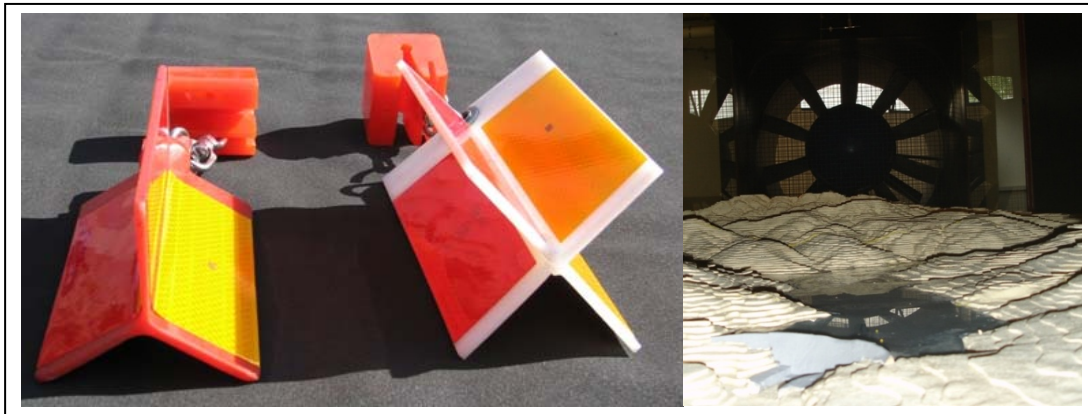


# COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE UN DISPOSITIVO AHUYENTA AVES Y ESTUDIO DE CAMPOS DE VIENTO SOBRE TOPOGRAFÍA COMPLEJA

Tesis Doctoral



**AUTOR:** Juan Antonio Cuesta Cañas

**DIRIGIDA POR:** Asunción Baquerizo Azofra

Miguel A. Losada Rodríguez

**Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales**

**Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica**

**Centro Andaluz de Medio Ambiente**



**Universidad de Granada**

Editor: Editorial de la Universidad de Granada  
Autor: Juan Antonio Cuesta Cañas  
D.L.: GR. 487-2009  
ISBN: 978-84-691-9299-3



# Tesis doctoral

## **Comportamiento aerodinámico de un dispositivo ahuyenta aves y estudio de campos de viento sobre topografía compleja**

**Doctorando:** Juan Antonio Cuesta Cañas

**Programa de Doctorado:** Dinámica de flujos biogeoquímicos y sus aplicaciones

Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales  
Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica  
Centro Andaluz de Medio Ambiente

Dirigida por:

**Asunción Baquerizo Azofra**

Profesora Titular de la Universidad de Granada

**Miguel Ángel Losada Rodríguez**

Catedrático de la Universidad de Granada





A mi familia/as

*Si el molino fuera demasiado grande, ya veré  
qué hago con el viento que lo mueve*

*Scaramouche*

*Rafael Sabatini*



# Agradecimientos

---

Una tesis doctoral es fruto de un esfuerzo continuado durante un periodo más o menos largo. En él son muchas las personas e instituciones que se asoman y ayudan de una u otra manera a que todo cobre forma. El objetivo de este apartado es agradecer a todos ellos su contribución.

Esta tesis no hubiera podido realizarse sin el apoyo del Grupo de Dinámica de Fluidos Ambientales (GDFA) de la Universidad de Granada y del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. El apoyo económico e institucional de ambos ha sido indispensable.

Las primeras personas físicas a quién quiero dedicar mi trabajo son mis dos directores de tesis, Miguel y Asunción, de cuyo tiempo se ha alimentado el mío. La dedicación que ambos dedican a esta profesión supone un gratificante ejemplo para alguien cuyos pasos comienzan un camino que ellos conocen tan bien.

Dentro de mi grupo de trabajo, en nuestra sección de viento los conocimientos de Chema asoman en varias partes de esta tesis, no en vano, todos mis esfuerzos están basados en alguno que él hizo antes. Muchas gracias por todo el tiempo dedicado.

Sin salir del apartado del túnel tengo que mencionar a Chris Mans. No en vano el capítulo de Guadalfeo está hecho sobre un modelo topográfico que le ha costado muchas horas de trabajo. Jessica, Fran, Enrique e Isrra son los compañeros de pecera con los que he tenido más contacto, pero ha habido muchos más. Aunque cada uno ha desarrollado trabajos de diversa índole todos han tenido un punto en común: en algún momento les ha tocado acompañarme a poner anemómetros, reparar desperfectos, cambiar baterías... Gracias por ascender montañas, bajar escolleras, subirnos en grúas desvencijadas, etc.

Al resto de mis compañeros de grupo, a los que están y a los que estuvieron. Sebastián, Migue(s), Angélica, Sergio.... A los compañeros de

estreses de tesis, a la gente del improvisado comedor que nos permitió sacar alguna hora más.

Un agradecimiento muy especial a mis compañeras de despacho, María, Isa y Mariana. Con Isa he compartido el último tramo de tesis y muchos irónicos “¿Qué tal tu fin de semana?”. A María y a su inagotable buen humor les debo muchas sonrisas. No soy capaz de recordar un día sin que su risa haya aparecido alguna vez. A Mariana, la última en llegar, la más friky también (en parte es culpa mía), compañera de peleas cariñosas.

Por supuesto no puedo dejar de agradecer a mi familia su apoyo infinito. A mi padre el incansable buscador de comas mal puestas, por sus esfuerzos, ideas y comentarios. A mi madre por sus preocupaciones y desvelos, mi descanso y alimentación no han encontrado (ni encontrarán jamás) un paladín semejante. Y por su puesto también a mi hermano y sus *“pero entonces, ¿tú que es lo que haces?”*.

Y muy especialmente a Irene, la que más ha sufrido mis desvelos y cambios de humor. A su generosidad por ceder a esta tesis parte de las horas que tendría que haberle dedicado a ella. Por todo el tiempo que ha echado en el coche para que pudiéramos pasar unas horas juntos. Por su entusiasmo cuando las cosas avanzaban. Por sus ánimos cuando no lo hacían. Por quererme y cuidarme como lo hace.

# Índice general

---

---

<b>Agradecimientos</b> .....	<b>V</b>
<b>Índice general</b> .....	<b>VII</b>
<b>Lista de Símbolos</b> .....	<b>XI</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>XVII</b>
<b>Índice de tablas</b> .....	<b>XXV</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>XXVII</b>
<b>Capítulo 1: Estudio de la aerodinámica de un cuerpo suspendido</b> .....	<b>1</b>
1.1    Antecedentes .....	1
1.1.1    Problemática asociada a las líneas de distribución .....	1
1.1.1.1    Problemáticas existentes .....	2
1.1.1.2    Colisión de las aves con las líneas de distribución .....	3
1.1.1.3    Electrocución de aves .....	6
1.1.2    Visión de las aves .....	8
1.1.2.1    Respuesta a nivel celular .....	8
1.1.2.2    Morfología del ojo .....	10
1.1.2.3    Características particulares de los ojos de las aves .....	13
1.1.2.4    Visión policromática .....	15
1.2    Formulación del problema.....	18
1.2.1    Parametrización de los prototipos.....	18
1.2.2    Comportamiento aerodinámico y modos de fallo.....	32
1.3    Mediciones experimentales.....	36
1.3.1    Descripción general de los ensayos .....	36
1.3.2    Modelización de los prototipos .....	38
1.3.3    Ensayos exhaustivos sobre dos de las caras .....	44
1.3.3.1    Condiciones ambientales de los ensayos.....	44

1.3.3.2	Instrumentación.....	45
1.3.3.3	Mediciones de presión.....	45
1.3.3.4	Fuerzas .....	50
1.3.4	Ensayos con medidas simultáneas en todas las caras .....	54
1.3.4.1	Condiciones ambientales de los ensayos.....	60
1.3.4.2	Instrumentación.....	61
1.3.4.3	Mediciones de presión.....	61
1.3.4.4	Fuerzas .....	62
1.3.4.5	Momentos.....	69
1.3.4.6	Cálculos espectrales.....	71
1.4	Dinámica de los prototipos.....	73
1.4.1	Modelo analítico de péndulo.....	73
1.4.2	Resultados de la simulación.....	85
1.4.2.1	Dinámicas observadas .....	85
1.4.2.2	Casuística .....	102
1.4.2.3	Descripción de las oscilaciones.....	113
1.4.2.4	Balance de fuerzas .....	127
1.4.2.5	Linealización de las ecuaciones de movimiento .....	135
1.4.2.6	Efectos del perfil temporal de la velocidad del viento ...	144
1.4.2.7	Balance energético .....	153
1.5	Conclusiones .....	164
1.6	Futuras líneas de trabajo .....	168
<b>Capítulo 2: Modificación del campo de viento en topografía compleja ..</b>		<b>169</b>
2.1	Antecedentes.....	169
2.1.1	Motivación del estudio .....	169
2.1.2	Características topográficas.....	170
2.1.3	Objetivos específicos .....	172
2.2	Planteamiento del problema .....	174
2.2.1	Posibles enfoques .....	174

2.2.2	Características del estudio .....	178
2.2.2.1	Metodología adoptada .....	178
2.2.2.2	Instrumentación.....	179
2.2.2.3	Breve descripción del túnel de viento de capa límite.....	181
2.3	Capa límite atmosférica .....	183
2.3.1	Capa límite: Descripción y características.....	183
2.3.2	Capa límite: Métodos para su reproducción a escala.....	189
2.3.3	Sistema de generación empleado.....	194
2.3.4	Capa límite obtenida.....	208
2.3.4.1	Características.....	209
2.3.4.2	Ajustes.....	211
2.4	Flujo en terreno complejo .....	214
2.4.1	Introducción.....	214
2.4.2	Análisis dimensional.....	218
2.4.3	Modelización realizada .....	223
2.4.4	Mediciones sobre el modelo.....	227
2.5	Mediciones a escala real .....	233
2.5.1	Objetivos .....	233
2.5.2	Datos obtenidos.....	236
2.6	Conclusiones .....	246
2.7	Futuras líneas de trabajo .....	247
<b>Capítulo 3: Dinámica de los prototipos bajo viento complejo .....</b>		<b>249</b>
3.1	Motivación .....	249
3.2	Velocidades de viento medidas .....	251
3.2.1	Mediciones en el túnel.....	251
3.2.2	Velocidades a escala real .....	255
3.3	Dinámica de los prototipos bajo viento no homogéneo .....	259
3.3.1	Simulaciones realizadas .....	259
3.3.2	Casuística .....	263



3.4	Dinámica de los prototipos bajo viento real.....	268
3.5	Conclusiones .....	272
3.6	Futuras líneas de trabajo .....	274
	<b>Apéndice A: Presiones obtenidas (I) .....</b>	<b>275</b>
	<b>Apéndice B: Presiones obtenidas (II) .....</b>	<b>289</b>
	<b>Apéndice C: Resultados espectrales.....</b>	<b>303</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>311</b>

# Lista de Símbolos

---

## Capítulo 1

- a Altura de una placa bidimensional
- b Anchura de una placa bidimensional
- $b_{p1}$  Anchura de una cara del prototipo 1
- $b_{p2}$  Anchura de una cara del prototipo 2
- $cdg_{p1}$  Centro de gravedad del prototipo 1
- $cdg_{p2}$  Centro de gravedad del prototipo 2
- d Distancia entre el cuerpo y el origen de coordenadas
- $d_{F1}$  Distancia del centro de coordenadas al punto de aplicación de  $F_{x1}$
- $d_{F2}$  Distancia del centro de coordenadas al punto de aplicación de  $F_{x2}$
- $d_{Fy}$  Distancia del centro de coordenadas al punto de aplicación de  $F_y$
- dI Diferencial de inercia
- dM Diferencial de masa
- $d_p$  Distancia del centro de coordenadas al centro de gravedad
- $d_x$  Diferencial de x
- $d_y$  Diferencial de y
- g Constante gravitacional
- h Altura del prototipo 2
- $h_a$  Altura de la cara larga del prototipo 1
- $h_b$  Altura de la cara corta del prototipo 1
- m Masa del cuerpo
- $m_a$  Masa del ave
- $m_a$  Masa de la cara larga del prototipo 1
- $m_b$  Masa de la cara corta del prototipo 2
- $m_c$  Masa de cada cara prototipo 2

$m_o$	Masa del ojo del ave
$m_{p1}$	Masa del prototipo 1
$m_{p2}$	Masa del prototipo 2
$p_d$	Presión dinámica media
$p_e$	Presión estática media
$p_i$	Presión media en el punto i, referenciada a la presión estática
$p_T$	Presión total media
$x_E$	componente en x del vector unitario de $\bar{E}$
$x_p$	Coordenada x de un diferencial de masa
$y_p$	Coordenada y de un diferencial de masa
$A_i$	Área tributaria del punto i
$A_r$	Área de referencia
$C_{pi}$	Coefficiente de presión en el punto i
$\bar{D}$	Vector distancia entre $\bar{P}$ y $\bar{E}$
$\bar{E}$	Proyección de $\bar{P}$ sobre el eje de giro
$E_c$	Energía cinética
$E_{c\alpha}$	Energía cinética del prototipo en $\alpha$
$E_{c\beta}$	Energía cinética del prototipo en $\beta$
$E_{c\gamma}$	Energía cinética del prototipo en $\gamma$
$E_{p\alpha}$	Energía potencial del prototipo en $\alpha$
$E_{p\beta}$	Energía potencial del prototipo en $\beta$
$E_t$	Energía total del prototipo
$\bar{E}_t$	Vector unitario en la dirección del eje de giro
$F_a$	Fuerza adimensionalizada
$F_x$	Fuerza en x
$F_{x'}$	Fuerza en $x'$
$F_{x1}$	Fuerza en el plano XZ provocada por el viento
$F_{x2}$	Fuerza en el plano XZ provocada por el rozamiento

$F_x^a$	Fuerza adimensionalizada en x
$F_{x'}^a$	Fuerza adimensionalizada en x'
$F_y$	Fuerza en y
$F_{y'}$	Fuerza en y'
$F_y^a$	Fuerza adimensionalizada en y
$F_{y'}^a$	Fuerza adimensionalizada en y'
$I_\alpha$	Inercia al giro en $\alpha$
$I_\beta$	Inercia al giro en $\beta$
$I_{eA}$	Inercia de la cara A respecto del eje e
$I_{eAg}$	Inercia de la cara A respecto de un eje paralelo a E que pase por su centro de gravedad
$I_{eB}$	Inercia de la cara B respecto del eje e
$I_{eC}$	Inercia de la cara C respecto del eje e
$I_{eP1}$	Inercia del prototipo 1 respecto del eje e
$I_{eP2}$	Inercia del prototipo 2 respecto del eje e
$I_{zP1}$	Inercia del prototipo 1 respecto del eje z
$I_{zP2}$	Inercia del prototipo 2 respecto del eje z
$M_x^a$	Momento adimensionalizado en x
$M_{x'}^a$	Momento adimensionalizado en x'
$M_y^a$	Momento adimensionalizado en y
$M_{y'}^a$	Momento adimensionalizado en y'
$M_z^a$	Momento adimensionalizado en z
$\bar{P}$	Vector de posición
P	Peso
$P_n$	Peso en dirección normal al movimiento
$P_t$	Peso en dirección tangencial al movimiento
T	Tensión
V	Velocidad del viento
$V_c$	Velocidad del cuerpo
X	Eje de coordenadas perpendicular a la dirección del viento

Y	Eje de coordenadas paralelo a la dirección del viento
Z	Eje de coordenadas paralelo a la aceleración de la gravedad
X'	Eje de coordenadas
Y'	Eje de coordenadas
$\alpha$	Angulo girado por el cuerpo en el plano XZ
$\alpha'$	Primera derivada temporal de $\alpha$
$\alpha''$	Segunda derivada temporal de $\alpha$
$\beta$	Angulo girado por el cuerpo en el plano YZ
$\beta'$	Primera derivada temporal de $\beta$
$\beta''$	Segunda derivada temporal de $\beta$
$\gamma$	Angulo girado por el cuerpo en torno al eje de unión
$\gamma''$	Segunda derivada temporal de $\gamma$
$\theta$	Angulo que forma el eje de giro con el eje X
$\rho$	Densidad del aire
$\lambda_{\max}$	Longitud de onda

## Capítulo 2

$a_c$	Parámetro geométrico que define una colina
$c_p$	Calor específico del aire
f	Parámetro de Coriolis
$f^*$	Coficiente adimensional utilizado para la definición del espectro
g	Constante gravitacional
$h_c$	Altura de la colina
k	Constante adimensional de Von Karman
$\bar{k}$	Vector unitario con dirección vertical y sentido contrario al de la gravedad
$k_t$	Conductividad térmica del aire
m	Parámetro de ajuste de la intensidad de turbulencia
n	Frecuencia característica

$p_{ad}$	Presión, adimensionalizada con $\rho V_r^2$
$t_r$	Tiempo de referencia
$u'$	Componente turbulenta de la velocidad
$\bar{u}'$	Media de $u'$
$z$	Altura con respecto al suelo
$z_o$	Altura de rugosidad superficial
$C_D$	Coefficiente de arrastre superficial
$C_g$	Coefficiente geostrófico de arrastre
$E_c$	Número de Eckert
$F_r$	Número de Froude
$I_u$	Intensidad de turbulencia
$L_r$	Longitud de referencia
$P_r$	Número de Prandtl
$R_e$	Número de Reynolds
$R_o$	Número de Rosby
$S_t$	Número de Strouhal
$S_{uu}$	Función de densidad espectral
$T_r$	Temperatura de referencia
$U(z)$	Velocidad instantánea
$\bar{U}(z)$	Velocidad media
$U_*$	Velocidad de fricción
$U_{gr}$	Velocidad del viento de gradiente
$U_o(z)$	Velocidad de referencia, función de la altura
$\vec{V}$	Vector velocidad, adimensionalizado
$V_r$	Velocidad de referencia
$Z_g$	Altura a la que $U(z) \approx U_{gr}$

$\alpha$	Parámetro de ajuste de la ley exponencial
$\delta$	Altura de capa límite
$\Delta S$	Incremento diferencial de la velocidad
$\Delta T$	Incremento de la temperatura media, adimensionalizada con $\Delta T_r$
$\Delta T_r$	Incremento de la temperatura de referencia
$\phi$	Latitud
$\phi_E$	Energía disipada por unidad de volumen o masa (adimensionalizada)
$\eta$	Parámetro de ajuste de la intensidad de turbulencia (ESDU 83045)
$\lambda c$	Longitud de onda asociada a la geometría de colina idealizada
$\rho$	Densidad del aire
$\sigma$	Función de la variación de la velocidad del viento
$\tau_o$	Fuerza de arrastre superficial por unidad de superficie
$\nu$	Viscosidad cinemática
$\Omega$	Velocidad angular de rotación de la tierra

### Capítulo 3

Presenta la misma nomenclatura que el capítulo 1

# Índice de figuras

---

## Capítulo 1

Figura 1.1-1 Consumo energético anual.....	2
Figura 1.1-2 Dos tipos de células: Cono (izquierda) y bastón (derecha) (MOYES and SCHULTE 2006).....	9
Figura 1.1-3 Comparación de un cono con un cono doble (MOYES and SCHULTE 2006).....	10
Figura 1.1-4 Partes del ojo (MOYES and SCHULTE 2006) .....	11
Figura 1.1-5 Estructura de la retina, a la izquierda dibujo esquemático de Ramón y Cajal (1900 aprox), derecha: imagen de microscopio .....	13
Figura 1.1-6 Espectros normalizados de absorción para el Herrerillo común (HART 2001) .....	16
Figura 1.2-1 Imagen de ambos prototipos .....	19
Figura 1.2-2 Vistas de P1.....	20
Figura 1.2-3 Vistas de P2.....	21
Figura 1.2-4 Descripción geométrica de paralelepípedo.....	24
Figura 1.2-5 Planta superior del prototipo 1 .....	26
Figura 1.2-6 Planta superior del prototipo 1 .....	29
Figura 1.2-7 Pieza de unión.....	34
Figura 1.3-1 Esqueleto de aluminio del prototipo P1 .....	39
Figura 1.3-2 Lámina de policarbonato con microtubos.....	40
Figura 1.3-3. Pieza de unión del modelo del prototipo P1 .....	40
Figura 1.3-4. Pieza de unión.....	41
Figura 1.3-5 Modelo del prototipo 1 en el interior del túnel .....	42
Figura 1.3-6 Modelo del prototipo 2 en el interior del túnel .....	43
Figura 1.3-7 Modelo del prototipo 2 montado en el interior del túnel.....	43
Figura 1.3-8 Esquema de los puntos de presión para P1F1.....	46
Figura 1.3-9 Esquema de los puntos de presión para P2F1.....	47
Figura 1.3-10 Diferencias de presiones en dos ensayos idénticos realizados en fechas diferentes .....	49
Figura 1.3-11 Fuerzas medidas sobre cada cara; P1F1; Direcciones de viento comprendidas entre 0° y 67.5°.....	51
Figura 1.3-12 Fuerzas medidas sobre cada cara; P1F1; Direcciones de viento comprendidas entre 90° y 157.5° .....	52



Figura 1.3-13 Fuerzas medidas sobre cada cara; P2F1; Direcciones de viento comprendidas entre 0° y 67.5°.....	53
Figura 1.3-14 Áreas de control; P1F2.....	56
Figura 1.3-15 Áreas de control, P2F2.....	57
Figura 1.3-16 Puntos de control, P1F2.....	58
Figura 1.3-17 Puntos de control P2F2.....	59
Figura 1.3-18 Fuerzas medidas sobre cada cara; P1F2; Direcciones de viento comprendidas entre 0° y 67.5°.....	62
Figura 1.3-19 Fuerzas medidas sobre cada cara; P1F2; Direcciones de viento comprendidas entre 90° y 157.5° .....	63
Figura 1.3-20 Fuerzas medidas sobre cada cara; P2F2 .....	64
Figura 1.3-22 Cambio de ejes coordenados .....	69
Figura 1.4-1 Esquema de P1 con unión a punto de giro .....	74
Figura 1.4-2 coordenadas polares .....	75
Figura 1.4-3 Cuerpo suspendido con fuerzas actuantes en el plano YZ .....	76
Figura 1.4-4 Cuerpo suspendido con fuerzas actuantes en el plano XZ .....	81
Figura 1.4-5 situación de equilibrio en $\beta$ para P1 .....	87
Figura 1.4-6 situación de equilibrio: relación $\beta$ - $\beta'$ para P1,.....	88
Figura 1.4-7 Situación de equilibrio en $\gamma$ para P2 .....	89
Figura 1.4-8 Situación de equilibrio: relación $\gamma$ - $\gamma'$ para P1. ....	90
Figura 1.4-9 Situación de equilibrio en $\alpha$ para P1 .....	91
Figura 1.4-10 Situación de equilibrio: relación $\alpha$ - $\alpha'$ para P1.....	92
Figura 1.4-11 Oscilaciones sinusoidales en $\gamma$ para P2 .....	93
Figura 1.4-12 Situación de equilibrio: relación $\gamma$ - $\gamma'$ para P1. ....	94
Figura 1.4-13 Oscilaciones sinusoidales en $\alpha$ para P2 .....	94
Figura 1.4-14 Oscilaciones periódicas: relación $\alpha$ - $\alpha'$ para P1. ....	95
Figura 1.4-15 Sistema de giros en $\gamma$ para P1 (caso 1).....	96
Figura 1.4-16 Sistema de giros: relación $\gamma$ - $\gamma'$ para P1. ....	97
Figura 1.4-17 Sistema de giros: relación $\gamma$ - $\gamma'$ para P1 (caso 2).....	98
Figura 1.4-18 Sistema complejo de movimiento en $\alpha$ para P2 .....	99
Figura 1.4-19 Sistema de giros: relación $\alpha$ - $\alpha'$ para P1. ....	100
Figura 1.4-20 Fuerzas ejercidas en $\alpha$ presentándose resonancia .....	100
Figura 1.4-21 Fuerzas ejercidas en $\alpha$ sin presentarse resonancia.....	101
Figura 1.4-22 Sistema complejo de movimiento en $\gamma$ para P2 .....	102
Figura 1.4-23 Movimientos finales; P1; V= 6 m/s .....	109
Figura 1.4-24 Movimientos finales; P1; V= 8 m/s .....	109
Figura 1.4-25 Movimientos finales; P1; V= 10 m/s.....	110

Figura 1.4-26 Movimientos finales; P1; V= 12 m/s.....	110
Figura 1.4-27 Movimientos finales; P2; V= 6 m/s.....	111
Figura 1.4-28 Movimientos finales; P2; V= 8 m/s.....	111
Figura 1.4-29 Movimientos finales; P2; V= 10 m/s.....	112
Figura 1.4-30 Movimientos finales; P2; V= 12 m/s.....	112
Figura 1.4-31 Amplitud de oscilación; $\gamma$ ; P1.....	114
Figura 1.4-32 Amplitud de oscilación; $\gamma$ ; P2.....	114
Figura 1.4-33 Periodo de oscilación; $\gamma$ ; P1.....	115
Figura 1.4-34 Periodo de oscilación adimensionalizado; $\gamma$ ; P1.....	116
Figura 1.4-35 Periodo de oscilación adimensionalizado (I); $\gamma$ ; P2.....	117
Figura 1.4-36 Desviación típica de la amplitud; $\gamma$ ; P2.....	118
Figura 1.4-37 Periodo adimensionalizado; $\gamma$ ; P2.....	119
Figura 1.4-38 Periodo de oscilación adimensionalizado; $\gamma$ ; P1.....	120
Figura 1.4-39 Periodo de oscilación adimensionalizado; $\beta$ ; P2.....	121
Figura 1.4-40 Periodo de oscilación adimensionalizado; $\beta$ ; P1.....	122
Figura 1.4-41 Amplitudes; $\alpha$ ; P1.....	123
Figura 1.4-42 Amplitudes; $\alpha$ ; P2.....	124
Figura 1.4-43 Periodo de oscilación; $\alpha$ ; P1.....	125
Figura 1.4-44 Periodo de oscilación adimensionalizado; $\alpha$ ; P2.....	126
Figura 1.4-45 Valores de los diferentes términos según el valor de $T_{\beta 1}$ , $T_{\beta 2}$ , $T_{\beta 3}$ y $T_{\beta 4}$ .....	132
Figura 1.4-46 comparación con ec. lineales; $\gamma$ ; P2; Incidencia inicial: 45º..	137
Figura 1.4-47 comparación con ec. lineales; $\gamma$ ; P1; Incidencia inicial: 45º..	138
Figura 1.4-48 comparación con ec. lineales; $\gamma$ ; P1; Incidencia inicial: 30º..	139
Figura 1.4-49 comparación con ec. lineales; $\beta$ ; P1; Incidencia inicial: 45º..	140
Figura 1.4-50 comparación con ec. lineales; $\beta$ ; P2; Incidencia inicial: 15º..	141
Figura 1.4-51 comparación con ec. lineales; $\alpha$ ; P2; Incidencia inicial: 15º..	142
Figura 1.4-52 comparación con ec. lineales; $\alpha$ ; P1; Incidencia inicial: 15º..	143
Figura 1.4-53 comparación con ec. lineales; $\beta$ ; P1; Incidencia inicial: 30º..	144
Figura 1.4-54 Velocidad no constante: Esquema de aceleración.....	145
Figura 1.4-55 Comparación de velocidades; P1; V=8 m/s; Incidencia inicial 10º.....	146
Figura 1.4-56 Comparación de velocidades; P1; V=12 m/s; Incidencia inicial 45º.....	147
Figura 1.4-57 Comparación de velocidades; P1; V=12 m/s; Incidencia inicial 55º.....	148

Figura 1.4-58 Comparación de velocidades; P1; V=10 m/s; Incidencia inicial 10º.....	149
Figura 1.4-59 Comparación de velocidades; P2; V=6 m/s; Incidencia inicial 60º (I) .....	150
Figura 1.4-60 Comparación de velocidades; P2; V=6 m/s; Incidencia inicial 60º (I) .....	150
Figura 1.4-61 Comparación de velocidades; P2; V=6 m/s; Incidencia inicial 25º.....	151
Figura 1.4-62 Comparación de velocidades; P2; V=8 m/s; Incidencia inicial 30º.....	152
Figura 1.4-63 Comparación de velocidades; P2; V=6 m/s; Incidencia inicial 80º.....	152
Figura 1.4-64 Energía adimensionalizada; P1; Incidencia inicial: 90º.....	155
Figura 1.4-65 Energía adimensionalizada; P2; Incidencia inicial: 0º.....	156
Figura 1.4-66 Distribución de energía; P1; V=10m/s Incidencia inicial: 0º.....	157
Figura 1.4-67 Energía adimensionalizada; P1; Incidencia inicial: 110º.....	158
Figura 1.4-68 Distribución de energía; P1; V=10m/s Incidencia inicial: 110º .....	158
Figura 1.4-69 Energía adimensionalizada; P2; Incidencia inicial: 10º.....	159
Figura 1.4-70 Distribución de energía; P2; V=10m/s Incidencia inicial: 170º .....	160
Figura 1.4-71 Distribución de energía; P2; V=8m/s Incidencia inicial: 10º(I) .....	161
Figura 1.4-72 Distribución de energía; P2; V=8m/s Incidencia inicial: 10º(II) .....	162
Figura 1.4-73 Distribución de energía; P1; V=8m/s Incidencia inicial: 145º .....	163
Figura 2.1-1 Topografía de la zona en la que se enmarca el embalse .....	170
Figura 2.1-2 Topografía del cauce del río Guadalfeo.....	172
Figura 2.2-1 Mástil en el interior del túnel de viento de capa límite .....	181
Figura 2.2-2 Exterior del túnel de viento de capa límite .....	182
Figura 2.3-1 Espiral de Ekman (extraído de (ROM 04.95 1995)) .....	184
Figura 2.3-2 Ejemplo de perfil de velocidades.....	187
Figura 2.3-3 Túnel dispuesto para el ensayo .....	195
Figura 2.3-4 Barrera utilizada .....	196
Figura 2.3-5 Espesor de capa límite para barrera1.....	199
Figura 2.3-6 Perfil de velocidades medias con barrera1 .....	200
Figura 2.3-7 Perfil de $I_u$ para barrera1 .....	200

Figura 2.3-8 Comparación entre anemómetros de uno y dos hilos (HW y XW respectivamente) para el perfil de velocidades medias .....	201
Figura 2.3-9 Comparación entre anemómetros de uno y dos hilos (HW y XW respectivamente) para el perfil de intensidades de turbulencia.....	202
Figura 2.3-10 Espesor de capa límite en el caso moqueta .....	203
Figura 2.3-11 Perfiles de velocidades medias con moqueta .....	204
Figura 2.3-12 $I_u$ para moqueta .....	204
Figura 2.3-13 Altura de capa límite para las diferentes configuraciones ..	206
Figura 2.3-14 Perfiles de velocidades medias para las diferentes alternativas .....	206
Figura 2.3-15 $I_u$ para las diferentes alternativas .....	207
Figura 2.3-16 Comparación anemómetro de hilo caliente y PITOT.....	208
Figura 2.3-17 Perfil de velocidades medias de la solución obtenida.....	210
Figura 2.3-18 Perfil de $I_u$ para la solución elegida.....	211
Figura 2.3-19 Ajuste logarítmico.....	212
Figura 2.3-20 Ajuste a ley exponencial .....	213
Figura 2.4-1 Regiones de la Capa límite atmosférica (Bowen 2003) .....	217
Figura 2.4-2 Modelo topográfico durante su construcción .....	225
Figura 2.4-3 Modelo (escala 1/3000) con lámina de agua. ....	227
Figura 2.4-4 Situación de la colina .....	228
Figura 2.4-5 Desarrollo del campo de velocidades de viento al enfrentarse a una topografía real; colina analizada.....	229
Figura 2.4-6 Intensidades de turbulencia en la colina .....	232
Figura 2.5-1 Ubicaciones de los anemómetros.....	234
Figura 2.5-2 Ubicación de Anemómetro 1.....	235
Figura 2.5-3 Edificio de ubicación de Anemómetro 2.....	236
Figura 2.5-4 Anemómetro en U1 .....	237
Figura 2.5-5 Anemómetro en U2 .....	237
Figura 2.5-6 Rosa de viento; Anemómetro 2 (I) .....	239
Figura 2.5-7 Rosa de viento; Anemómetro 2 (II) .....	240
Figura 2.5-8 Rosa de viento; Anemómetro 3 (I) .....	241
Figura 2.5-9 Rosa de viento; Anemómetro 3 (II) .....	242
Figura 2.5-10 Rosa de viento; Anemómetro 5 (I) .....	243
Figura 2.5-11 Rosa de viento; Anemómetro 5 (II) .....	244
Figura 3.2-1 Perfil de velocidad en la dirección del viento de gradiente ...	252
Figura 3.2-2 Perfil de velocidad perpendicular a la dirección del viento de gradiente.....	253

