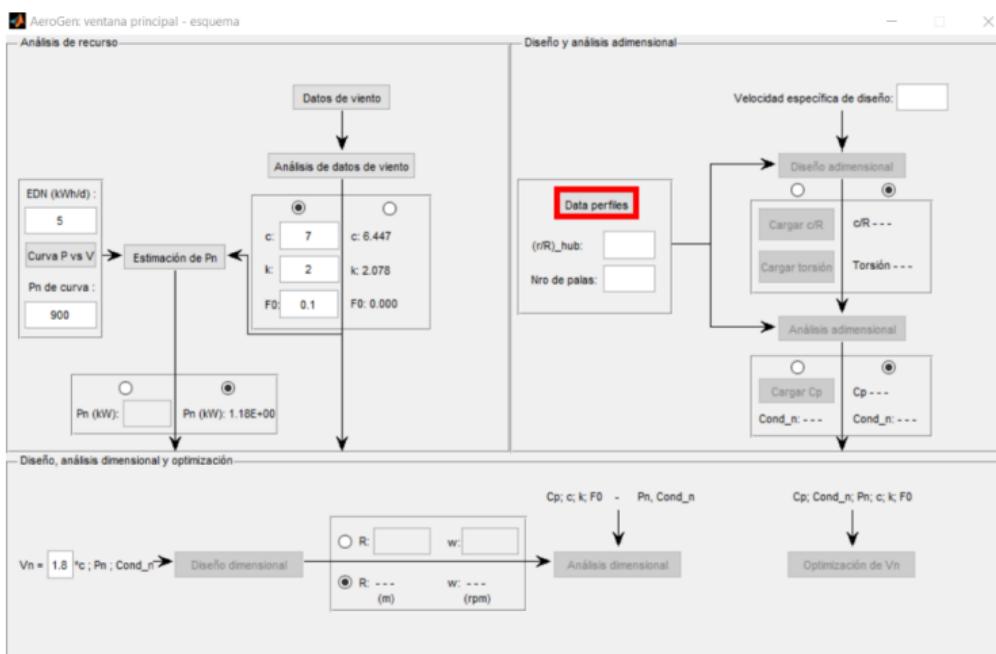
Datos de perfil, palas y velocidad específica → geometría de pala y/o curva de funcionamiento adimensional



- a) Entradas: perfiles, nro de palas, pos. raíz pala y vel.específica b) Salidas: dist. de torsión y cuerda adim.; curva Cp vs  $\lambda$  y punto nominal. c) Alternativa: Sustituir manualmente las salidas

## Ejemplo de aplicación

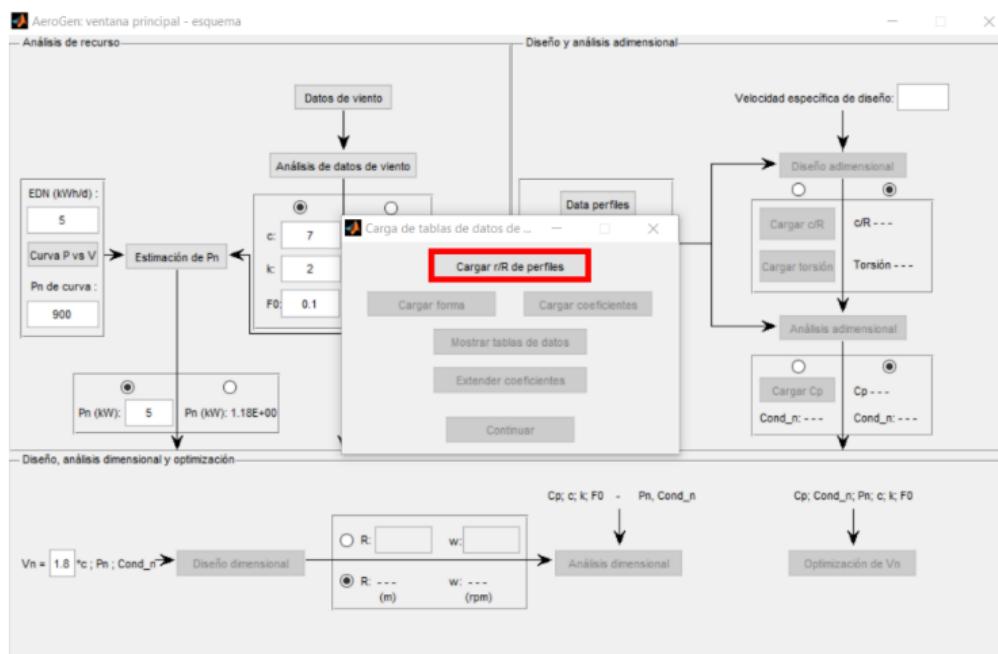
## Entrada de datos de perfil(es)



Pinchar en "Data profiles"

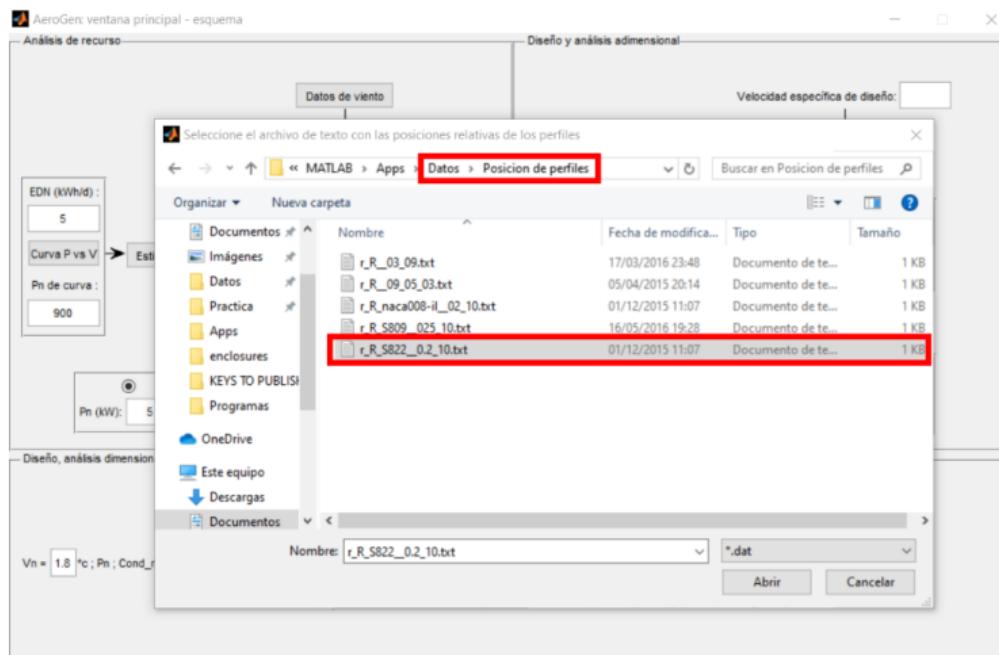
## Ejemplo de aplicación

## Interfaz data perfiles



Pinchar en "Cargar r/R de perfiles" para abrir el dialogo de carga de las posiciones adimensionales en las que se desea definir los perfiles

## Ejemplo de aplicación

Carga de posiciones radiales adimensionales  $r/R$ 

Buscar el archivo de texto plano que indica la posición adimensional (posición radial / radio) de los perfiles a definir

## Ejemplo de aplicación

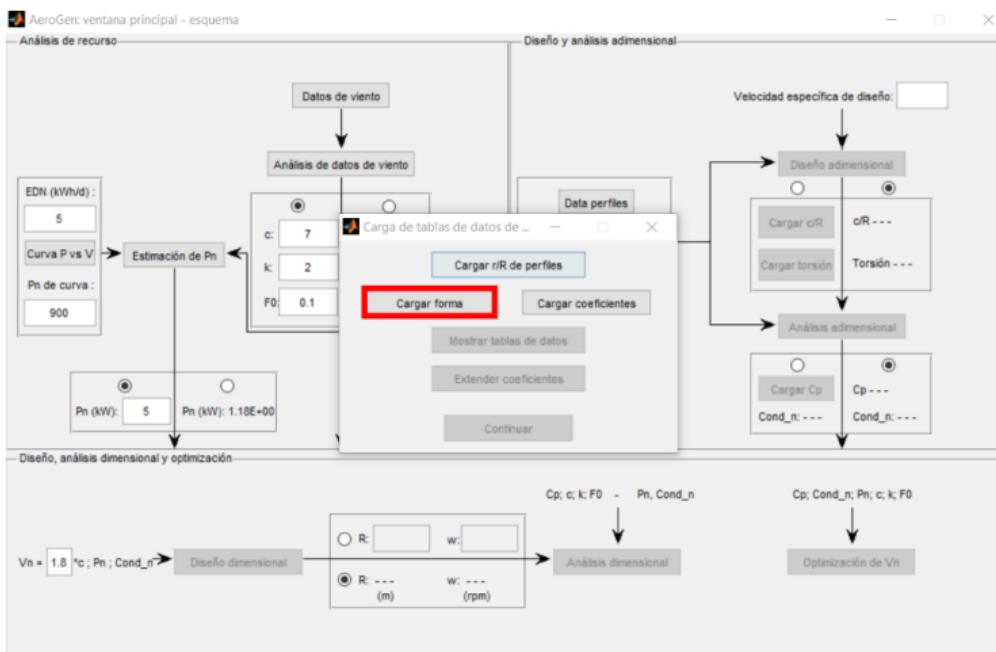
## Formato de archivo de texto con posiciones



Formato: Columna de valores de la posición adimensional donde se ubican los perfiles a definir.  
En el ejemplo: primer perfil al 20% del radio, segundo perfil al 100% (puede ser el mismo perfil, se necesitan mínimo 2 posiciones para interpolar)

## Ejemplo de aplicación

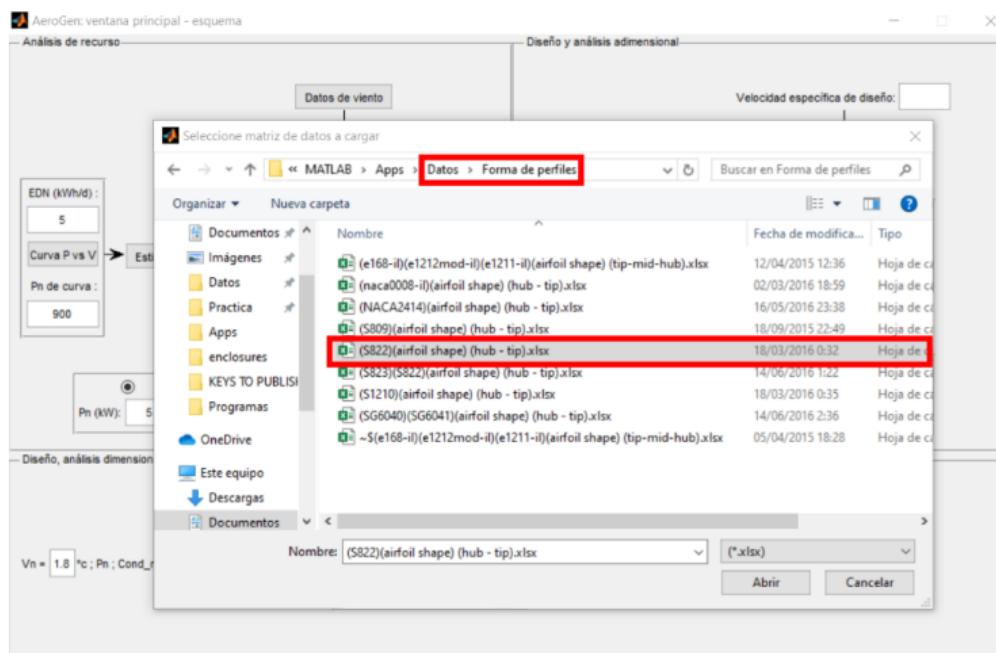
## Interfaz data perfiles actualizada



Se activan los botones de "Cargar forma" y "Cargar coeficientes". Pinchar en "Cargar forma"

## Ejemplo de aplicación

## Cargar forma de perfiles



Buscar el archivo de excel con la forma de los perfiles

## Ejemplo de aplicación

## Formato de excel con las formas de los perfiles

	A	B	C	D
1	x_c	y_c	x_c	y_c
2	34	34	34	34
3				
4	b)	0	0	0
5	0,00014	0,00136	0,00014	0,00136
6	0,00065	0,00340	0,00065	0,00340
7	0,00176	0,00607	0,00176	0,00607
8	0,00860	0,01514	0,00860	0,01514
9	0,02031	0,02479	0,02031	0,02479
10	0,03659	0,03430	0,03659	0,03430
11	0,05742	0,04373	0,05742	0,04373
12	0,08253	0,05275	0,08253	0,05275
13	0,11171	0,06126	0,11171	0,06126
14	0,14464	0,06908	0,14464	0,06908
15	0,18102	0,07610	0,18102	0,07610
16	0,22047	0,08223	0,22047	0,08223
17	0,26259	0,08732	0,26259	0,08732
18	0,30693	0,09136	0,30693	0,09136
19	0,35301	0,09426	0,35301	0,09426
20	0,40032	0,09595	0,40032	0,09595
21	0,44832	0,09634	0,44832	0,09634
22	0,49647	0,09530	0,49647	0,09530
23	0,54432	0,09248	0,54432	0,09248
24	0,59197	0,08792	0,59197	0,08792
25	0,63895	0,08195	0,63895	0,08195
26	0,68477	0,07482	0,68477	0,07482
27	0,72895	0,06632	0,72895	0,06632
28	0,77174	0,05668	0,77174	0,05668
29	0,81278	0,04673	0,81278	0,04673

Perfil 1 (S822)  
posición 20%

a)

Perfil 2 (S822)  
posición 100%

c)

Formato: Perf1|Perf2|...|PerfN. a) Datos de forma de perfiles ordenados de manera consistente con el archivo de posiciones. b) Formato obligatorio de cabecera (x\_c|y\_c). c) Formato Lednicer para puntos del perfil

## Ejemplo de aplicación

Ejemplo de búsqueda de forma de perfiles en la web: Airfoil tools

① airfoiltools.com

This site uses cookies. See the [privacy policy](#) for more information.