Figura 3.2-3 Perfil de intensidad de turbulencia en la dirección del viento de gradiente.....	254
Figura 3.2-4 Perfil de intensidad de turbulencia perpendicular a la dirección del viento de gradiente.....	254
Figura 3.2-5 Variación de la velocidad del viento.....	257
Figura 3.2-6 Variación de la dirección del viento .....	257
Figura 3.3-1 dinámica en $\beta$ , viento Guadalfeo; 90° .....	260
Figura 3.3-2 dinámica en $\beta$ , viento Guadalfeo; 15° .....	260
Figura 3.3-3 dinámica en $\alpha$ , viento Guadalfeo; 15°.....	261
Figura 3.3-4 dinámica en $\gamma$ , viento Guadalfeo; 60° .....	262
Figura 3.3-5 dinámica en $\gamma$ , viento Guadalfeo; 85° .....	262
Figura 3.3-6 dinámica en $\gamma$ , viento Guadalfeo; 25° .....	263
Figura 3.3-7 Amplitud en los movimientos finales; P1; Velocidad de viento Guadalfeo.....	266
Figura 3.3-8 Amplitud en los movimientos finales; P2; Velocidad de viento Guadalfeo.....	266
Figura 3.4-1 Velocidad del viento; Ubicación 2; 12/2/2008 .....	269
Figura 3.4-2 Dirección del viento; Ubicación 2; 12/2/2008.....	270
Figura A-1 Coeficientes de presión; P1F1; Ángulo de incidencia: 0° .....	276
Figura A-2 Coeficientes de presión; P1F1; Ángulo de incidencia: 22.5° .....	277
Figura A-3 Coeficientes de presión; P1F1; Ángulo de incidencia: 45° .....	278
Figura A-4 Coeficientes de presión; P1F1; Ángulo de incidencia: 67.5° .....	279
Figura A-5 Coeficientes de presión; P1F1; Ángulo de incidencia: 90° .....	280
Figura A-6 Coeficientes de presión; P1F1; Ángulo de incidencia: 112.5° .....	281
Figura A-7 Coeficientes de presión; P1F1; Ángulo de incidencia: 135° .....	282
Figura A-8 Coeficientes de presión; P1F1; Ángulo de incidencia: 157.5° .....	283
Figura A-9 Coeficientes de presión; P2F1; Ángulo de incidencia: 0° .....	284
Figura A-10 Coeficientes de presión; P2F1; Ángulo de incidencia: 30° .....	285
Figura A-11 Coeficientes de presión; P2F1; Ángulo de incidencia: 60° .....	286
Figura A-12 Coeficientes de presión; P2F1; Ángulo de incidencia: 90° .....	287
Figura B-1 Coeficientes de presión; P1F2; Ángulo de incidencia: 0° .....	290
Figura B-2 Coeficientes de presión; P1F2; Ángulo de incidencia: 22.5° .....	291
Figura B-3 Coeficientes de presión; P1F2; Ángulo de incidencia: 45° .....	292
Figura B-4 Coeficientes de presión; P1F2; Ángulo de incidencia: 67.5° .....	293
Figura B-5 Coeficientes de presión; P1F2; Ángulo de incidencia: 90° .....	294
Figura B-6 Coeficientes de presión; P1F2; Ángulo de incidencia: 112.5° .....	295
Figura B-7 Coeficientes de presión; P1F2; Ángulo de incidencia: 135° .....	296

Figura B-8 Coeficientes de presión; P1F2; Ángulo de incidencia: 157.5° ...	297
Figura B-9 Coeficientes de presión; P2F2; Ángulo de incidencia: 0° .....	298
Figura B-10 Coeficientes de presión; P2F2; Ángulo de incidencia: 30° .....	299
Figura B-11 Coeficientes de presión; P2F2; Ángulo de incidencia: 60° .....	300
Figura B-12 Coeficientes de presión; P2F2; Ángulo de incidencia: 90° .....	301
Figura C-1 Espectro de velocidades (I); P1.....	303
Figura C-2 Espectro de velocidades (II); P1.....	304
Figura C-3 Espectro de fuerzas en x (I); P1 .....	304
Figura C-4 Espectro de fuerzas en x (II); P1 .....	305
Figura C-5 Espectro de fuerzas en y (I); P1 .....	305
Figura C-6 Espectro de fuerzas en y (II); P1 .....	306
Figura C-7 Espectro de de velocidades; P2 .....	306
Figura C-8 Espectro de fuerzas en x; P2.....	307
Figura C-9 Espectro de Fuerzas en y; P2 .....	307
Figura C-10 Espectro de momentos en x; P2.....	308
Figura C-11 Espectro de momentos en y; P2.....	308
Figura C-12 Espectro de momentos en z; P2 .....	309



# Índice de tablas

## Capítulo 1

Tabla 1.3-1 Nomenclatura de los resultados .....	38
Tabla 1.3-2 Resumen de las condiciones ambientales durante los ensayos	44
Tabla 1.3-3 Fuerzas totales sobre el P1 .....	54
Tabla 1.3-4 Fuerzas totales sobre el P2 .....	54
Tabla 1.3-5 Resumen de las condiciones ambientales durante los ensayos	60
Tabla 1.3-6 Comparaciones de valores obtenidos entre P1F1 y P1F2.....	65
Tabla 1.3-7 Diferencia relativa media entre las fuerzas obtenidas en P1F1 y P1F2 .....	66
Tabla 1.3-8 Comparaciones de valores obtenidos entre P2F1 y P2F2.....	66
Tabla 1.3-9 Diferencia relativa media entre las fuerzas obtenidas en P2F1 y P2F2 .....	67
Tabla 1.3-10 Diferencia de fuerzas en dos ensayos idénticos .....	67
Tabla 1.3-11 Fuerzas totales sobre el P1 .....	68
Tabla 1.3-12 Fuerzas sobre el prototipo 2 .....	68
Tabla 1.3-13 Fuerzas totales sobre el P1 .....	69
Tabla 1.3-14 Fuerzas sobre el prototipo 2 .....	69
Tabla 1.3-15 Momentos ejercidos por el viento sobre P1F2.....	71
Tabla 1.3-16 Momentos ejercidos por el viento sobre P1F2.....	71
Tabla 1.3-17 Momentos ejercidos sobre P1F2 en los ejes X e Y.....	71
Tabla 1.3-18 Momentos ejercidos sobre P1F2 en los ejes X e Y.....	71
Tabla 1.4-1 Tabla resumen de las variables con influencia sobre $\beta$ .....	80
Tabla 1.4-2 Tabla resumen de las variables con influencia sobre $\alpha$ .....	84
Tabla 1.4-3 Casuística para $V= 6\text{m/s}$ .....	103
Tabla 1.4-4 Casuística para $V= 8\text{m/s}$ .....	104
Tabla 1.4-5 Casuística para $V= 10\text{m/s}$ .....	104
Tabla 1.4-6 Casuística para $V= 12\text{m/s}$ .....	105
Tabla 1.4-7 Estadísticas de casos, Prototipo 1.....	106
Tabla 1.4-8 Estadísticas de casos, Prototipo 2.....	107
Tabla 1.4-9 Fuerzas totales sobre el P1 .....	134
Tabla 2.3-1 Valores de $Z_o$ , $C_D$ y $C_g$ .....	186



Tabla 2.3-2 Altura de capa límite.....	209
Tabla 2.4-1 Comparación velocidades en cresta / velocidades en capa límite generada .....	230
Tabla 2.4-2 Comparación velocidades a media altura / velocidades en capa límite generada .....	231
Tabla 2.4-3 Comparación velocidades en la falda / velocidades en capa límite generada .....	231
Tabla 3.3-1 Casuística para viento en topografía compleja.....	264
Tabla 3.3-2 Probabilidad de cada tipo de movimiento.....	264

# Resumen

---

En esta tesis se tratan dos problemas relacionados con la acción del viento. En primer lugar se analizan las características aerodinámicas de dos cuerpos, ambos se encuentran suspendidos de un cable, siendo el viento la fuerza motora de su movimiento. Se pretende, con el estudio realizado, determinar la dinámica que presentan y estudiar sus posibles defectos.

Por otro lado se estudian las variaciones que sufre un campo de viento de características conocidas cuando se enfrenta a una situación de topografía compleja que le somete a fuertes modificaciones. Este estudio se integra dentro de un proyecto mucho más amplio destinado a la gestión integrada del río Guadalfeo.

Estos contenidos se estructuran en tres capítulos. En el primero de ellos se analiza la dinámica de los dos prototipos bajo condiciones de viento sencillas. En el segundo se crea un modelo topográfico de la cuenca del río Guadalfeo en el que sea posible realizar mediciones del campo de velocidades de viento. En capítulo final se emplean los datos obtenidos en el segundo para utilizarlos como input del modelo numérico del primer capítulo. De esta manera se estudia el comportamiento aerodinámico de los cuerpos bajo condiciones simuladas de viento reales.

Como hemos adelantado, en el Capítulo I de esta tesis se analiza la aerodinámica de dos cuerpos. Se trata de dos cuerpos de geometría sencilla que se suspenden de las catenarias de las líneas de distribución. Su objetivo es hacer visible el cableado evitando así que las aves colisionen contra él. Como se documentará, este es un problema importante en la conservación de la avifauna.

La efectividad de ambos cuerpos se basa en dos principios. Por un lado, su propio volumen supone un obstáculo de mayor visibilidad para los pájaros. Por otro lado ambos cuerpos están dotados de una serie de bandas reflectantes que reflejan la luz solar. Para ambos propósitos es favorable que los cuerpos presenten una cierta dinámica. Este movimiento se adquiere mediante la fuerza ejercida por el viento. Uno de los objetivos de la tesis es, por lo tanto, analizar qué movimientos se consiguen atendiendo

a la velocidad del viento y a su ángulo de incidencia sobre cada uno de los dos prototipos.

Para realizar este análisis se parte de ensayos en túnel de viento en los que se muestrean las presiones que el fluido ejerce sobre el cuerpo. Estas presiones se traducen, en su integración, en fuerzas y momentos.

En una segunda fase se formulan las ecuaciones del movimiento del cuerpo. Para ello se hace necesario realizar una serie de simplificaciones tanto en términos de interacción flujo-cuerpo como en términos de conexión sólido-catenaria.

La resolución de las ecuaciones obtenidas se logra mediante un modelo numérico en el que los datos de entrada se calculan mediante la interpolación de los resultados obtenidos en los ensayos en el túnel de viento.

Para comprobar la validez de la respuesta dada por el modelo numérico se comparan los resultados obtenidos con los que resultarían si linearizáramos las ecuaciones del movimiento. La comparación entre ambas resulta correcta, apareciendo diferencias de alguna importancia sólo en los casos en los que el cuerpo sufre movimientos con importantes amplitudes. Estas diferencias están dentro de lo esperado ya que las aproximaciones realizadas para linealizar las ecuaciones de movimiento sólo son válidas para pequeños movimientos, lo que implica, forzosamente, perder precisión en el rango mencionado.

El objetivo del modelo numérico es conocer la dinámica del cuerpo para una determinada velocidad de viento una vez que el posible estado estacionario se ha alcanzado. En estas primeras simulaciones el flujo se impone homogéneo y constante durante todo el periodo de análisis. Es posible que esto tenga algún tipo de repercusión sobre la dinámica final, ya que supone la introducción de fuerzas de manera brusca y por tanto un cambio violento en el estado del cuerpo. Para analizar esta posibilidad, se modifica el modelo numérico introduciendo una aceleración progresiva al fluido. Exceptuando los casos en los que el cuerpo no entra en una dinámica estacionaria, sólo se han encontrado diferencias entre ambos procesos en algunos casos en los que el cuerpo comienza una rotación

sobre el eje de sujeción. En algunos de ellos se observa un cambio en el sentido de giro así como en el momento en que se inicia esta dinámica.

Ambos cuerpos presentan dinámicas claramente diferenciadas, lo que viene provocado por el diferente balance de fuerzas que el viento ejerce sobre ellos. Uno de los prototipos sólo presenta simetría para dos planos perpendiculares, lo que origina la aparición de fuerzas transversales a la dirección del viento. Esto provoca movimientos caóticos en esta dirección. En el otro prototipo, por el contrario, las fuerzas transversales son un orden de magnitud menor que las longitudinales, por lo que los movimientos presentan características más sencillas. Esta dinámica transversal es negativa ya que podría ocasionar que el cuerpo se enganchara en la línea de alta tensión, quedando inmovilizado.

Otra nota negativa encontrada se refiere a los movimientos en torno a este eje de unión que en la mayoría de los casos analizados se han demostrado insuficientes. El motivo por el que esto sucede es por la continua alternancia de signo del momento aplicado. Esta alternancia provoca que ambos cuerpos tiendan a oscilar en un movimiento de vaivén en torno a una posición fija, aquella en la que los momentos se anulan.

Este comportamiento podría mejorarse si se eliminara la simetría con respecto del eje vertical del cuerpo. De esta manera se lograría romper con esta tendencia y lograr un movimiento continuo en términos de sentido de giro. Disponer de algún tipo de álabes podría ser una solución de sencilla implantación sobre el modelo ya realizado.

Un prototipo idealizado debería disponer de una inercia variable, esto es, debería incluir una masa móvil. De esta manera se podría obligar al cuerpo a girar con una velocidad constante lo que permitiría programar la frecuencia de generación de destellos.

El capítulo 2 se enmarca dentro de un estudio más amplio que propone un sistema piloto de gestión integrada de la cuenca del río Guadalfeo.

En una primera toma de contacto se debate acerca de los diferentes sistemas que pueden utilizarse para realizar el estudio. Analizadas las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos se entiende que es la simulación con un túnel de viento de capa límite el más adecuado para este estudio.

Para ello se realiza una revisión bibliográfica de diferentes trabajos acerca de las modificaciones que sufre el campo de viento cuando se enfrenta con diferentes accidentes topográficos. Estos trabajos se abordan desde los más simples (accidentes aislados de geometría sencilla) hasta casos con topografía real.

Los trabajos de laboratorio realizados en este capítulo se pueden dividir en dos etapas. En la primera de ellas se genera una capa límite completamente desarrollada con unas características similares a las de una capa límite desarrollada sobre el mar. En la segunda se miden las características del campo de viento en diferentes puntos del modelo.

La capa límite es simulada mediante métodos naturales pasivos. Esto es, incluyendo una rugosidad en la solera del túnel semejante a la que existe en la naturaleza. El problema que esto representa viene dado por el escaso espesor de una capa límite desarrollada sobre el mar. Esto, unido al factor de escala empleado (1:3000), provoca que la capa límite a desarrollar sea de muy pequeño espesor. Tras probar diferentes sistemas de generación se opta por disponer de una barrera en la solera del túnel como único sistema generador.

Para comprobar la calidad de la modelización realizada hemos comprobado los resultados obtenidos con los perfiles propuestos por diferentes códigos de uso, tanto nacionales como internacionales. Los resultados obtenidos han sido satisfactorios, tanto en lo que se refiere a velocidades medias como en términos de intensidad de turbulencia.

Una vez comprobada la idoneidad de este sistema entramos en la segunda fase, en la que se observan las modificaciones del campo de viento al enfrentarse con accidentes topográficos reales. Para ello se observa el comportamiento en la primera colina con la que se encuentra el flujo de viento realizando mediciones, en el modelo topográfico, de la velocidad que se produce en ella.

Las modificaciones que sufre el flujo en el accidente topográfico tienen sentido y están conformes con lo esperado, según la literatura existente, para velocidades de viento medias e intensidades de turbulencia.

Para concluir este capítulo se describen las medidas de campo realizadas y se muestran los resultados obtenidos con ellas durante un año hidrológico.

En el tercer y último capítulo se emplean los datos de velocidad de viento obtenidos en el modelo topográfico del río Guadalfeo y se emplean para alimentar al modelo numérico que rige el comportamiento dinámico de ambos prototipos.

Se pretende con ello valorar el efecto que tiene sobre los prototipos el verse enfrentados a un viento de características complejas, con variaciones temporales importantes tanto del módulo de la velocidad como de la orientación que presenta.

Los datos de viento se obtienen de una localización situada a media altura de una colina del modelo topográfico. Se selecciona dicha localización ya que no es la primera con la que el viento se encuentra, por lo que las características del flujo vienen afectadas, también, por los accidentes precedentes. Este viento obtenido se escala inversamente para obtener el flujo que se obtendría en la realidad en el punto seleccionado.

Para poder emplear un viento de características complejas es necesario modificar el modelo numérico, de tal forma que acepte un flujo con módulo y dirección variable en el tiempo. A los resultados así obtenidos se les aplica un tratamiento semejante a los empleados en el capítulo 1.

Los resultados obtenidos muestran semejanzas y diferencias importantes con los de un flujo de velocidad y dirección constantes. En términos generales podemos decir que las dinámicas obtenidas son similares. Sólo se observa un nuevo patrón dinámico, que se asemeja bastante a uno de los observados en el capítulo 1. La frecuencia de aparición de las diferentes dinámicas tipo tampoco sufre alteraciones importantes.

Sí es destacable, en el movimiento longitudinal del cuerpo, la presencia de situaciones de equilibrio inestables. En ellas el cuerpo no presenta movimientos bruscos, pero sí variaciones suaves provocadas por el cambio de la velocidad del viento.

En general, las condiciones de viento impuestas en este último capítulo, no provocan cambios importantes con respecto a los resultados obtenidos en el primero. Si bien es cierto que uno de los dos prototipos aumenta levemente los casos favorables de giro en torno al eje de unión no lo hace en una cantidad importante. Sí es destacable el aumento de la amplitud de los movimientos, en el otro prototipo, en la dirección transversal al viento.



# Estudio de la aerodinámica de un cuerpo suspendido

---

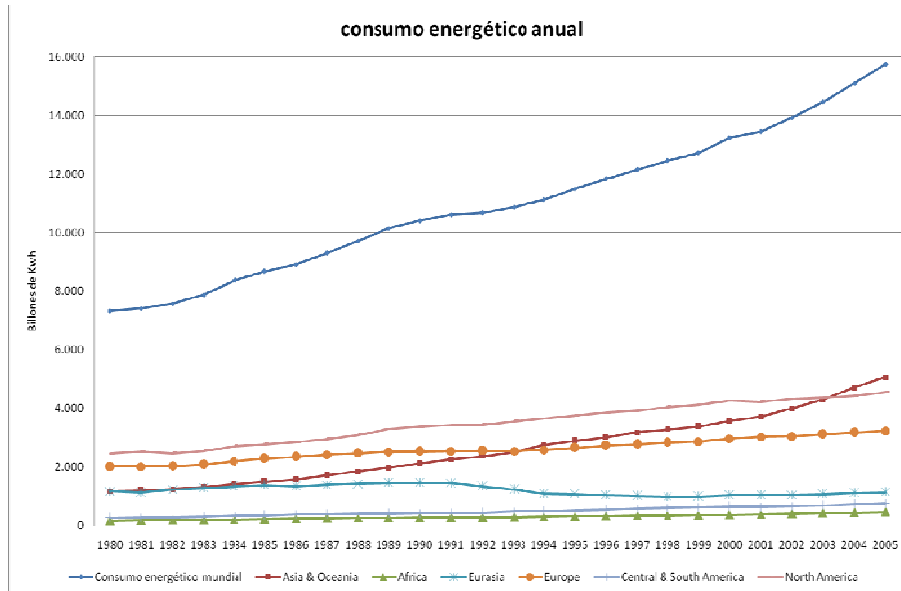
---

## 1.1 Antecedentes

### 1.1.1 Problemática asociada a las líneas de distribución

Durante el pasado siglo la mayor parte de las economías occidentales han vivido un importante crecimiento económico. A estas economías se las ha unido, más recientemente, otras provenientes de Asia y Oceanía. Este desarrollo de las sociedades ha provocado, en paralelo, un aumento de la demanda energética. A modo de ejemplo, a día de hoy, un habitante de un país desarrollado consume 100 veces más energía de la que necesita como alimento (HOENEISEN 2006). En la figura 1.1-1, obtenida de la “Energy Information Administration” (EEUU), observamos como se ha producido el crecimiento del consumo mundial.





**Figura 1.1-1 Consumo energético anual**

En paralelo a este desarrollo, la distancia entre los centros de producción energética y los de consumo ha provocado un aumento en las necesidades de distribución. El paisaje de los países desarrollados se ha visto modificado por multitud de líneas de transporte energético que surcan su geografía. La tipología de la gran mayoría de estas líneas de distribución es aérea, lo que crea un conflicto en el uso del espacio con las aves.

### 1.1.1.1 Problemáticas existentes

La relación entre las aves y las líneas de distribución afecta a ambos grupos de manera singular.

#### a) Afecciones a las aves

El cableado de las líneas de distribución de electricidad consiste en elementos lineales y, por tanto, difíciles de percibir por un ave en movimiento (HÜPPOP 2004) (especialmente con el cable de tierra, de menor diámetro que el resto), lo que provoca que muchos pájaros sufran colisiones. Estas colisiones pueden ser fatales para las aves por diversos motivos, siendo los más habituales: hemorragia, heridas hepáticas, choque

traumático, inanición y muerte por depredadores o el hombre(MATHIASSEN 1999).

Por otro lado, los postes suponen unos elementos idóneos para la anidación, por lo que algunas especies de aves los eligen para tal fin. Si los conductores no se encuentran aislados esto conlleva un alto riesgo de electrocución. Aún sin llegar a anidar, algunas especies de rapaces o de carroñeros pueden usar estos elementos como posaderos, asumiendo el mismo riesgo.

#### b) Afecciones a las líneas de distribución

La convivencia entre las aves y las líneas de distribución provoca una serie de inconvenientes para estos elementos. Por un lado los accidentes, ya sean por colisión o electrocución pueden provocar cortes en el suministro, con la consiguiente problemática asociada. Añadido a esto se encuentra el coste de las averías que producen, ya sea por algunos de los factores ya mencionados o por el deterioro derivado de un uso para el que no estaban diseñados (acumulación de excrementos, p.ej.). Por otro lado la presencia de aves en las líneas de distribución o postes provocan complicaciones a la hora de realizar las tareas de mantenimiento.

Estos problemas suponen costes para la sociedad, tanto en términos de gasto económico como en afecciones a los usuarios que sufren los inconvenientes derivados. Estamos, por tanto, ante un problema medioambiental con efectos adicionales sobre la sociedad que depende de estas líneas de transporte eléctrico.

#### *1.1.1.2 Colisión de las aves con las líneas de distribución*

##### a) Factores de influencia

Existen una serie de factores que marcan la sensibilidad de un ave en concreto a chocar contra una línea de distribución. Factores de comportamiento, tales como hibernación, época de apareamiento, momentos del año con menor abundancia de alimento... etc, condicionan el número de vuelos de las aves y la distancia recorrida en estos, por lo que deben de ser tenidos en cuenta.

Por otro lado, el tipo de vuelo de cada especie/individuo es, también, un factor fundamental. En términos generales se ha detectado un mayor índice de siniestrabilidad en aves de vuelo rápido y/o especies gregarias (ALONSO and ALONSO 1999) o en especies de vuelo torpe (JANSS 2000). Por el contrario, las de vuelo lento, en especial si no son gregarias y sí territoriales, sufren una menor tasa de accidentes. Algunas especies, sin embargo, rompen con esta tendencia (cigüeñas, avutardas, grulla común). Dentro de una misma especie, individuos con determinadas características tienen una mayor probabilidad de colisión. Ejemplares jóvenes, de mayor peso o con alto contenido de metales pesados, que presentan un vuelo más torpe, son más propensos a sufrir este tipo de colisiones (MATHIASSEN 1999).

Como es lógico, adicionalmente a los factores inherentes al ave, otro factor de gran peso es el la situación y naturaleza del cableado. Estudios realizados en Suecia sobre poblaciones de cisnes demuestran que existe una mayor probabilidad de colisión en estrechos y lenguas de tierra entre bahías u otras masas de aguas. En definitiva, hay indicios de que el factor de situación de un área revierte de mucha más importancia que la longitud de tendido eléctrico existente (MATHIASSEN 1999) en ella. En estudios análogos, sobre especies de rapaces, se ha demostrado que lugares elevados, que pueden ser usados por estas aves como lugar de avistamiento, también suponen un riesgo adicional (LEHMAN, et al. 1999). Por tanto, para un ecosistema concreto, se hace necesario estudiar cuales son las áreas de mayor peligro conforme a las características y hábitos de la avifauna presente.

#### b) Evaluación del problema

La cuantificación del número de muertes provocadas por la colisión entre las aves y las líneas del tendido eléctrico es compleja. El método tiene que pasar por un conteo de los cadáveres, lo que lleva aparejado diferentes problemáticas (K. BEVANGER 1999):

- i. El ave, por encontrarse en vuelo, puede desplazarse una cantidad apreciable de metros antes de morir, alejándose del lugar en el que se produce el muestreo.
- ii. Efecto de carroñeros.
- iii. Características topográficas o de vegetación que oculten el avistamiento.

- iv. Error humano a la hora de muestrear.
- v. Factores climáticos. Ocultación por nieve, niebla... etc.

Estudios llevados a cabo en España (ALONSO and ALONSO 1999), a lo largo de 100 Km de tendidos en nueve hábitats diferentes característicos de los diferentes ecosistemas de la Península Ibérica, mostró una causalidad de 230 aves, pertenecientes a 53 especies diferentes, muertas por colisión. Estos datos, teniendo en cuenta el sesgo producido por las causas anteriormente descritas, permiten estimar el fallecimiento de 2.95 individuos por Kilómetro y año. Esta cifra, analizada de manera global, no supone una causa biológicamente significativa de mortalidad, sin embargo, sí que puede tener un importancia vital en el caso de que las especies afectadas estén en peligro de extinción (8 de las 53 especies encontradas en el estudio se encontraban en la lista roja).

Como ya se ha mencionado, existen determinadas especies con una mayor predisposición a sufrir colisiones. Estudios análogos realizados sobre poblaciones de cisnes arrojan una frecuencia mucho más alta, con un porcentaje comprendido entre el 19% y el 38% de los fallecimientos debidos al choque (MATHIASSEN 1999).

#### c) Medidas anticolidión

Existen diferentes medidas que se pueden adoptar para eliminar o al menos paliar la problemática analizada. Algunas de estas medidas fueron esquematizadas por Campayo Martin (CAMPAYO MARTIN, et al. n.d.). Presentamos a continuación un resumen de las posibilidades:

- Soterramiento de las líneas: Evidente esta solución elimina, por completo, la problemática analizada. Sin embargo dos elementos dificultan su implementación. Por un lado la orografía o situación de la línea pueden complicar mucho el enterramiento. Por otro, económicamente resulta una solución cara.
- Instalación de cable trenzado aislado: Al presentar la línea un único cable su visualización es mucho más sencilla por parte de las aves. No supone, tampoco, una solución económica.
- Utilización de crucetas bóveda: Presenta la ventaja de disponer todos los cables en un mismo plano horizontal, lo que reduce el

riesgo de colisión (BEVANGER and HENRIK 2001). Es de complicada aplicación en líneas ya existentes.

- Señalización de la línea: Supone disponer de elementos extra a la línea que la hagan visible a las aves, su efectividad ha sido contrastada (ALONSO, ALONSO and MUÑOZ-PULIDO 1994). Podemos distinguir entre:

- Espirales. Se instalan sobre las líneas con una distribución que depende de la línea, aumentan el diámetro efectivo del cable facilitando su visibilidad.
- Ahuyentadores suspendidos. Son cuerpos que se suspenden de la línea, además de hacerla visible por su volumen presentan una dinámica que refuerza su efectividad.

A lo largo de los años también han sido estudiadas algún otro tipo de solución de menor utilidad. Destaca en este aspecto el trabajo de (JANS, LAZO and FERRER 1999), en el que evaluaron la efectividad de disponer de modelos de rapaces sobre los postes. Sin embargo los resultados obtenidos no demostraron mejoras significativas.

### 1.1.1.3 *Electrocución de aves*

#### a) Factores de influencia

La electrocución de las aves en los apoyos de las líneas de distribución se produce cuando el ave provoca la aparición de una nueva conducción entre uno de los conductores y la tierra o entre dos conductores. Por tanto, un factor fundamental es el propio tamaño del ave que debe de ser capaz de realizar dicho empalme.

En este aspecto es destacable la diferencia sustancial existente entre las torres de distribución metálicas y las de madera. En las primeras, por condicionar la propia estructura un contacto con la tierra, basta con que el ave entre en contacto con uno de los cables para que se produzca la electrocución, lo que las dota de una mayor peligrosidad (JANSS and FERRER, La electrocución de aves en los apoyos del tendido eléctrico: experiencias europeas 1999). Por tanto, en esta tipología, el factor de mayor importancia es la longitud del cuerpo del animal. Sin embargo en los

postes de madera, es necesario que el ave entre en contacto con dos cables, por lo que es la envergadura del animal el factor de mayor relevancia.

Un factor fundamental, en esta problemática, es la manera en que el ave realiza la maniobra de aproximación. Un aterrizaje limpio tiene mucha menos peligrosidad que uno torpe o accidentado, que implica la necesidad de un aleteo más brusco. Esto provoca que los animales inmaduros, en fase de aprendizaje sean más vulnerables. Estudios realizados muestran que en EEUU el 90% de las electrocuciones se producen en individuos jóvenes (LEHMAN, et al. 1999). Un factor externo a las condiciones del ave es la magnitud y dirección del viento incidente, que puede poner en apuros a los individuos.

La tipología y posición del poste, son también de vital importancia. En el primer caso ya que supone la distancia efectiva entre conductores así como su protección (JANSS y FERRER 2001). La ubicación es importante ya que supone, para muchas especies, un apoyo excepcional desde la que acechar a sus víctimas.

Como última nota importante es de destacar la nula capacidad de aprendizaje, ya que el accidente provoca la muerte inmediata el individuo.

#### b) Evaluación del problema

El problema de la electrocución es de importancia por el tipo de especies susceptibles de ser afectadas. Estas son las de mayor tamaño, que suelen corresponder con el final de la pirámide trófica, con un menor número de individuos y, por tanto con un alto valor para los ecosistemas.

Según datos del Laboratorio Nacional de Sanidad de la Vida Silvestre de los Estados Unidos aproximadamente un 10% de las águilas calvas muertas fallecen por electrocución. De las 50 especies de rapaces diurnas o búhos que habitan en Norteamérica, 26 son susceptibles a la electrocución (LEHMAN, et al. 1999), siendo, de todas ellas, el águila real la más afectada.

Además de esta afección a las aves, el cortocircuito que se puede producir en una situación de electrocución puede afectar al suministro. Existiendo datos recogidos en diferentes países que así lo demuestran (VAN ROOYEN and LEDGER 1999).

Adicionalmente, sin salir de nuestro país, se han documentado averías en las líneas de suministro como consecuencia de la acumulación de excrementos (NAVAZO and LAZO 1999), así mismo, la presencia de animales en las torres provocan complicaciones a la hora de realizar las necesarias labores de mantenimiento.

### **1.1.2 Visión de las aves**

La visión es la capacidad para detectar determinadas longitudes de onda del espectro de radiación. El rango de longitudes de onda que las especies animales detectan mediante la vista va desde los 300nm hasta los 1000nm. Esta limitada porción del espectro parece estar relacionada con los orígenes marítimos de la evolución, ya que esa banda es la que puede penetrar en el agua.

#### *1.1.2.1 Respuesta a nivel celular*

Las células capaces de recibir la señal lumínica y transformarla en una señal eléctrica legible por el sistema nervioso son denominadas fotorreceptoras. Su funcionamiento está basado en un pigmento que absorbe la energía enviada por los fotones. Esta energía produce una alteración metabólica que inicia una cadena de reacciones químicas que finaliza en un cambio en el potencial de la célula. Este cambio de potencial provoca una señal eléctrica que se trasmite a través del sistema nervioso hasta el cerebro donde se procesa.

Los vertebrados tienen dos tipos de células fotorreceptoras: Los conos y los bastones (ver figura 1.1-21.1-2). Ambas células tienen una estructura alargada, en uno de cuyos extremos presentan una serie de membranas donde se encuentran los fotorreceptores, en el otro están las conexiones sinápticas con otras células del ojo.



**Figura 1.1-2 Dos tipos de células: Cono (izquierda) y bastón (derecha) (MOYES and SCHULTE 2006).**

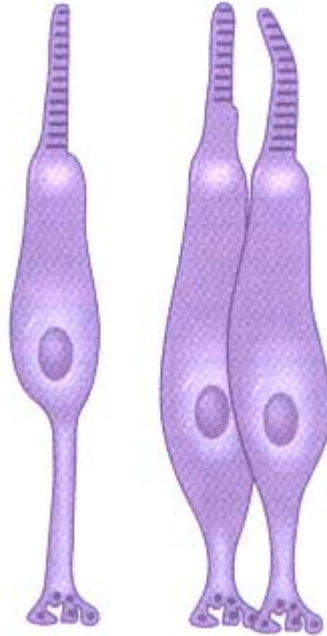
A pesar de sus similitudes morfológicas, existen diferencias funcionales importantes entre ambas células. Los bastones tienen mayor cantidad de fotopigmentos que los conos y una respuesta más lenta que permite integrar señales durante un periodo más largo. Debido a esto están especializados en la visión en condiciones de menor iluminación. Los bastones son más numerosos que los conos, en una proporción aproximada de 100 a 1.

Los conos están especializados en la visión diurna y necesitan, por tanto, de más energía para excitarse. La proteína que se excita bajo la acción de la luz es la opsina. La mayoría de los vertebrados tienen diferentes tipos de opsinas, cada una con sensibilidad máxima a una longitud de onda particular. Esta diferente sensibilidad es la que permite distinguir colores en condiciones adecuadas de luz.

Como muchas otras especies de vertebrados, entre las que no se encuentran algunos mamíferos como los humanos, las aves poseen una subestructura denominada doble cono (ver figura 1.1-3). Esta célula tiene una estructura similar a la del cono, pero presenta una cabeza doble. Si



bien su función aún no está clara, parece factible que esté relacionada con la percepción de objetos en movimiento (N. S. HART 2001). La proporción de conos dobles en relación con la de conos simples se encuentra en valores del orden de 1 a 1.



**Figura 1.1-3 Comparación de un cono con un cono doble (MOYES and SCHULTE 2006)**

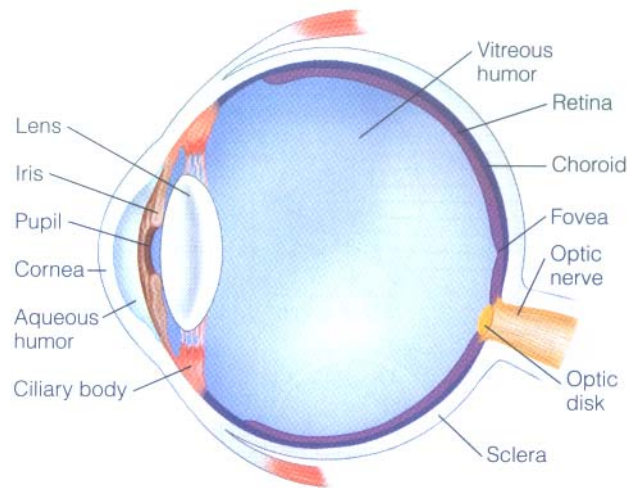
### *1.1.2.2 Morfología del ojo*

Lo que distingue a un ojo de una célula simple fotorreceptora es la capacidad para distinguir la dirección de la que provienen los impulsos lumínicos (MOYES and SCHULTE 2006). Esta capacidad se puede lograr de diferentes maneras. La más sencilla es alinear varias células, de tal forma que les llegue una diferente cantidad de luz según la dirección de ésta. Sin embargo esta disposición no logra una buena capacidad para discernir la direccionalidad de la señal.

Para mejorar la efectividad algunas especies dan una curvatura a esta disposición que consigue que para diferentes orientaciones de la luz sólo algunas células se encuentren iluminadas y que serán las únicas que envíen una señal al sistema nervioso. El problema que presenta este sistema es

que limita la cantidad de luz que llega a las células, lo que reduce la intensidad de la imagen.

Los ojos más evolucionados existentes en la naturaleza incorporan una lente al sistema de visión que recibe múltiples fuentes de luz y las refracta al interior del ojo, donde se encuentran los fotorreceptores. Cada rayo incidente se focaliza en un punto de la retina, lo que permite discernir, con precisión, la dirección del impulso visual.



**Figura 1.1-4 Partes del ojo (MOYES and SCHULTE 2006)**

A continuación hacemos una breve descripción de las partes que componen un ojo complejo (ver figura 1.1-4).

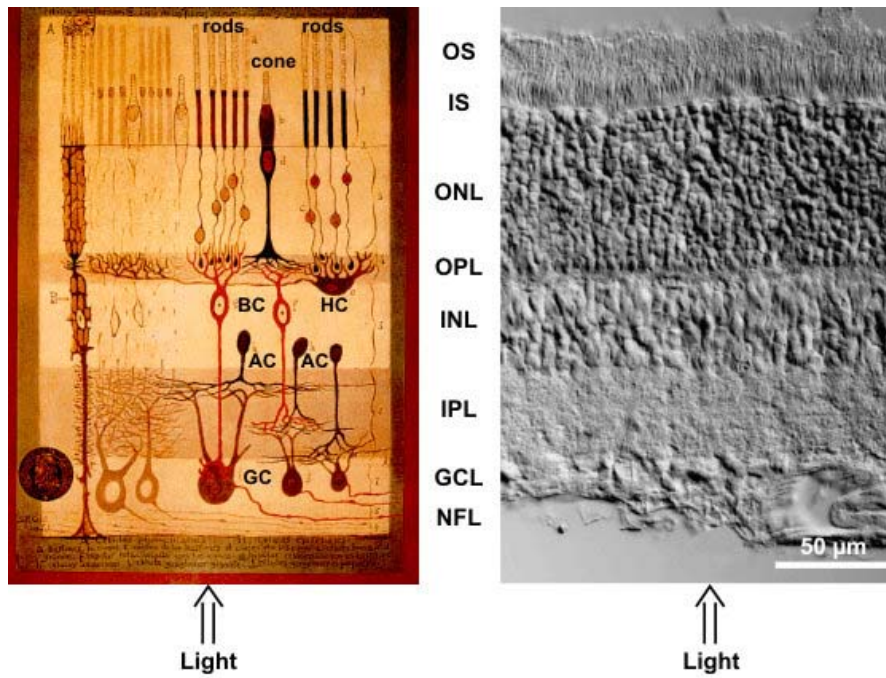
El exterior del ojo complejo está formado por la esclerótica y por la córnea. La esclerótica es una membrana blanca, dura y fibrosa, con una abertura central anterior en la que encaja la córnea y otra en parte posterior que da paso al nervio óptico. Su función es la de proteger al ojo. La córnea es una membrana también dura, pero transparente para permitir el paso de la luz a la lente donde se refracta. Debido a que la cavidad orbitaria de las aves no es tan completa como en el caso de los mamíferos, la esclerótica consta de un cartílago hialino y de un anillo óseo que contribuye a su protección (HOFFMAN and VÖLKER 1968).

En la parte frontal del ojo se encuentra el iris, el cuerpo ciliar y el cristalino. El iris consiste en dos capas de un músculo que rodea la pupila. Al contraerse o dilatarse aumenta o disminuye el tamaño de la pupila y controla, así, la cantidad de luz que entra en el ojo. El cristalino es una lente biconvexa que puede modificar su curvatura para permitir enfocar objetos a diferentes distancias. Se sostiene mediante ligamentos al cuerpo ciliar que, además, es el encargado de segregar el humor acuoso.

El iris y el cuerpo ciliar dividen el ojo en dos partes, la cámara anterior y la cámara posterior. La primera está rellena de humor acuoso y la segunda de humor vítreo. La función del segundo es la de mantener una presión constante que mantenga la forma de la retina.

La retina (ver figura 1.1-4) es la parte del ojo en la que se encuentran situados los fotorreceptores. La densidad de estos varía según la región de la misma. La zona con mayor densidad de fotorreceptores es la fovea, donde se concentra la mayor agudeza visual. En esta zona, así mismo, sólo se encuentran conos. Algunas especies de aves disponen de dos foveas lo que las permite tener dos focos de atención visual.

Detrás de la esclerótica se encuentra la coroides que es la membrana en la que se encuentran las venas que alimentan a las células del interior del ojo. En la mayoría de los animales nocturnos absorbe luz, evitando así reflejos que perjudiquen la visión. En determinados animales nocturnos, sin embargo, contienen una capa que refleja la luz, amplificando así la iluminación y mejorando la visión en condiciones de penumbra.



**Figura 1.1-5 Estructura de la retina, a la izquierda dibujo esquemático de Ramón y Cajal (1900 aprox), derecha: imagen de microscopio**

La retina consiste en varias capas, estando las células fotorreceptoras en la zona más alejada de la luz. Antes de incidir sobre los conos o bastones, la luz debe atravesar el nervio óptico, las células ganglionares y las células bipolares. La excepción a esto es la zona de la fóvea, en la que la luz incide de manera directa, ya que las células ganglionares y las bipolares se encuentran rodeándolas.

### 1.1.2.3 Características particulares de los ojos de las aves

Si bien a nivel estructural los ojos de las aves son muy similares a los de los humanos, existen diferencias importantes entre ambos. En cuestión de tamaño son proporcionalmente al tamaño del cráneo más grandes que los de los humanos, lo que proporciona una longitud focal elevada que mejora la resolución espacial obtenida y proporciona un aumento de la capacidad para discernir objetos a grandes distancias.

Así mismo, parecen seguir una ley lineal con respecto al peso total. Estudios realizados con 104 especies de aves diferentes (BROOKE, HANLEY and LAUGHLIN 1999), muestran que:

$$\log(m_o) = 0.68 \log(m_a) - \log(23.9) \quad (1.1)$$

Donde:

- $m_o$ : masa del ojo
- $m_a$ : masa del ave

Esto es significativo teniendo en cuenta la gran variedad de especies de aves a las que se aplica, pertenecientes a cinco órdenes diferentes (Psittaciformes o loros, Columbiformes o palomas, Procellariiformes o gaviotas, Falconiformes o rapaces y Strigiformes o búhos). También es relevante su validez a lo largo de un amplio abanico de masas corporales (desde 6g hasta 11.3Kg).

Los motivos que han llevado a las aves a evolucionar hacia unos globos oculares de gran tamaño son varios. Por un lado las velocidades en vuelo que alcanzan estos animales y por otro la necesidad de discernir objetos reducidos a grandes distancias.

Existen, sin embargo, fuerzas evolutivas concretas en determinadas especies que provocan contrastes. Por ejemplo, las rapaces presentan unos ojos 1.4 veces más grandes de lo que correspondería por su masa corporal. Esto, combinado con una fovea profunda mejora su agudeza visual, capacidad de gran importancia para su alimentación de depredador. En el caso de los búhos el tamaño de los ojos, 2.2 veces más grande de lo esperado, permite una pupila grande que acepta mayor cantidad de luz, mejorando así la sensibilidad nocturna.

Por otro lado el globo ocular, al contrario de lo que ocurre en los mamíferos, no dispone apenas de capacidad de movimiento sino que se encuentra fuertemente unido al cráneo. Esta limitación es la que provoca los frecuentes y característicos movimientos laterales de cabeza de las aves que consiguen así cambiar su foco de visión.

Otra característica fundamental de los ojos de las aves es su posicionamiento. Al contrario de lo que ocurre en el caso de los humanos,

los pájaros tienen los globos oculares situados en extremos opuestos de la cabeza, lo que limita considerablemente su ángulo de visión binocular, que mientras que en los humanos llega a 140° en determinadas especies de aves se reduce a 30-50° (GRASSÉ 1980). Como contrapartida, esta ubicación les permite percibir un área de entre 300 y 340°. En la especie humana este valor está reducido a unos 180°.

A escala macroscópica una diferencia fundamental es que mientras que los ojos de la mayoría de los vertebrados están protegidos por dos párpados, cuya función es la de limpiar la superficie exterior, las aves disponen de un tercer párpado de movimiento horizontal. Este es una membrana nictificante que se caracteriza por ser transparente, que permite humedecer y limpiar la superficie del ojo sin perder capacidad visual.

Otra estructura exclusiva de las aves es el pecten, cuya función es la irrigar y mantener la humedad de los ojos. Se sitúa cerca de la base del ojo y tiene forma de peine.

#### *1.1.2.4 Visión policromática*

La capacidad de ver colores se deriva de la presencia en la retina de varios tipos de conos con una absorción máxima para una diferente longitud de onda. La visión cromática en los humanos se deriva de la existencia de tres tipos de conos, uno especializado en el color azul, otro en el rojo y otro en el verde.

Al contrario de lo que sucede en nuestra especie, la mayoría de los mamíferos sólo poseen dos tipos de fotorreceptores, por lo que no tienen capacidad para observar colores, como lo hacemos los humanos. Las aves se distinguen de este patrón en sentido contrario a que la gran mayoría de ellas disponen de cuatro tipos de fotorreceptores.

Tres de éstos se encuentran asociados a los tres colores básicos, sin embargo el cuarto se encuentra fuera de nuestro espectro visible, adentrándose en el rango de los ultravioletas. Estudios realizados sobre los diferentes tipos de conos de distintas especies de aves muestran una amplia similitud entre especies. Cuando se obtienen datos completos acerca de la absorción espectral de los conos de las aves, se obtienen, para

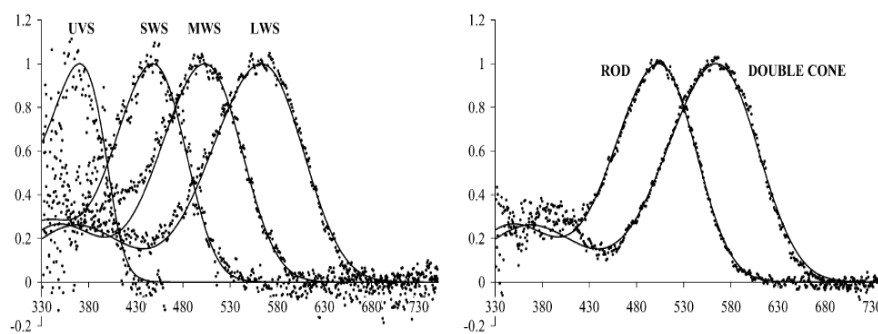
todas las especies, células con una mayor absorción en cuatro rangos claramente diferenciados (N. S. HART 2001) (ver figura 2.1-5):

LWS<sup>1</sup>;  $\lambda_{\max}$  543-571nm

MWS<sup>1</sup>;  $\lambda_{\max}$  497-510 nm

SWS<sup>1</sup>;  $\lambda_{\max}$  430-463 nm

UVS/VS<sup>1</sup>;  $\lambda_{\max}$  362-426 nm



**Figura 1.1-6 Espectros normalizados de absorción para el Herrerillo común(N. S. HART 2001)**

Como se observa, excepto en el caso de los ultravioletas, la absorción de luz está, para los otros tres fotorreceptores, muy centrada.

La capacidad para discernir longitudes de onda asociadas al ultravioleta es utilizada para diferentes objetivos. A modo de ejemplo parece relacionado con los procesos de cortejo, ya que es una frecuencia reflejada abundantemente por el plumaje de los machos de ciertas especies (BURKHARDT 1989). Otras funciones de la visión en este rango se corresponde con el forrajeo (BURKHARDT, Birds, Berries and UV 1982) o el seguimiento de la pista de presas.

Añadido a esta diversificación espectral, las aves presentan una característica diferenciadora clave con respecto a los humanos. Ésta es la presencia en los conos de una película de una sustancia aceitosa que los recubre. Situada en el extremo distal de la célula, su función es la de actuar

<sup>1</sup> LWS, MWS, SWS y UVS/VS hacen referencia a Long, Médium, Short y UltraViolet/Violet Sensitive

como un filtro de paso alto, eliminando así parte de la capacidad de absorción de los fotorreceptores (VARELA, PALACIOS and GOLDSMITH 1993). De esta manera la sensibilidad espectral final del cono fotorreceptor será igual al producto de la transmisividad de la película por la absorción del pigmento del cono. Además de este efecto la película consigue aumentar la longitud de onda en la que se logra el punto de máxima sensibilidad del cono, reduciendo, también, la máxima sensibilidad.(BOWMAKER 1977).



## 1.2 Formulación del problema

En este trabajo se analizan dos modelos de salva-pájaros. El principio de funcionamiento para ambos es el mismo. Por un lado supone un objeto de dimensiones apreciables por el ave y por otro emite señales luminosas en dirección a los pájaros que las disuaden de aproximarse. El animal, al recibir este estímulo, percibe algo anormal en la línea eléctrica y evita el acercamiento a la misma.

La emisión se logra mediante un material capaz de reflejar la luz. Lo que supone un sistema robusto, con autonomía de fuentes energéticas, aunque dependiente de la luz solar.

Para el correcto funcionamiento del sistema se hace necesaria la presencia del viento. La presión que induce sobre el cuerpo pone a éste en movimiento y, al reflejar la luz del sol, crea los destellos que disuaden al ave de acercarse al cableado. Las características del fluido son perfectas para este cometido. Al ser el viento un flujo altamente turbulento la emisión se produce con un alto grado de aleatoriedad, lo que impide que las aves puedan habituarse a este fenómeno. Por tanto la dependencia es doble, por un lado de la luz solar y por otro de la acción del viento.

El objetivo de la sección 1.2 de este documento es el de ahondar en la base física que rige el comportamiento aerodinámico de los prototipos seleccionados.

### 1.2.1 Parametrización de los prototipos

Los dos prototipos analizados presentan importantes similitudes entre sí. El orden de magnitud de todas sus dimensiones es el mismo. La diferencia más notable entre ambos se encuentra en el número de aspas que cada uno posee.

El prototipo 1 (al que en adelante denominaremos alternativamente P1) consta de cuatro aspas que se disponen simétricamente formando ángulos

de 90° entre ellas. El prototipo 2 (o P2), está formado por tres aspas, equidistantes también, aunque a 120°.



**Figura 1.2-1 Imagen de ambos prototipos**

A continuación se muestran las características físicas de ambos prototipos.

**a) Masa**

La masa de ambos cuerpos es semejante, en el caso del P1 es de 267.3 g y en el P2 de 219.2g.

$$\begin{aligned} m_{P1} &= 267.3g \\ m_{P2} &= 219.2g \end{aligned} \quad (1.2)$$

**b) Dimensiones**

Las dimensiones de las aspas también presentan pequeñas variaciones, así el P1 tiene 4 aspas, dos de 6x23cm y dos de 6x20cm, mientras que el P2 tiene 3 aspas de 5.5x20.5cm. El espesor, en ambos casos, es de 5mm.

La manufactura de los prototipos no es perfecta, percibiéndose, a simple vista, variaciones con la geometría deseada. Así, en ambos casos no es extraño encontrarse con variaciones de hasta 8° en la orientación de las aspas.

A continuación presentamos las vistas de ambos cuerpos.

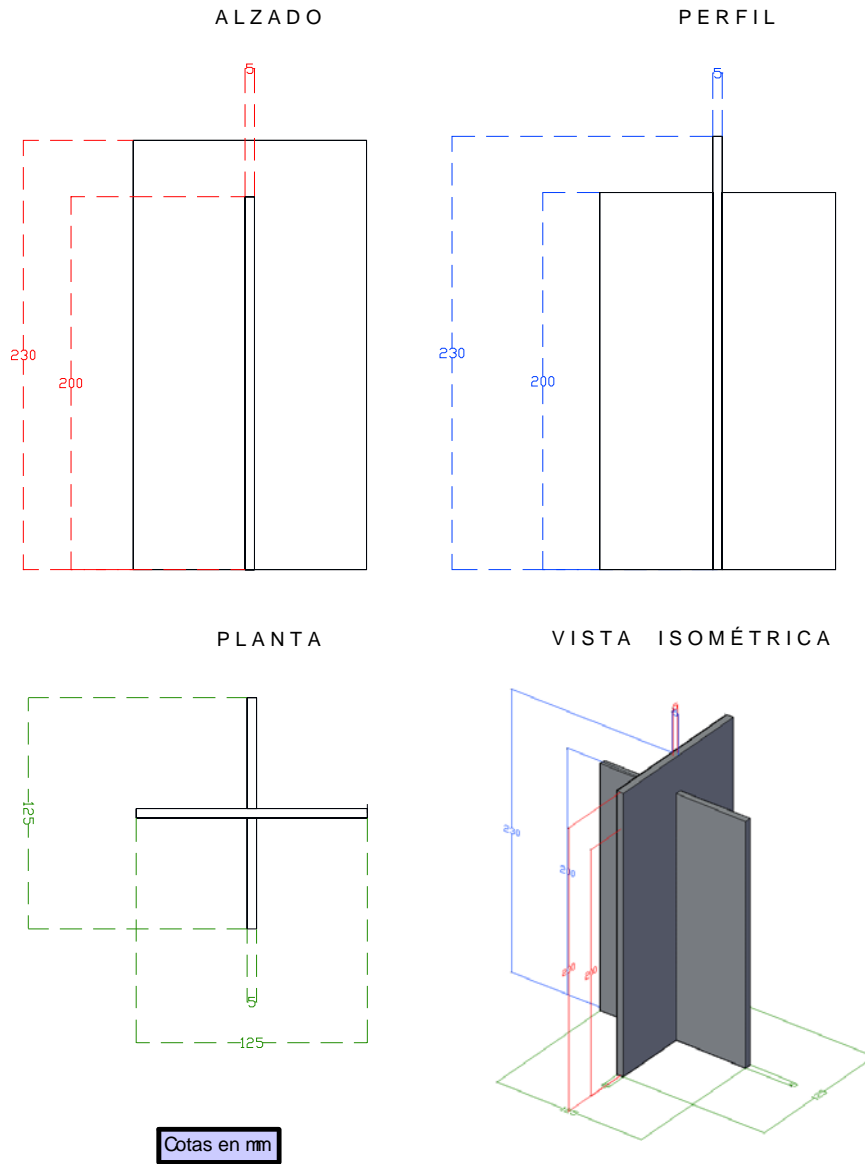


Figura 1.2-2 Vistas de P1.

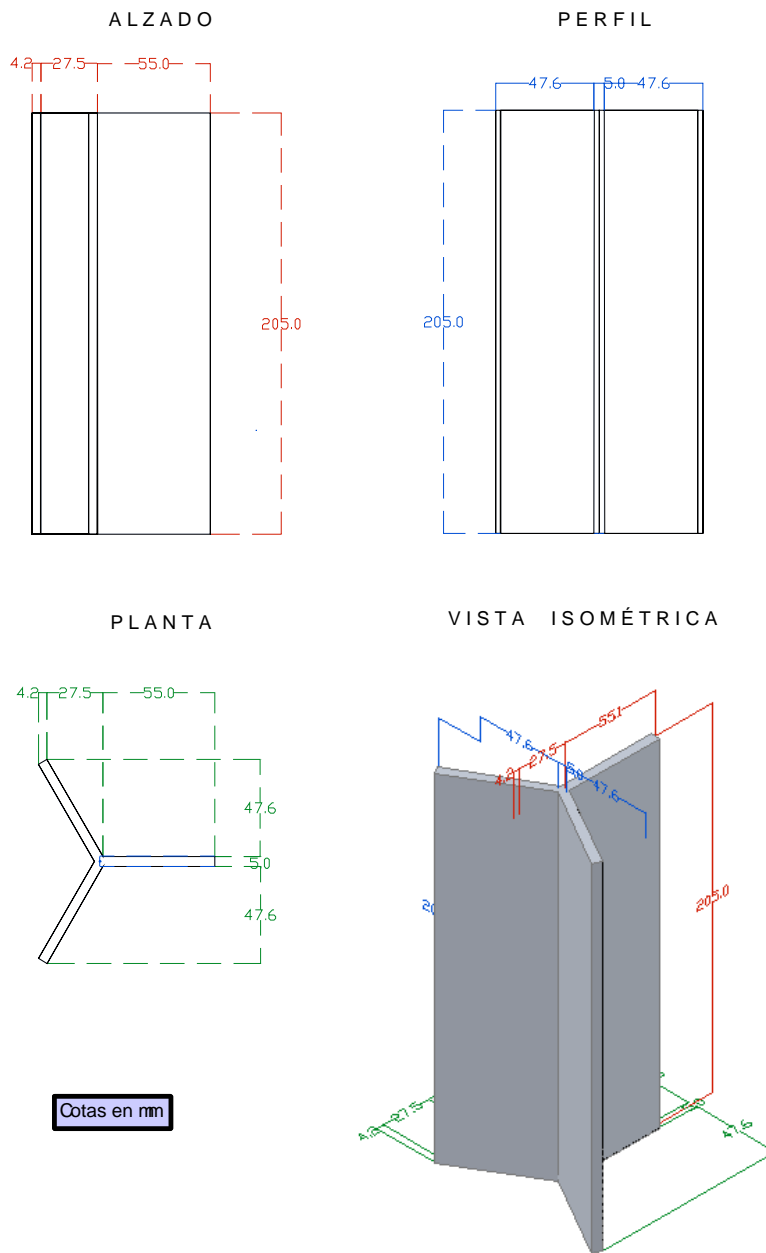


Figura 1.2-3 Vistas de P2.

**c) Centro de gravedad**

El prototipo1 puede considerarse formado por dos planos bidimensionales. El primero, de mayor altura, tiene el centro de gravedad (cdg en adelante) a 11.5cm de la base, siendo su masa  $m_o$ :

$$m_a = \frac{23}{43} m_{P1} \quad (1.3)$$

La segunda cara, tiene el cdg a 10 cm de la base, siendo su masa  $m_b$ :

$$m_b = \frac{20}{43} m_{P1} \quad (1.4)$$

El cdg de P1, por tanto, está sobre la línea de unión de ambas caras a una distancia de la base de:

$$cdg_{P1} = \frac{11.5 \frac{23}{43} m_{P1} + 10 \frac{20}{43} m_{P1}}{m_{P1}} = 10.802cm \quad (1.5)$$

El prototipo 2 puede ser considerado formado por tres planos de 20.5\*5.5cm. El centro de gravedad de cada uno de ellos, por tanto, está situado a 10.25cm de la base y a 2.75cm del eje de unión.

Dado que las caras son idénticas y están dispuestas equidistantes cada 120º, el cdg del cuerpo estará centrado en el eje de unión, a una distancia de 10.25cm de la base.

$$cdg_{P2} = 10.25cm \quad (1.6)$$

#### **d) Inercia**

El cuerpo presenta una inercia compleja. El enganche a la catenaria se realiza mediante una serie de eslabones metálicos. La unión entre cada dos eslabones puede ser de dos tipos:

- Con libertad en el giro para un único eje.
- Con libertad en el giro, restringida, para tres ejes cartesianos.

La unión final entre la cadena y la catenaria se consigue mediante una pieza de plástico rígido que permite, también, el giro en un eje.

Este sistema de unión permite, por tanto, movimientos complejos, con giros en torno a diferentes ejes situados a diferentes distancias del cuerpo. El análisis de este movimiento de una manera analítica se hace, por tanto, inabordable.

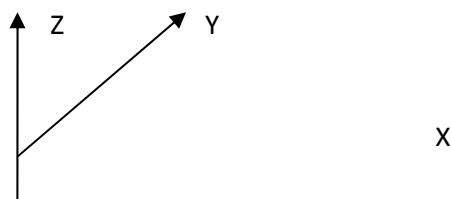
De cara a lograr una aproximación al problema, sin embargo, vamos a analizar la inercia que presentan ambos cuerpos respecto del giro en tres ejes coordenados situados a una distancia variable sobre el cuerpo. Descompondremos el estudio en tres fases:

- i) Inercia de un paralelepípedo
- ii) Inercia del prototipo 1
- iii) Inercia del prototipo 2

- i) Inercia de un paralelepípedo

Como paso previo vamos a calcular la inercia de un paralelepípedo de dimensiones  $a$  y  $b$  respecto de un eje horizontal de vector director  $\overline{E}_u$ , que forma un ángulo  $\theta$  con el eje X.

Supondremos el paralelepípedo contenido en el plano XZ, el eje Z divide al mismo en dos partes iguales, siendo por tanto un eje de simetría. El vector  $\overline{E}_u$  está comprendido en el plano XY (ver figura 1.2-4)



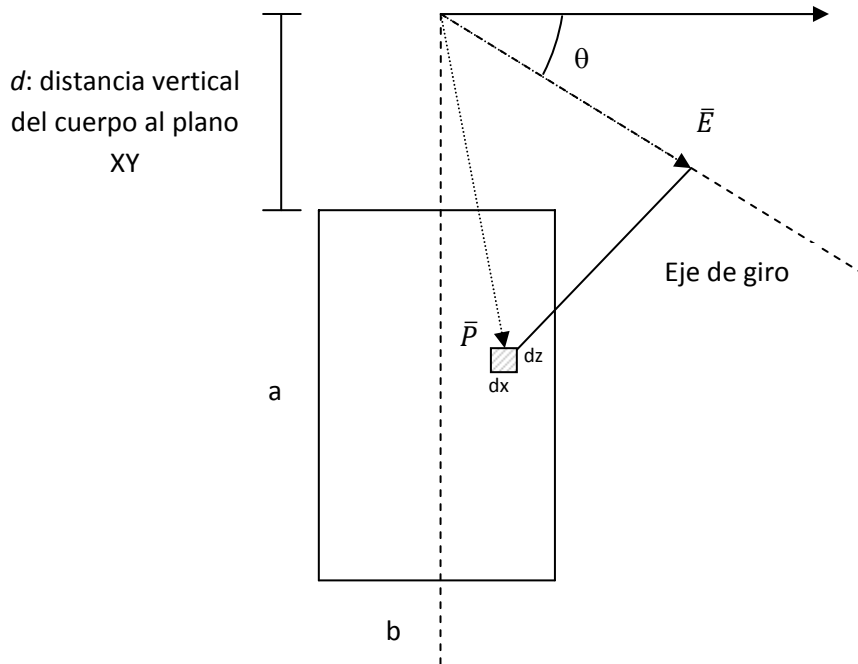


Figura 1.2-4 Descripción geométrica de paralelepípedo

En primer lugar vamos a calcular la contribución a la inercia de un elemento diferencial del paralelepípedo de dimensiones  $dx$  y  $dz$  cuyo vector de posición es  $\bar{P} = (x_p, z_p, 0)$ .

El eje sobre el que queremos calcular la inercia tiene como vector director unitario a:  $\bar{E}_u = (x_E, 0, x_E \operatorname{tg}(\theta))$ , donde el valor de  $x_E$  puede ser calculado mediante:

$$\sqrt{x_E^2 + (x_E \operatorname{tg} \theta)^2} = 1, \tag{1.7}$$

De donde:

$$x_E = \sqrt{\frac{1}{(1 + \operatorname{tg}^2 \theta)}}. \tag{1.8}$$

Si nombramos como  $\bar{E}$  la proyección entre el vector  $\bar{P}$  sobre la recta determinada por el vector  $\bar{E}_u$  tenemos:

$$|\overline{E}| = \overline{PE}_u = x_p x_E \quad (1.9)$$

y por tanto el vector  $\overline{E}$  es de la forma:

$$\overline{E} = |\overline{E}| \overline{E}_u = x_p x_E (x_E, 0, x_E \operatorname{tg}(\theta)) \quad (1.10)$$

La propia definición del vector  $\overline{E}$  como proyección de  $\overline{P}$  hace que determinen un triángulo rectángulo. Por tanto la distancia entre ambos,  $|\overline{D}|$  se rige por el teorema de Pitágoras

$$|\overline{D}| = \sqrt{x_p^2 + z_p^2 - (x_p x_E)^2} \quad (1.11)$$

Por otro lado la contribución a la inercia del diferencial de masa situado en  $\overline{P}$  es:

$$dI = dM \overline{D}^2 \quad (1.12)$$

Asumiendo una distribución másica homogénea se tiene que:

$$dM = \frac{M dx dz}{ab} \quad (1.13)$$

De(1.11),(1.12) y (1.13) se tiene que:

$$dI = \frac{M dx dz}{ab} \left[ x_p (1 - x_E^2) + y_p \right] \quad (1.14)$$

La inercia total del cuerpo se consigue integrando en toda la superficie

$$\begin{aligned} I &= \frac{M}{ah} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-(d+a)}^{-d} \left[ x^2 (1 - x_E^2) + z^2 \right] dx dz \\ &= M \left[ \frac{b^2}{12} (1 - x_E^2) + \frac{a^2}{3} + ad + d^2 \right] \end{aligned} \quad (1.15)$$

Fórmula que podemos simplificar desarrollando (1.8)



$$1-x_E^2 = 1 - \frac{1}{1+\operatorname{tg}^2(\theta)} = \frac{\operatorname{tg}^2(\theta)}{1+\operatorname{tg}^2(\theta)} = \frac{\frac{\operatorname{sen}^2(\theta)}{\operatorname{cos}^2(\theta)}}{1+\frac{\operatorname{sen}^2(\theta)}{\operatorname{cos}^2(\theta)}} = \operatorname{sen}^2(\theta) \quad (1.16)$$

Y por tanto:

$$I = M \left[ \frac{b^2}{12} \operatorname{sen}^2(\theta) + \frac{a^2}{3} + ad + d^2 \right] \quad (1.17)$$

ii) Inercia del Prototipo 1

Para facilitar la comprensión de los cálculos que se exponen en este apartado, comenzamos por presentar una vista, en planta, de P1 en la figura 1.2-5.

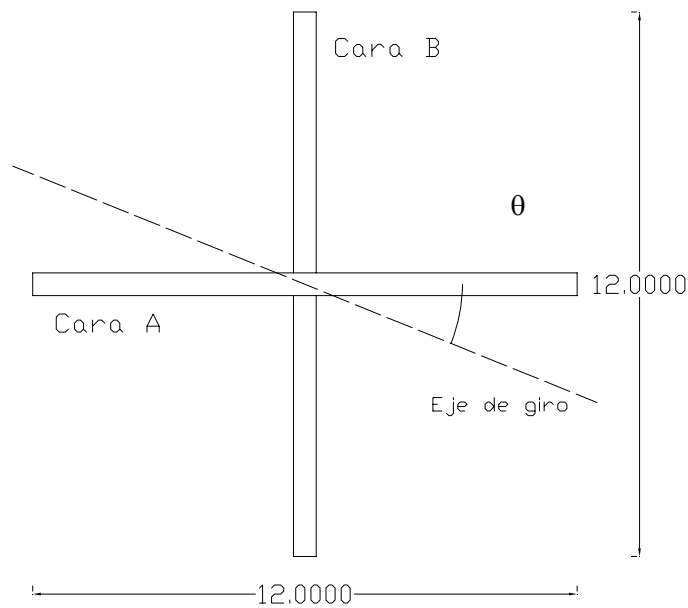


Figura 1.2-5 Planta superior del prototipo 1

Consideraciones:

- Consideramos el cuerpo formado por dos paralelepípedos perpendiculares bidimensionales de espesor despreciable: Cara A y Cara B.
- La altura de las caras se corresponden con  $h_a$  (23 cm) y  $h_b$  (20 cm). La diferencia entre ambos es  $c$  (3 cm).
- Existe una distancia en vertical desde el límite vertical del cuerpo hasta el plano horizontal en que se encuentra el eje de giro, que denominaremos  $d$ .
- La masa de las caras es  $m_a$  y  $m_b$  respectivamente.
- Las dos caras son homogéneas y de la idéntica densidad.