You have 0 airfoils loaded.  
Your Reynold number range is 50,000 to 1,000,000. ( )

Google Custom Search Search

# Airfoil Tools

Search 1636 airfoils G+ Twitter Me gusta 186

## Applications

Airfoil database search  
My airfoils  
Airfoil plotter  
Airfoil comparison  
Reynolds number calc  
NACA 4 digit generator  
NACA 5 digit generator

## Information

Airfoil data  
Lift/drag polar  
Generated airfoil shapes

## Searches

Symmetrical airfoils  
NACA 4 digit airfoils  
NACA 5 digit airfoils  
NACA 6 series airfoils

### Airfoils A to Z

A a16 to avistar (68)  
B b291901 to b45 (21)  
C c141a to curtsj72 (40)  
D dael11 to dubed1372 (26)  
E e1086 to es40 (209)  
F facon to fs21156 (121)  
G gemini to gu255118 (419)  
H hh02 to ht23 (63)  
I ias571 to ias62 (4)  
J j5012 to joukowski021 (7)  
K k1 to kennar (11)  
L l1003 to lakk0150k25 (24)  
M m1 to true139 (95)  
N n0009em to np1c (174)

## Airfoil Tools

Tools to search, compare and plot airfoils.



EPFL ER 3.76 AIRFOIL

### Airfoil search

Search for airfoils available on the web or in online databases, filtering by thickness and camber with preview images of the airfoil sections. Download the dat file data in various formats or use the dat file data in the tools. Links to the original data source for more information. View the airfoil details page with polar diagrams for a range of Reynolds numbers.

### Airfoil plotter

View and plot a full size plan of the airfoil to your chord width. The camber, thickness can be adjusted and the pitch set to allow for wing angle of attack, wash out or wind turbine blade angle. The SVG (Scalar Vector Graphics) plan can be printed out full size or over multiple pages for large sections.

### Airfoil comparison

Plots two or more airfoils on the same plan for shape comparison. The plan can be downloaded or printed full size for better resolution. Compare lift and drag polar diagrams for a range of Reynolds numbers.

### My airfoils

Add your own airfoils so they can be used in the tools. Paste the dat file data into a form and the airfoil will be available to use in the drop down menus. There are many sources of airfoil data or the sections can be generated using tools. Currently the airfoils are only stored in your browser session and will need to be added when the browser is re-opened

### NACA 4 digit airfoil generator

Generate NACA 4 digit airfoil sections to your own specification and use them in the airfoil comparison and plotter.

### NACA 5 digit airfoil generator

Create NACA 5 digit airfoil sections to your own specification for use with the tools.

### Reynolds number calculator

Buscar en google "Airfoil tools" o escribir directamente la dirección web "[airfoiltools.com](http://airfoiltools.com)"

## Ejemplo de aplicación

## Ejemplo de búsqueda de forma de perfiles en la web: Airfoil tools

The screenshot shows the Airfoil Tools website interface. On the left, there's a sidebar with links for Applications (Airfoil database search, My airfoils, Airfoil plotter, Airfoil comparison, Reynolds number calc, NACA 4 digit generator, NACA 5 digit generator), Information (Airfoil data, Lift/drag polars, Generated airfoil shapes), Searches (Symmetrical airfoils, NACA 4 digit airfoils, NACA 5 digit airfoils, NACA 6 series airfoils), and Airfoils A to Z (a to b, c to d, e to f, g to h, i to j, k to l, m to n, o to p). The main content area has a header "AirfoilTools.com search results" with a subtitle "About 132 results (0.20 seconds)". A search bar at the top right contains the query "eppeler 210". Below the search bar, a message says "You have 0 airfoils loaded. Your Reynolds number range is 50,000 to 1,000,000. (...)". The search results are listed in three sections: 1) "Did you mean: [eppeler 210](#)" with a red box around the link; 2) "Information" with a red box around the link "E210 (13.64%) (e210-il)" which also has a red box around it; 3) "Airfoil database list" with several entries including "E210 (13.64%) - Eppeler E210 low Reynolds number airfoil ... E210 (13.64%) 1.00000 0.00000 0.99649 0.00099 0.98657 0.00414 0.97139 0.00936 0.95177 ...", "Airfoil database list" with "E226 (10.19%) (e226-il)" and "NACA 66-210 (naca66210-il)", and "E224 (10.17%) (e224-il)".

1)

2)

- 1) Utilizar la herramienta de búsqueda para encontrar el perfil "eppeler 210". 2) Pinchar en el vínculo con el perfil correspondiente

## Ejemplo de aplicación

## Ejemplo de búsqueda de forma de perfiles en la web: Airfoil tools

Screenshot of the Airfoil Tools website showing the E210 airfoil details page.

The URL in the address bar is [airfoiletools.com/airfoil/details?airfoil=e210-il](http://airfoiletools.com/airfoil/details?airfoil=e210-il).

The main content area displays the E210 airfoil profile (red line) on a coordinate system grid. The airfoil is labeled "E210 (13.64%) (e210-il)" and described as "E210 (13.64%) - Eppler E210 low Reynolds number airfoil".

The left sidebar contains links for Applications (Airfoil database search, My airfoils, Airfoil plotter, Airfoil comparison, Reynolds number calc, NACA 4 digit generator, NACA 5 digit generator), Information (Airfoil data, Lift/drag polars, Generated airfoil shapes), and Searches (Symmetrical airfoils, NACA 4 digit airfoils, NACA 5 digit airfoils, NACA 6 series airfoils).

The right sidebar includes a Google Custom Search bar and a "Buscar" button. A message at the top right says "You have 0 airfoils loaded. Your Reynolds number range is 50,000 to 1,000,000." with a link to "Reynolds number".

The central panel shows the airfoil's chord length and thickness distribution. Below the graph, there are tabs for "Details", "Dat file", and "Parser". The "Details" tab provides a brief description of the airfoil. The "Dat file" tab shows the airfoil's coordinates in Lednicker format:

E210 (13.64%)
Eppler E210 low Reynolds number airfoil
Max thickness 13.6% at 32.1% chord
Max camber 3.7% at 50.7% chord
Source <a href="#">NLUUC Airfoil Coordinates Database</a>
<a href="#">Source EEL</a>
The dat file is in Selig format.

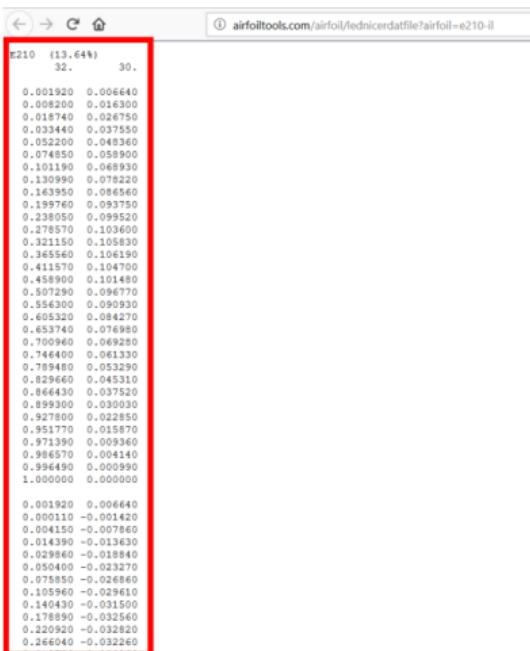
The "Parser" tab indicates "No parser warnings". To the right, there is a "Send to airfoil plotter" section with a "Lednicker format dat file" link, which is highlighted with a red box.

At the bottom, a "Similar airfoils" section lists other airfoil profiles with "Preview" and "Details" links.

Pinchar en el vínculo "Lednicker format dat file"

## Ejemplo de aplicación

## Ejemplo de búsqueda de forma de perfiles en la web: Airfoil tools



E210 (13.64%)	32.	30.
0.001920	0.006640	
0.008200	0.016300	
0.018740	0.026750	
0.033440	0.037550	
0.052200	0.048360	
0.074650	0.058900	
0.101190	0.068930	
0.130990	0.078220	
0.163950	0.086560	
0.199760	0.094750	
0.237500	0.109920	
0.276570	0.130400	
0.321150	0.105430	
0.365560	0.106190	
0.411570	0.104700	
0.458900	0.101480	
0.507290	0.096770	
0.556300	0.090930	
0.605320	0.084270	
0.653740	0.076980	
0.700960	0.069280	
0.746180	0.060780	
0.789480	0.053290	
0.829660	0.045310	
0.866430	0.037520	
0.899300	0.030030	
0.927800	0.022850	
0.951770	0.015870	
0.971390	0.009360	
0.986570	0.004140	
0.996490	0.000990	
1.000000	0.000000	
0.001920	0.006640	
0.000110	-0.001420	
0.004150	-0.007860	
0.014390	-0.013630	
0.029860	-0.018840	
0.050400	-0.023270	
0.075850	-0.026860	
0.105960	-0.030810	
0.139000	-0.031100	
0.178890	-0.032560	
0.220920	-0.032820	
0.266040	-0.032860	

Copiar todo el texto en un excel. Convertir texto a columnas. Tener cuidado con las comas y los puntos decimales en excel. Borrar la primera línea y poner en formato la cabecera. Copiar el mismo perfil u otro para tener al menos 2 perfiles para interpolar

## Ejemplo de aplicación

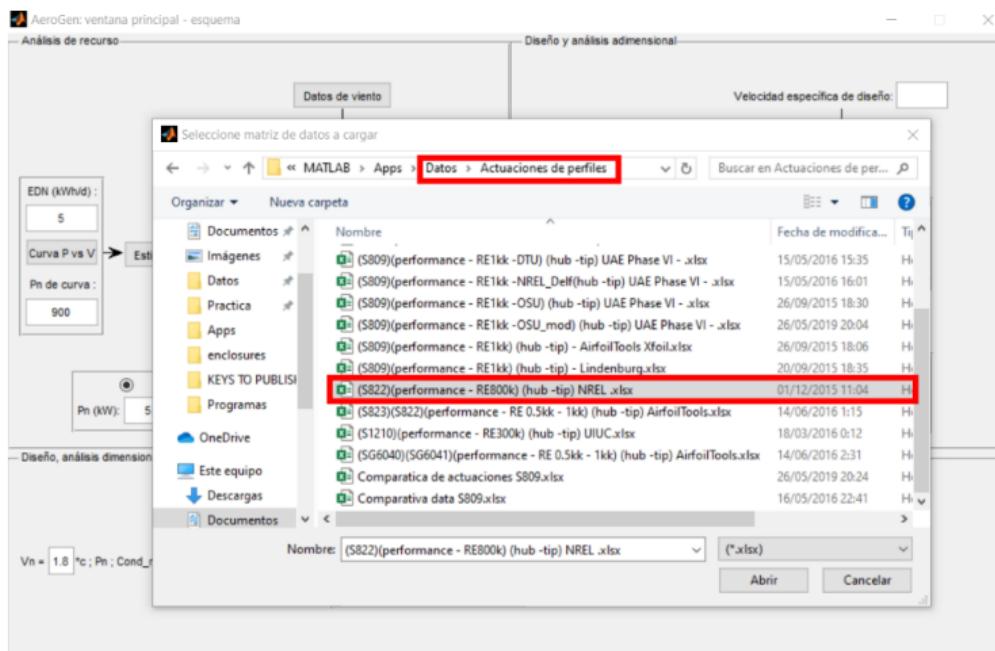
## Interfaz data perfiles actualizada



Pinchar en "Cargar coeficientes" para completar la carga de datos de perfiles

## Ejemplo de aplicación

## Cargar coeficientes de actuaciones de perfiles



Buscar el archivo de excel con los coeficientes de actuaciones de los perfiles

## Ejemplo de aplicación

## Formato de excel con los coeficientes de los perfiles

Perfil 1 (S822)  
pos. 20%

Perfil 2 (S822)  
pos. 100%

A	B	C	D	E	F
1	alpha	CL	CD	alpha	CL
2	-3.00000	-0,03700	0,00710	-3.00000	-0,03700
3	-2.00000	0,07100	0,00680	-2.00000	0,07100
4	-1.00000	0,17900	0,00670	-1.00000	0,17900
5	0.00000	0,28700	0,00680	0.00000	0,28700
6	1.00000	0,39400	0,00700	1.00000	0,39400
7	2.00000	0,50100	0,00720	2.00000	0,50100
8	3.00000	0,60700	0,00740	3.00000	0,60700
9	4.00000	0,71200	0,00760	4.00000	0,71200
10	5.00000	0,81700	0,00810	5.00000	0,81700
11	6.00000	0,92000	0,00860	6.00000	0,92000
12	7.00000	0,97400	0,01580	7.00000	0,97400
13	8.00000	1,05500	0,01780	8.00000	1,05500
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					

Formato: Act1|Act2|...|ActN. Las actuaciones vienen dadas en el formato  $\alpha | C_L | C_D$ , donde  $\alpha$  es el ángulo de ataque en grados y  $C_L$  y  $C_D$  son los coeficientes de sustentación y arrastre respectivamente. Se debe colocar en orden consistente con el archivo de posiciones

## Ejemplo de aplicación

## Ejemplo de búsqueda de coeficientes de perfiles en la web: Airfoil tools

The screenshot shows the Airfoil tools website interface. At the top, there's a navigation bar with links like 'Home', 'Contact', and 'Privacy Policy'. Below the navigation is a search bar with placeholder text 'Buscar'.