Por lo tanto, la inercia de la cara A respecto de un eje horizontal que pase a una distancia  $d$  sigue la formulación (1.17), donde  $a=h_a$

$$I_{eA} = m_a \left[ \frac{b_{p1}^2}{12} \text{sen}^2(\theta) + \frac{h_a^2}{3} + h_a d + d^2 \right] \quad (1.18)$$

Análogamente, teniendo en cuenta que la cara B es 3cm más baja que la cara A:

$$I_{eB} = m_b \left[ \frac{b_{p1}^2}{12} \text{sen}^2\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) + \frac{h_b^2}{3} + h_b(d+3) + (d+3)^2 \right] \quad (1.19)$$

Como la inercia del Prototipo 1 es la suma de las inercias de las dos caras que lo forman, a partir de (1.18) y (1.19) se obtiene que:

$$I_{eP1} = m_a \left[ \frac{b_{p1}^2}{12} \text{sen}^2(\theta) + \frac{h_a^2}{3} + h_a d + d^2 \right] + m_b \left[ \frac{b_{p1}^2}{12} \text{sen}^2\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) + \frac{h_b^2}{3} + h_b(d+3) + (d+3)^2 \right] \quad (1.20)$$

Denominando  $m=m_a+m_b$  y usando la hipótesis de homogeneidad másica obtenemos que:

$$\begin{aligned}
 m_a &= \frac{h_a}{h_a + h_b} m \\
 m_b &= \frac{h_b}{h_a + h_b} m
 \end{aligned}
 \tag{1.21}$$

Y por tanto:

$$\begin{aligned}
 I_{eP1} &= \frac{m}{h_a + h_b} \left[ \frac{h_a b_{p1}^2}{12} \text{sen}^2(\theta) + \frac{h_a^3}{3} + h_a^2 d + h_a d^2 \right] \\
 &+ \frac{m}{h_a + h_b} \left[ \frac{h_b b_{p1}^2}{12} \text{sen}^2\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) + \frac{h_b^3}{3} + h_b^2 (d+3) + h_b (d+3)^2 \right]
 \end{aligned}
 \tag{1.22}$$

Uniendo términos:

$$\begin{aligned}
 I_{eP1} &= \frac{m}{h_a + h_b} \left[ \frac{b_{p1}^2}{12} \left( h_a \text{sen}^2(\theta) + h_b \text{sen}^2\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \right) + \right. \\
 &\left. + \frac{h_a^3 + h_b^3}{3} + h_a^2 d + h_a d^2 + h_b^2 (d+3) + h_b (d+3)^2 \right]
 \end{aligned}
 \tag{1.23}$$

La inercia de un paralelepípedo a un eje paralelo al eje X que lo atraviese por su parte central tiene la siguiente fórmula

$$I_z = \frac{1}{12} m b_{p1}^2
 \tag{1.24}$$

La inercia, por tanto, del prototipo 1 respecto del eje que conforma la unión entre ambas caras será:

$$I_{zP1} = \frac{1}{12} b_{p1}^2 \left( \frac{m h_a}{h_a + h_b} + \frac{m h_b}{h_a + h_b} \right)
 \tag{1.25}$$

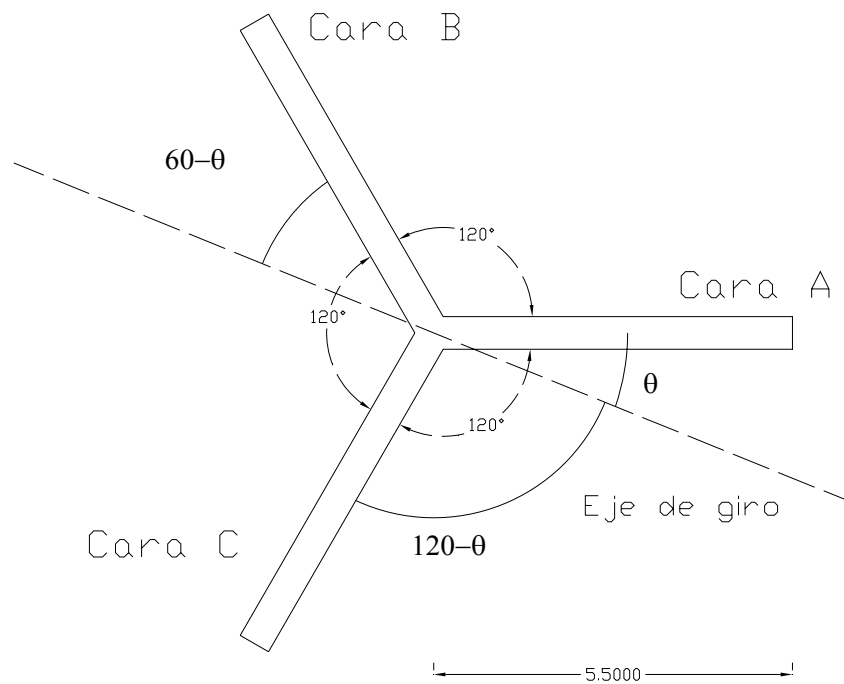
Es decir

$$I_{zP1} = \frac{1}{12} m b_{p1}^2
 \tag{1.26}$$

Resultado obvio dado que ambas caras tienen la misma anchura y su eje central es coincidente.

## iii) Inercia del Prototipo 2

Para facilitar la comprensión de los cálculos que se exponen en este apartado, comenzamos por presentar una vista, en planta, de P2 en la figura 1.2-6.



**Figura 1.2-6 Planta superior del prototipo 1**

Otras consideraciones:

- Todas las caras tienen la misma altura  $h$  (20,5cm)
- La masa de las caras idéntica en los tres casos:  $m_c$
- La distancia del cuerpo al eje se denomina  $d$
- Las tres caras son homogéneas y de idéntica densidad.

La inercia de la cara A respecto de un eje horizontal que pasa por su centro de gravedad se puede obtener a partir de la fórmula (1.17), tomando,  $a$  el valor de  $h$  y  $d$  el valor de  $-h/2$ , de donde:

$$I_{eAg} = m_c \left[ \frac{b_{p2}^2}{12} \text{sen}^2(\theta) + \frac{h^2}{12} \right] = \frac{m_c}{12} \left[ b_{p2}^2 \text{sen}^2(\theta) + h^2 \right] \quad (1.27)$$

La inercia respecto de un eje paralelo al anterior, a una distancia  $D$  se calcula mediante el teorema de Steiner:

$$I_{eA} = I_{eAg} + m_c D^2 \quad (1.28)$$

Donde  $D$  es la distancia entre ejes. Esta distancia se calcula de acuerdo al teorema de Pitágoras:

$$D^2 = \left( \frac{h}{2} + d \right)^2 + \left( \frac{b_{p2}}{2} \text{sen}(\theta) \right)^2 \quad (1.29)$$

Uniendo los resultados de (1.27), (1.28) y (1.29):

$$\begin{aligned} I_{eA} &= \frac{m_c}{12} \left[ b_{p2}^2 \text{sen}^2(\theta) + h^2 \right] + m_c \left[ \left( \frac{h}{2} + d \right)^2 + \frac{b_{p2}^2}{4} \text{sen}^2(\theta) \right] \\ &= m_c \left[ \frac{b_{p2}^2}{3} \text{sen}^2(\theta) + \frac{h^2}{3} + d^2 + hd \right] \end{aligned} \quad (1.30)$$

Las inercias de las caras B y C se calcularían de manera análoga<sup>2</sup>:

$$I_{eB} = m_c \left[ \frac{b_{p2}^2}{3} \text{sen}^2\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) + \frac{h^2}{3} + d^2 + hd \right] \quad (1.31)$$

$$I_{eC} = m_c \left[ \frac{b_{p2}^2}{3} \text{sen}^2\left(\frac{2\pi}{3} - \theta\right) + \frac{h^2}{3} + d^2 + hd \right] \quad (1.32)$$

Teniendo en cuenta que cada cara supone  $1/3$  de la masa total:  $m_c = 1/3m$ , la inercia de P2 será:

<sup>2</sup> La definición del ángulo como  $\pi/3 - \theta$  o  $2\pi/3$ , no plantea problemas en el caso de  $\alpha > \pi/3$  o  $2\pi/3$  por ser  $\text{sen}^2(\psi) = \text{sen}^2(-\psi)$

$$I_{ep2} = m_c \left\{ 3 \left( \frac{h^2}{3} + d^2 + hd \right) + \frac{b_p^2}{3} \left[ \text{sen}^2(\theta) + \text{sen}^2\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) + \text{sen}^2\left(\frac{2\pi}{3} - \theta\right) \right] \right\} \quad (1.33)$$

De cara a simplificar la expresión (1.33) vamos a analizar ahora el valor de:

$$\text{trig} = \text{sen}^2(\theta) + \text{sen}^2\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) + \text{sen}^2\left(\frac{2\pi}{3} - \theta\right)$$

Es conocida la relación:

$$\text{sen}^2(\theta) = \frac{1 - \cos(2\theta)}{2}; \quad (1.34)$$

Por tanto:

$$\text{trig} = \frac{1 - \cos(2\theta) + 1 - \cos\left(\frac{2\pi}{3} - 2\theta\right) + 1 - \cos\left(\frac{4\pi}{3} - 2\theta\right)}{2} \quad (1.35)$$

Sabiendo que:

$$\cos(\theta - \phi) = \cos(\theta)\cos(\phi) + \text{sen}(\theta)\text{sen}(\phi) \quad (1.36)$$

Y aplicándolo:

$$\begin{aligned} & \cos(2\theta) + \cos\left(\frac{2\pi}{3} - 2\theta\right) + \cos\left(\frac{4\pi}{3} - 2\theta\right) \\ &= \cos(2\theta) + \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right)\cos(2\theta) + \text{sen}\left(\frac{2\pi}{3}\right)\text{sen}(2\theta) + \\ &+ \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right)\cos(2\theta) + \text{sen}\left(\frac{4\pi}{3}\right)\text{sen}(2\theta) \end{aligned} \quad (1.37)$$

Por tanto

$$\begin{aligned} & \cos(2\theta) + \cos\left(\frac{2\pi}{3} - 2\theta\right) + \cos\left(\frac{4\pi}{3} - 2\theta\right) \\ & = \cos(2\theta) - \frac{\cos(2\theta)}{2} + \frac{\sqrt{3}\operatorname{sen}(2\theta)}{2} - \frac{\cos(2\theta)}{2} - \frac{\sqrt{3}\operatorname{sen}(2\theta)}{2} = 0 \end{aligned} \quad (1.38)$$

De donde:

$$\operatorname{trig} = \operatorname{sen}^2(\theta) + \operatorname{sen}^2\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) + \operatorname{sen}^2\left(\frac{2\pi}{3} - \theta\right) = \frac{3}{2} \quad (1.39)$$

Lo que nos conduce a la solución final:

$$I_{eP2} = m_c \left( h^2 + 3d^2 + 3hd + \frac{b_{p2}^2}{2} \right) \quad (1.40)$$

Valor que es independiente del ángulo que tome el eje sobre el que estamos realizando los cálculos. **Por tanto podemos concluir que la inercia del cuerpo es constante para cualquier eje comprendido en un mismo plano horizontal a una distancia d sobre el cuerpo.**

La inercia de un paralelepípedo de masa  $m_c$  a un eje coincidente con uno de sus lados sigue la siguiente formulación:

$$I_z = \frac{1}{3} m_c b_{p2}^2 \quad (1.41)$$

Dado que cada todas las caras tienen la misma masa, 1/3 de la masa total, la inercia del prototipo será:

$$I_{zP2} = m_c b_{p2}^2 \quad (1.42)$$

## 1.2.2 Comportamiento aerodinámico y modos de fallo

### A) Comportamiento idealizado

Los dos prototipos que estamos analizando se basan en el mismo principio: La reflexión de la luz solar con un patrón aleatorio. Esta emisión provoca

que el ave distinga un objeto en el cableado del tendido, y evite acercarse al mismo. De esta manera se logra eliminar la indeseada colisión.

Los destellos se producen mediante la reflexión de la luz solar. Esto se consigue mediante la propia dinámica del cuerpo, que al rotar sobre una serie de ejes refleja la luz solar en un amplio abanico de direcciones.

Esta reflexión debe de tener una serie de características que maximicen su efecto, como son:

- *Aleatoriedad.* De esta manera los reflejos no poseen un patrón al que las aves se puedan llegar a habituar.
- *Continuidad.* El destello debe de producirse de una manera continua.
- *Direccionalidad.* La luz emitida debe abarcar un espectro de 360° en horizontal.

Estas características deben lograrse mediante la interacción entre el flujo de aire y el cuerpo suspendido.

La aleatoriedad viene dada por el propio fenómeno atmosférico que provoca el movimiento. La altura a la que se encuentran los hilos de conducción eléctrica se encuentra dentro del dominio de la capa límite atmosférica, que tiene características turbulentas. Esta turbulencia garantiza una discontinuidad en las fuerzas ejercidas sobre el cuerpo. La aerodinámica de los prototipos, por tanto, debe de ser tal que reproduzca esta característica del fluido en su movimiento.

La continuidad del movimiento implica la necesidad de una baja resistencia a la rotación. El cuerpo debe de ser capaz de recoger la acción del viento y de transformarla en movimiento. Para ello, el rozamiento y por tanto su inercia a comenzar el giro debe de ser pequeña.

La direccionalidad requiere que el cuerpo rote de manera continua sobre el eje Z. Sin embargo, de cara abarcar un espacio lo más amplio posible, es necesario que también se produzca el movimiento alrededor de algún eje horizontal.

#### B) *Comportamiento real*



Los dos prototipos logran el movimiento mediante de una serie de piezas rígidas, que, a modo de eslabón, se enganchan una con otra. En cada punto de unión se permite el giro en dos ejes perpendiculares entre sí. La dirección de estos dos ejes depende, en cada momento, de la posición de los dos eslabones que se conectan, que a su vez depende del movimiento del cuerpo.



**Figura 1.2-7 Pieza de unión**

En cada prototipo uno de los eslabones es una unión de dos piezas con libertad de giro en un eje longitudinal a su unión. Este tipo de eslabón es el que permite el giro del cuerpo sobre sí mismo y por tanto, girar sobre el eje vertical.

#### C) Modos de fallo

El fallo del cuerpo se puede producir por tres razones:

- Ausencia de viento. Sin la presencia del flujo, el movimiento del cuerpo no se producirá, por lo que la emisión de destellos será unidireccional.
- Movimiento indeseado. Esto se produce cuando la aerodinámica del cuerpo, en relación con el flujo incidente, no produce el movimiento adecuado. Esto conduce a una reflectividad de la luz inadecuada.
- Fallo estructural del cuerpo. Esto se puede producir por diferentes razones:
  - Por rotura de alguno de sus componentes. Consideramos muy remota esta posibilidad dados los materiales utilizados. El cuerpo de plástico duro y los eslabones metálicos con buen acabado proporcionan una alta durabilidad en este apartado.

- Fallo por imposibilidad de movimiento. Se produce cuando el cuerpo queda atrapado en el cable de alta tensión. Este fallo ha sido observado directamente en las catenarias. Una vez que el prototipo se queda enganchado pierde completamente su función. Este fallo se produce por unos giros excesivos alrededor de los ejes horizontales.

## 1.3 Mediciones experimentales

### 1.3.1 Descripción general de los ensayos

La dinámica deseada de los dos prototipos analizados es la que provoca los reflejos que disuaden al ave de aproximarse a la línea de alta tensión. Este movimiento se produce por la fuerza ejercida por el viento, que se traduce en la aparición de presiones, variables en el tiempo, aplicadas sobre el cuerpo. Por tanto, podemos acercarnos a la comprensión de la acción del viento en cada instante sobre el cuerpo mediante datos de las presiones ejercidas sobre cada una de sus caras.

En la presente tesis se ha optado por realizar un estudio de esa dinámica en el ambiente controlado de un laboratorio. La reproducción de las condiciones que se dan en la naturaleza es siempre compleja y necesita de unas instalaciones especiales. En este caso necesitamos imitar las condiciones del flujo incidente sobre el cuerpo así como disponer, en el interior del modelo, de la sensórica necesaria para su estudio. Esto se ha realizado en el interior del Túnel de Viento I del CEAMA (Centro Andaluz de Medio Ambiente). Se puede encontrar más información sobre sus características en el apartado 2.2.2.3 *Breve descripción del túnel de viento de capa límite*.

La monitorización del cuerpo se ha realizado mediante un modelo a escala 1:1 de cada uno de los prototipos analizados. El uso del tamaño real del cuerpo implica una mayor sencillez a la hora de modelar los fenómenos físicos, dado que parámetros físicos como densidad o viscosidad están correctamente representados. Por contra, el tamaño del modelo utilizado limita físicamente el número de puntos de control que se pueden disponer en el mismo y por tanto los datos adquiridos en cada ensayo.

Dadas que los cuerpos estudiados están compuestos por planos de escaso grosor, se hace imposible introducir en ellos los sensores que traducen las presiones ejercidas por el viento en una señal eléctrica. Esto fuerza a disponer de microtubos de diámetro del orden del milímetro que extraigan la presión al exterior del cuerpo. A su vez, esta manera de realizar el

prototipo implica la imposibilidad de realizar el estudio con el cuerpo en movimiento.

Así, se ha optado por una serie de ensayos estáticos en los que se adquieran datos de presión para diferentes orientaciones de viento. Conociendo estos datos y las características físicas tanto de los prototipos como de su conexión se tratará de modelar el comportamiento dinámico de los mismos.

Como ya se ha explicado cada punto de medida implica un tubo por el que la señal física se extraiga del modelo, por tanto, a mayor número de puntos de control mayor es la superficie necesaria. El prototipo 1 dispone de 4 aspas y, por tanto, de cuatro vías por las que evacuar la señal obtenida. En la otra mano, el prototipo 2 sólo presenta tres aspas, lo que supone una limitación mayor.

Analizadas las geometrías y la superficie que necesita cada punto de control se marca el límite de puntos de control en 60 para el P1 y en 48 para el P2.

La distribución de estos puntos de presión debe realizarse comprendiendo que las zonas de mayores gradientes de presión suelen ser aquellas cercanas a las aristas, especialmente en las esquinas de la superficie analizada. Si bien esperamos que este patrón se repita en nuestro caso, hemos optado por un camino que nos permita comprobarlo empíricamente.

Éste consiste en realizar un estudio previo de los patrones de presiones existentes sobre cada una de las caras para diferentes orientaciones del viento. El primero objetivo, por tanto, no es el de parametrizar el movimiento del cuerpo sino el de comprender en profundidad los esquemas de presión que el viento ejerce sobre él. Para ello repartimos los puntos de control disponibles en sólo dos de las caras, lo que permite una suficiente densidad de muestreo.

Una vez obtenidos los datos de las presiones en cada cara, para cada orientación de viento, dispondremos de mapas de presiones con una gran precisión, a través de los cuales se podrá optar, con conocimiento de causa, por la configuración óptima para la ubicación de los puntos de control con la que modelar el movimiento del cuerpo.

De esta manera dividimos la etapa experimental en dos fases:

- Fase 1: Ensayos exhaustivos sobre dos de las caras.
- Fase 2: Ensayos con medidas simultáneas en todas las caras.

En cada una de estas fases vamos a estudiar a ambos prototipos. De cara a clarificar la exposición de resultados, la nomenclatura por la que nos regiremos para denominar será la siguiente:

	<b>Prototipo 1</b>	<b>Prototipo 2</b>
<b>Fase 1</b>	<b>P1F1</b>	<b>P2F1</b>
<b>Fase 2</b>	<b>P1F2</b>	<b>P2F2</b>

**Tabla 1.3-1 Nomenclatura de los resultados**

Para realizar los ensayos se han creado dos modelos a escala 1:1 de los prototipos reales. Los modelos tienen una cubierta exterior intercambiable que permite modificar la distribución de los puntos de control. De esta manera, sin cambiar el núcleo del modelo se pueden realizar diferentes configuraciones experimentales.

### 1.3.2 Modelización de los prototipos

Los modelos realizados se componen de diferentes piezas:

- a) Aspas.
- b) Pieza de unión.
- c) Tubo horizontal
- d) Sujeción
- e) Microtubos
- f) Elemento de finalizado

- a) Aspas

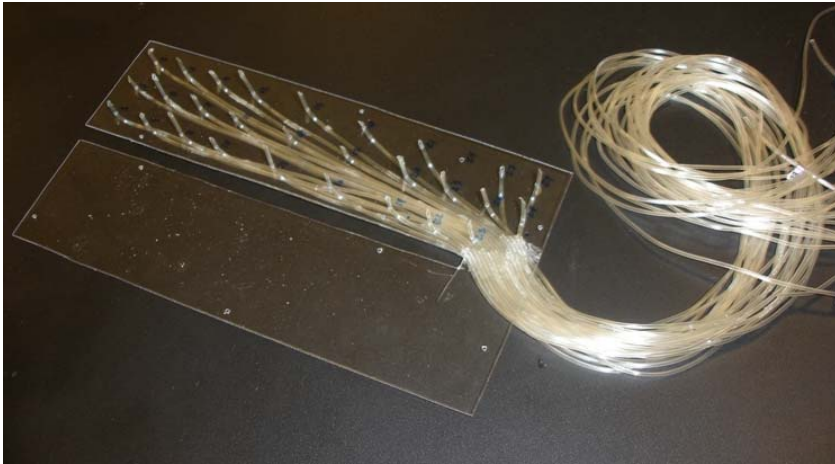
Las aspas están formadas por un esqueleto de piezas de aluminio de 3 mm de espesor (ver Figura 1.3-1). Estas piezas se encuentran unidas mediante epoxi de alta resistencia. La cara externa se conforma mediante planchas de

policarbonato de 1mm de espesor. La unión entre ambos elementos se logra con tornillos M2 de 4mm de longitud y de cabeza de 0.5mm de espesor. Esta unión permite un sencillo intercambio de las planchas de policarbonato por lo que de una fase a otra de ensayos sólo hay que intercambiar las planchas de policarbonato, manteniendo el resto del modelo inalterado.

Las planchas de policarbonato presentan orificios de 1.5mm de diámetro en los que se adhieren las cabezas de microtubos huecos de PVC flexible (ver Figura 1.3-2 ) que serán descritos más adelante. A través de estas conducciones, se transmiten las presiones hasta los escáneres que realizan la adquisición de datos.



**Figura 1.3-1 Esqueleto de aluminio del prototipo P1**



**Figura 1.3-2 Lámina de policarbonato con microtubos**

b) Pieza de unión

La modelización de los prototipos para la medición de las presiones en sus caras fuerza el transporte de los tubos de presión desde los puntos de control hasta los escáneres de medición. La salida desde el interior del modelo se realiza mediante una pieza que perturba lo menos posible el campo de viento: con perfil cóncavo en los puntos de unión con las aspas y cilíndrico hasta la llegada a la pieza que sirve de soporte (ver Figura 1.3-3). Para conseguir la mayor similitud posible con el prototipo se escoge un diámetro externo igual al ancho de los enganches metálicos que presentan los prototipos reales. En el caso del prototipo 2 se conforma la pieza asimilando la forma del propio enganche: perfil cilíndrico con acabado troncocónico.



**Figura 1.3-3. Pieza de unión del modelo del prototipo P1**

c) Tubo horizontal

Los prototipos, en funcionamiento, quedan suspendidos de un cable de alta tensión mediante un paralelepípedo plástico. Ambos elementos inducen perturbaciones en el campo de viento que no pueden ser despreciadas.

El cable de alta tensión se ha modelado mediante sendos tubos de aluminio horizontal. Su diámetro, de 15mm, se ha escogido del orden de los de los cables de tierra utilizados en la red eléctrica española. Su longitud es superior a tres veces el ancho del cuerpo, lo que asegura que el efecto del cable esté correctamente simulado.

El elemento plástico se modela mediante una caja metálica de acero inoxidable.



**Figura 1.3-4. Pieza de unión**

d) Sujeción

Los extremos de los tubos de aluminio se sustentan en una estructura de acero que sirve para sujetar con firmeza el conjunto y para elevarlo de la solera del túnel. La elevación que se logra es de 220mm, lo que es suficiente para alejarlo de la capa límite del suelo del túnel, estimada en ensayos previos en 115mm para una velocidad de viento de 6.4m/s.



La longitud del tubo de aluminio asegura que estos elementos queden lo suficientemente alejados del prototipo como para descartar su influencia.

e) Microtubos

Las presiones obtenidas en las caras del prototipo deben conducirse hasta los sensores capaces de transformarlas en una señal digital manejable mediante computadora. Para esto se dispone de una serie de microtubos (diámetro exterior 1.7mm, diámetro interior 1.3mm) huecos. Las presiones se transmiten a lo largo de éstos hasta llegar a los escáneres.

La longitud de cada uno de los tubos es idéntica e igual a 1m, lo que permite que la respuesta obtenida en los sensores sea simultánea.

f) Elementos de finalizado

El modelo se finaliza mediante el sellado de todos los puntos de unión. Esto se logra mediante adhesivo plástico, cinta aislante y masilla de modelado plástico.

El resultado final, mostrado en las figuras 1.3-5, 1.3-6 y 1.3-7, es un modelo a escala 1:1 del prototipo presentado que integra los efectos del cable de alta tensión capaz de llevar las presiones que aparecen en sus caras hasta el sistema de adquisición de datos.

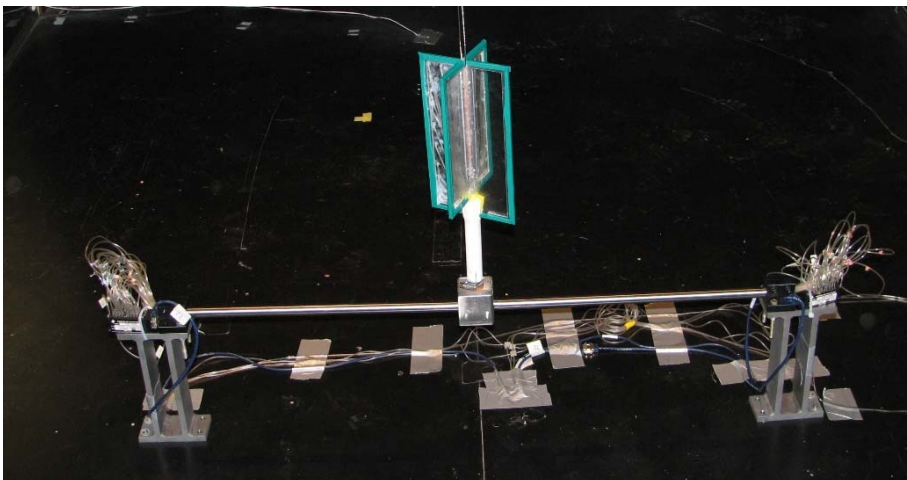


Figura 1.3-5 Modelo del prototipo 1 en el interior del túnel

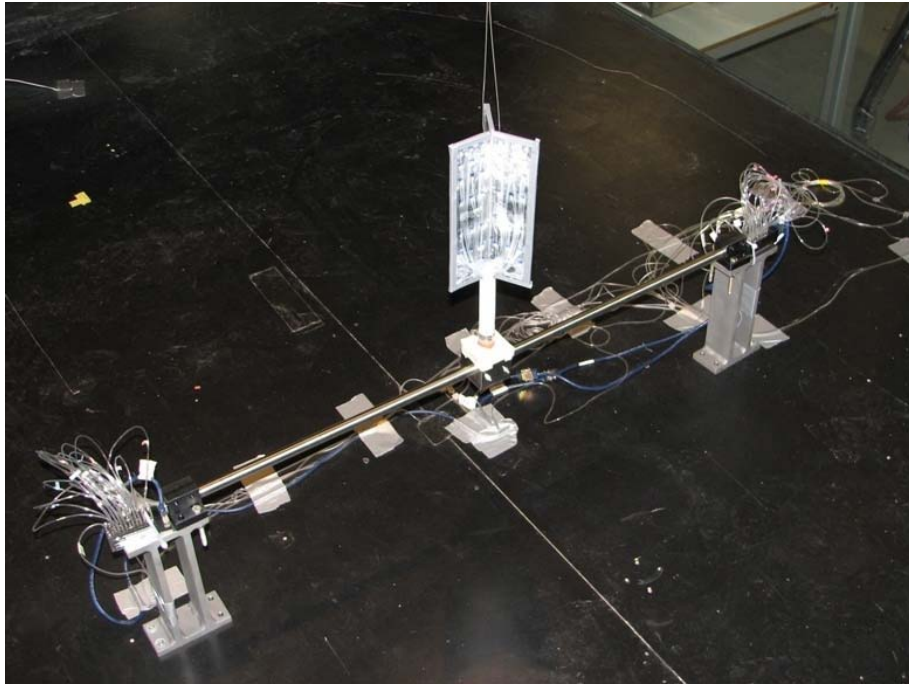


Figura 1.3-6 Modelo del prototipo 2 en el interior del túnel

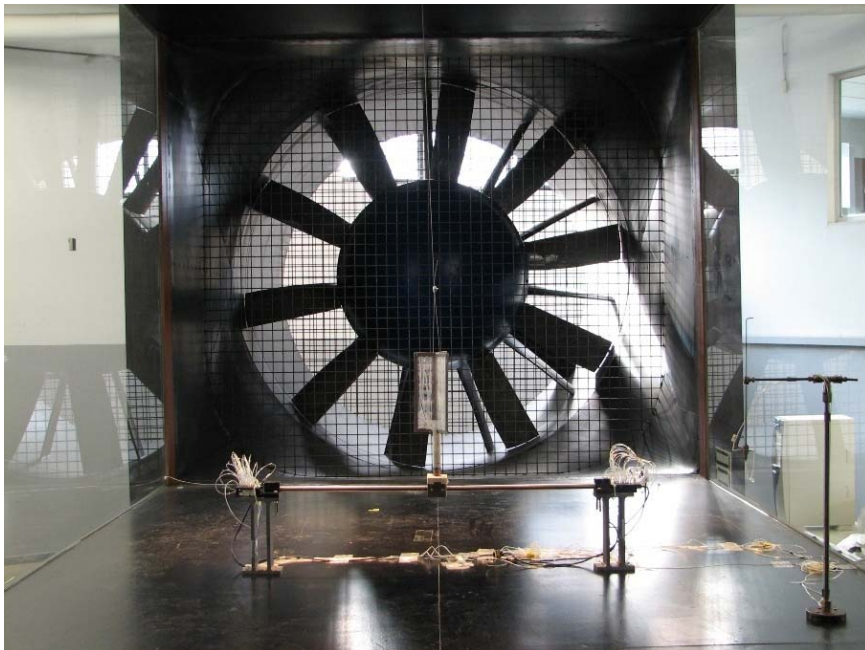


Figura 1.3-7 Modelo del prototipo 2 montado en el interior del túnel

### 1.3.3 Ensayos exhaustivos sobre dos de las caras

En el siguiente apartado se explica el método seguido en los ensayos realizados sobre los dos prototipos y se muestran los resultados obtenidos midiendo, de manera exhaustiva, en dos de las caras.

De acuerdo con la nomenclatura planteada en la Tabla 1.3-1 los ensayos, en esta fase se denominarán P1F1 y P2F1 según el prototipo al que nos estemos refiriendo.

#### 1.3.3.1 Condiciones ambientales de los ensayos

Los ensayos han sido realizados en el interior del túnel de viento I del CEAMA (Centro Andaluz de Medio Ambiente). Las mediciones de presiones se han realizado sobre sendos modelos a escala 1:1 de los dos prototipos analizados.

El túnel ha funcionado con un régimen de giro constante, a 170 r.p.m. En estas condiciones, variaciones en las condiciones ambientales tales como temperatura, humedad... etc. del aire provocan pequeñas perturbaciones de la velocidad entre unos ensayos y otros.

En los ensayos del prototipo P1, la temperatura ha oscilado entre 15.6°C y 18.0°C, con una humedad relativa de entre el 51% y el 42%. Las velocidades medias obtenidas durante estos ensayos han oscilado entre 6.65 m/s y 6.78 m/s.

En el prototipo 2 la temperatura ha oscilado entre 14.2°C y 14.6°C, con una humedad relativa del 42%. Las velocidades medias obtenidas en los ensayos del prototipo 2 ha oscilado entre 6.60 m/s y 6.67 m/s.

Estos datos se resumen en la Tabla 1.3-2.

<b>PROTOTIPO</b>	<b>T<sup>a</sup> (°C)</b>	<b>Humedad %</b>	<b>V<sub>max</sub> (m/s)</b>	<b>V<sub>min</sub> (m/s)</b>
<b>1</b>	15.6 – 18.0	42 - 51	6.78	6.65
<b>2</b>	14.2 – 14.6	42	6.60	6.67

**Tabla 1.3-2 Resumen de las condiciones ambientales durante los ensayos**

### 1.3.3.2 Instrumentación

Las presiones se han adquirido mediante tres escáneres de presión. Uno de ellos de 32 puertos (ESP-32HD) y otros dos de 16 puertos (ESP-16HD). Se utiliza el sistema de adquisición de presiones de Pressure Systems, modelo 8400.

La presión de referencia para las mediciones es la presión estática del flujo, adquirida mediante tubo de Pitot, que también se emplea para recoger la presión dinámica y, por tanto, la velocidad del flujo. Su eje se sitúa a 660mm de altura sobre la solera del túnel. La conexión neumática de éste conecta con uno de los escáneres de presión y con un transductor SETRA.

Para cada una de las direcciones analizadas se ha realizado una nueva calibración que asegure la precisión de las medidas realizadas.

En cada uno de los ensayos se ha adquirido un dato cada 6ms, durante un periodo de 2 minutos, lo que conforma una frecuencia de muestreo de 167Hz. Esto supone 20.000 datos para cada muestra en cada punto de control. La adquisición de los datos en el tubo de Pitot sigue idéntico esquema.

Desde la salida del personal del interior del túnel hasta el comienzo de la adquisición de datos transcurre un mínimo de dos minutos de cara a conseguir estabilizar el flujo de viento.

### 1.3.3.3 Mediciones de presión

El objetivo de esta primera fase experimental es averiguar el patrón espacial que sigue la distribución de las presiones en cada una de las caras según la dirección del viento.

Dadas las condiciones de simetría de los cuerpos P1 necesita del análisis de las presiones en un arco de 180°. Según el mismo razonamiento, P2 necesita de estos datos en un arco de 120°. Observando esta simetría, las mediciones en P1 se han realizado cada 22.5° y en el P2 cada 30°.

Para ello es importante disponer de puntos de medición que comprendan la mayor superficie posible. Se ha optado por una distribución que abarca el

área que conforma cada una de las caras. En la Figura 1.3-8 y la Figura 1.3-9 se muestran gráficamente las coordenadas de los puntos de control. El número que corresponde a cada uno muestra el escáner y el puerto utilizados. El primer número hace referencia al escáner (del 1 al 3) y los dos siguientes al puerto (del 1 al 29 para el escáner 1, del 1 al 16 para el escáner 2 y del 1 al 8 para el escáner 3).

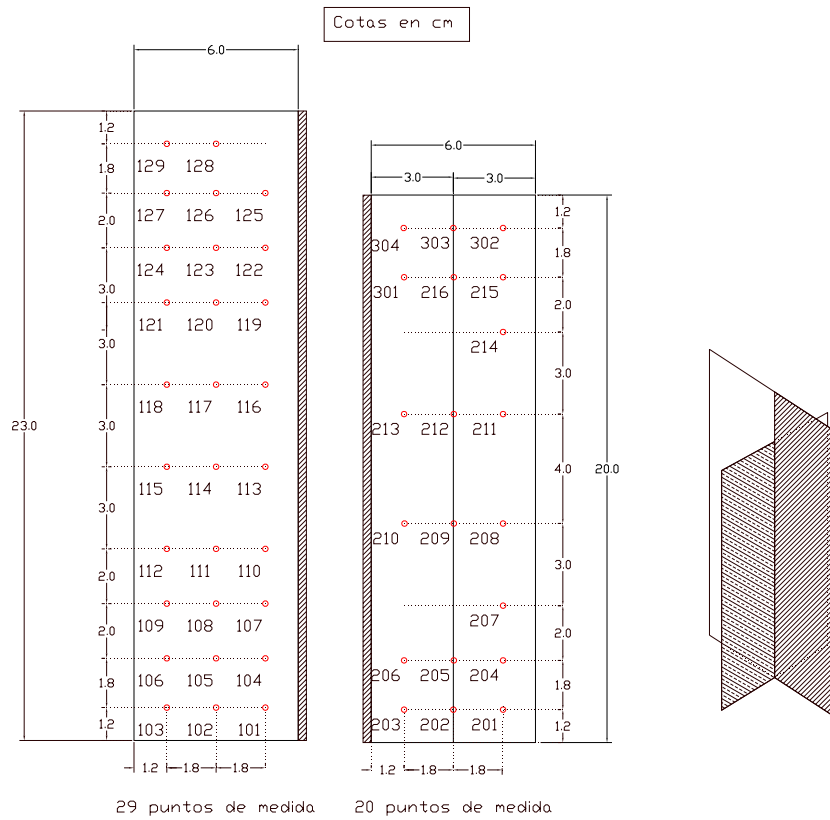
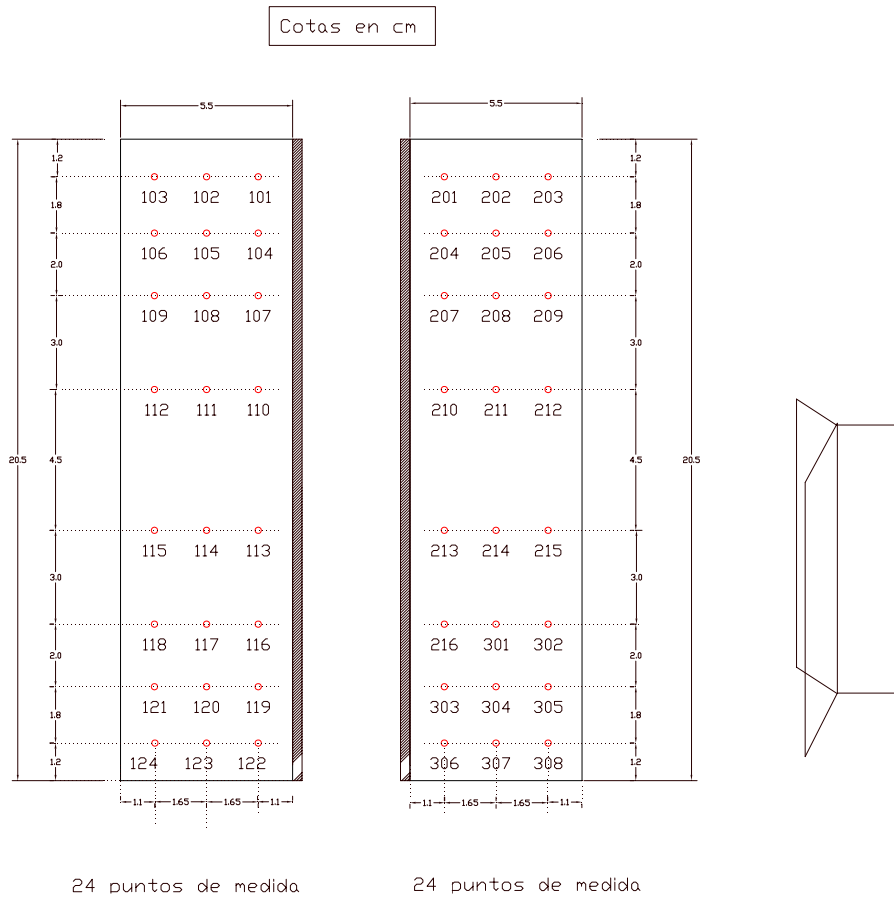


Figura 1.3-8 Esquema de los puntos de presión para P1F1



**Figura 1.3-9 Esquema de los puntos de presión para P2F1**

A continuación se exponen las gráficas con las presiones medias obtenidas en los ensayos desarrollados en el túnel de viento. Los valores que se muestran son valores de coeficientes de presión (y por tanto adimensionales) expresados como:

$$C_{pi} = \frac{P_i}{P_d} \tag{1.43}$$

dónde:

·  $C_{pi}$  : Coeficiente de presión en el punto  $i$

- $p_i$  : Presión media medida en el punto  $i$ , referenciada a la presión estática
- $p_d$  : Presión dinámica media

La presión  $p_i$  es la media de las presiones instantáneas obtenidas en los ensayos en el punto  $i$ , referenciadas con respecto a la presión estática instantánea, medida mediante tubo de Pitot. La media se calcula con los 20.000 datos obtenidos durante cada periodo de dos minutos.

A la misma frecuencia, mediante un tubo de Pitot, medimos las presiones total y estática del flujo. Resultando la presión dinámica la diferencia entre ambos valores.

$$p_d = p_T - p_e \quad (1.44)$$

- $p_T$  : Presión total

Éste último valor permite obtener la velocidad de viento existente en el túnel, siendo:

$$p_d = \frac{1}{2} \rho V^2, \quad (1.45)$$

dónde:

$\rho$  : Densidad del aire

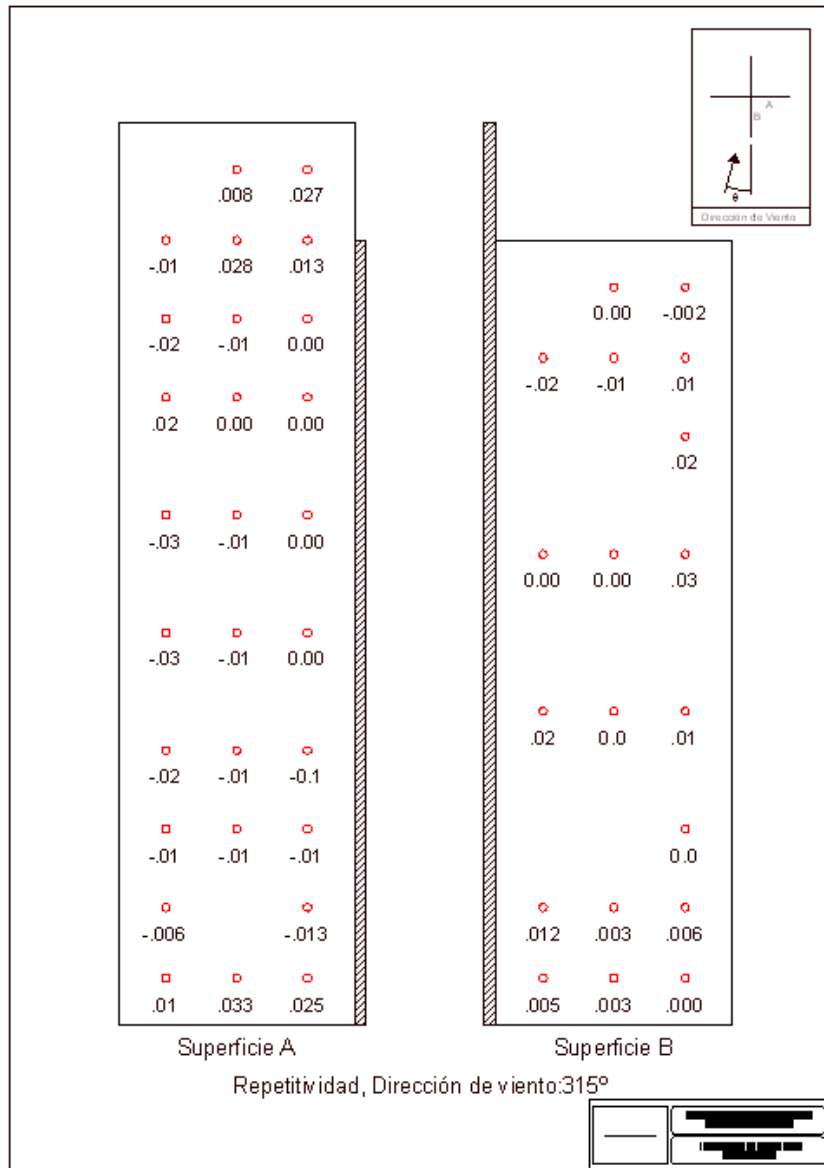
$V$  : Velocidad del viento

Con estos valores es posible realizar una interpolación que muestre de manera gráfica el campo de presión existente en cada una de las caras. Esto se ha realizado mediante un modelo Krigging lineal de pendiente 1.

Para cada dirección del viento es necesario conocer las presiones existentes en todas las caras (8 caras en P1 y 6 caras en P2), dado que sólo dos de ellas presentan instrumentación, para cada gráfica mostrada han sido necesarios 4 o 3 ensayos (P1 y P2, respectivamente).

Los resultados obtenidos se muestran en el Apéndice A.

De cara a contrastar la repetitividad de los resultados obtenidos se realizó un ensayo por duplicado, el que corresponde al P1, con un ángulo de viento de 315° (que sirve para contrastar dos de las caras del lado derecho de los coeficientes de presión para el ángulo de 45°). Las diferencias observadas fueron considerablemente bajas, tal y como se muestran en la Figura 1.3-10:



**Figura 1.3-10 Diferencias de presiones en dos ensayos idénticos realizados en fechas diferentes**



#### 1.3.3.4 Fuerzas

Podemos suponer que cada punto de control en el que se han obtenido presiones es representativo de un área tributaria. Esto permite traducir las presiones obtenidas en fuerzas ejercidas sobre cada cara. Considerando todas estas fuerzas podemos calcular la resultante sobre el cuerpo, así como los momentos asociados a ellas.

La adimensionalización de los datos se realiza con respecto al área referencia, considerada como la media de las dos caras analizadas para el prototipo 1 (129cm<sup>2</sup>) y el área de la cara única para el prototipo 2 (112cm<sup>2</sup>). De esta manera la fuerza ejercida sobre cada cara se calcula conforme a la siguiente formulación:

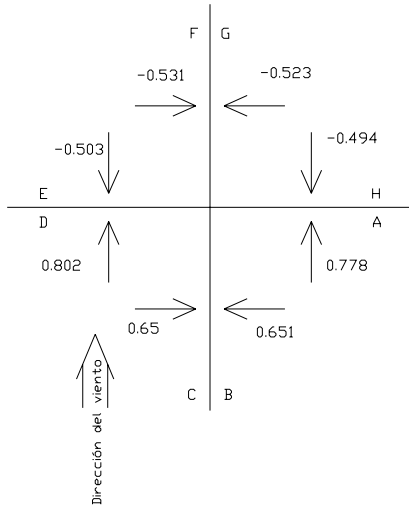
$$F^a = \sum_i c_{pi} \frac{A_i}{A_r} \quad (1.46)$$

donde:

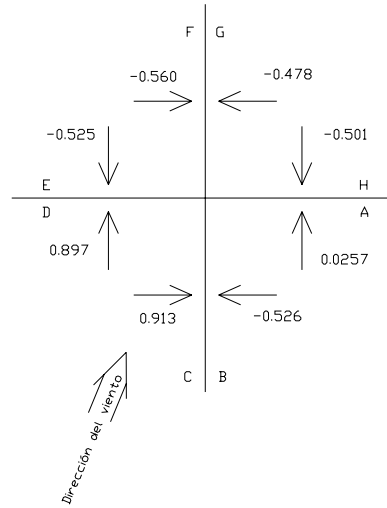
- $F^a$  : Fuerza adimensionalizada ejercida sobre una cara
- $c_{pi}$ : Coeficiente de presión del punto  $i$
- $A_i$  : Área tributaria del punto  $i$
- $A_r$  : Área referencia

Lo que ofrece los resultados que aparecen en las Figuras 1.3-11 a 1.3-13 :

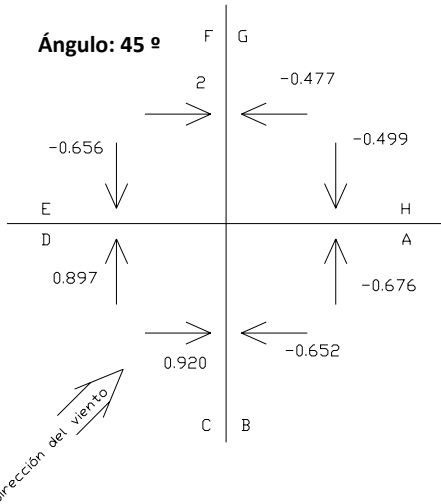
Ángulo: 0°



Ángulo: 22.5°



Ángulo: 45°



Ángulo: 67.5°

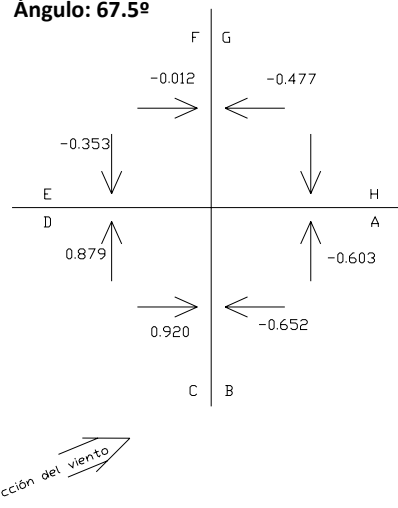


Figura 1.3-11 Fuerzas medidas sobre cada cara; P1F1; Direcciones de viento comprendidas entre 0° y 67.5°

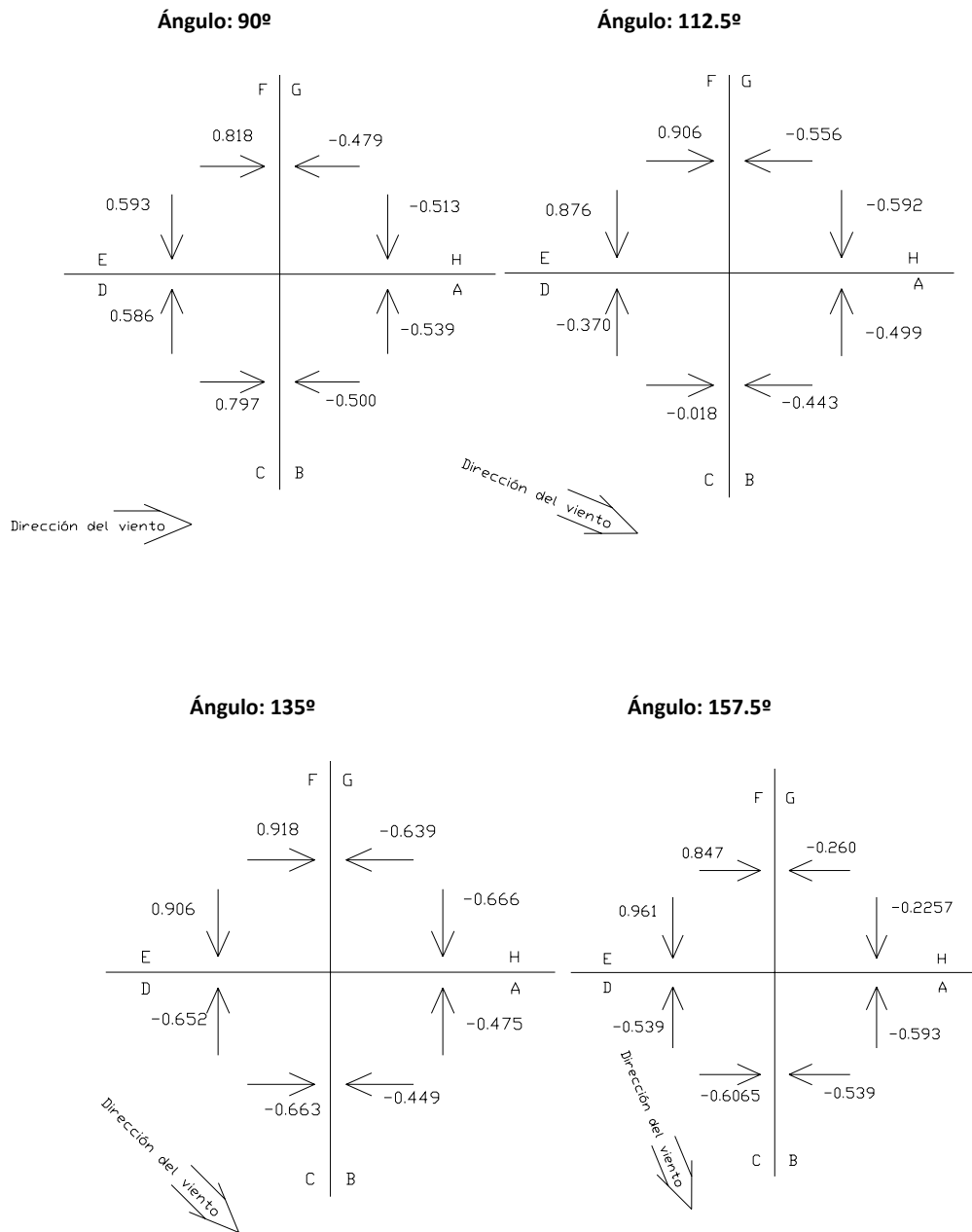
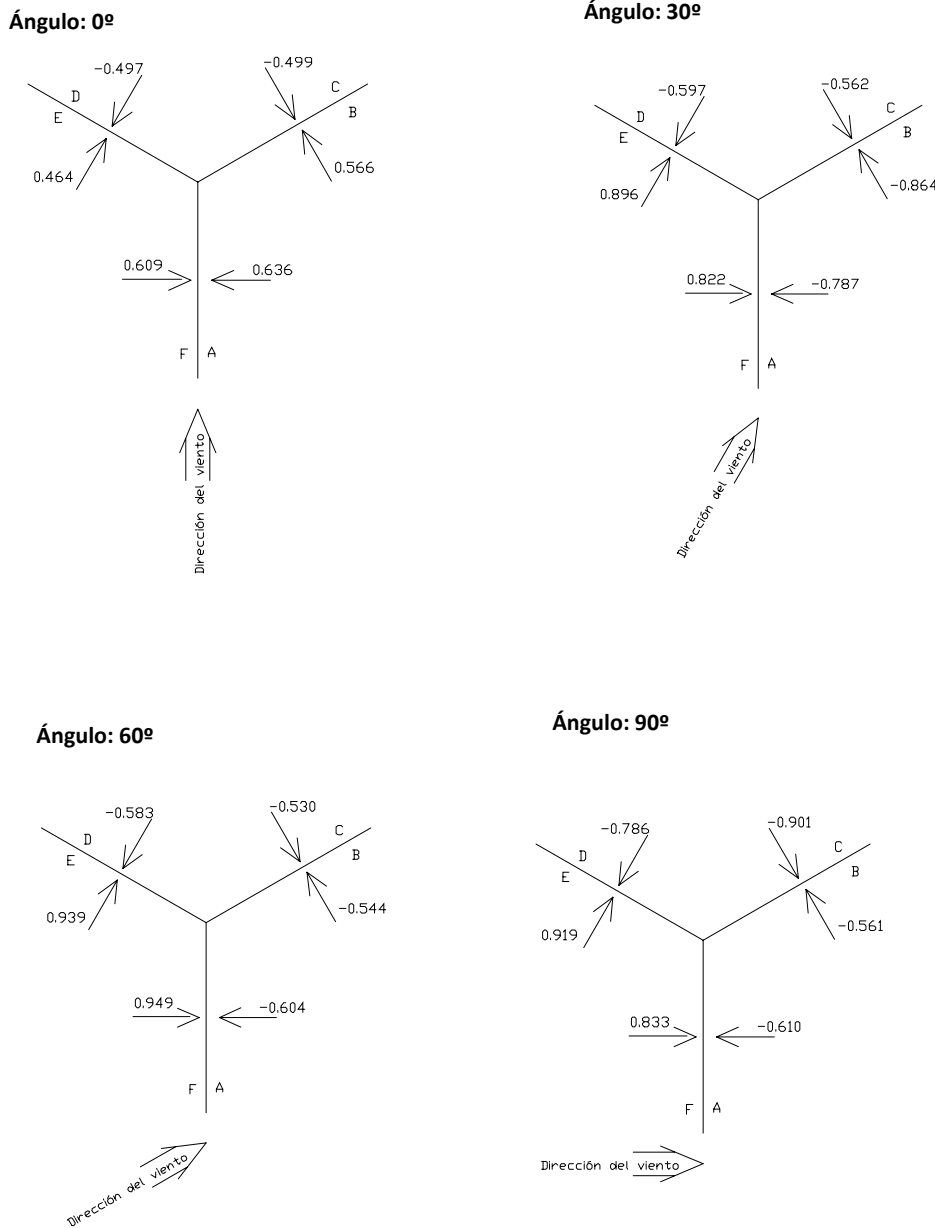


Figura 1.3-12 Fuerzas medidas sobre cada cara; P1F1; Direcciones de viento comprendidas entre 90° y 157.5°



**Figura 1.3-13 Fuerzas medidas sobre cada cara; P2F1; Direcciones de viento comprendidas entre 0° y 67.5°**

La composición de estas fuerzas permite obtener la fuerza adimensionalizada resultante sobre cada uno de los prototipos para una dirección de viento concreta. En las tablas 1.3-3 y 1.3-4 se muestran los resultados. Los ejes coordenados están fijados al cuerpo, siendo el eje Y' paralelo al viento cuando este incide con un ángulo de 0° y el X' paralelo al

viento para una dirección de 90°. El ángulo  $\varpi$  que se muestra mide la dirección de la resultante y está expresado del mismo modo que la dirección del viento. La fuerza  $F^a$  es la resultante de  $F_x^a$  y  $F_y^a$ .

	0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5
$F_x^a$	0.009	1.087	1.377	1.908	2.594	1.887	1.343	-1.745
$F_y^a$	2.577	1.949	1.376	1.148	-0.033	-1.153	-1.367	1.263
$F^a$	2.577	2.231	1.947	2.227	2.594	2.211	1.916	2.154
$\varpi$	0.2	29.15	45.02	58.97	90.729	121.429	135.507	144.104
$\Delta\varpi$	0.2	6.653	0.02	-8.53	0.729	8.929	0.507	-13.396

Tabla 1.3-3 Fuerzas totales sobre el P1

	0	30	60	90
$F_x^a$	-0.406	2.237	2.082	1.676
$F_y^a$	1.585	0.703	0.962	1.435
$F^a$	1.636	2.345	2.293	2.2061
$\theta$	-14.38	72.546	65.191	49.435
$\Delta\theta$	14.38	42.546	5.191	-40.57

Tabla 1.3-4 Fuerzas totales sobre el P2

Es interesante analizar como la aerodinámica de cada cuerpo modifica la resultante de la fuerza. El prototipo 1 modifica menos el flujo y por tanto, la resultante de su acción se desvía poco de la dirección del viento. El prototipo 2, por contra, parece generar unas mayores modificaciones en el flujo, lo que fuerza la desviación del flujo medio.

### 1.3.4 Ensayos con medidas simultáneas en todas las caras

En segunda fase experimental se miden, simultáneamente, las presiones en todas las caras de los prototipos. En esta segunda fase experimental la nomenclatura, como se enunció en la Tabla 1.3-1, es P1F2 para los datos obtenidos en el prototipo 1 y P2F2 para el prototipo 2.

En esta fase del estudio se busca conocer el desarrollo en el tiempo de las fuerzas y momentos sobre cada uno de los dos prototipos. Para ello es

necesario que todas las caras del cuerpo contengan sensores de presión. Así, en vez de ceñirnos a un análisis de fuerzas medias, podremos analizar las variaciones temporales. Sin embargo, esta necesidad de instrumentación limita, necesariamente, el número de puntos de control que se puede asignar a cada cara.

Los datos obtenidos en la fase anterior permiten conocer los mapas de presiones en las caras de cada prototipo para diferentes orientaciones del viento incidente. Con este conocimiento se pueden determinar zonas con patrones homogéneos que pueden ser representados por un único punto. En consecuencia podemos caracterizar el comportamiento del viento en cada cara con un menor número de puntos de control asignados a cada una sin limitar, excesivamente, la calidad de las mediciones.

Siempre teniendo en cuenta la heterogeneidad de las distribuciones de las presiones que dependen fuertemente de la orientación del viento, el análisis de los patrones descubiertos muestran unos fuertes gradientes de presiones en la zona inferior y superior de cada cara. Las áreas centrales, sin embargo demuestran una mayor homogeneidad. También, aunque de menor magnitud, existen gradientes en horizontal. Teniendo en cuenta ambos factores se ha optado por las distribuciones que muestran las figuras 1.3-14 y 1.3-15:

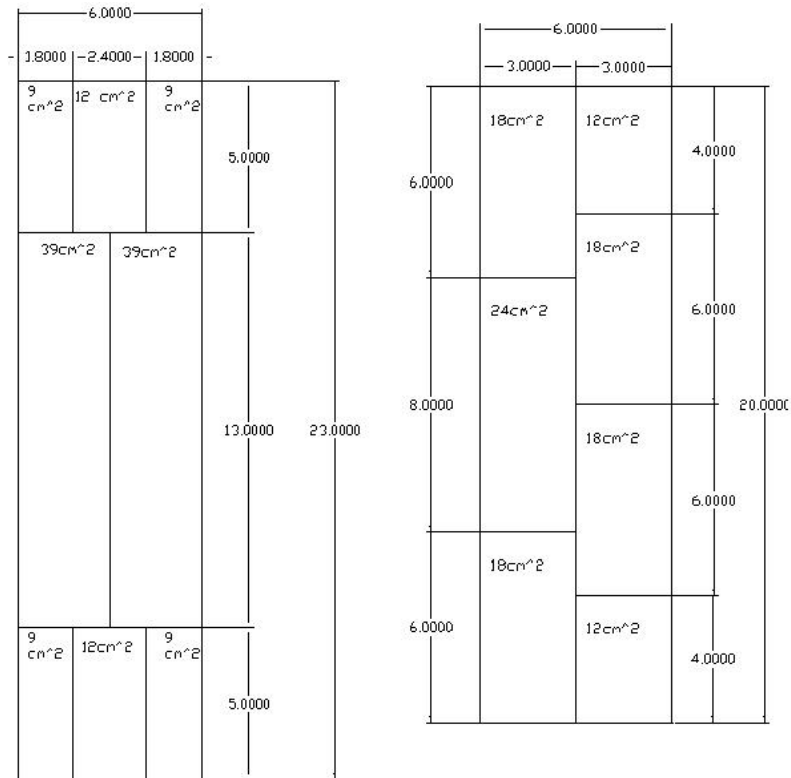
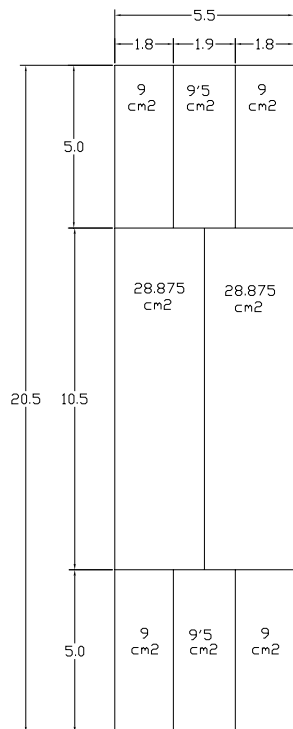


Figura 1.3-14 Áreas de control; P1F2



**Figura 1.3-15 Áreas de control, P2F2**

Cada una de estas áreas está representada por un punto de control, representativo de las presiones ejercidas sobre ella. Para cada prototipo los puntos escogidos se muestran en las figuras 1.3-16 y 1.3-17, en las que la nomenclatura sigue lo regido en el apartado 1.3.3.



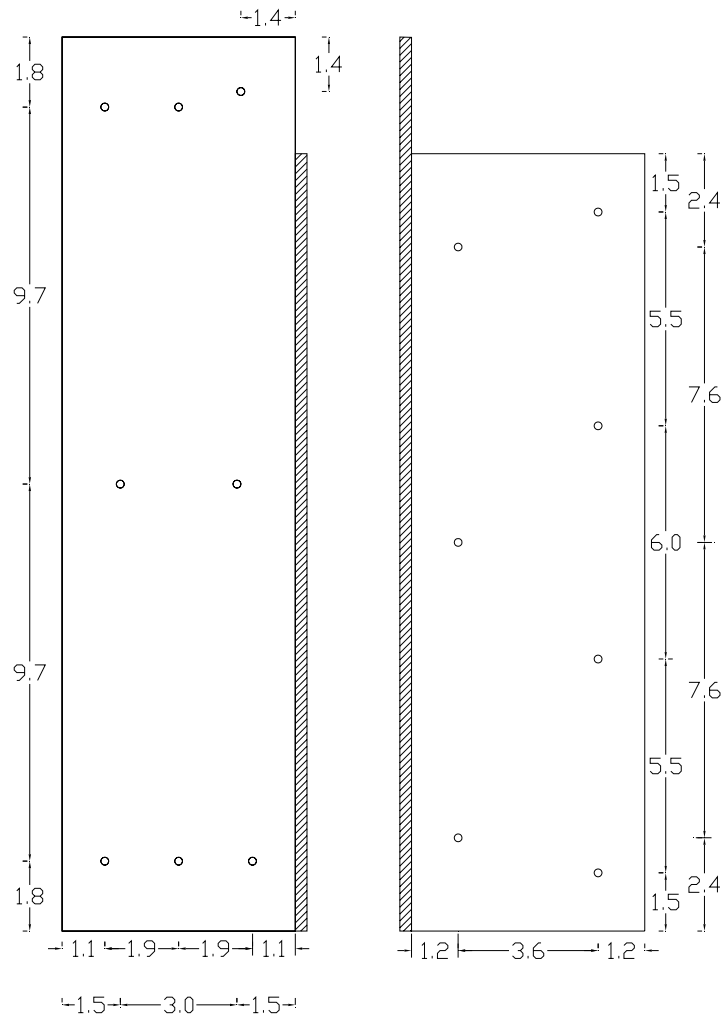


Figura 1.3-16 Puntos de control, P1F2

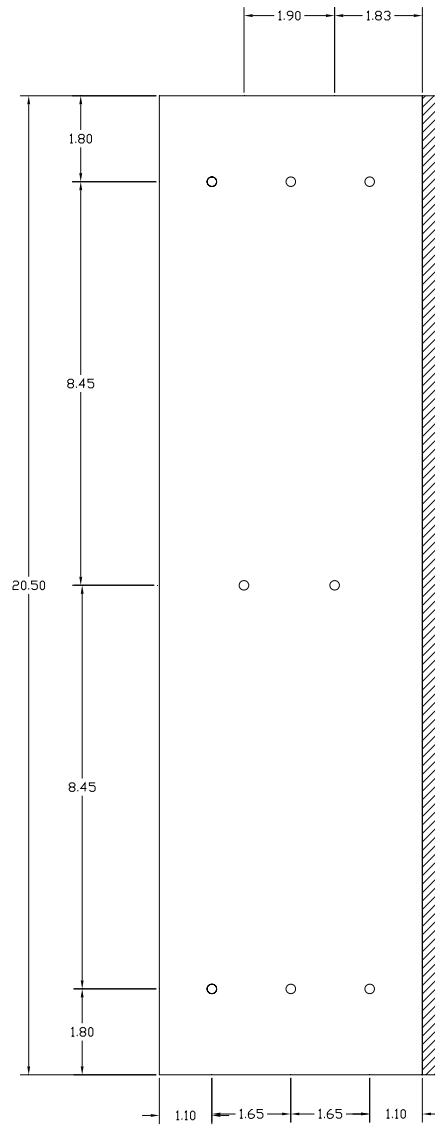


Figura 1.3-17 Puntos de control P2F2

Se puede observar en la figura 1.3-16 como el punto de control situado en la parte superior derecha se encuentra parcialmente desviado de su simétrico superior izquierdo. Esto se debe al necesario espaciamiento para permitir la salida de los tubos de presión, desde el modelo hasta el sensor.