**Parser:** Shows the airfoil data for E210-il (13.64%) in a table format. The data includes chord length (1.00000), maximum camber (0.00099), and other parameters.

**Similar airfoils:** A list of 15 similar airfoils with their names and sources.

**Polars for E210 (13.64%) (e210-il):** A table showing lift coefficient (Cl) versus angle of attack (alpha) for various Reynolds numbers (50,000 to 1,000,000). The table includes columns for Plot, Airfoil, Reynolds #, Ncrit, Max Cl/Cd, Description, and Source. The last row (Reynolds 1,000,000) has a red border around the 'Source' column.

At the bottom left is a 'Site' menu with links to Home, Contact, and Privacy Policy. At the bottom right is a 'Reynolds number calculator' button.

Acceder a página de información de un perfil (diap. 38-40), desplazarse hacia abajo y pinchar en el vínculo "Details" correspondiente a las condiciones deseadas. En este caso Reynolds  $10^6$  y  $N_{crit} = 5$  (turbulencia túnel de viento sucio)

## Ejemplo de aplicación

## Ejemplo de búsqueda de forma de perfiles en la web: Airfoil tools

[airfoiltools.com/polar/details?polar=xf-e210-il-1000000-n5](http://airfoiltools.com/polar/details?polar=xf-e210-il-1000000-n5)

Airfoil Tools  
Search 1636 airfoils G Twitter Me gusta 160

E210 (13.64%) (e210-il) Xfoil prediction polar at RE=1,000,000 Ncrit=5

**Applications**  
Airfoil database search  
My airfoils  
Airfoil plotter  
Airfoil comparison  
Reynolds number calc  
NACA 4 digit generator  
NACA 5 digit generator

**Information**  
Airfoil data  
Lift/drag polars  
Generated airfoil shapes  
**Searches**  
Symmetrical airfoils  
NACA 4 digit airfoils  
NACA 5 digit airfoils  
NACA 6 series airfoils  
Airfoils A to Z  
A a18 to avstar (88)  
B b29root to bw3 (22)  
C c1410 to curtiss72 (40)  
D d1n1 to dudie1372 (28)  
E e1098 to esad01 (209)  
F falcon to fss2158 (121)  
G gemini to gu255118 (419)  
H hh02 to ht23 (63)  
I isa571 to isa962 (4)  
J j012 to joukowsk0021 (7)  
K k1 to kemmar (11)  
L l1003 to laks0150k25 (24)  
M m11 to mue139 (95)  
N n0009sm to npix (174)  
O ox206 to cart39 (9)  
P p01droot to pw9mod (16)  
R r1046 to rhodesg36 (63)  
S s1010 to suemarinen37il

**Polar file**

XFOIL version 9.6  
calculated polar for: E210 (13.64%)  
1. 1 Reynolds number fixed Mach number fixed  
xtrf = 1.000 (top) 1.000 (bottom)  
mach = 0.000 Re = 1.000 e 6 NCrit = 5,000

1)

alpha	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>	C <sub>D</sub> OK	Top_Xtr	Bottom_Xtr
-15.000	-0.451	0.0656		0.06318	-0.0694
-14.750	-0.453	0.05545		0.05279	-0.0750
-14.500	-0.9204	0.04711		0.04427	-0.0809
-14.250	-0.9204	0.04711		0.03753	-0.0878
-14.000	-0.9204	0.04711		0.03851	-0.0918

2)

<< Back to E210 (13.64%) (e210-il)

**Polar data table (+)**

**Polar graphs**

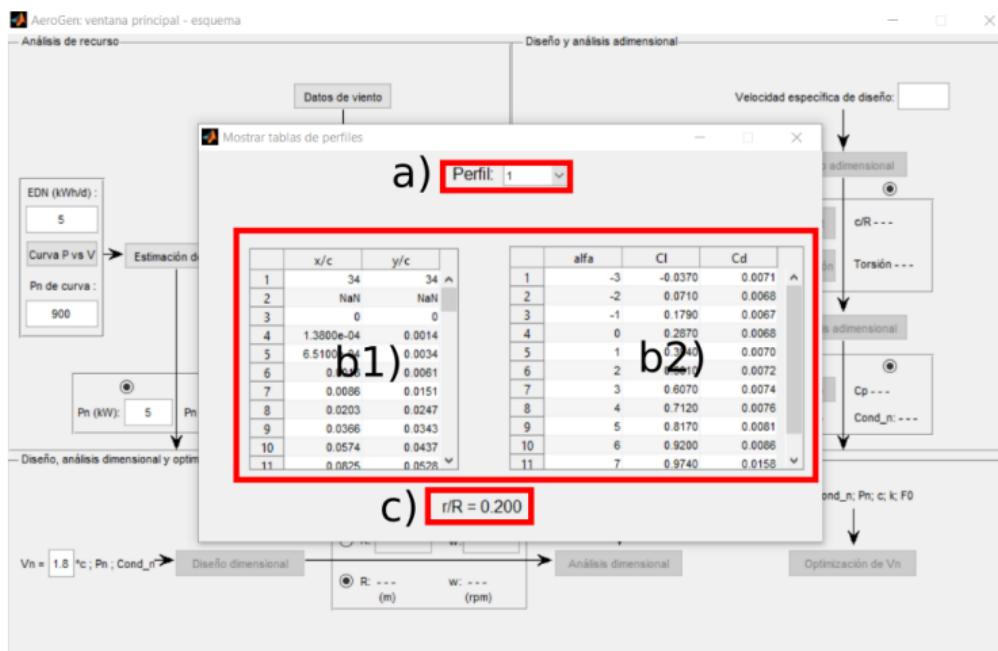
Cl v Cd

Cl v Alpha

- 1) Copiar el texto señalado a una hoja de excel. Convertir texto en columnas cuidando de los puntos y las comas decimales. Eliminar la segunda fila, la cual solo contiene "----". 2) Eliminar las columnas sobrantes y quedarse con  $\alpha$  |  $C_L$  |  $C_D$

## Ejemplo de aplicación

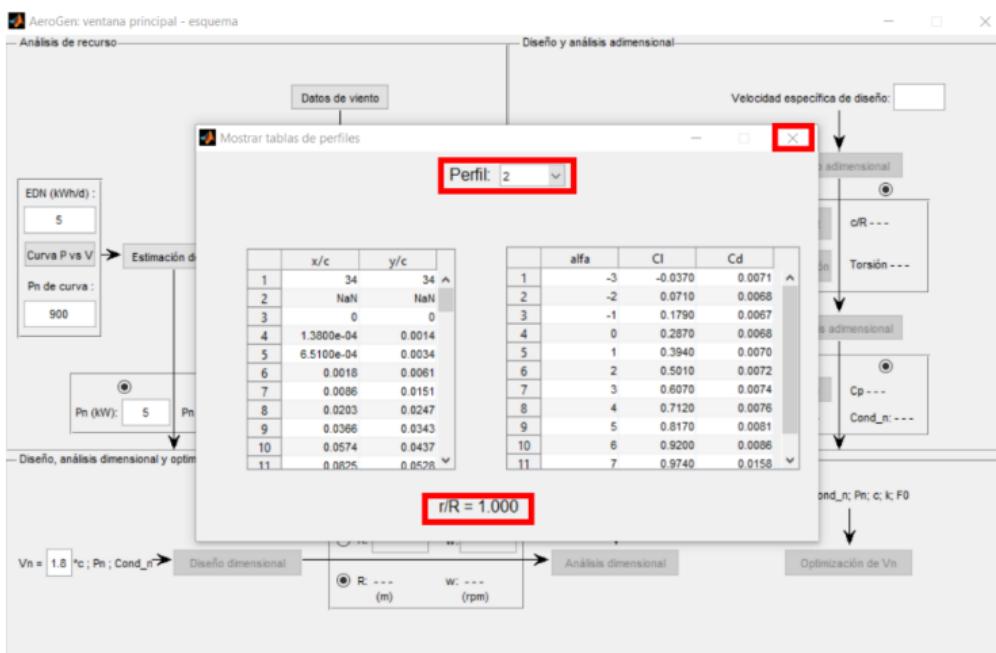
## Interfaz de verificación de carga de datos de perfiles



- a) Muestra el orden de carga de los perfiles y permite cambiar entre ellos a través del menú desplegable. b1) Tabla de forma. b2) Tabla de coeficientes. c) Posición radial adimensional correspondiente

## Ejemplo de aplicación

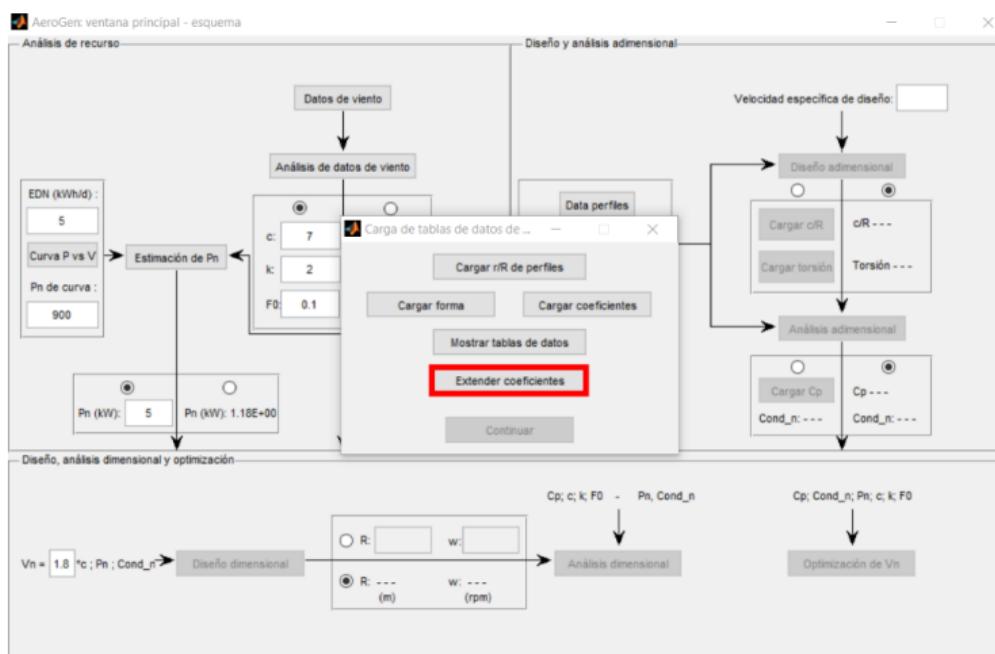
## Interfaz de verificación de carga de datos de perfiles



Al pinchar en el menú desplegable y cambiar al segundo perfil se actualiza la posición radial. Al ser un único perfil para toda la pala, la forma y los coeficientes son los mismos en ambas posiciones. Cerrar para continuar

## Ejemplo de aplicación

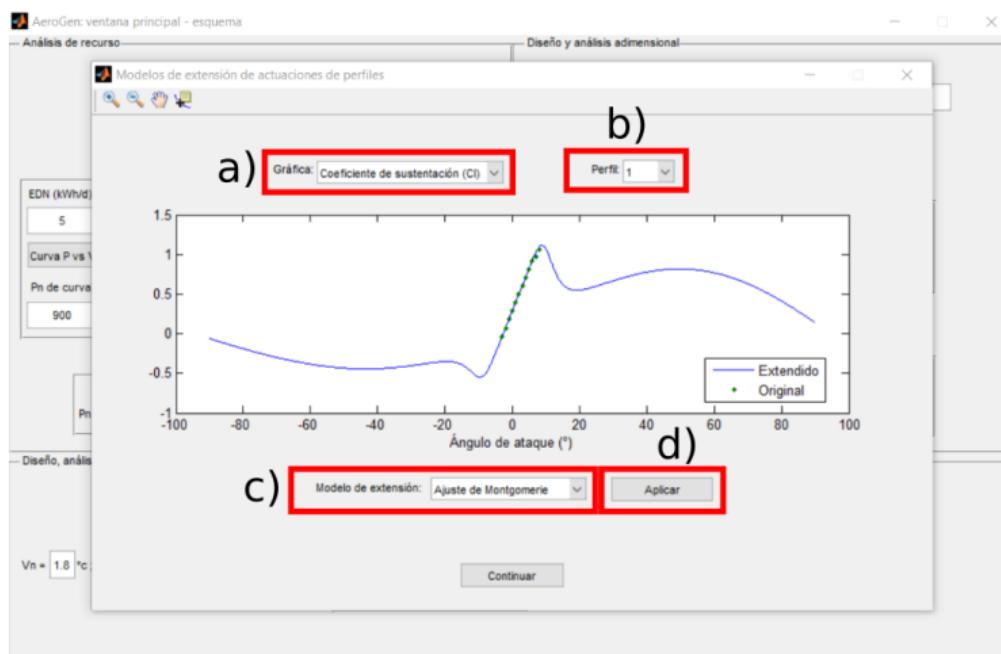
## Interfaz data perfiles



Pinchar en "Extender coeficientes" para extender el comportamiento de los coeficientes de actuaciones los 360° de ángulo de ataque