De cara a contrastar la bondad de la elección realizada en términos de punto de control/áreas asignadas, en el apartado 1.3.4.4 se realizará una comparación entre los resultados obtenidos en ambas fases de los ensayos.

#### 1.3.4.1 Condiciones ambientales de los ensayos

Los ensayos han sido realizados en el interior del túnel de viento I del CEAMA (Centro Andaluz de Medio Ambiente). Las mediciones de presiones se han realizado sobre sendos modelos a escala 1:1 de los dos prototipos analizados.

El túnel ha funcionado con un régimen de giro constante, a 170 r.p.m. En estas condiciones, variaciones en las condiciones ambientales tales como temperatura, humedad del aire... etc. provocan pequeñas perturbaciones de la velocidad entre unos ensayos y otros.

En los ensayos del prototipo P1, la temperatura ha sido de 13.6 °C, con una humedad relativa del 44%. Las velocidades medias obtenidas durante estos ensayos han oscilado entre 6.61 m/s y 6.67 m/s. Las intensidades de turbulencia media obtenidas varían entre 0.037 y 0.039.

En el prototipo 2 la temperatura ha sido de 16.3 °C, con una humedad relativa del 44%. Las velocidades medias obtenidas en los ensayos del prototipo 2 ha oscilado entre 6.49 m/s y 6.64 m/s. La intensidad de turbulencia durante estos ensayos ha variado entre 0.050 y 0.052.

Estos datos se resumen en la tabla 1.3-5.

PROTOTIPO	T <sup>a</sup> (°C)	Humedad %	V <sub>max</sub> (m/s)	V <sub>min</sub> (m/s)	Iu <sub>max</sub> (adim)	Iu <sub>min</sub> (adim)
1	13.6	44	6.67	6.61	0.039	0.037
2	16.3	44	6.64	6.49	0.052	0.050

Tabla 1.3-5 Resumen de las condiciones ambientales durante los ensayos

#### *1.3.4.2 Instrumentación*

Las presiones se han adquirido mediante tres escáneres de presión. Uno de ellos de 32 puertos (ESP-32HD) y otros dos de 16 puertos (ESP-16HD). Se utiliza el sistema de adquisición de presiones de Pressure Systems, modelo 8400.

La presión de referencia para las mediciones es la presión estática del flujo, adquirida mediante tubo de Pitot.

La velocidad del flujo se recoge con un tubo de Pitot que mide las presiones estática y total del flujo, cuyo eje se sitúa a 660mm de altura sobre la solera del túnel para los ensayos del prototipo 1 y a 740mm para los ensayos del prototipo 2. Las presiones obtenidas con él se trasladan a uno de los escáneres de presión y a un transductor SETRA.

Para cada una de las direcciones analizadas se ha realizado una nueva calibración que asegure la precisión de las medidas realizadas.

En cada uno de los ensayos se ha adquirido un dato cada 6ms, durante un periodo de 2 minutos, lo que conforma una frecuencia de muestreo de 167Hz. Esto supone 20.000 datos para cada muestra en cada punto de control. La adquisición de los datos en el tubo de pitot sigue idéntico esquema.

#### *1.3.4.3 Mediciones de presión*

Las mediciones de presión han sido realizadas con un patrón similar al de los anteriores ensayos. Las condiciones de simetría son las mismas que anteriormente, por lo que de nuevo basta con el análisis de las presiones en un arco de 180° para el P1 y de 120° para el P2.

La nomenclatura cada punto de control haciendo referencia al escáner/puerto es la misma que anteriormente, siendo la distribución la mostrada en las figuras 1.3-16 y 1.3-17.

Los valores que se muestran siguen el mismo tratamiento que en la primera tanda de resultados, los valores mostrados siguen la formulación (1.43). La obtención de la presión dinámica se realiza mediante tubo de Pitot

conforme a (1.44), valor con el que se obtiene, con (1.45), la presión dinámica.

Con estos datos se ha realizado, de nuevo, una interpolación Krigging lineal de pendiente 1. Con ella se puede crear un mapa de las presiones obtenidas que mostramos, en detalle en el apéndice B.

1.3.4.4 Fuerzas

Con las presiones obtenidas es posible, de nuevo, realizar cálculos que permitan determinar las fuerzas que el viento está ejerciendo sobre cada una de las caras. Utilizando, de nuevo, la formulación de (1.46).

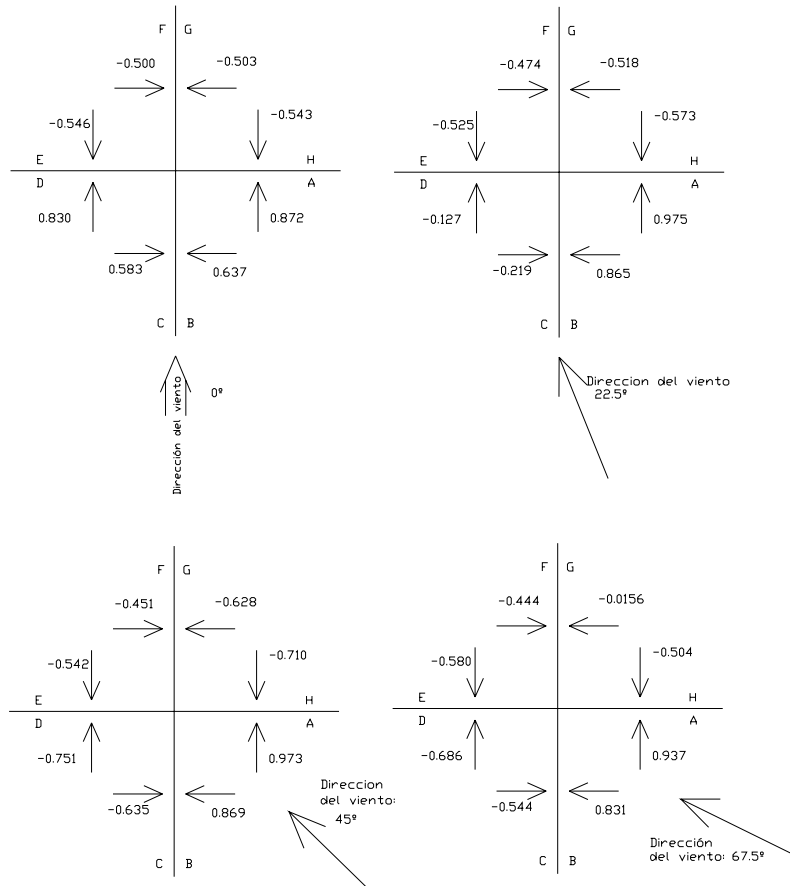
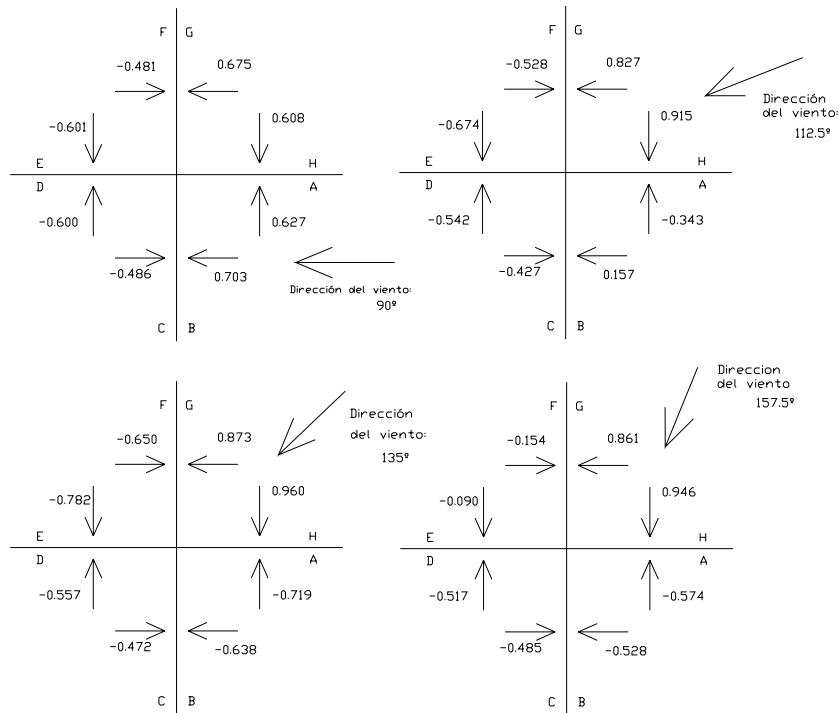
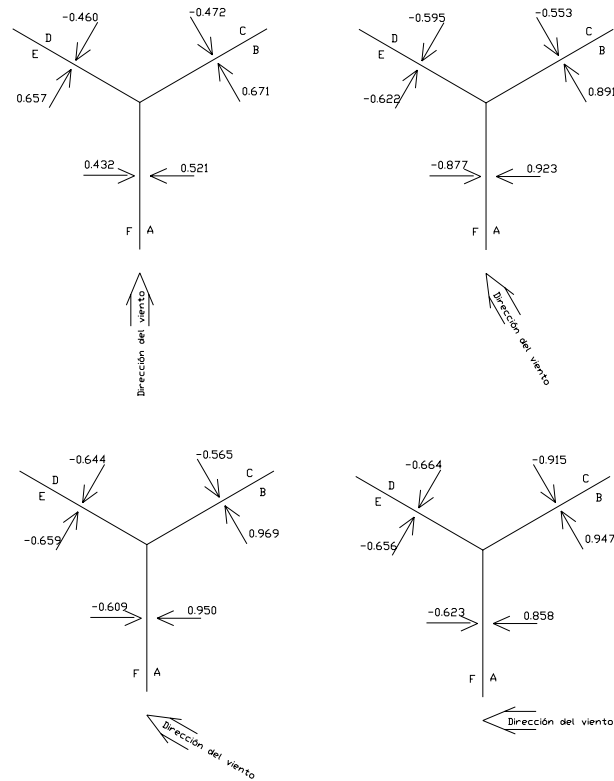


Figura 1.3-18 Fuerzas medidas sobre cada cara; P1F2; Direcciones de viento comprendidas entre 0° y 67.5°



**Figura 1.3-19 Fuerzas medidas sobre cada cara; P1F2; Direcciones de viento comprendidas entre 90° y 157.5°**



**Figura 1.3-20 Fuerzas medidas sobre cada cara; P2F2**

A partir de estas mediciones podemos hacer un análisis de la bondad de la decisión tomada en términos de reparto del modelo en los diferentes puntos de control. Para ello realizamos la comparación de la resultante hallada en cada una de las caras de los dos modelos de cada prototipo. Los resultados se ofrecen en la tabla 1.3-6 :

PROTOTIPO 1			CARA							
Ángulo		m/s	A	B	C	D	E	F	G	H
0	Fase 1	6.701	0.651	0.65	0.802	-0.503	-0.531	-0.523	-0.494	0.778
	Fase 2	6.663	0.637	0.583	0.83	-0.546	-0.5	-0.503	-0.543	0.872
	Diferencia	-0.038	-0.014	-0.067	0.028	-0.043	0.031	0.02	-0.049	0.094
	Df. relativa	0.0057	0.023	0.109	0.045	0.07	0.05	0.032	0.079	0.152
22.5	Fase 1	6.682	0.897	0.913	-0.256	0.026	-0.501	-0.478	-0.56	-0.525
	Fase 2	6.635	0.975	0.865	-0.219	-0.127	-0.525	-0.474	-0.518	-0.573
	Diferencia	-0.047	0.078	-0.048	0.037	-0.153	-0.024	0.004	0.042	-0.048
	Df. relativa	0.0071	0.15	0.092	0.071	0.294	0.046	0.008	0.081	0.092
45	Fase 1	6.670	0.897	0.92	-0.652	-0.676	-0.499	-0.477	-0.672	-0.656
	Fase 2	6.651	0.973	0.869	-0.635	-0.751	-0.542	-0.451	-0.628	-0.71
	Diferencia	-0.019	0.076	-0.051	0.017	-0.075	-0.043	0.026	0.044	-0.054
	Df. relativa	0.0029	0.112	0.075	0.025	0.11	0.063	0.038	0.065	0.079
67.5	Fase 1	6.682	0.879	0.902	-0.568	-0.603	-0.519	-0.45	-0.012	-0.353
	Fase 2	6.614	0.937	0.831	-0.544	-0.686	-0.58	-0.444	-0.016	-0.504
	Diferencia	-0.068	0.058	-0.071	0.024	-0.083	-0.061	0.006	-0.004	-0.151
	Df. relativa	0.0102	0.108	0.133	0.045	0.155	0.114	0.011	0.007	0.282
90	Fase 1	6.665	0.586	0.797	-0.5	-0.539	-0.513	-0.479	0.818	0.593
	Fase 2	6.628	0.627	0.703	-0.486	-0.6	-0.601	-0.481	0.675	0.608
	Diferencia	-0.037	0.041	-0.094	0.014	-0.061	-0.088	-0.002	-0.143	0.015
	Df. relativa	0.0056	0.068	0.156	0.023	0.101	0.146	0.003	0.237	0.025
112.5	Fase 1	6.710	-0.37	-0.018	-0.443	-0.499	-0.592	-0.556	0.906	0.876
	Fase 2	6.671	-0.343	0.157	-0.427	-0.542	-0.674	-0.528	0.827	0.915
	Diferencia	-0.039	0.027	0.175	0.016	-0.043	-0.082	0.028	-0.079	0.039
	Df. relativa	0.0058	0.051	0.329	0.03	0.081	0.154	0.053	0.148	0.073
135	Fase 1	6.689	-0.697	-0.617	-0.418	-0.508	-0.712	-0.594	0.854	0.969
	Fase 2	6.626	-0.719	-0.638	-0.472	-0.557	-0.782	-0.65	0.873	0.96
	Diferencia	-0.063	-0.022	-0.021	-0.054	-0.049	-0.07	-0.056	0.019	-0.009
	Df. relativa	0.0095	0.033	0.031	0.08	0.073	0.104	0.083	0.028	0.013
157.5	Fase 1	6.665	-0.593	-0.539	-0.607	-0.539	-0.226	-0.26	0.847	0.961
	Fase 2	6.623	-0.574	-0.528	-0.485	-0.517	-0.09	-0.154	0.861	0.946
	Diferencia	-0.042	0.019	0.011	0.122	0.022	0.136	0.106	0.014	-0.015
	Df. relativa	0.0063	0.033	0.019	0.213	0.038	0.238	0.185	0.024	0.026

Tabla 1.3-6 Comparaciones de valores obtenidos entre P1F1 y P1F2

La diferencia relativa ha sido calculada con respecto a una presión característica de la generada por el viento para cada cara. Esta ha sido considerada la media de las de las presiones en las ocho caras para los dos modelos analizados. Es decir, la media de los 16 valores obtenidos.

La media de estas diferencias relativas, para cada dirección del viento, figura en la tabla 1.3-7:



Ángulo	Diferencia relativa media
0	0.070
22.5	0.104
45	0.071
67.5	0.107
90	0.095
112.5	0.115
135	0.056
157.5	0.097
<b>MEDIA</b>	0.089

Tabla 1.3-7 Diferencia relativa media entre las fuerzas obtenidas en P1F1 y P1F2

Para el prototipo 2, los resultados obtenidos son los que muestra la tabla 1.3-8:

PROTOTIPO 2		CARA						
Ángulo		m/s	A	B	C	D	E	F
0	Fase 1	6.619	0.464	0.609	-0.499	-0.497	0.636	0.566
	Fase 2	6.631	0.521	0.671	-0.472	-0.46	0.657	0.432
	Diferencia	0.012	0.057	0.062	0.027	0.037	0.021	-0.134
	Dif. Relativa	0.00181	0.105	0.1147	0.05	0.0685	0.0389	0.248
30	Fase 1	6.664	0.896	0.822	-0.562	-0.597	-0.787	-0.864
	Fase 2	6.636	0.923	0.891	-0.553	-0.595	-0.622	-0.877
	Diferencia	-0.028	0.027	0.069	0.009	0.002	0.165	-0.013
	Dif. Relativa	0.00421	0.049	0.1277	0.0167	0.0037	0.3054	0.0241
60	Fase 1	6.634	0.939	0.949	-0.53	-0.583	-0.604	-0.544
	Fase 2	6.491	0.95	0.969	-0.565	-0.644	-0.659	-0.609
	Diferencia	-0.143	0.011	0.02	-0.035	-0.061	-0.055	-0.065
	Dif. Relativa	0.02179	0.020	0.037	0.0648	0.1129	0.1018	0.1203
90	Fase 1	6.648	0.919	0.833	-0.901	-0.786	-0.61	-0.561
	Fase 2	6.528	0.858	0.947	-0.915	-0.664	-0.656	-0.623
	Diferencia	-0.12	-0.061	0.114	-0.014	0.122	-0.046	-0.062
	Dif. Relativa	0.01821	0.1128933	0.211	0.0259	0.2258	0.0851	0.1147

Tabla 1.3-8 Comparaciones de valores obtenidos entre P2F1 y P2F2

La diferencia relativa media, para cada una de las direcciones analizadas es la de la tabla siguiente:

Ángulo	Diferencia relativa media
0	0.104
30	0.088
60	0.076
90	0.129
<b>MEDIA</b>	0.099

**Tabla 1.3-9 Diferencia relativa media entre las fuerzas obtenidas en P2F1 y P2F2**

Como vemos, la diferencia media entre los dos modelos ha sido menor del 9% para el prototipo1 y menor del 10% para el prototipo2. Estas diferencias en parte vienen provocadas por las variaciones inherentes al hecho de ser ensayos realizados en diferentes días y con diferentes condiciones atmosféricas.

De cara a analizar estas variaciones vamos a realizar el mismo tratamiento al ensayo que, en la fase 1, fue repetido para contrastar la capacidad de repetitividad de los muestreos. Analizando las fuerzas que se obtuvieron en cada uno de los muestreos obtenemos la siguiente tabla

Ángulo	Diferencia relativa media
<b>Ensayo1</b>	0.858
<b>Ensayo 2</b>	0.888
<b>Diferencia</b>	0.0298
<b>Dif. relativa</b>	0.0397

**Tabla 1.3-10 Diferencia de fuerzas en dos ensayos idénticos**

Como vemos la diferencia relativa entre dos ensayos idénticos es del 4%.

Los resultados obtenidos, por tanto, validan el sistema empleado y muestran que la elección de los puntos de control ha sido correcta. El descenso de puntos de muestreo (se ha reducido en un 72.4% y un 65% para el P1 y 66.7% para el P2) no ha resultado en una bajada importante de la calidad de los resultados obtenidos.

A continuación vamos a realizar el análisis de la resultante total de la fuerza resultante del viento sobre el cuerpo. Se utilizarán unos ejes coordenados idénticos a los descritos en el apartado 1.3.3.4.

En las tablas 1.3-11 y 1.3-12 se muestran las componentes de  $F^a$  (a de adimensionalizada) en  $X'$  e  $Y'$  de la fuerza del viento, el valor de su módulo

$F^a$ , así como el ángulo que forma con el eje Y (denominado  $\theta$ ), y la desviación de éste con respecto a la dirección del viento:  $\Delta\theta$ .

	<b>0</b>	<b>22.5</b>	<b>45</b>	<b>67.5</b>	<b>90</b>	<b>112.5</b>	<b>135</b>	<b>157.5</b>
$F_x^a$	0.052	1.041	1.326	1.805	2.345	1.941	1.356	0.973
$F_y^a$	2.791	1.944	1.476	1.337	0.198	-1.125	-1.456	-1.948
$F^a$	2.792	2.205	1.984	2.246	2.354	2.243	1.989	2.177
$\theta$	1.07	28.14	41.94	53.48	89.52	120.11	137.03	153.47
$\Delta\theta$	1.07	5.64	-3.06	-14.18	-0.48	7.61	2.03	-4.03

**Tabla 1.3-11 Fuerzas totales sobre el P1**

	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>90</b>
$F_x^a$	0.116	2.537	2.333	2.407
$F_y^a$	1.957	1.228	1.315	1.619
$F^a$	1.961	2.819	2.678	2.901
$\theta$	2.97	64.17	60.60	56.08
$\Delta\theta$	2.97	34.17	0.60	-33.92

**Tabla 1.3-12 Fuerzas sobre el prototipo 2**

Como se observa, la geometría del prototipo de cuatro caras condiciona que la fuerza resultante tenga una dirección muy semejante a la del viento incidente. Sin embargo, la geometría del P2 hace que las fuerzas, para determinadas direcciones de viento, tiendan a desviarse de ésta, tendiendo a una dirección paralela a una de las tres aspas del cuerpo.

Es interesante, también, averiguar la fuerza ejercida por el viento en su propia dirección, así como en la dirección perpendicular. Para ello se hace necesario recurrir a una composición vectorial de los valores obtenidos. Si denominamos X a la dirección del viento e Y a la dirección perpendicular, tal y como muestra la figura 1.3-21 obtenemos:

$$\begin{aligned}
 F_x^a &= -F_x^a \cdot \cos(\beta) + F_y^a \cdot \text{sen}(\beta); \\
 F_y^a &= F_x^a \cdot \text{sen}(\beta) + F_y^a \cdot \cos(\beta)
 \end{aligned}
 \tag{1.47}$$

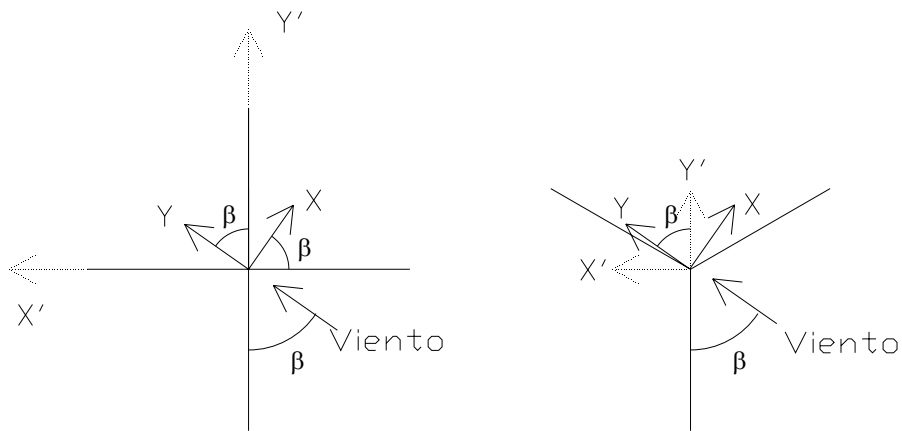


Figura 1.3-21 Cambio de ejes coordenados

Lo que ofrece los siguientes resultados:

	0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5
$F_x^a$	-0.052	-0.218	0.106	0.544	0.198	-0.297	-0.071	0.153
$F_y^a$	2.791	2.194	1.981	2.179	2.345	2.224	1.988	2.172
$F^a$	2.791	2.205	1.984	2.246	2.353	2.243	1.990	2.177

Tabla 1.3-13 Fuerzas totales sobre el P1

	0	30	60	90
$F_x^a$	-0.116	-1.583	-0.028	1.619
$F_y^a$	1.957	2.332	2.677	2.407
$F^a$	1.961	2.819	2.678	2.901

Tabla 1.3-14 Fuerzas sobre el prototipo 2

1.3.4.5 Momentos

La complicada geometría de los enganches que presenta cada uno de los prototipos condiciona el reparto de los momentos a lo largo del sistema de unión. De cara a sintetizar el efecto del viento, se han calculado los momentos sobre una única rótula situada a una distancia variable de la cúspide del prototipo.

Sobre esta rótula, se muestran los momentos medios provocados por el viento en tres ejes perpendiculares entre sí, denominados X', Y' y Z, tal y como muestra la figura **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (siendo el eje Z vertical y perpendicular a los otros dos). Los momentos en X' e Y' se muestran supuesta la rótula en el extremo superior del prototipo. Se añade además el incremento que sufriría dicho momento cada 10 cm que dicha rótula ascienda. Todos los valores mostrados se encuentran adimensionalizados por la presión dinámica del viento, un área característica y una longitud característica.

Los resultados son los siguientes:

<b>Ángulo = 0º</b>			<b>Ángulo = 22.5º</b>		
	valor 0	Δ Cada 10 cm		valor 0	Δ Cada 10 cm
$M_{x'}^a$	-2.551	-2.233	$M_{x'}^a$	-1.682	-1.556
$M_{y'}^a$	0.050	0.041	$M_{y'}^a$	1.063	0.831
$M_z^a$	-0.007	0	$M_z^a$	-0.023	0
<b>Ángulo = 45º</b>			<b>Ángulo = 67.5º</b>		
	valor 0	Δ Cada 10 cm		valor 0	Δ Cada 10 cm
$M_{x'}^a$	-1.320	-1.181	$M_{x'}^a$	-1.185	-1.068
$M_{y'}^a$	1.338	1.061	$M_{y'}^a$	1.828	1.443
$M_z^a$	0.055	-	$M_z^a$	0.205	-
<b>Ángulo = 90º</b>			<b>Ángulo = 112.5º</b>		
	valor 0	Δ Cada 10 cm		valor 0	Δ Cada 10 cm
$M_{x'}^a$	-0.108	-0.015	$M_{x'}^a$	1.028	0.900
$M_{y'}^a$	2.405	1.876	$M_{y'}^a$	2.005	1.551
$M_z^a$	-0.002	-	$M_z^a$	-0.215	-
<b>Ángulo = 135º</b>			<b>Ángulo = 157.5º</b>		
	valor 0	Δ Cada 10 cm		valor 0	Δ Cada 10 cm
$M_{x'}^a$	1.330	1.163	$M_{x'}^a$	1.749	1.557
$M_{y'}^a$	1.389	1.085	$M_{y'}^a$	0.984	0.777
$M_z^a$	-0.057	-	$M_z^a$	0.019	-

Tabla 1.3-15 Momentos ejercidos por el viento sobre P1F2

<b>Ángulo = 0°</b>			<b>Ángulo = 30°</b>		
	<b>valor 0</b>	<b>Δ Cada 10 cm</b>		<b>valor 0</b>	<b>Δ Cada 10 cm</b>
$M_{x'}$	-1.886	-1.864	$M_{x'}$	-1.157	-1.169
$M_{y'}^a$	0.102	0.097	$M_{y'}^a$	2.443	2.414
$M_z^a$	-0.012	-	$M_z^a$	-0.119	-

<b>Ángulo = 60°</b>			<b>Ángulo = 90°</b>		
	<b>valor 0</b>	<b>Δ Cada 10 cm</b>		<b>valor 0</b>	<b>Δ Cada 10 cm</b>
$M_{x'}$	-1.264	-1.252	$M_{x'}$	-1.600	-1.542
$M_{y'}^a$	2.240	2.222	$M_{y'}^a$	2.295	2.293
$M_z^a$	-0.004	-	$M_z^a$	0.129	-

Tabla 1.3-16 Momentos ejercidos por el viento sobre P1F2

Del mismo modo que anteriormente, se pueden componer estos valores para hallar los momentos en los ejes X e Y de la figura 1.3-21. En este caso damos valores para  $M_x$  y  $M_y$  supuestos ambos ejes a una distancia de 12 cm de los prototipos. Los resultados son los siguientes:

	<b>0</b>	<b>22.5</b>	<b>45</b>	<b>67.5</b>	<b>90</b>	<b>112.5</b>	<b>135</b>	<b>157.5</b>
$M_x^a$	5.231	4.067	3.782	4.233	4.656	4.379	3.830	4.075
$M_y^a$	0.099	0.545	-0.089	-0.917	-0.126	0.468	0.024	-0.386

Tabla 1.3-17 Momentos ejercidos sobre P1F2 en los ejes X e Y

	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>90</b>
$M_x^a$	4.123	4.887	5.632	5.047
$M_y^a$	0.218	3.345	0.057	-3.450

Tabla 1.3-18 Momentos ejercidos sobre P1F2 en los ejes X e Y

### 1.3.4.6 Cálculos espectrales

A partir de los datos de fuerzas y momentos obtenidos puede realizarse un cálculo espectral que permita trasponer los datos, obtenidos en el dominio del tiempo, al dominio de la frecuencia.

Los resultados que hemos obtenido no han mostrado picos de energía en ninguna de las componentes analizadas. Esto implica que no aparecen fenómenos periódicos de importancia cuando el cuerpo se encuentra en reposo. En el apéndice C mostramos algunos de los resultados que hemos obtenido.

## 1.4 Dinámica de los prototipos

El objetivo del presente apartado es el de calcular el comportamiento dinámico que presentan ambos prototipos. Para ello, se calcula de manera numérica la ecuación de movimiento de ambos prototipos. Para lograrlo se adoptan una serie de simplificaciones en las condiciones de sujeción del cuerpo y en la interacción entre el cuerpo y el flujo de viento.

### 1.4.1 Modelo analítico de péndulo

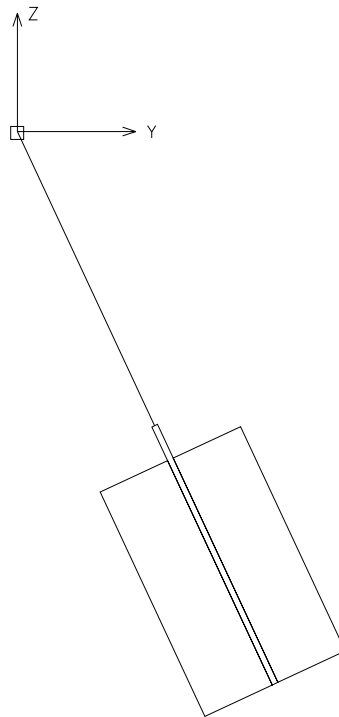
Para resolver el movimiento de ambos prototipos en las tres dimensiones se parte de las fuerzas determinadas mediante los ensayos en túnel de viento (ver apartado 1.3.4.4) y de las características físicas de los cuerpos (apartado 1.2.1). Con estos datos se determinan las ecuaciones que rigen la dinámica del cuerpo.

En términos de interacción flujo-cuerpo se adoptan las siguientes simplificaciones:

- El movimiento del cuerpo no altera el flujo de viento. Suponemos que la velocidad del cuerpo es pequeña con respecto a la del fluido y que, por tanto, éste sufre las mismas variaciones que si el cuerpo está en reposo.
- En cualquier posición el cuerpo altera el flujo exactamente igual que si estuviera en posición vertical (alteraciones que ya han sido reproducidas en el interior del túnel de viento durante los ensayos).

Además, consideramos que ambos prototipos se unen a un único punto de giro mediante una conexión infinitamente rígida e indeformable, tal y como muestra la figura 1.4-1.

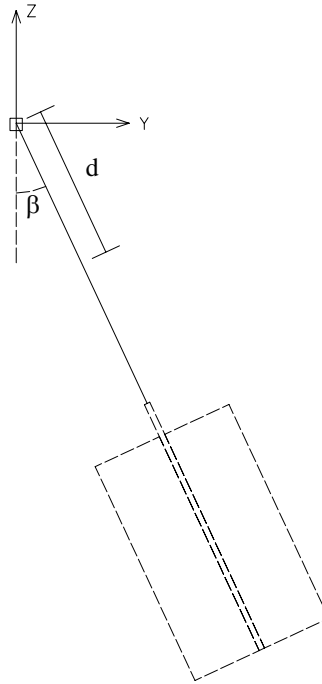




**Figura 1.4-1 Esquema de P1 con unión a punto de giro**

Los ejes coordenados que se utilizarán  $(X,Y,Z)$  se sitúan fijos en la rótula, de tal manera que el eje Z coincide con la dirección de la gravedad (y sentido contrario), el eje Y tiene la dirección y sentido del viento, siendo el eje X perpendicular a ambos.

Para el cálculo del movimiento recurrimos a coordenadas polares. Las coordenadas  $(Y,Z)$  pasan a ser  $(d,\beta)$ , tal y como muestra la figura 1.4-2:



**Figura 1.4-2 coordenadas polares**

Al ser la conexión indeformable, la variable  $d$  es constante para todos los puntos del cuerpo. Por lo tanto, el movimiento en este plano queda determinado por la variación del ángulo  $\beta$  a lo largo del tiempo. Denotaremos como  $\beta'$  y  $\beta''$  a su primera y segunda derivada temporal.

Por otro lado, la unión de los prototipos permite el giro sobre el eje  $d$ . El ángulo girado se denomina  $\gamma$  y sus derivadas temporales se denotarán como  $\gamma'$  y  $\gamma''$ .

La fuerza que el viento ejerce sobre el cuerpo, conocida gracias a los ensayos realizados en el interior del túnel de viento, es función de la dirección del viento con respecto al cuerpo, es decir del valor del ángulo  $\gamma$ .

La relación entre la fuerza ejercida y el giro provocado en el eje  $d$  es función directa de la inercia del cuerpo, según la relación:

$$\gamma'' = \frac{M_d}{I_d} \quad (1.48)$$

Siendo:

$M_d$  : Momento respecto del eje d

$I_d$  : Inercia al giro respecto del eje d

Donde  $M_d$  se extrae de los ensayos, siendo dependiente de  $\gamma$  (ver apartado 1.3.4.5), mientras que  $I_d$  coincide con el valor de  $I_z$  hallado en el apartado 1.2.1.

El movimiento pendular descrito por  $\beta$  presenta una mayor complejidad que el de  $\gamma$  por la presencia de las fuerzas másicas, que en este caso sí tienen efecto en la dinámica. Las fuerzas que intervienen en este movimiento se muestran en la figura 1.4-3.

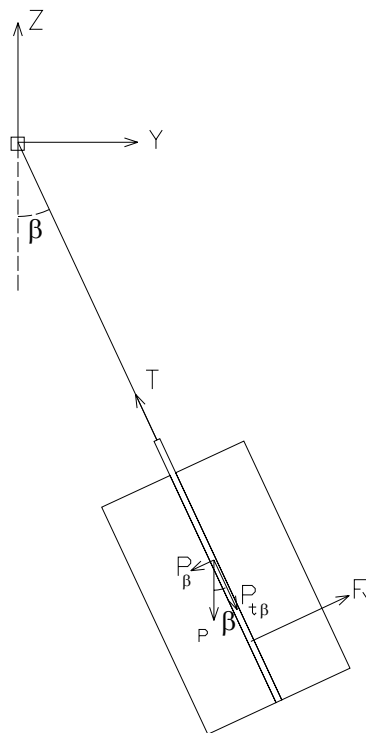


Figura 1.4-3 Cuerpo suspendido con fuerzas actuantes en el plano YZ

En esta figura aparecen tres fuerzas:

- T: Tensión del cable.
- $F_Y$ : Fuerza ejercida por el viento.
- P: Peso del cuerpo. Igual al producto de la masa por la gravedad, valor constante en todo momento.

El valor de  $F_Y$  se calcula en base a los datos obtenidos en laboratorio. Depende de la dirección del viento con respecto del cuerpo, es decir de  $\gamma$ . Los valores obtenidos en los ensayos se adimensionalizaron con respecto a la presión dinámica por lo que para conocer el valor de la fuerza se hace necesario conocer la velocidad relativa entre el viento y el cuerpo que, a su vez, depende de  $\beta$ . Por tanto, establecemos que:

$$F_Y = f(\gamma, \beta') \quad (1.49)$$

En la figura 1.4-3,  $P$  se ha descompuesto en sus componentes tangencial y normal al eje de unión. Teniendo en cuenta que la unión no es elongable, la ecuación diferencial que rige la variación de  $\beta$  es:

$$\beta'' = \frac{F_Y d_{FY}}{I_\beta} - \frac{P d_P}{I_\beta} \quad (1.50)$$

O bien:

$$\beta'' = \frac{F_Y d_{FY}}{I_\beta} - \frac{P \sin(\beta) d_P}{I_\beta} \quad (1.51)$$

Donde:

- $I_\beta$ : Es la inercia al giro en  $\beta$ , En P2 su valor es constante e independiente de  $\gamma$  (ec. (1.40)). En P1, por su geometría, presenta un valor levemente variable con  $\gamma$  (ec. (1.23)).
- $d_P$ : El punto de aplicación del peso del cuerpo. Sólo depende del centro de gravedad del cuerpo y por tanto su valor es fijo.
- $d_{FY}$ : El punto de aplicación de  $F_Y$ . Depende de la distribución de la fuerza del viento en las caras del cuerpo y por tanto de  $\gamma$ . Para hallar  $d_{FY}$  es necesario conocer la longitud de la unión entre el cuerpo y la

rótula. Para esa longitud podemos hallar la fuerza resultante  $F_Y$  y el momento resultante  $M_X$  ejercidos por el viento. De esta manera podemos establecer que para que la fuerza  $F_Y$  realice un momento  $M_X$  debe de aplicarse a una distancia  $d_{F_Y}$  que cumpla la siguiente relación:

$$d_{F_Y} = \frac{M_X}{F_Y} \quad (1.52)$$

Por depender de  $M_X$  y  $F_Y$ ,  $d_{F_Y}$  también cumple:

$$d_F = f(\gamma, \beta') \quad (1.53)$$

Como hemos enunciado  $F_Y$  se obtiene a partir de los datos obtenidos en los ensayos. Hay que tener en cuenta, por tanto, la adimensionalización que en su momento se realizó:

- a) Los datos de presión se encontraban referenciados a la presión dinámica del viento:  $P_d$
- b) Para adimensionalizar las fuerzas se recurrió a un área de referencia:  $A_r$

Por tanto, para dar unidades a las fuerzas obtenidas en el apartado Fuerzas 1.3.4.4 hay que multiplicar por  $A_r$  y  $P_d$ , de manera que:

$$F_Y = F_Y^a A_r P_d \quad (1.54)$$

Donde:

- $F_Y^a$  es el valor obtenido en los ensayos. Depende de la dirección del viento con respecto a la posición del cuerpo, es decir de  $\gamma$ .
- $A_r$  es el área de referencia. Es un valor constante aunque diferente para los prototipos P1 y P2.
- $P_d$  es la presión dinámica. Depende de la velocidad relativa  $V_r$  entre el viento y el cuerpo según la formulación siguiente:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho V_r^2 \quad (1.55)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire.

La velocidad relativa entre el cuerpo y el viento se mide en la dirección del movimiento. En la dirección del movimiento esta velocidad vale:

$$V_r = V \cos(\beta) - V_c \quad (1.56)$$

Donde  $V_v$  es la velocidad del viento y  $V_c$  la del cuerpo en la dirección del movimiento.

A su vez la velocidad del cuerpo en el punto de aplicación de  $F_Y$  es:

$$V_c = d_{F_Y} \beta' \quad (1.57)$$

Juntando las ecuaciones (1.55), (1.56) y (1.57) obtenemos:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho (V \cos \beta - d_{F_Y} \beta')^2 \quad (1.58)$$

Lo que a su vez, sustituido en (1.54), nos permite concluir que la fuerza en la dirección de Y vale:

$$F_Y = F_Y^a A_r \frac{1}{2} \rho (V \cos \beta - d_{F_Y} \beta')^2 \quad (1.59)$$

Esta fuerza será positiva cuando la componente de la velocidad del viento en la dirección del movimiento sea mayor que la del cuerpo, y negativa cuando el cuerpo sea más veloz (el viento realizará entonces una fuerza de rozamiento). Para reflejar este hecho transformamos la ecuación (1.59) en

$$F_Y = \frac{V \cos \beta - d_{F_Y} \beta'}{|V \cos \beta - d_{F_Y} \beta'|} F_Y^a A_r \frac{1}{2} \rho (V \cos \beta - d_{F_Y} \beta')^2 \quad (1.60)$$

De (1.60) y (1.51) obtenemos la ecuación diferencial que rige el comportamiento pendular del cuerpo en el plano YZ:

$$\beta'' = \frac{V \cos \beta - d_{FY} \beta'}{|V \cos \beta - d_{FY} \beta'|} \frac{F_Y^a A_r \frac{1}{2} \rho (V \cos(\beta) - d_{FY} \beta')^2 d_{FY}}{I_\beta} - \frac{mg \sin(\beta) d_p}{I_\beta} \quad (1.61)$$

A continuación e incluye una tabla resumen de las variables que actúan en el movimiento:

Variable	Significado	Características	
Movimiento	$\beta$	Ángulo girado	A determinar
	$\beta'$	Velocidad angular	A determinar
	$\beta''$	Aceleración angular	A determinar
Variables atmosféricas	g	Constante gravitacional	Constante
	V	Velocidad del viento	Considerada constante
	$\rho$	Densidad del aire	Constante
Parámetros físicos de los cuerpos	$A_r$	Área de referencia	Constante
	m	Masa del cuerpo	Constante
	$d_p$	Distancia al centro de gravedad	Constante
	$I_\beta$	Inercia en $\beta$	P1: $f(\gamma)$ P2: constante
Fuerzas y puntos de aplicación	$F_Y^a$	Fuerza adimensionalizada	$f(\gamma)$
	$d_{FY}$	Distancia al punto de aplicación de $F_Y$	$f(\gamma)$

Tabla 1.4-1 Tabla resumen de las variables con influencia sobre  $\beta$

Como señalamos en el apartado 1.3.4.4 el viento, con dirección Y, ejerce también fuerzas en la dirección X. La geometría de los dos prototipos hacen que estas fuerzas, que dependen de  $\gamma$ , tiendan a ser menores en P1 que en P2. El movimiento pendular en el plano XZ, perpendicular a la velocidad del viento, se realiza mediante un desarrollo matemático similar al usado en el plano YZ.

La aparición de una sollicitación en X provoca el inicio del movimiento y por tanto una velocidad relativa entre el cuerpo y el fluido (estático en esa dirección), lo que origina la aparición de una fuerza de rozamiento. En definitiva se ejercen tres fuerzas sobre el cuerpo: La ejercida por el viento, la acción de la gravedad y el rozamiento del aire en el plano XZ. Nuevamente se recurre a coordenadas polares ( $d, \alpha$ , en este caso) para la resolución del movimiento.

Representamos las fuerzas que intervienen en este caso en la siguiente figura:

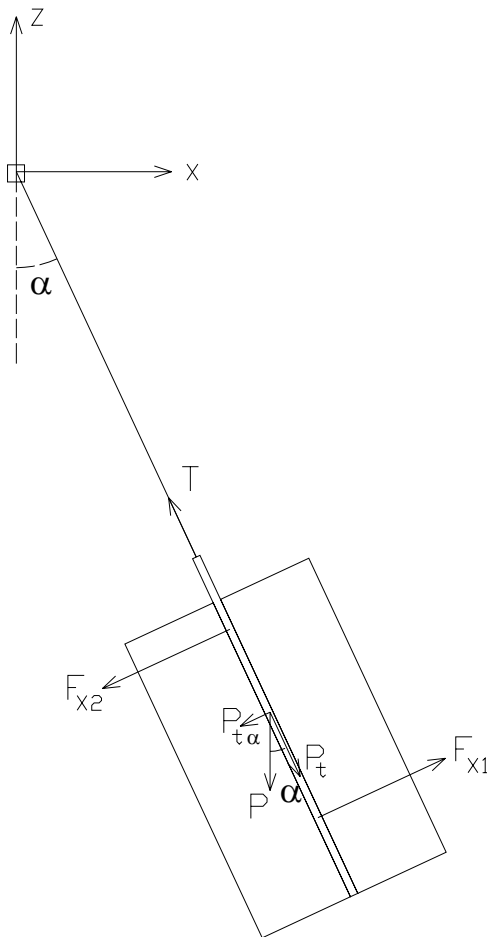


Figura 1.4-4 Cuerpo suspendido con fuerzas actuantes en el plano XZ



La acción de estas fuerzas determinan el movimiento pendular en el plano XZ por medio de la ecuación siguiente:

$$\alpha'' = \frac{F_{X1}d_{F1}}{I_\alpha} - \frac{F_{X2}d_{F2}}{I_\alpha} - \frac{P \operatorname{sen}(\alpha)d_p}{I_\alpha} \quad (1.62)$$

Donde:

- $\alpha''$  : Es la aceleración angular en el plano XZ
- $F_{X1}$  : Es la fuerza ejercida por el viento, su expresión se extrae siguiendo un razonamiento análogo al empleado para obtener (1.59) teniendo en cuenta las fuerzas trasversales a su movimiento que el viento ejerce. Su valor es:

$$F_{X1} = F_x^a A_r \frac{1}{2} \rho (V \cos \beta - d_{F1} \beta')^2 \quad (1.63)$$

Es la responsable del inicio del movimiento.

- $d_{F1}$  : Distancia a la que se aplica  $F_{X1}$
- $F_{X2}$  : Es la fuerza de rozamiento que ejerce el fluido (estático en este plano) sobre el cuerpo en movimiento. Su determinación es similar a la seguida para obtener (1.59). Al no existir velocidad del viento en este plano:

$$F_{X2} = F_y^a A_r \frac{1}{2} \rho (d_{F2} \alpha')^2 \quad (1.64)$$

Depende de  $F_y^a$  ya que el cuerpo y el viento se mueven en paralelo, por tanto es el mismo caso que el medido en el interior del túnel de viento. Esta fuerza siempre tiene sentido contrario al del movimiento del cuerpo, por tanto:

$$F_{X2} = -\frac{\alpha'}{|\alpha'|} F_y^a A_r \frac{1}{2} \rho (d_{F2} \alpha')^2 \quad (1.65)$$

- $d_{F2}$  : Distancia a la que se aplica  $F_{X2}$

- $P$ : Peso del cuerpo
- $d_p$ : Distancia a la que se aplica  $P$ , función del centro de gravedad del cuerpo.
- $I_\alpha$ : Es la inercia al giro en  $\alpha$ , En P2 su valor es constante e independiente de  $\gamma$ . En P1, por su geometría, presenta un valor variable.

En definitiva, obtenemos que la ecuación diferencial que determina el movimiento en el plano XZ es:

$$\alpha'' = \frac{V \cos(\beta) - d_{F1} \beta'}{|V \cos(\beta) - d_{F1} \beta'|} \frac{F_x^a A_r \frac{1}{2} \rho (V \cos(\beta) - d_{F1} \beta')^2 d_{F1}}{I_\alpha} - \frac{\alpha' F_y^a A_r \frac{1}{2} \rho (d_{F2} \alpha')^2 d_{F2}}{|\alpha'| I_\alpha} - \frac{mg \operatorname{sen}(\alpha) d_p}{I_\alpha} \quad (1.66)$$

Todas las variables que intervienen en esta ecuación aparecen reunidas en la siguiente tabla resumen:

Variable	Significado	Características	
Variables del movimiento	$\alpha$	Ángulo girado	A determinar
	$\alpha'$	Velocidad angular	A determinar
	$\alpha''$	Aceleración angular	A determinar
	$\beta$	Ángulo girado	A determinar
	$\beta'$	Velocidad angular	A determinar
	$\beta''$	Aceleración angular	A determinar
Variables atmosféricas	$g$	Gravedad	Constante
	$V$	Velocidad del viento	Considerada constante
	$\rho$	Densidad del aire	Constante
Parámetros físicos de los cuerpos	$A_r$	Área de referencia	Constante
	$m$	masa	Constante
	$d_p$	Distancia al centro de gravedad	Constante
	$I_\alpha$	Inercia en $\alpha$	P1: $f(\gamma)$ P2: constante
Variables de las fuerzas ejercidas por el viento	$F_y^a$	Fuerza adimensionalizada	$f(\gamma)$
	$F_x^a$	Fuerza adimensionalizada	$f(\gamma)$
	$d_{F1}$	Distancia al punto de aplicación de $F_{X1}$	$f(\gamma)$
	$d_{F2}$	Distancia al punto de aplicación de $F_{X2}$	$f(\gamma)$

Tabla 1.4-2 Tabla resumen de las variables con influencia sobre  $\alpha$

Es de destacar que las ecuaciones anteriormente presentadas son válidas tanto para el Prototipo 1 como para el Prototipo 2, variando de un caso a otro, el valor de los diferentes parámetros.

De acuerdo con los resultados obtenidos podemos afirmar que para resolver los tres movimientos de manera simultánea, debemos resolver el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias definido por las ecuaciones (1.43) (1.61) y (1.66). La ecuación (1.67) recoge las dependencias existentes entre las variables involucradas:

$$\begin{aligned}
 \alpha'' &= f(\alpha, \alpha', \beta, \beta', \gamma) \\
 \beta'' &= f'(\beta, \beta', \gamma) \\
 \gamma'' &= f''(\gamma)
 \end{aligned}
 \tag{1.67}$$

### 1.4.2 Resultados de la simulación

En este apartado se muestran los resultados obtenidos al resolver numéricamente las ecuaciones de movimiento descritas en el apartado 1.4.1. Se han realizado simulaciones para diferentes orientaciones y velocidades de viento. Los comportamientos observados en ambos prototipos siguen patrones semejantes si bien se han encontrado diferencias de importancia para determinadas orientaciones del viento incidente.

Siguiendo con la notación introducida en el apartado mencionado utilizaremos  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  para referirnos a los movimientos del cuerpo en los planos que dicha sección mostraba.

En términos generales los movimientos en  $\gamma$ , adecuados para el correcto funcionamiento del cuerpo, son más amplios en el prototipo 1 que en el prototipo 2, sin embargo en  $\alpha$  y  $\beta$ , P2 presenta unas amplitudes mayores. Es destacable, en este último prototipo, la aparición para determinadas orientaciones y velocidades de viento de oscilación de gran amplitud y complejidad en  $\alpha$ .

#### 1.4.2.1 Dinámicas observadas

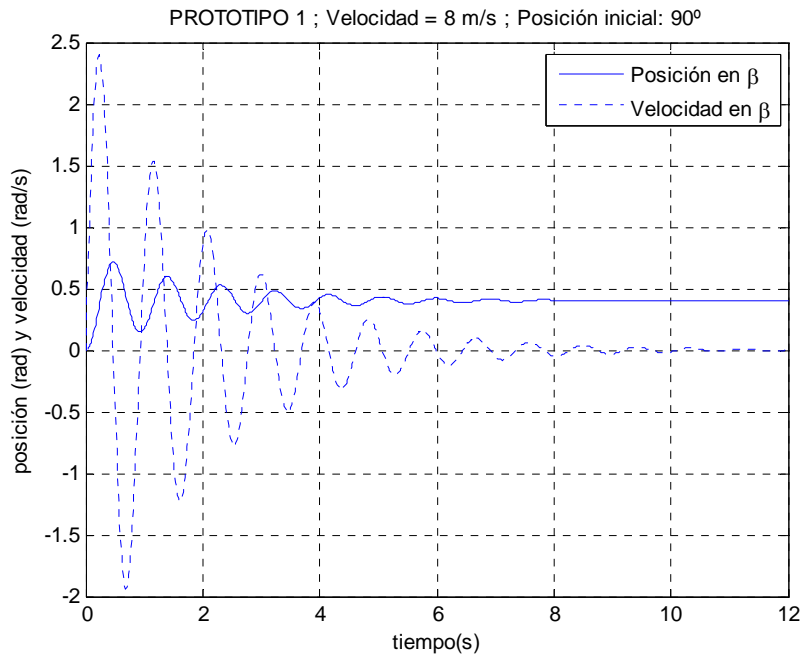
Los patrones de resultados observados muestran determinadas dinámicas tipo que se repiten para diferentes velocidades y orientaciones del viento. Algunas de ellas presentan similitudes con movimientos pendulares (péndulo simple o péndulo amortiguado). Para los tres movimientos analizados ( $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ ) las tipologías que se han encontrado se pueden clasificar en cinco categorías.

- El cuerpo logra una posición de equilibrio.
- El cuerpo oscila en torno a una posición.
- El cuerpo entra en una dinámica indefinida de giros completos.
- El cuerpo realiza movimientos complejos.
- El cuerpo realiza movimientos mixtos.

Las simulaciones se han realizado con una velocidad de viento constante durante todo el periodo analizado, la relevancia de la inclusión de la velocidad del viento de manera brusca sobre la dinámica del cuerpo será analizada en el apartado 1.4.2.6.

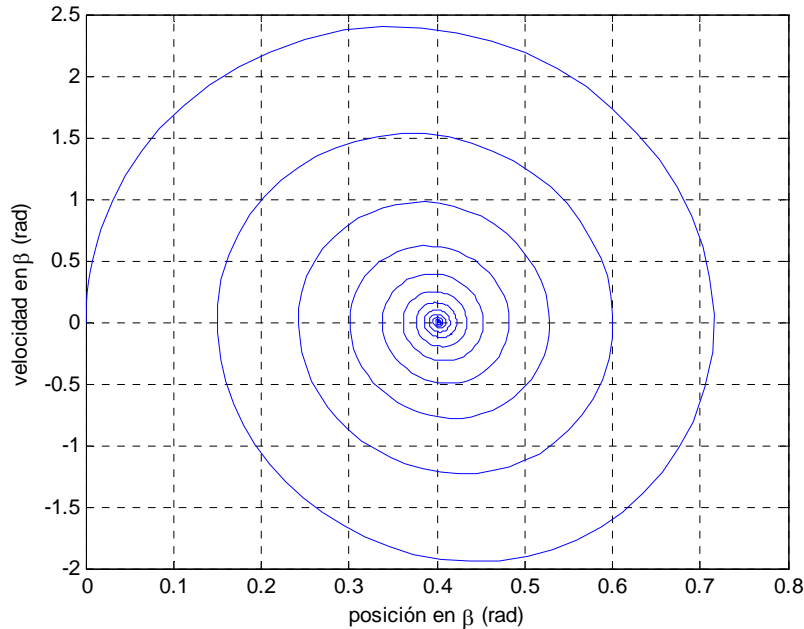
▪ ***Posición de equilibrio***

Es una tipología rara para el ángulo  $\gamma$ , muy frecuente en  $\beta$  mientras que en  $\alpha$  su aparición depende del prototipo que analicemos. En  $\beta$  se produce cuando la fuerza del viento encuentra un punto de equilibrio con las fuerzas másicas del cuerpo. Por tanto para que este equilibrio se produzca es necesario que las fuerzas del viento sean razonablemente constantes y para ello que la posición en  $\gamma$  no varíe apreciablemente con el tiempo. En el ejemplo de la figura 1.4-5, observamos este caso. Está realizada para una dirección del viento de 90 grados, con una velocidad de 8m/s, en el prototipo 1. En este caso las oscilaciones finales en  $\gamma$  son muy pequeñas, por lo que la fuerza en  $\beta$  se mantiene entre 0.998N y 1.002N, donde se equilibra con el peso del cuerpo para un  $\beta$  de 25°.



**Figura 1.4-5 situación de equilibrio en  $\beta$  para P1**

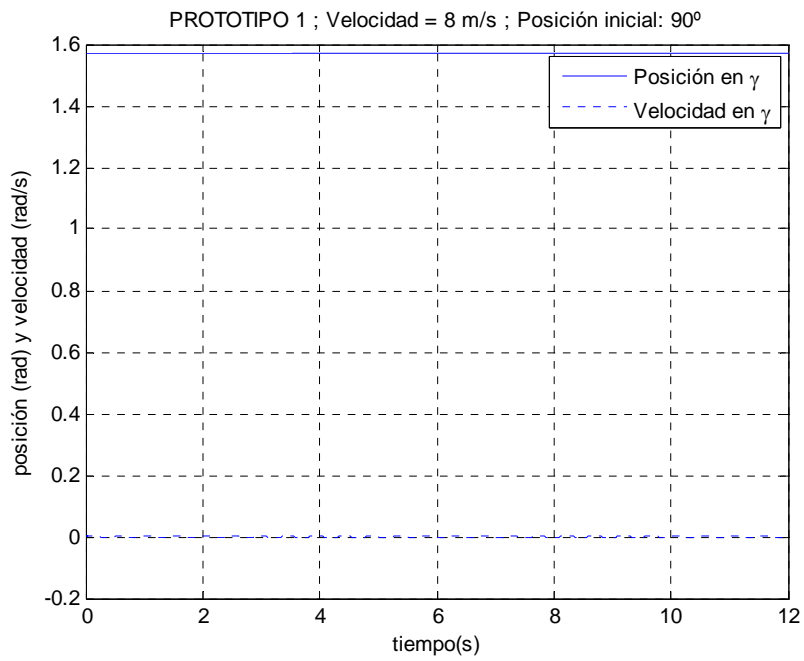
Como se observa en la figura, el cuerpo comienza presentando unos movimientos relativamente amplios, producto de la introducción brusca del viento que produce una importante discontinuidad en el estado de fuerzas aplicadas sobre el cuerpo. Estos movimientos se amortiguan debido a la propia masa del prototipo hasta alcanzar una posición de equilibrio. Como se intuye en la figura 1.4-5 existe una relación entre las magnitudes que en ella se representan (desplazamiento y velocidad) que mostramos, en detalle, en la figura 1.4-6.



**Figura 1.4-6 situación de equilibrio: relación  $\beta$ - $\beta'$  para P1,**

La figura 1.4-6 muestra el patrón típico de un movimiento pendular amortiguado, que en este caso tiende a una posición final estática en la que  $\beta=0.4$  rad y  $\beta'=0$  rad/s.

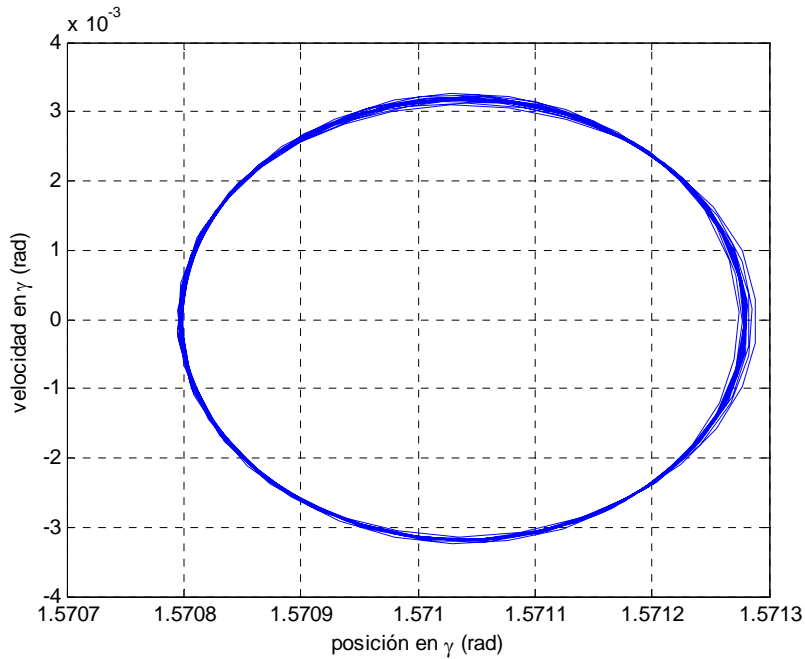
Esta tipología también se observa, en algunos casos, en los movimientos en  $\gamma$  y en  $\alpha$  aunque con diferencias con respecto a los mostrados en  $\beta$ . En  $\gamma$ , al contrario de lo que sucede en  $\beta$ , si el cuerpo logra una amplitud suficiente, al no existir una fuerza atenuante como la de la gravedad, el cuerpo no logra nunca volver a una posición de equilibrio. Por tanto la posición fija se consigue sólo cuando la fuerza del viento no induce fuerzas significativas de rotación y el cuerpo se mantiene en todo momento estático. Por la propia geometría de los prototipos este comportamiento se produce en P1 para incidencias iniciales múltiplos de  $\pi/2$  y en P2 con múltiplos de  $2\pi/3$ . La figura 1.4-7 muestra un ejemplo de esta situación.



**Figura 1.4-7 Situación de equilibrio en  $\gamma$  para P2**

Como observamos en la siguiente figura el diagrama  $\gamma-\dot{\gamma}$  es apreciablemente diferente del que teníamos con anterioridad para  $\beta-\dot{\beta}$ .

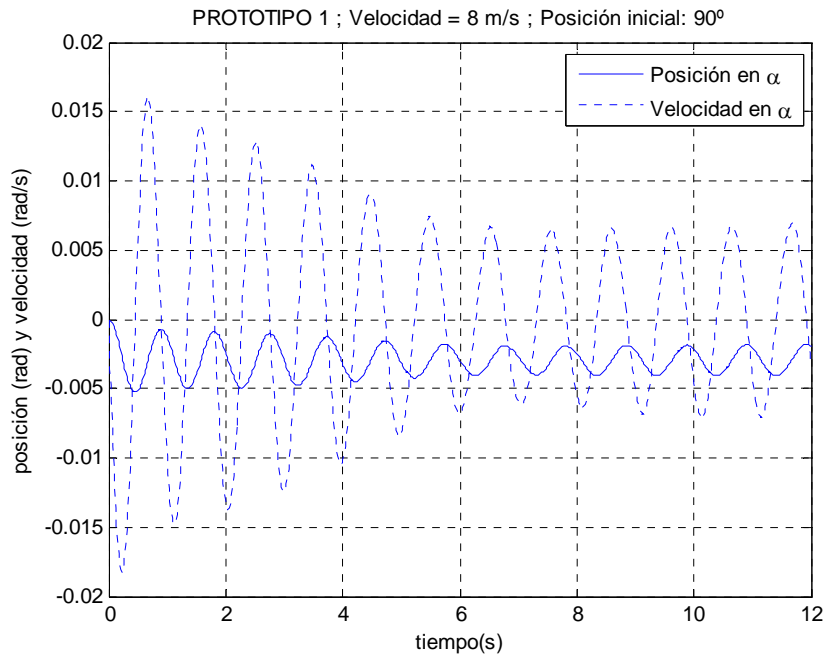




**Figura 1.4-8 Situación de equilibrio: relación  $\gamma$ - $\gamma'$  para P1.**

En el caso analizado el cuerpo siempre se mantiene en posiciones cercanas a la de equilibrio (la amplitud observada es de  $0.03^\circ$ ), existiendo una relación entre  $\gamma$  y  $\gamma'$ , de tal manera que a cada  $\gamma$  le corresponde un mismo valor absoluto de  $\gamma'$ , si bien el signo depende del sentido de giro.

El movimiento en  $\alpha$  depende de las características del movimiento en los otros dos ejes, lo que aumenta su complejidad. El motor del movimiento siguen siendo las fuerzas inducidas por el viento, que tienden a ser pequeñas en P1, pero que son apreciables en P2. Debido a esto se observa una desproporción de los casos de equilibrio entre ambos cuerpos. Un caso de equilibrio típico se muestra en la figura 1.4-9.



**Figura 1.4-9 Situación de equilibrio en  $\alpha$  para P1**

Vemos como se logra el equilibrio, presentándose oscilaciones muy limitadas al final del movimiento. Si bien en los instantes iniciales las amplitudes son mayores, tampoco se observan oscilaciones importantes en esta etapa.

La relación  $\alpha-\alpha'$  es una situación mixta de las mostradas en las figuras 1.4-6 y 1.4-8, con una dinámica paulatinamente amortiguada que concluye en una situación estacionaria con movimientos de muy escasa amplitud.

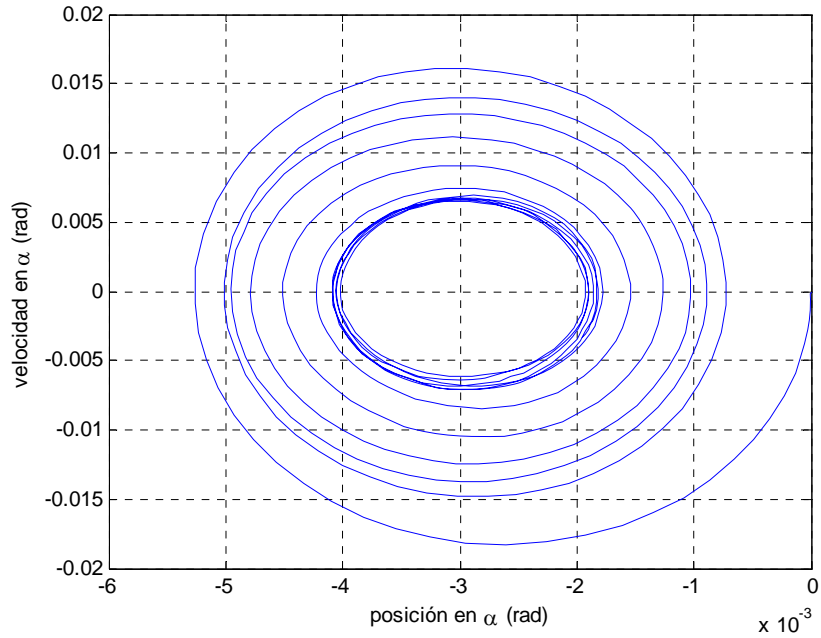
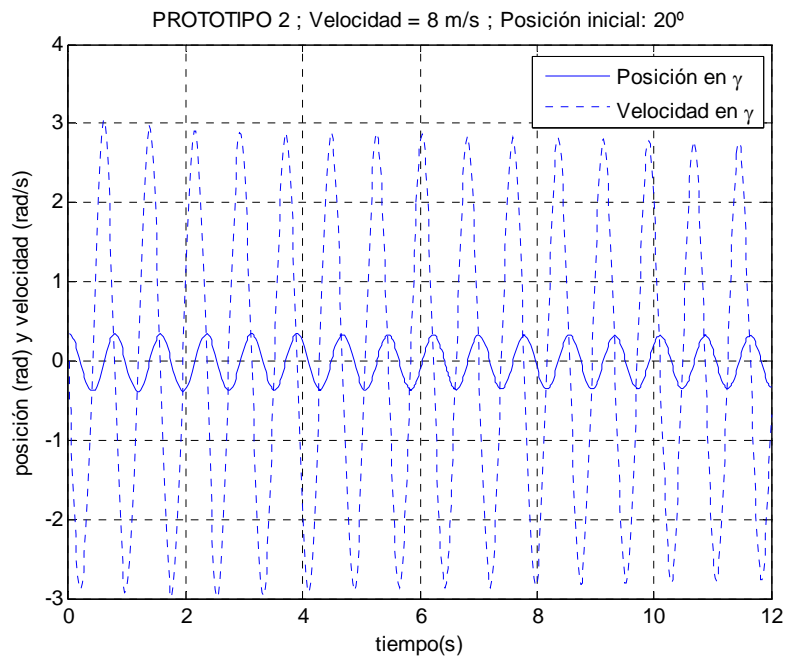


Figura 1.4-10 Situación de equilibrio: relación  $\alpha$ - $\alpha'$  para P1.