## Ejemplo de aplicación

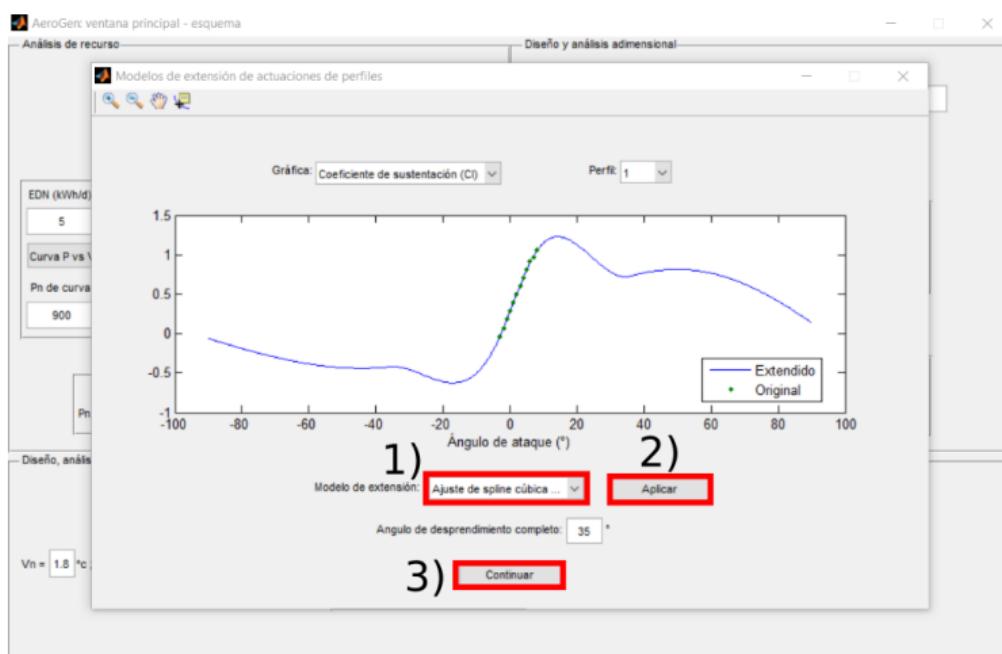
## Extensión de coeficientes de actuaciones



- a) Menú desplegable para intercambiar visualización entre coeficiente de sustentación y arrastre. b) Permite visualizar los diferentes perfiles c) Permite seleccionar diferentes modelados para la extensión de perfiles d) Aplica el modelo de extensión seleccionado

## Ejemplo de aplicación

## Extensión de coeficientes de actuaciones



En este caso el ajuste de Montgomerie puede resultar más conveniente, pero se ilustra el uso del ajuste más recomendado en general. 1) Cambiar a "Ajuste de spline cúbica suavizada". 2) Pinchar en "Aplicar". 3) Pinchar en "Continuar" para guardar cambios

## Ejemplo de aplicación

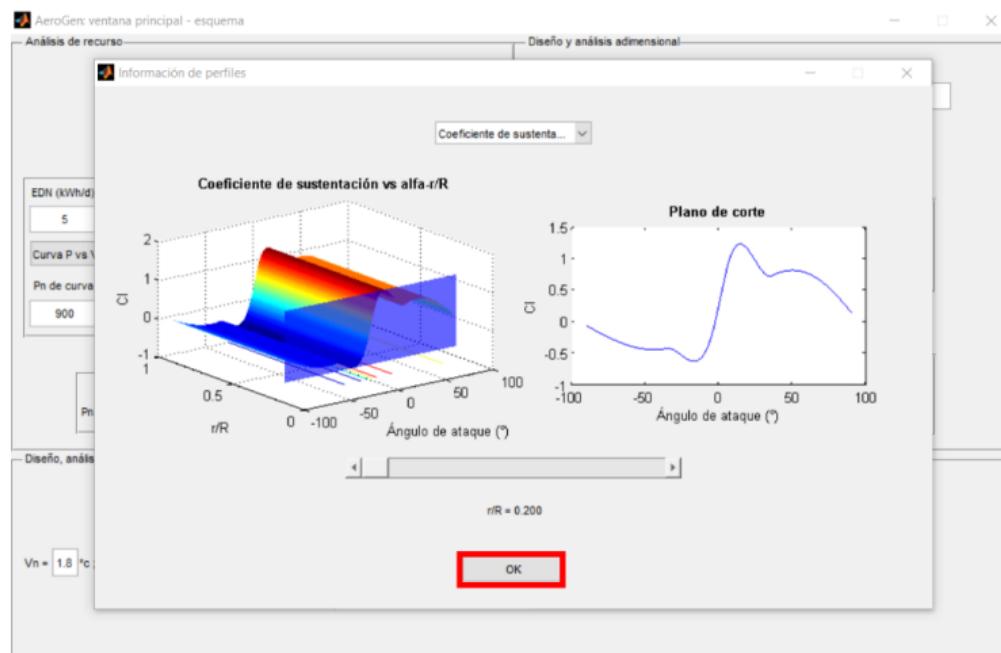
## Interfaz data profiles actualizada



Pinchar en el recién activado botón de "Continuar" para interpolar/extrapolar a lo largo del radio adimensional la forma y coeficientes extendidos de los perfiles

## Ejemplo de aplicación

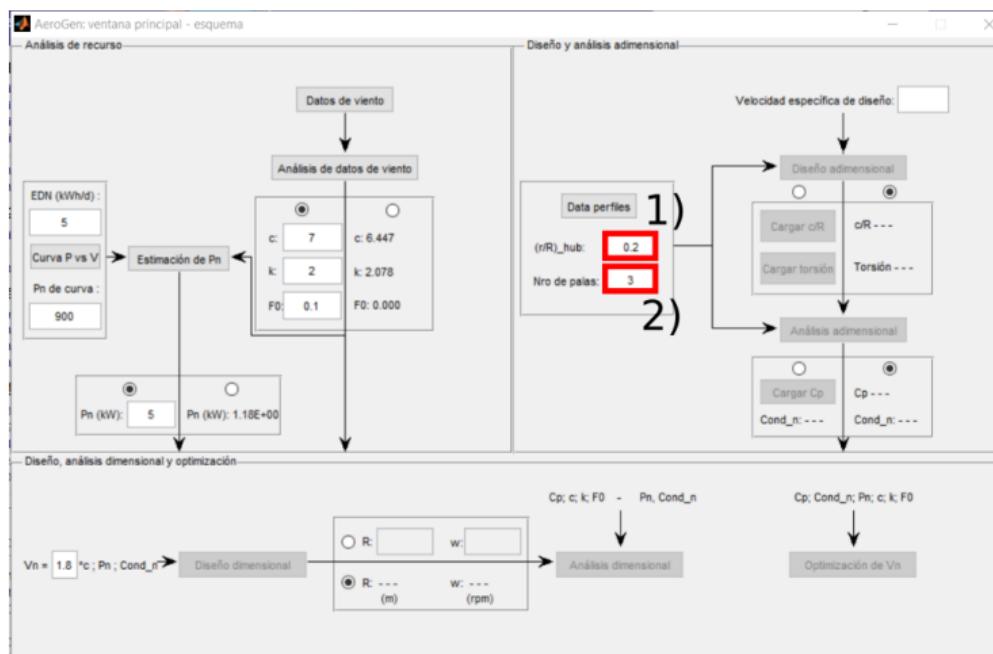
## Interfaz de extrapolación radial de datos de perfiles



En la interfaz se pueden visualizar los diferentes datos que han sido extrapolados a lo largo del radio usando el menú desplegable. Con la barra deslizante se pueden ver secciones. Pinchar en "OK" para guardar toda la información de los perfiles y cerrar la interfaz de data perfiles

## Ejemplo de aplicación

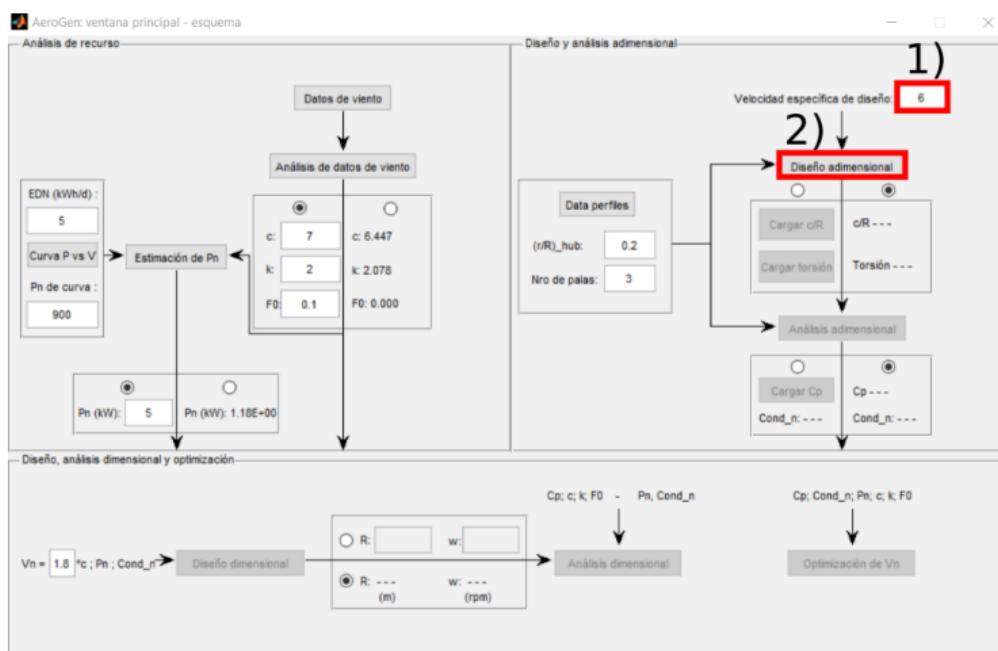
## Datos de pala



Para completar los datos de entrada comunes al diseño y análisis adimensional: 1) Rellenar la casilla de "(r/R)\_hub" con la estación radial adimensional donde comienza la raíz de la pala (0.2 en este ejemplo). 2) Rellenar la casilla de "Nro de palas" (3 para este ejemplo)

## Ejemplo de aplicación

## Entrada a diseño adimensional



- 1) Escribir la velocidad específica a la que se desea diseñar la pala, 6 para este ejemplo, pinchar fuera del recuadro para que el programa registre el valor escrito. 2) Pinchar el recién activado botón de "Diseño adimensional"

## Ejemplo de aplicación

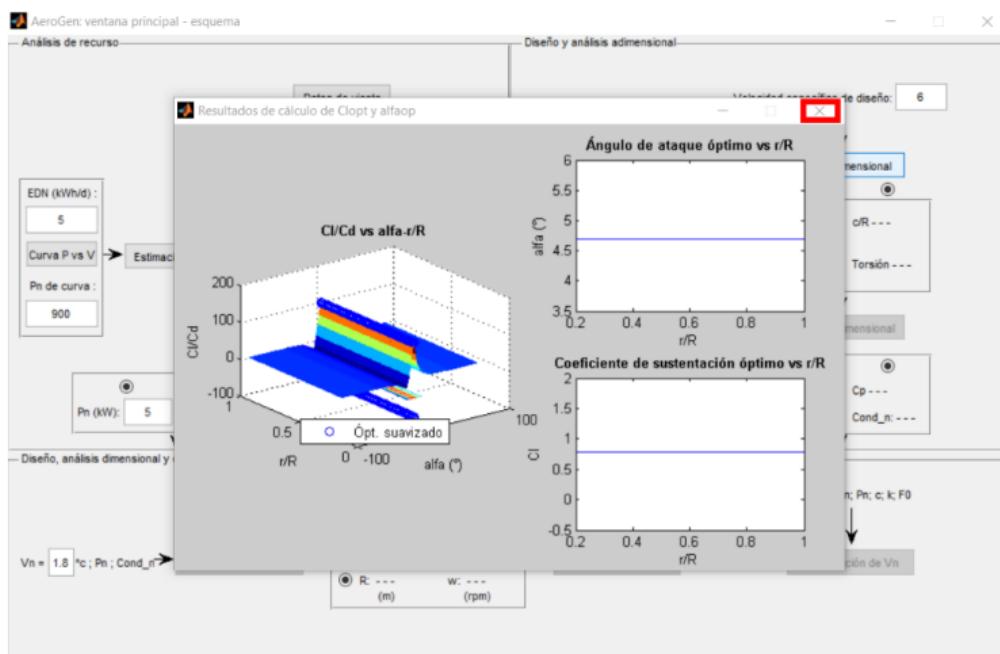
## Interfaz de diseño adimensional



Muestra varias opciones de discretización y diseño, pero la acción mínima necesaria es el cálculo del ángulo a  $Cl/Cd$  máximo a lo largo de toda la pala. Para ello pinchar en el botón "Cálculo de  $Cl/Cd$  óptimo"

## Ejemplo de aplicación

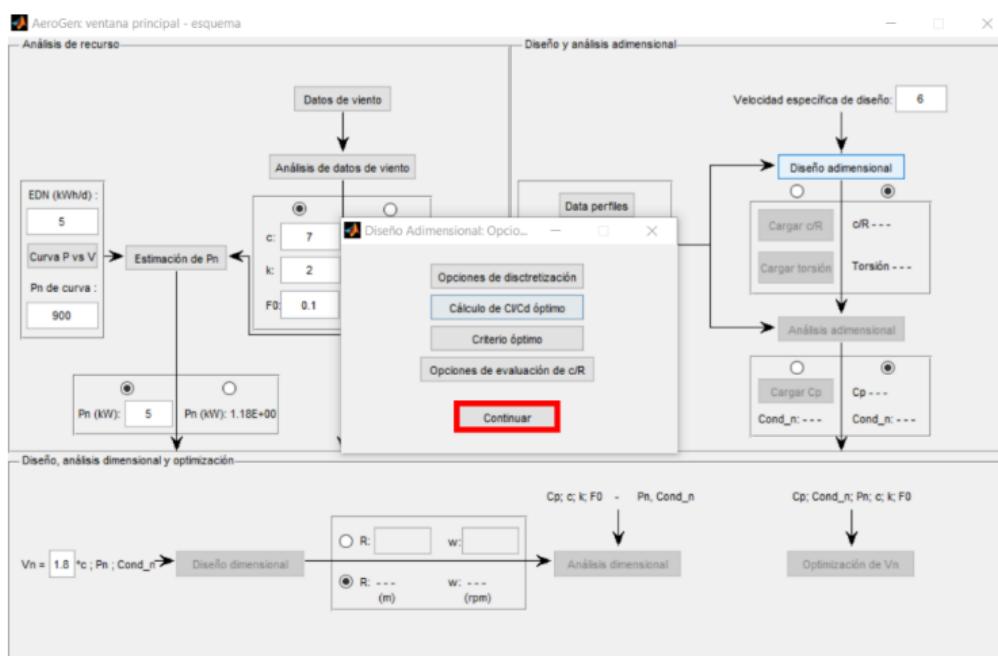
## Función de interpolación de ángulo óptimo a lo largo de la pala



Muestra las funciones calculadas. Al ser un único perfil la función es una constante. Cerrar la ventana para guardar los cambios.

## Ejemplo de aplicación

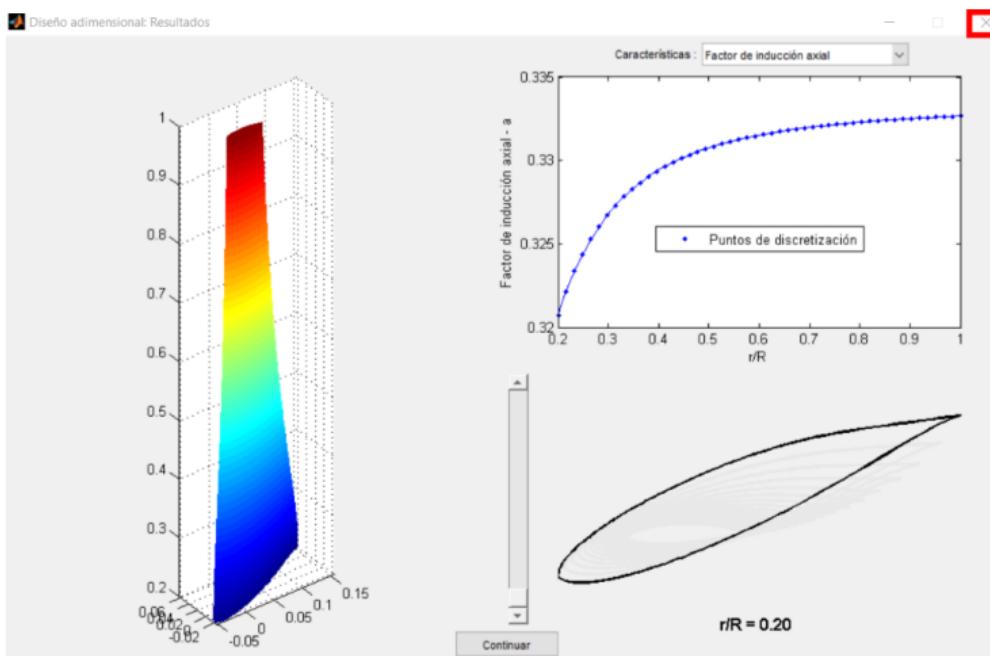
## Interfaz de diseño adimensional actualizada



Pinchar en el recién activado botón de "Continuar" para calcular la pala óptima

## Ejemplo de aplicación

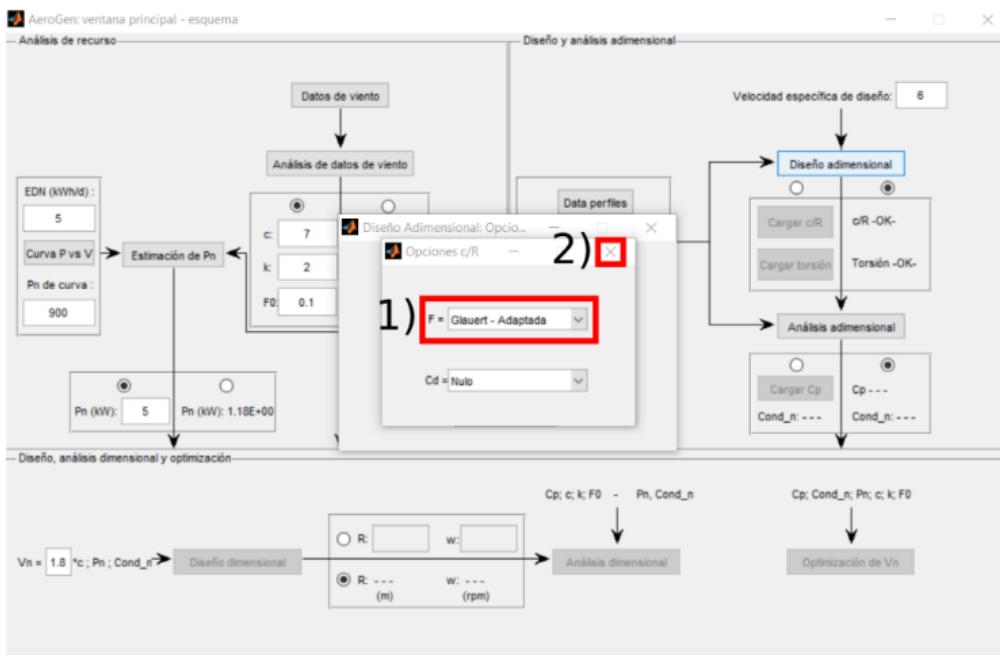
## Pala adimensional óptima generada



Muestra gráficamente las funciones generadas, las secciones de los perfiles y la pala en 3D. Por defecto no se consideran efectos de punta de pala, por lo que la punta termina abruptamente. Cerrar la ventana para NO guardar cambios y configurar la opción de efectos de punta de pala.

## Ejemplo de aplicación

## Opciones de evaluación de la cuerda adimensional

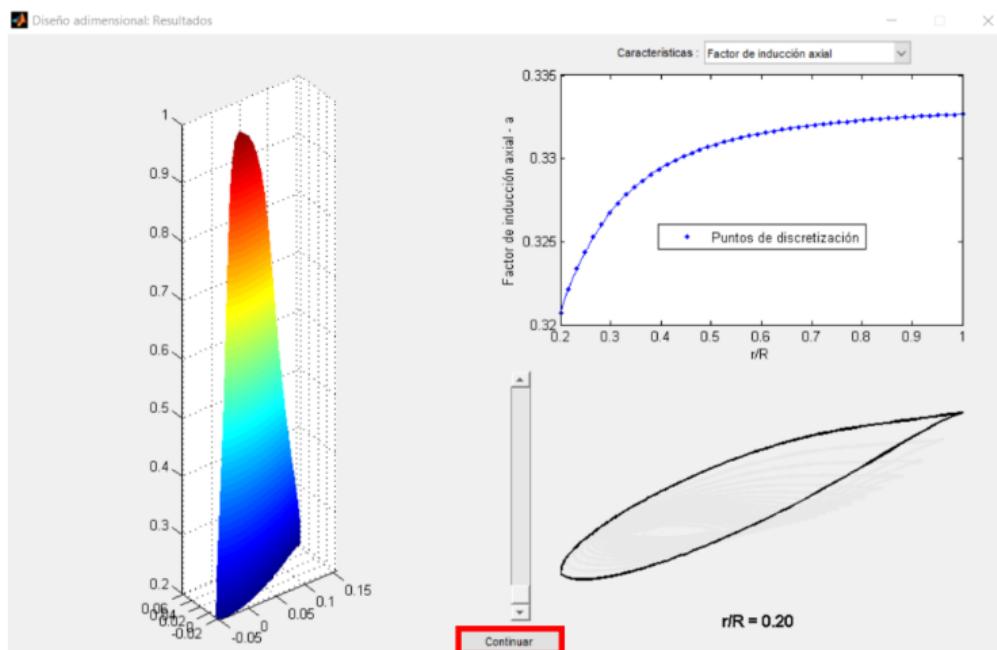


En la interfaz de diseño adimensional (diap. 56) pinchar en "Opciones de evaluación de c/R".

- 1) Cambiar la opción de "F" a "Glauert - adaptado". 2) Cerrar la ventana de opciones y pinchar en "Continuar" en la interfaz de diseño adimensional para visualizar la nueva pala.

## Ejemplo de aplicación

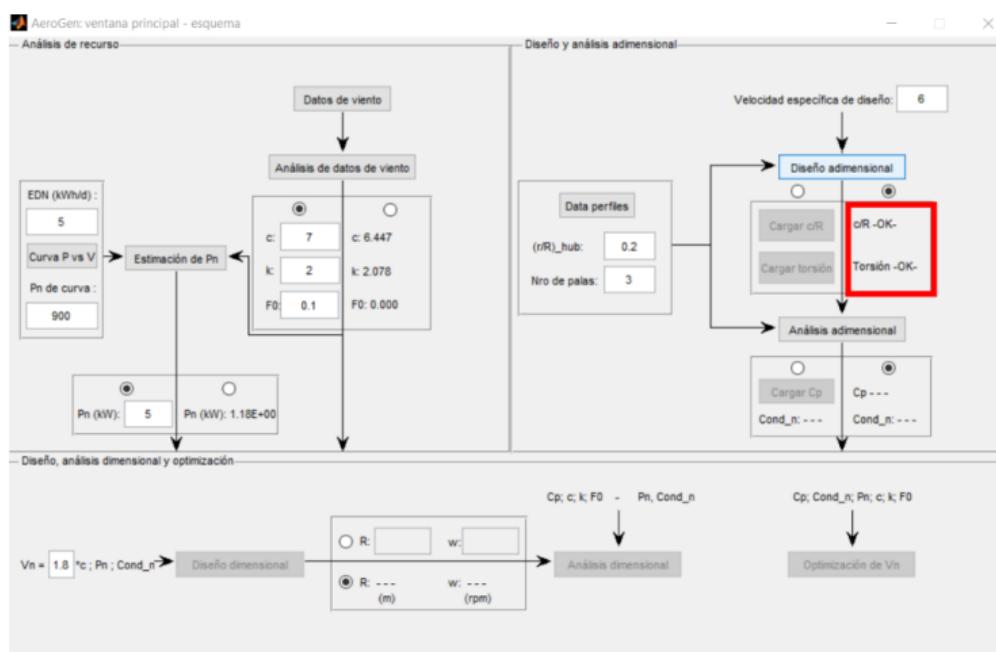
## Diseño considerando efectos de punta de palas



Muestra la pala óptima generada contando con los efectos de punta de pala para la distribución de cuerdas. Pinchar en "Continuar" para guardar la pala generada y cerrar la interfaz de diseño adimensional

## Ejemplo de aplicación

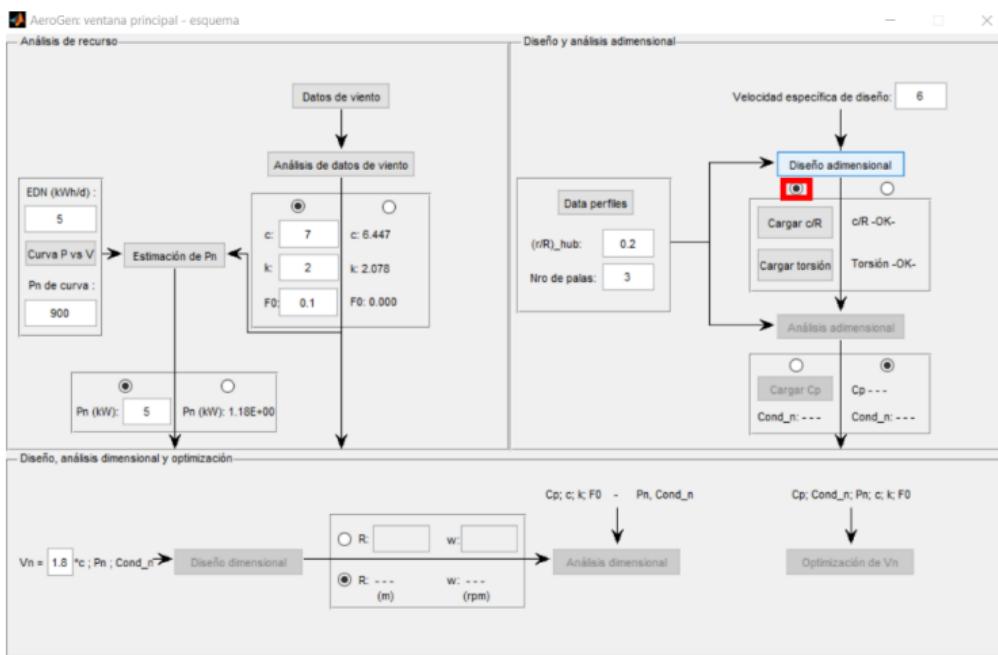
## Interfaz actualizada



Se señaliza con un "-OK-" que la distribución de cuerda adimensional y ángulos de torsión a lo largo del radio adimensional generados se han guardado correctamente y sirven de entrada para el análisis adimensional, el cual se muestra activo

## Ejemplo de aplicación

## Interfaz actualizada: Carga de geometría conocida



Opcionalmente se puede pinchar el selector izquierdo para activar los botones de carga de distribuciones de cuerda y torsión en caso de querer evaluar una geometría conocida.

## Ejemplo de aplicación

## Formato de archivos para cargar geometría conocida

a)

	A	B
1	0,250	0,146476
2	0,267	0,144749
3	0,300	0,141395
4	0,328	0,138623
5	0,388	0,132517
6	0,449	0,126391
7	0,466	0,124663
8	0,509	0,120265
9	0,570	0,114139
10	0,631	0,108012
11	0,633	0,107751
12	0,691	0,101906
13	0,752	0,09578
14	0,800	0,09092
15	0,812	0,089654
16	0,873	0,083528
17	0,934	0,077402
18	0,950	0,075715
19	0,983	0,072401
20	0,994	0,066333
21	1,000	0,063134
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		

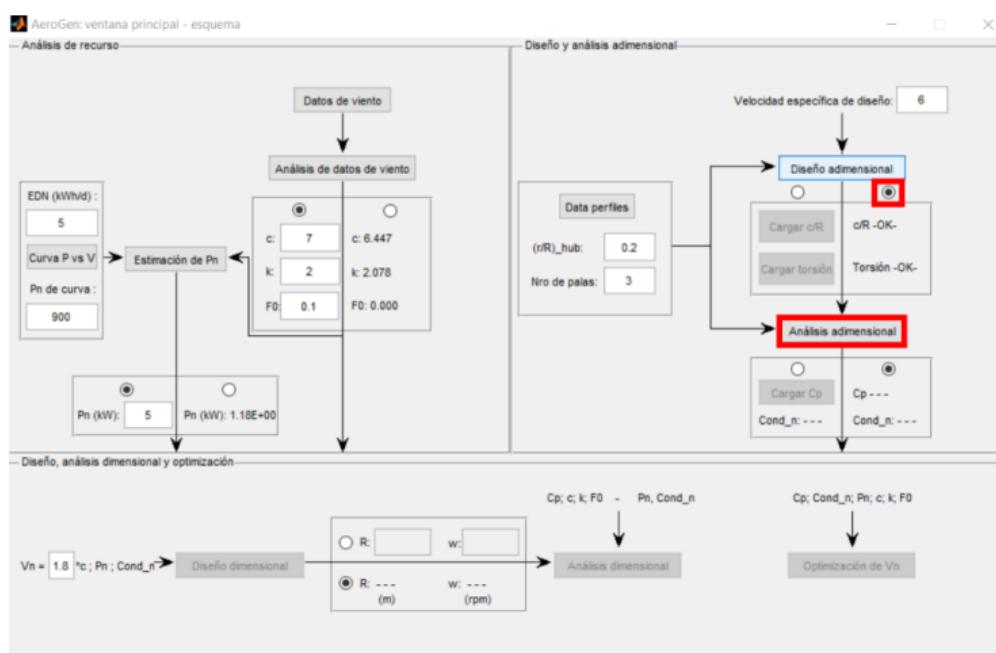
b)

	A	B
1	0,250	24,815
2	0,267	22,849
3	0,300	19,067
4	0,328	16,684
5	0,388	12,754
6	0,449	10,083
7	0,466	9,49
8	0,509	8,2
9	0,570	6,858
10	0,631	5,925
11	0,633	5,89
12	0,691	5,269
13	0,752	4,76
14	0,800	4,394
15	0,812	4,3
16	0,873	3,855
17	0,934	3,423
18	0,950	3,306
19	0,983	3,077
20	0,994	3,000
21	1,000	2,960
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		

- a) Formato requerido al pinchar "Cargar c/R":  $r/R$  |  $c/R$  que corresponden a las posiciones adimensionales y las cuerdas partidas del radio. b) Formato requerido al pinchar "Cargar torsión", análogo al anterior pero con el ángulo de torsión en grados

## Ejemplo de aplicación

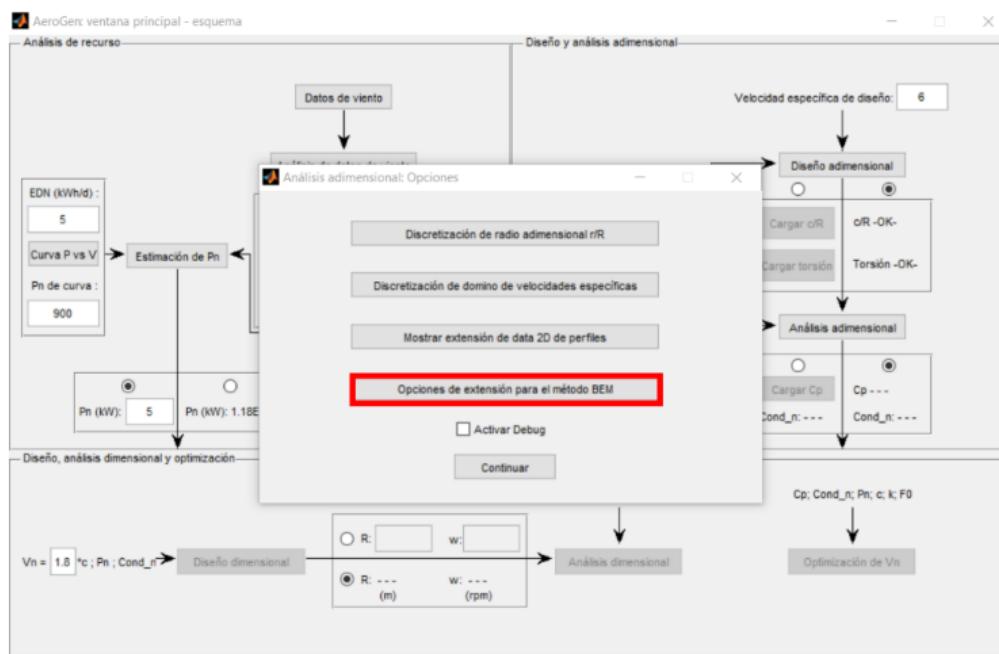
## Interfaz general



Para este ejemplo se decide proceder con la pala diseñada. Pinchar en el selector derecho y seguidamente pinchar en el botón recién activado de "Análisis adimensional" para abrir la interfaz correspondiente

## Ejemplo de aplicación

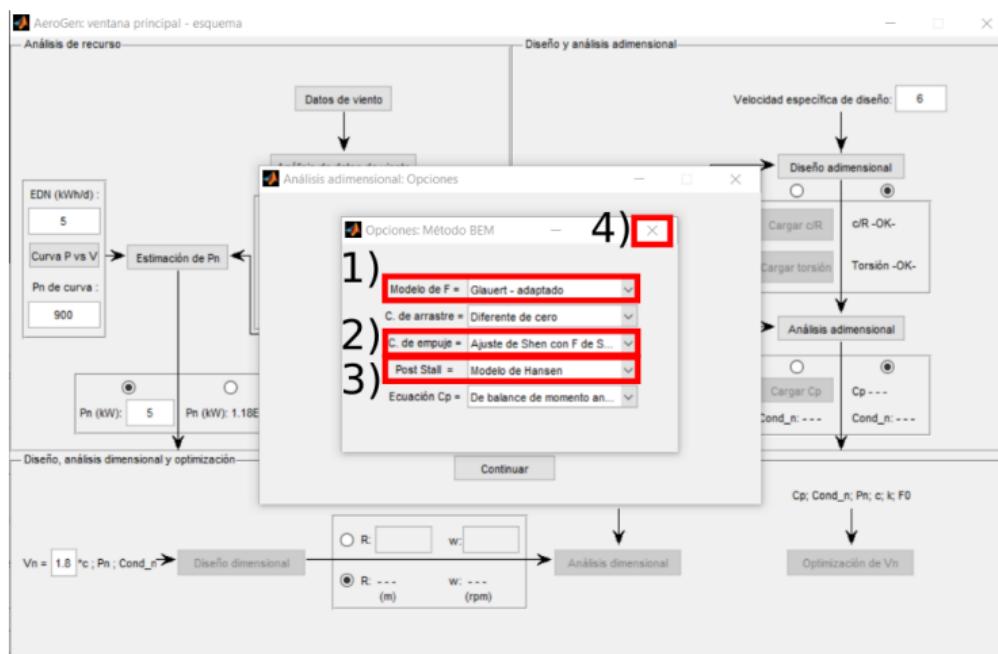
## Interfaz de análisis adimensional



Permite cambiar opciones de desratización y de los modelos de extensión del método BEM, así como activar la opción de "debug". Por defecto vienen varias opciones de extensión desactivadas. Pinchar en "Opciones de extensión para el método BEM"

## Ejemplo de aplicación

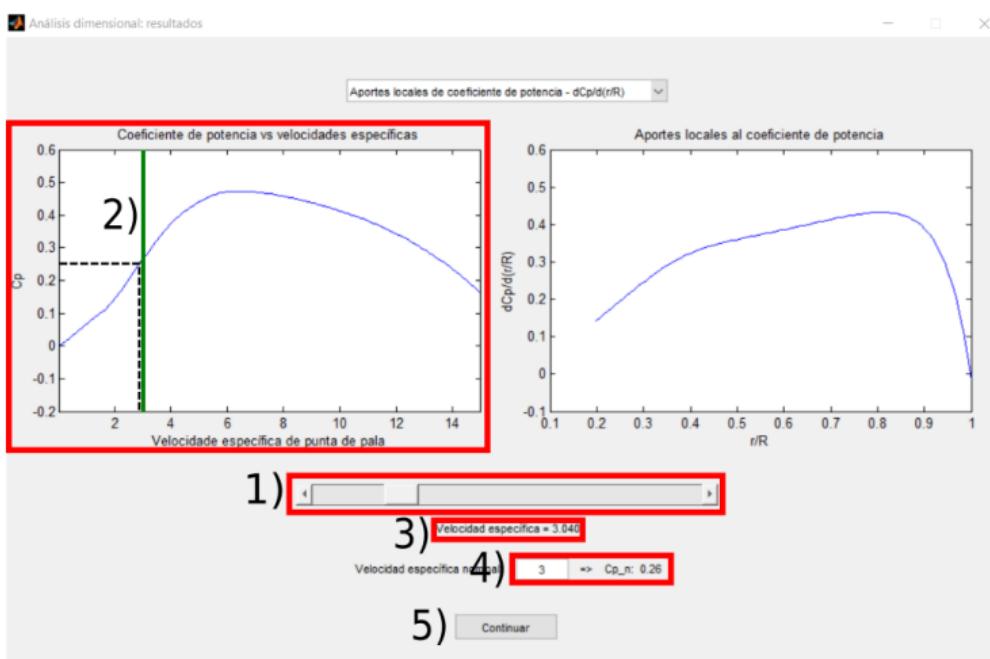
## Opciones de extensión del método BEM



- 1) Cambiar a "Glauert-adaptado" para considerar efectos de punta de pala. 2) Cambiar a "Ajuste de Shen con F de Shen". 3) Cambiar a "Modelo de Hansen". 4) Cerrar ventana de opciones y seguidamente pinchar en "Continuar" en la interfaz de análisis (diap. 66)

## Ejemplo de aplicación

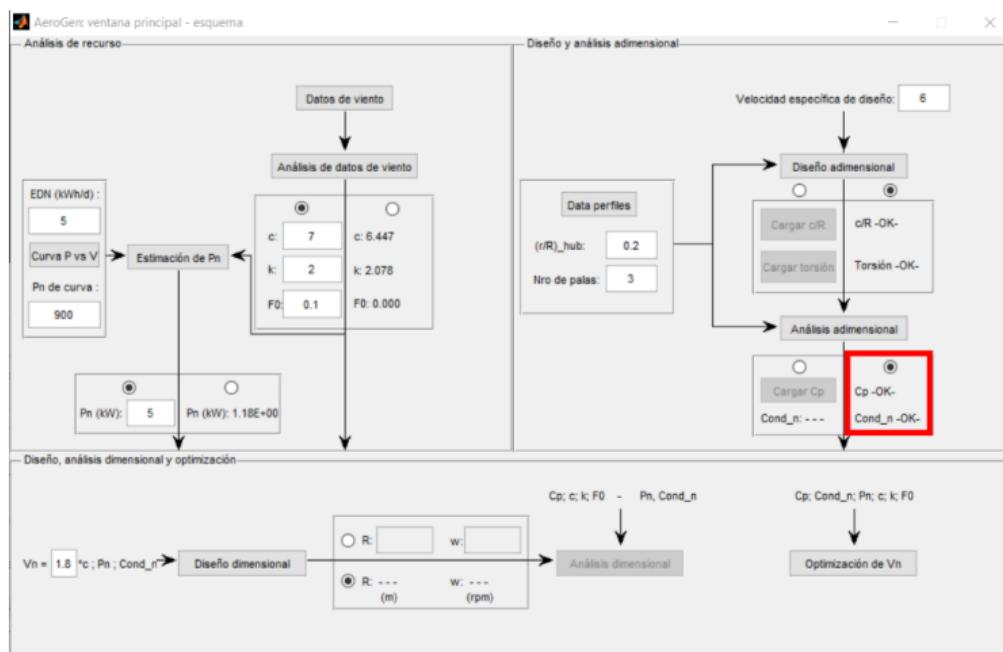
## Curvas de funcionamiento adimensional calculadas



A veces no reconoce el punto nominal: 1) usar la barra deslizante para mover la línea verde en 2) hasta que  $C_p \approx 0.25$  (criterio de Bak). 3) Muestra la vel. esp. de la línea verde. 4) Escribir la vel. esp. nominal encontrada y verificar que " $C_{p\_n}$ "  $\approx 0.25$ . 5) Pinchar en "Continuar"

## Ejemplo de aplicación

## Interfaz general actualizada



Finalmente en el selector derecho se indica con un "-OK-" que se ha guardado correctamente la curva de coeficiente de potencia vs velocidad específica calculada y el punto nominal sobre esa curva.

## Ejemplo de aplicación

## Formato de curva adimensional y punto nominal (Opcional)

	A	B	C
1	4,22	0,28	
2	6,36	0,44	
3	5,44	0,38	
4	4,75	0,34	
5	4,22	0,28	
6	3,80	0,21	
7	3,45	0,16	
8	3,13	0,12	
9	2,89	0,09	
10	2,69	0,07	
11	2,51	0,05	
12	2,35	0,04	
13	2,21	0,03	
14	2,09	0,03	
15	1,88	0,02	
16	1,50	0,01	
17	1,89	0,02	
18	1,52	0,02	
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
Data a importar			

Punto nominal

Opcionalmente se puede seguir un procedimiento análogo al presentado en la diapositiva 63.  
Formato req. al pinchar en "Cargar Cp": vel. esp.|Cp , correspondiendo la primera fila al punto nominal.

# Cuadro de contenido

## 1 Introducción

- Interfaz gráfica

## 2 Análisis de recurso eólico

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

## 3 Dimensionamiento de instalación aislada

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

## 4 Diseño y Análisis adimensional

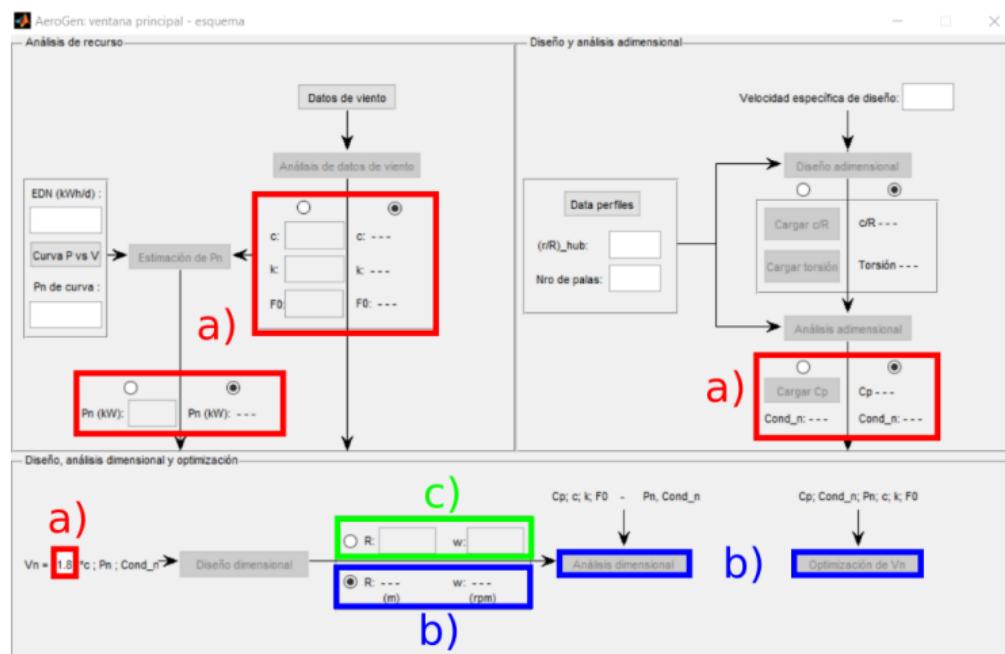
- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

## 5 Diseño y Análisis adimensional

- Entrada - salida
- Ejemplo de aplicación

Entrada - salida

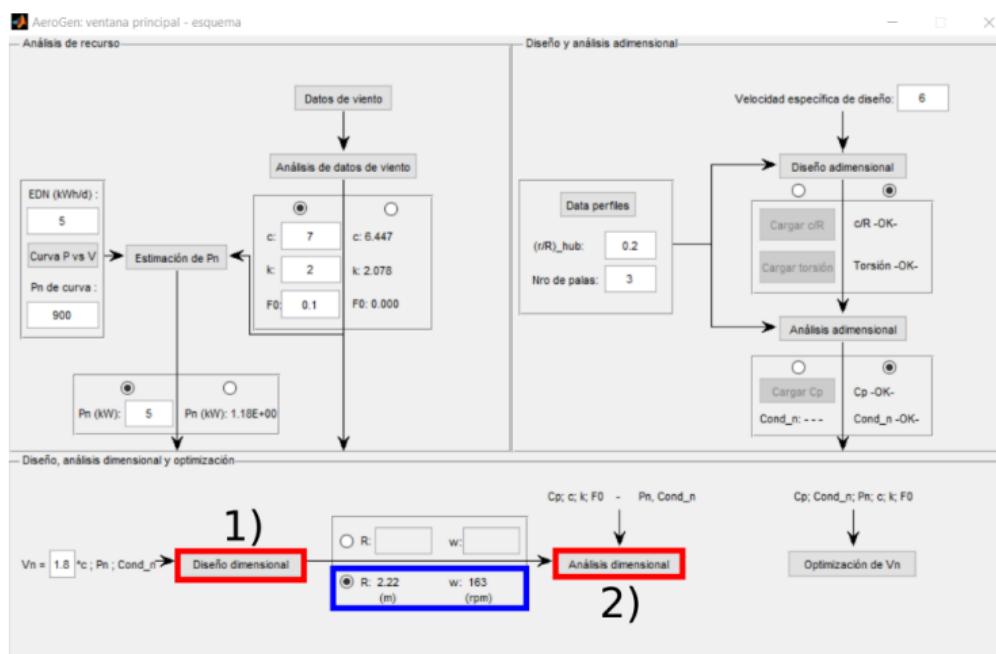
# Recurso eólico + comportamiento adimensional → radio, velocidad de giro, comportamiento dimensional y optimización



- a) Entradas: Recurso y  $P_{nominal}$ , curva  $C_p$  vs  $\lambda$  con pto nominal, factor de proporción vel. nominal  
 b) Salidas:  $R$  y  $\omega$ ; curvas P vs V; optimización. c) Alternativa: Introducción de  $R$  y  $\omega$

## Ejemplo de aplicación

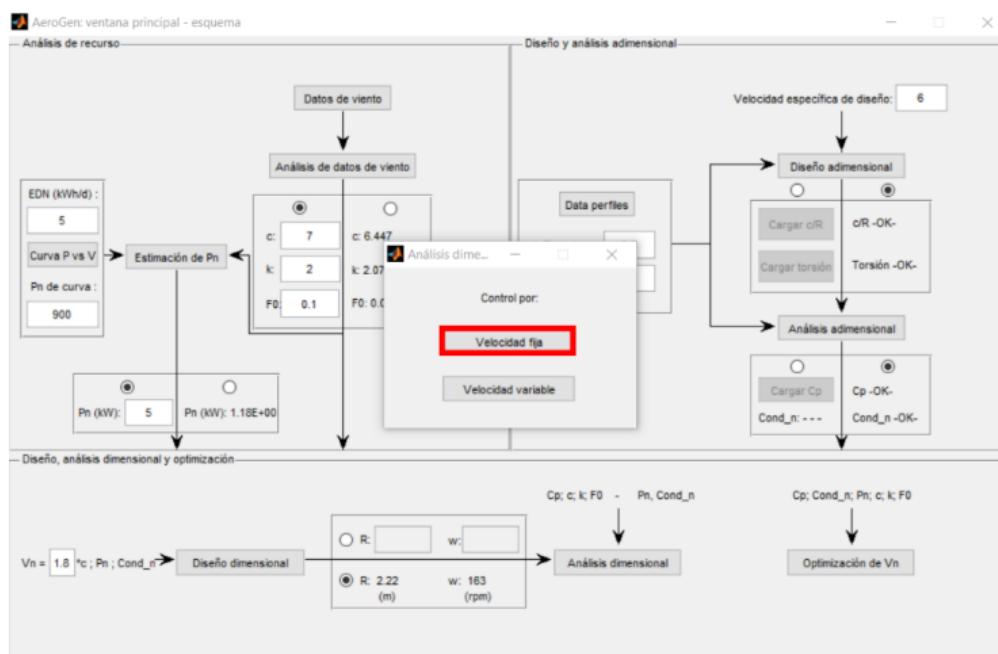
## Calculo de Radio y velocidad de giro



A partir del punto nomina y del criterio de Kaiser de fijar la velocidad nominal a 1.8 veces el parámetro de Weibull "c": 1) Pinchar en "Diseño dimensional" para calcular  $R$  y  $\omega$ . 2) Seguidamente pinchar en "Análisis dimensional" para mostrar curva P vs V correspondiente

## Ejemplo de aplicación

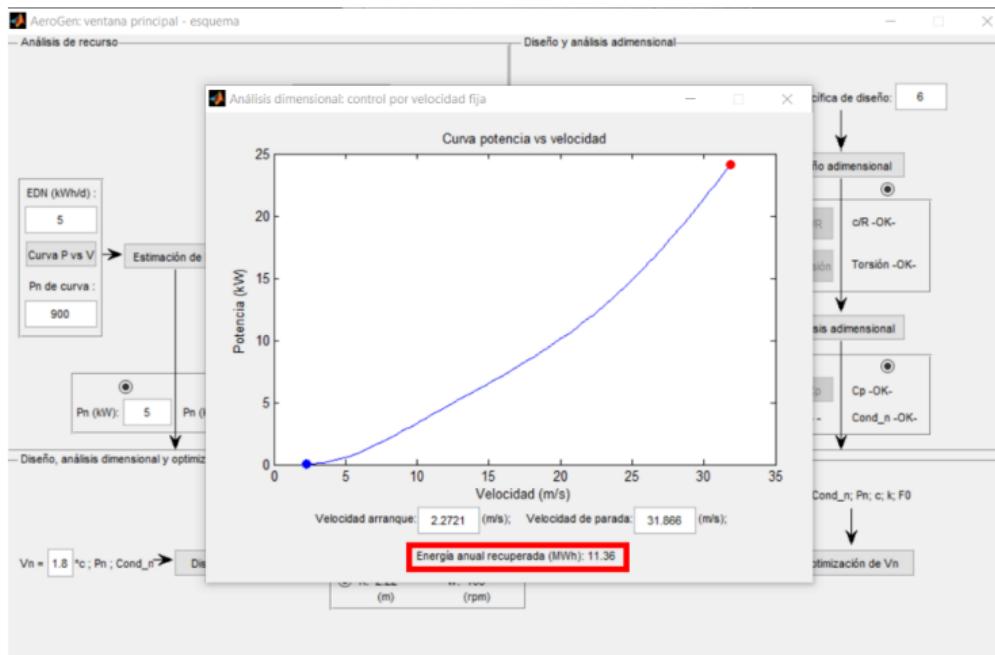
## Menú tipo de control



Dependiendo del control la curva de potencia-velocidad cambia. Pinchar en "Velocidad fija" para visualizar la curva con este tipo de control

## Ejemplo de aplicación

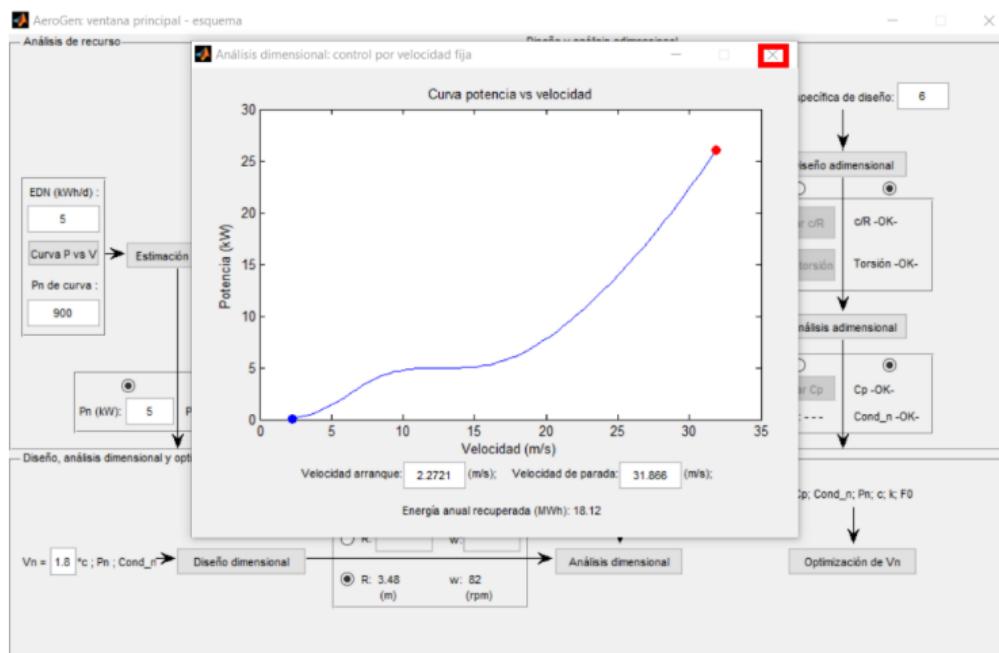
## Curva potencia - velocidad de viento para control por velocidad fija



Se muestra la curva  $P$  vs  $V$ , se puede cambiar el rango de velocidades de viento. Es importante destacar que se calcula la energía anual recuperada. Se observa que la zona de post-desprendimiento está exagerada

## Ejemplo de aplicación

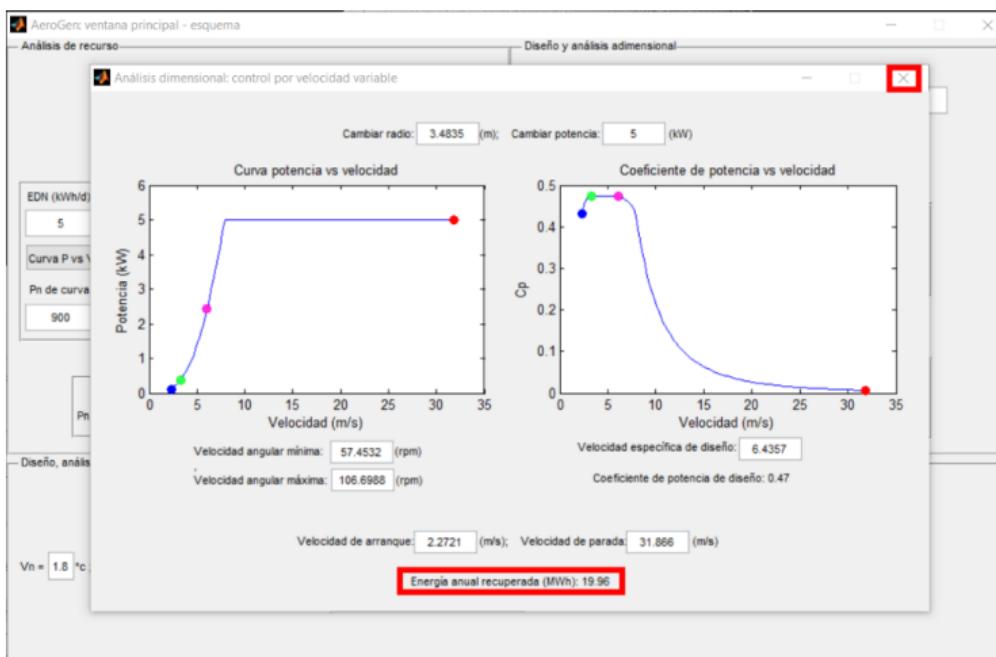
## Curva potencia - velocidad de viento para control por velocidad fija



Para capturar correctamente el comportamiento post-desprendimiento cuando no se cuenta con datos de desprendimiento del perfil es recomendable usar el modelo de Selig en vez del de Hansen. Repetir el procedimiento desde la diap. 65, cambiando al modelo. Cerrar la ventana.

## Ejemplo de aplicación

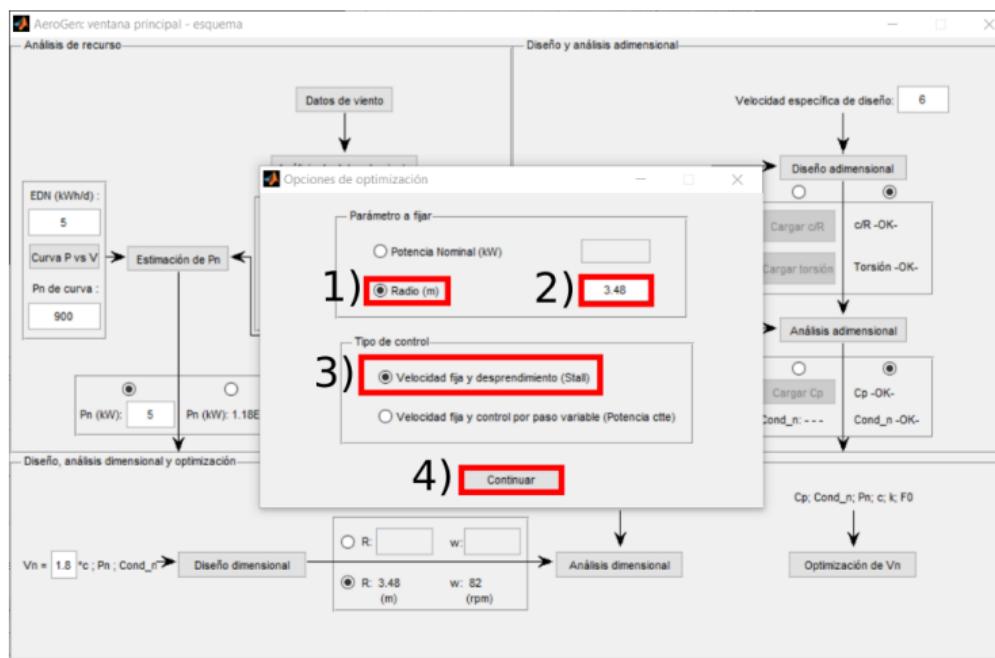
## Curva potencia - velocidad de viento para control por velocidad variable



En el menú (diap. 74) pinchar en "Velocidad variable". Se muestran las curvas P-V y Cp-V correspondientes. Se pueden variar  $R$ ,  $P_{nominal}$ ,  $\lambda_{diseño}$  sugerida y el rango de  $\omega$ , así como el rango de velocidades. Se muestra la energía anual recuperada. Cerrar ventana y menú

## Ejemplo de aplicación

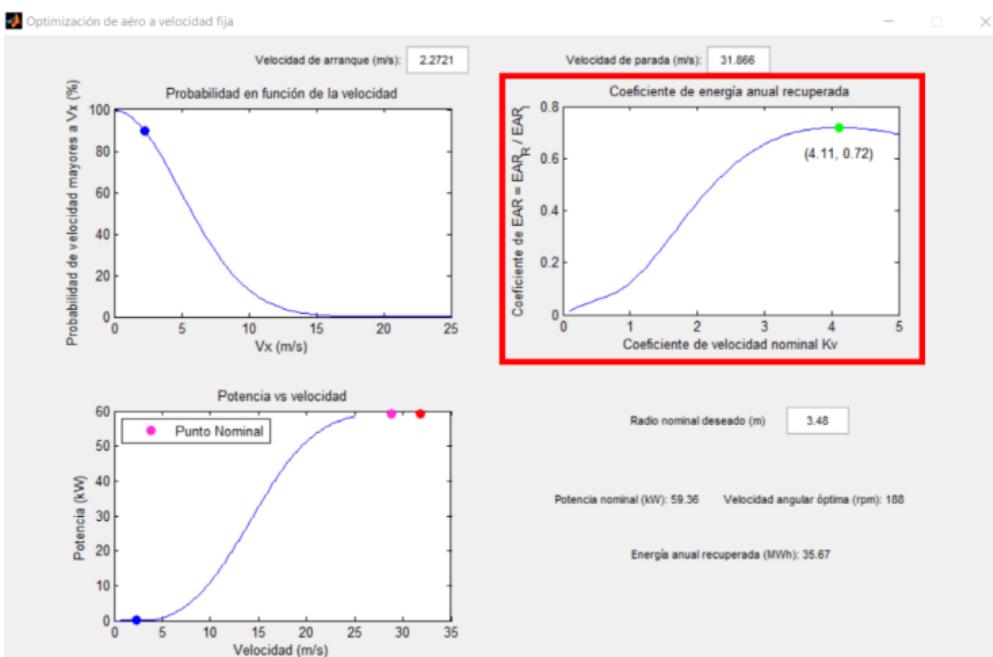
## Interfaz de opciones de optimización



En la interfaz general (diap. 73) pinchar en "Optimización de Vn". Se puede optimizar el punto nominal, ya sea fijando  $R$  o fijando  $P_{nominal}$ , dado un tipo de control. 1) Seleccionar "Radio (m)". 2) Escribir el radio calculado. 3) Seleccionar control. 4) pinchar en "Continuar"

## Ejemplo de aplicación

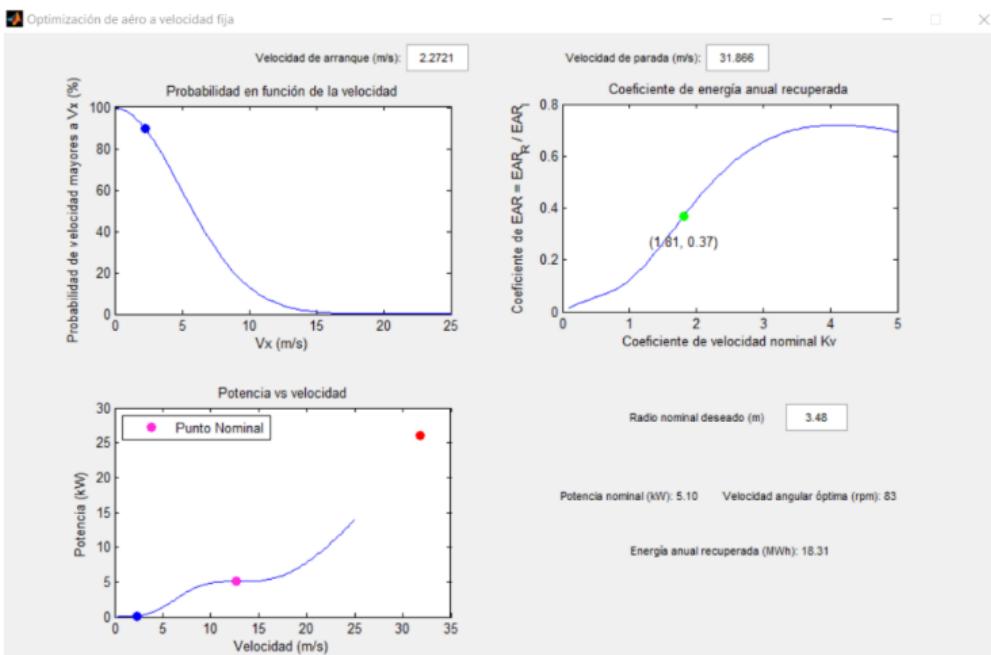
## Optimización a radio constante y control por velocidad fija



La gráfica señalada muestra frac. de energía anual recuperada por la turbina respecto a una ideal contra el factor de proporción  $k_v$  donde  $V_{nominal} = K_v c$ . Se puede pinchar sobre la línea para ver otro pto de funcionamiento nominal. También se puede corregir manualmente el radio

## Ejemplo de aplicación

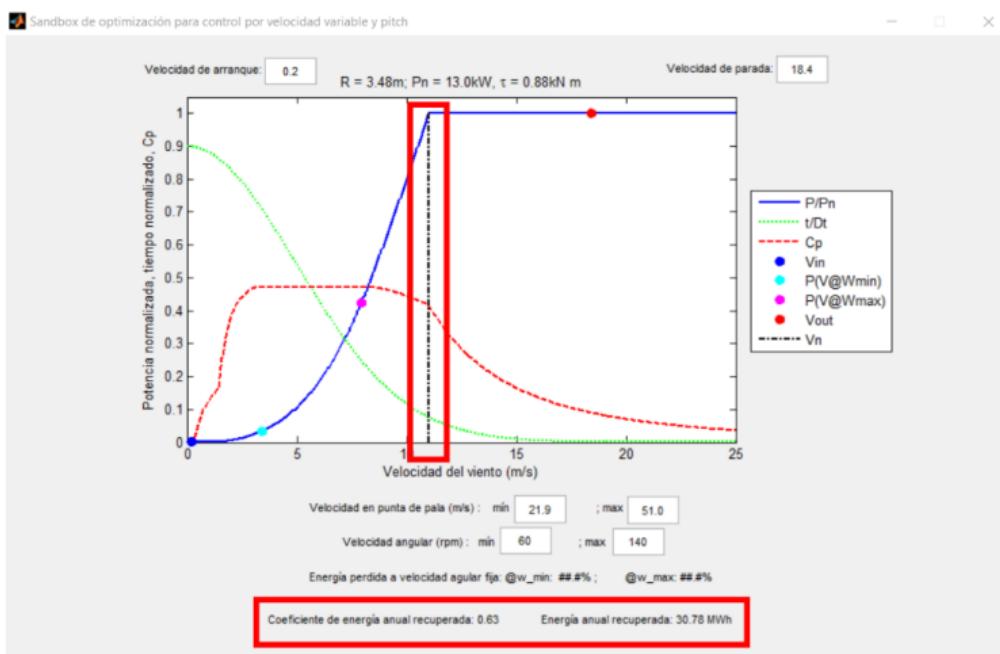
## Optimización a radio constante y control por velocidad fija



Si se cambia  $k_v = 1.8$  (criterio de Kaiser) se reduce la energía anual recuperada. Pero también se reduce sustancialmente la potencia nominal y en consecuencia el costo de fabricación, por lo que habría que complementar el análisis con una función de costes. Cerrar ventana

## Ejemplo de aplicación

## Optimización a radio constante y control por velocidad variable



En la interfaz de opciones de optimización (diap. 78), cambiar el tipo de control a vel. variable (errata). Se puede arrastrar el punto de velocidad nominal, cambiar el rango donde se hace el control por vel. variable y se muestra la EAR para comparar. Con esto concluye el tutorial.