▪ **Oscilación en torno a una posición fija**

En este caso el cuerpo no logra encontrar un punto en el que las fuerzas se equilibren, si no que tiende a oscilar en torno a una posición fija. Este movimiento es semejante al de un péndulo simple.

Esta tipología aparece en los tres movimientos analizados. En algunos casos el cuerpo entra en oscilaciones periódicas con forma similar a una senoide como muestra la figura 1.4-11.



**Figura 1.4-11 Oscilaciones sinusoidales en  $\gamma$  para P2**

La relación  $\gamma-\dot{\gamma}$  en este caso es similar a la mostrada en la figura 1.4-8, con mayores amplitudes en ambos ejes y con alguna pequeña variación respecto al elipsoide final.

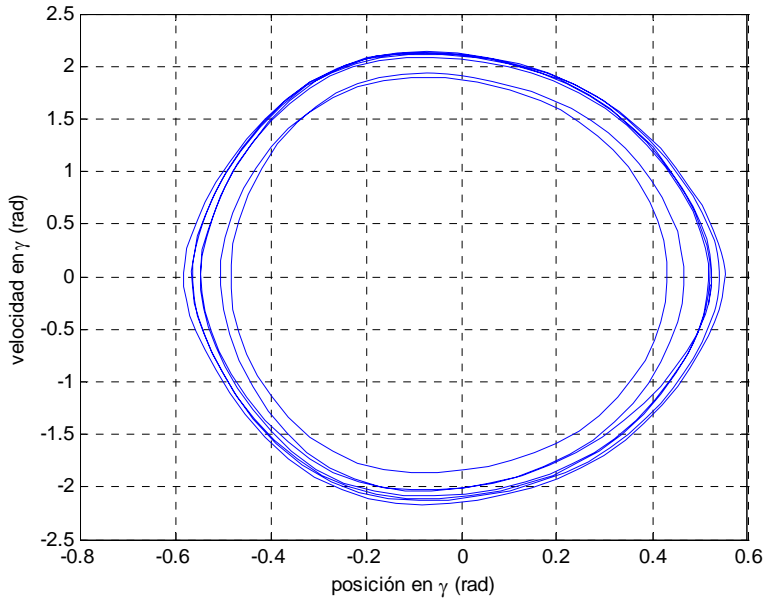


Figura 1.4-12 Situación de equilibrio: relación  $\gamma$ - $\gamma'$  para P1.

En otros casos, sin embargo, el movimiento presenta otros tipos de fluctuaciones periódicas.

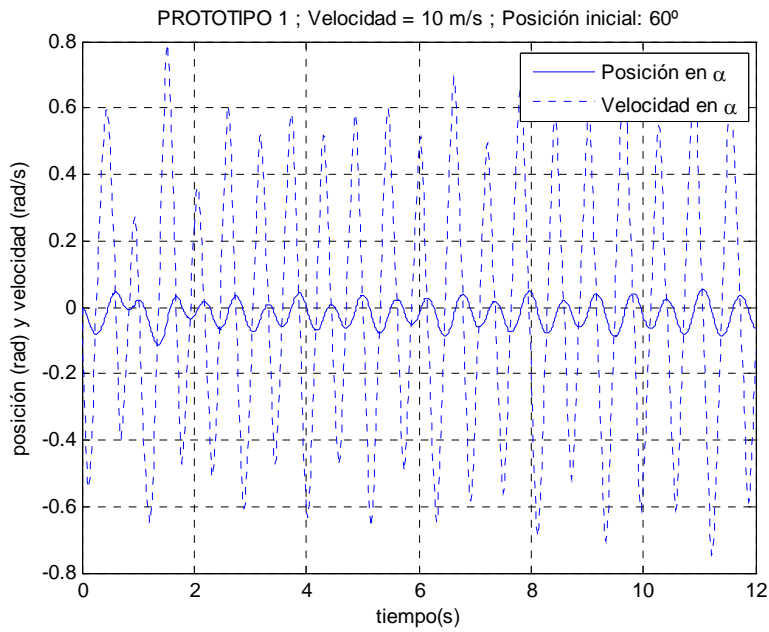
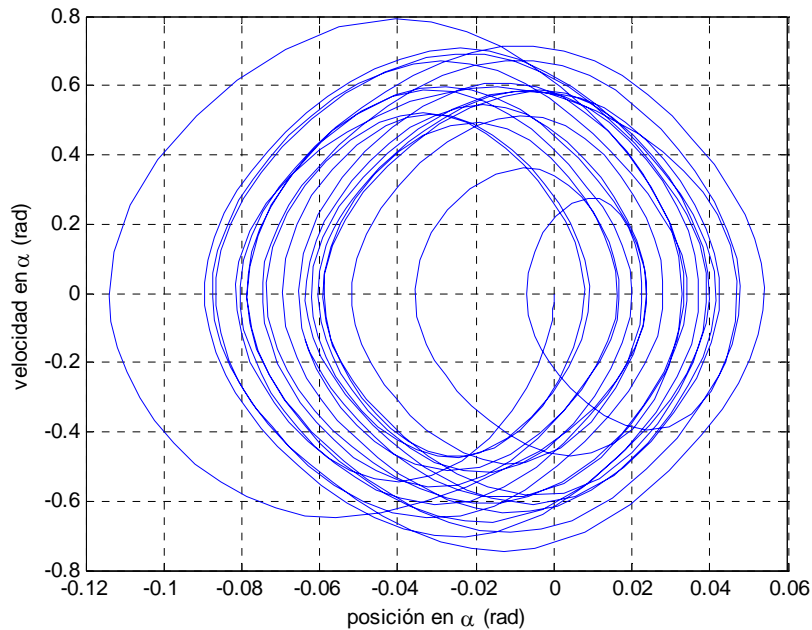


Figura 1.4-13 Oscilaciones sinusoidales en  $\alpha$  para P2

Como vemos en la figura 1.4-13 el cuerpo presenta un patrón oscilatorio aunque se aleja de una senoide perfecta. Esto induce a una relación  $\alpha$ - $\alpha'$  más compleja, que presentamos a continuación.

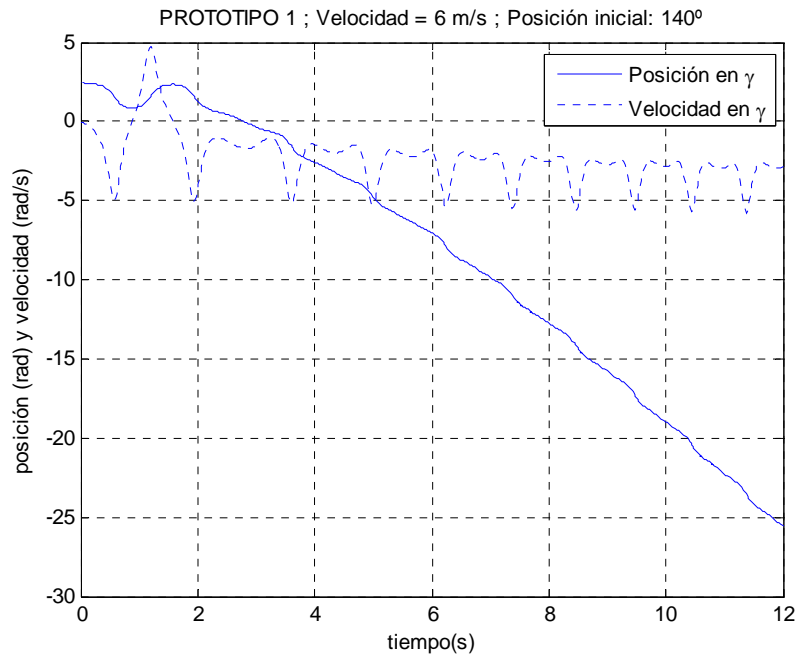


**Figura 1.4-14 Oscilaciones periódicas: relación  $\alpha$ - $\alpha'$  para P1.**

Estas alteraciones en la senoide se producen por la complejidad inherente al movimiento en  $\alpha$ , que, como hemos señalado, se encuentra influenciado por los movimientos en  $\beta$  y en  $\gamma$ . Se han encontrado casos de movimientos en este eje en los que el cuerpo entra en una dinámica sinusoidal. Aunque es difícil generalizar parece que esto sucede en casos de velocidad de viento baja y situación de equilibrio para  $\beta$ .

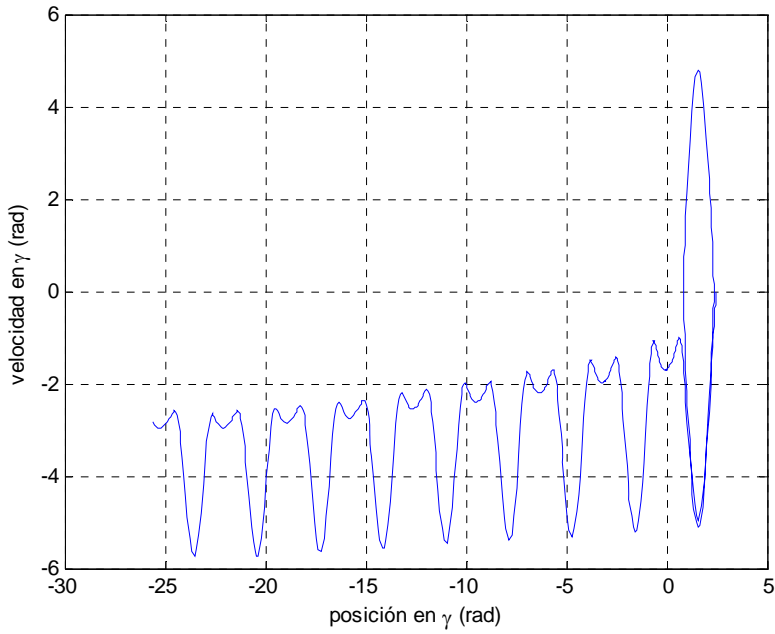
- ***Dinámica indefinida de giros completos***

Esta tipología se consigue en  $\gamma$ , no apareciendo en  $\beta$  ni en  $\alpha$  en ninguno de los casos analizados. Como se verá más adelante, esta situación tampoco es excesivamente frecuente. Una gráfica característica es la siguiente:



**Figura 1.4-15 Sistema de giros en  $\gamma$  para P1 (caso 1)**

En esta figura observamos como el prototipo comienza a realizar un movimiento periódico, sin embargo esta dinámica amplía su amplitud progresivamente hasta llegar a un punto en que es capaz de introducirse en la dinámica de giros completos, dinámica que no abandona durante el resto del movimiento. La velocidad presenta variaciones periódicas con un periodo coincidente con el periodo que tarda en realizar un giro completo. Además tiende a aumentar (en módulo) ligeramente durante el transcurso del tiempo. La relación entre posición y velocidad para este caso se representa en la figura 1.4-16.



**Figura 1.4-16 Sistema de giros: relación  $\gamma$ - $\gamma'$  para P1.**

Como se puede observar, pasados los dos segundos iniciales, la velocidad aumenta paulatinamente.

Para que esta dinámica se presente es necesario que el cuerpo sobrepase una posición límite. En la situación mostrada en el caso mostrado en la figura 1.4-15 esto se logra de en poco tiempo, pero existen otros casos en los que el prototipo tarda más tiempo en entrar en esta tipología. A modo de ejemplo se expone la figura 1.4-17:



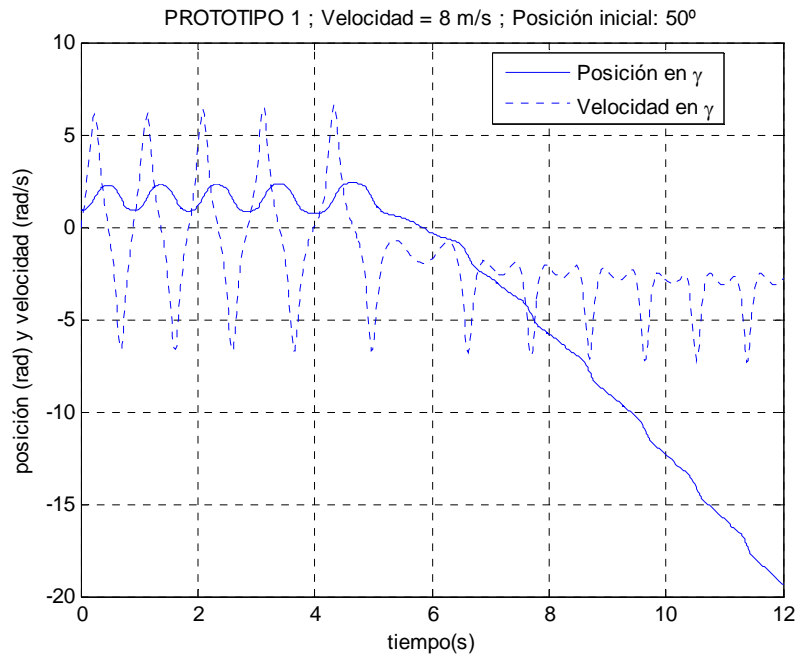
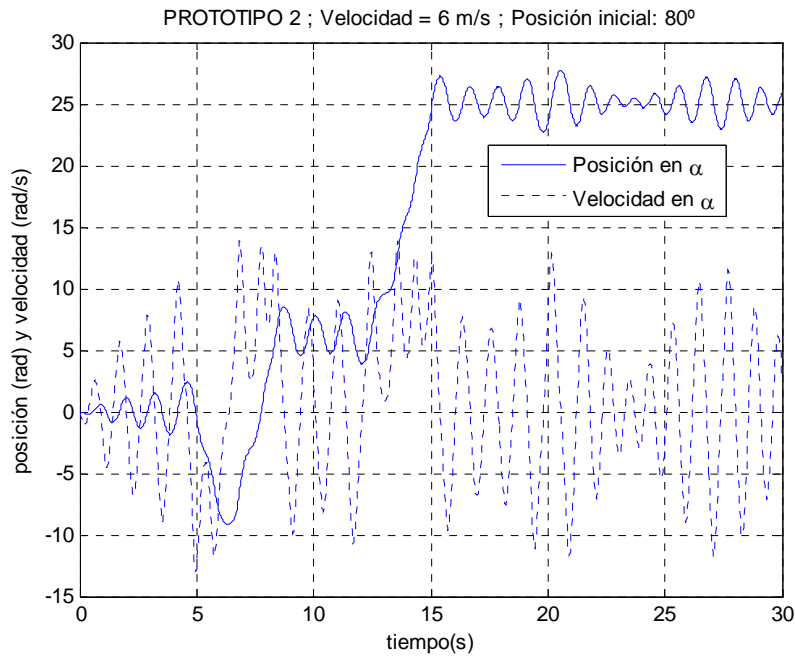


Figura 1.4-17 Sistema de giros: relación  $\gamma$ - $\gamma'$  para P1 (caso 2)

▪ **Movimientos complejos**

En las simulaciones realizadas del movimiento en  $\alpha$ , y siempre en el prototipo 2, han aparecido movimientos de características más complejas.

El motivo de esta excepcionalidad en  $\alpha$  es la complejidad de los factores que intervienen en su dinámica. Así, mientras que el movimiento en  $\gamma$  es de sencillo cálculo, por depender sólo de los momentos en su mismo sentido y el movimiento en  $\beta$  se resuelve con dos fuerzas que se autolimitan; en  $\alpha$  existen tres fuerzas que hacen que el movimiento dependa también de las características dinámicas en  $\beta$  y en  $\gamma$ . Esto provoca que se den casos complejos como el que mostramos a continuación:



**Figura 1.4-18 Sistema complejo de movimiento en  $\alpha$  para P2**

Como vemos la dinámica se compone de periodos con oscilaciones en torno a una posición fija seguido de periodos de giros completos que se pueden producir en cualquiera indistintamente en los dos sentidos. Las velocidades alcanzadas son relativamente altas, alcanzando los 10 rad/s en ambos sentidos. Estos fenómenos originan unas relaciones posición-velocidad complejas, similares a la siguiente:

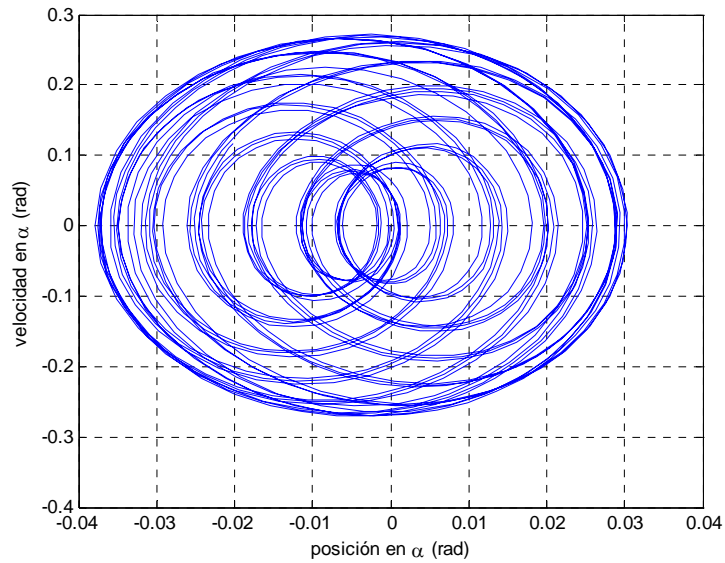


Figura 1.4-19 Sistema de giros: relación  $\alpha$ - $\alpha'$  para P1.

El motivo por el que esta tipología se produce es por la aparición de una resonancia entre dos de las fuerzas aplicadas sobre el cuerpo: La del viento, generadora de movimiento, y la del peso, como se muestra en la figura 1.4-20.

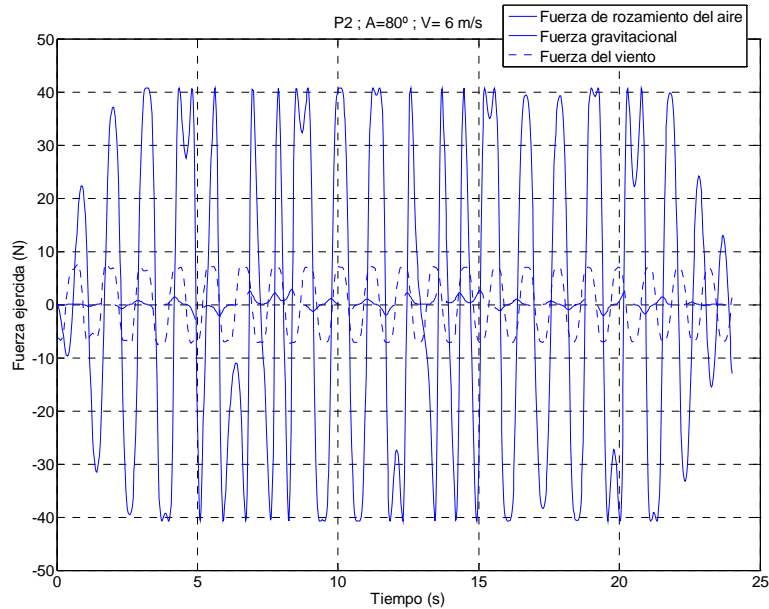
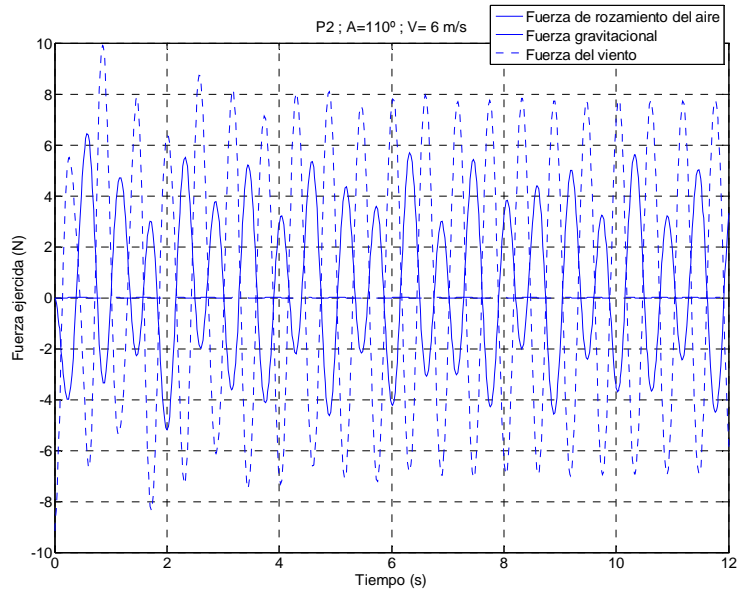


Figura 1.4-20 Fuerzas ejercidas en  $\alpha$  presentándose resonancia

En la mayoría de las ocasiones simuladas, como la mostrada a continuación, este fenómeno resonante entre las dos componentes no se presenta.

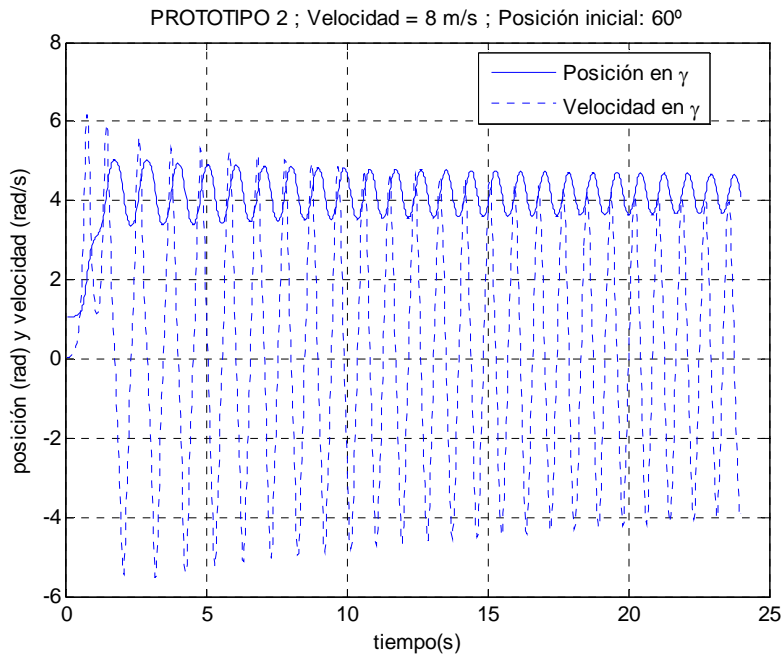


**Figura 1.4-21 Fuerzas ejercidas en  $\alpha$  sin presentarse resonancia**

Vemos aquí como para la orientación inicial escogida las fuerzas másicas se compensan con las del viento, por lo que el cuerpo no logra realizar unos movimientos relevantes y la tercera fuerza, de rozamiento, que depende de  $\alpha$  es, en todo momento, despreciable.

▪ **Movimientos mixtos**

Existe también algún movimiento mixto para el ángulo  $\gamma$ , como la que exponemos en la figura 1.4-22



**Figura 1.4-22 Sistema complejo de movimiento en  $\gamma$  para P2**

Vemos como el cuerpo ha tratado de entrar en una dinámica indefinida de rotaciones sobre el eje de unión pero, tras completar algo más de medio giro, entra en un movimiento de oscilación en torno a una posición fija semejante al expuesto en la figura 1.4-11. El motivo por el que esto sucede parece relacionado con la interacción del movimiento en  $\gamma$  y en  $\beta$ . Al estar el primero influenciado por la velocidad relativa entre el cuerpo y el viento, en los primeros instantes, en los que el cuerpo presenta importantes velocidades en el plano YZ se producen fuerzas mayores que permiten el giro completo en este eje. Una vez que las velocidades han entrado en su dinámica estacionaria, el cuerpo deja de ser capaz de girar sobre el eje y entra, a su vez, en el movimiento pendular definitivo.

#### 1.4.2.2 Casuística

A continuación presentamos una serie de tablas en las que indicamos el tipo de dinámica obtenido en función de la velocidad del viento y su incidencia original.

Para poder realizar la clasificación de los casos es necesario marcar una frontera entre la dinámica de posición estable y la de oscilaciones en torno a una posición de equilibrio, ya que el cuerpo en ningún caso está completamente estático. Para ello hay que marcar un límite que necesariamente tiene carácter subjetivo. Se ha considerado que movimientos con amplitud menor de 5° pueden considerarse despreciables y por tanto dentro de la categoría de cuerpo estático en equilibrio. Amplitudes mayores se han clasificado en la categoría de oscilaciones en torno a una posición de equilibrio.

		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
P1	$\alpha$	o	o	o	o	o	X	X	X	o	X	X	X	X	X	X	X	o	o
	$\beta$	o	o	o	X	X	X	X	X	X	X	o	o	o	o	o	o	o	o
	$\gamma$	X	X	X	X	X	X	X	▽	▽	▽	X	X	X	X	X	X	X	X
P2	$\alpha$	X	X	X	X	X	X	X	&	&	&	X	&	X	&	&	X	&	X
	$\beta$	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	X	o	o	o	o	o
	$\gamma$	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	▽	X	X	X	X	X
<b>V = 6 m/s</b>																			
		90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175
P1	$\alpha$	o	o	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	o	o	o	o	o
	$\beta$	o	o	o	o	o	o	o	X	X	X	X	X	X	X	X	o	o	o
	$\gamma$	o	X	X	X	X	X	X	X	▽	▽	▽	▽	X	X	X	X	X	o
P2	$\alpha$	X	X	X	X	X	X												
	$\beta$	o	o	o	o	o	o												
	$\gamma$	X	X	X	X	X	X												

o Equilibrio      X Oscilaciones      ▽ Giros completos      & Otros

Tabla 1.4-3 Casuística para V= 6m/s

		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
P1	$\alpha$	o	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	o	o	o	o
	$\beta$	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	o	o	o	o	o	o
	$\gamma$	X	X	X	X	X	X	X	▽	▽	▽	▽	▽	X	X	X	X	X	X
P2	$\alpha$	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	$\beta$	o	o	o	o	o	o	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	o
	$\gamma$	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	▽	X	X	X	X	X
<b>V = 8 m/s</b>																			
		90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175
P1	$\alpha$	o	o	o	o	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	o	o
	$\beta$	o	o	o	o	o	o	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	o	o
	$\gamma$	o	X	X	X	X	X	X	▽	▽	▽	▽	X	X	X	X	X	X	o
P2	$\alpha$	X	X	X	X	X	X												
	$\beta$	o	o	o	o	o	o												
	$\gamma$	X	X	X	X	X	X												

o Equilibrio      X Oscilaciones      ▽ Giros completos      & Otros

Tabla 1.4-4 Casuística para V= 8m/s

		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
P1	$\alpha$	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	o	o
	$\beta$	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	o	o	o	o	o	o
	$\gamma$	X	X	X	X	X	X	X	▽	▽	▽	▽	X	X	X	X	X	X	X
P2	$\alpha$	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	$\beta$	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	X	X	X	X	o	o	o	o
	$\gamma$	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>V = 10 m/s</b>																			
		90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175
P1	$\alpha$	o	o	o	X	X	X	X	X	o	X	X	X	X	X	X	X	X	o
	$\beta$	o	o	o	o	o	o	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	o	o
	$\gamma$	o	X	X	X	X	X	X	▽	▽	▽	▽	X	X	X	X	X	X	o
P2	$\alpha$	X	X	X	X	X	X												
	$\beta$	o	o	o	o	o	o												
	$\gamma$	X	X	X	X	X	X												

o Equilibrio      X Oscilaciones      ▽ Giros completos      & Otros

Tabla 1.4-5 Casuística para V= 10m/s

		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	
P1	$\alpha$	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	o	o
	$\beta$	o	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	o	o	o	o	o	o	o
	$\gamma$	X	X	X	X	X	X	▽	▽	▽	▽	▽	▽	X	X	X	X	X	X	X
P2	$\alpha$	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	$\beta$	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	$\gamma$	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>V = 12 m/s</b>																				
		90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	
P1	$\alpha$	o	o	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	o
	$\beta$	o	o	o	o	o	o	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	o	o
	$\gamma$	o	X	X	X	X	X	X	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	X	X	X	X	o
P2	$\alpha$	X	X	X	X	X	X													
	$\beta$	o	o	o	o	o	o													
	$\gamma$	X	X	X	X	X	X													

o Equilibrio      X Oscilaciones      ▽ Giros completos      & Otros

**Tabla 1.4-6 Casuística para V= 12m/s**

Para poder identificar las diferencias entre ambos prototipos así como entre las distintas velocidades es interesante estudiar la frecuencia de cada uno de los casos, lo que se recoge en las siguientes tablas:



Prototipo 1													
		6 m/s		8 m/s		10 m/s		12 m/s		TOTAL			
		Casos	%	Casos	%	Casos	%	Casos	%				
$\alpha$	o	15	41.67	13	36.11	8	22.22	7	19.44	43	30.07	$\alpha$	
	X	21	58.33	23	63.89	27	75.00	29	80.56	100	69.93		X
	∇	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00		∇
	&	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00		&
$\beta$	o	20	55.56	16	44.44	16	44.44	17	19.44	69	47.92	$\beta$	
	X	16	44.44	20	55.56	20	55.56	19	80.56	75	52.08		X
	∇	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00		∇
	&	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00		&
$\gamma$	o	2	5.56	2	5.56	2	5.56	2	5.56	8	5.56	$\gamma$	
	X	27	75.00	25	69.44	26	72.22	22	61.11	100	69.44		X
	∇	7	19.44	9	25.00	8	22.22	12	33.33	36	25.00		∇
	&	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00		&
TOTAL	o	37	34.26	31	28.70	26	24.30	26	24.07	110	27.84	TOTAL	
	X	64	59.26	68	62.96	73	68.22	70	64.81	275	65.81		X
	∇	7	6.48	9	8.33	8	7.48	12	11.11	36	8.35		∇
	&	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00		&

Tabla 1.4-7 Estadísticas de casos, Prototipo 1

Prototipo 2													
		6 m/s		8 m/s		10 m/s		12 m/s		TOTAL			
		Casos	%	Casos	%	Casos	%	Casos	%				
$\alpha$	o	0	0.00	1	8.00	1	8.00	1	8.00	3	3.12	$\alpha$	
	X	17	72.00	23	92.00	23	92.00	23	92.00	86	89.58		X
	∇	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00		∇
	&	7	28.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	7	7.29		&
$\beta$	o	23	96.00	14	60.00	20	84.00	24	100.00	81	84.37	$\beta$	
	X	1	4.00	10	40.00	4	16.00	0	0.00	15	15.63		X
	∇	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00		∇
	&	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00		&
$\gamma$	o	1	8.00	1	8.00	1	8.00	1	8.00	4	4.17	$\gamma$	
	X	22	88.00	22	88.00	23	92.00	23	92.00	90	93.75		X
	∇	1	4.00	1	4.00	0	0.00	0	0.00	2	2.08		∇
	&	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00		&
TOTAL	o	24	33.33	16	22.22	22	30.55	26	36.11	88	30.55	TOTAL	
	X	40	55.55	55	76.39	50	69.44	46	63.88	191	66.32		X
	∇	1	1.38	1	1.38	0	0.00	0	0.00	2	0.69		∇
	&	7	9.72	0	0.00	0	0.00	0	0.00	7	2.43		&

Tabla 1.4-8 Estadísticas de casos, Prototipo 2

En el movimiento en  $\alpha$  es destacable la práctica ausencia de situaciones de equilibrio en P2, lo que contrasta con el 30% de casos logrado por P1. Este porcentaje aumenta conforme disminuye la velocidad del viento. La diferencia porcentual es consecuencia de la distinta magnitud de las fuerzas transversales que el flujo ejerce sobre cada uno de los prototipos, siendo considerablemente mayor en el prototipo 2.

Por otro lado es también notable la existencia de casos con movimiento complejo en P1. Esta tipología, provocada por la resonancia de las diferentes fuerzas que intervienen en el movimiento, se produce exclusivamente a bajas velocidades de viento. Realizando diversas pruebas con el modelo esta situación de resonancia se ha identificado en el intervalo que va entre 5.8 m/s y 7.9 m/s.

El movimiento pendular en la dirección del viento,  $\beta$ , al contrario de lo que sucede en  $\alpha$ , es algo más suave para el segundo de los prototipos. La

aparente diferencia entre la velocidad de 6 m/s (96% de casos en equilibrio) y la de 8 m/s (60% de casos en equilibrio) se debe fundamentalmente a la frontera subjetiva situada en 5°. En realidad, en términos de amplitud, los movimientos no difieren en exceso. Así, la amplitud media de los 25 casos analizados para 6 m/s es de 2.93°, mientras que la de los casos a 8 m/s es de 3.93°, siendo la amplitud máxima de 7.80° y de 7.72° respectivamente.

En el prototipo 1 las posiciones de equilibrio en  $\beta$  son dependientes de la velocidad del viento, disminuyendo su frecuencia conforme aumenta ésta ya que al crecer la velocidad aumenta la fuerza aplicada conforme a una ley cuadrática. Por equilibrio de fuerzas, tanto la posición de equilibrio como la posición en torno a la que oscila el cuerpo se produce en un  $\beta$  mayor conforme aumenta la velocidad del viento.

En  $\gamma$  existen también diferencias claras entre ambos prototipos. En el segundo prototipo destaca la práctica ausencia de movimientos en  $\gamma$  que permitan el movimiento continuo de rotación en torno al eje de unión. Tan sólo dos casos, para bajas velocidades de viento, presentan esta dinámica. El prototipo 1 tiene un mejor comportamiento, con un 25% de los casos favorables a este movimiento. Esta estadística mejora con la velocidad de viento. Así, para un flujo con velocidad media de 12 m/s uno de cada tres casos se comporta así en P1. En este movimiento, para ambos prototipos, las situaciones de equilibrio son escasas, suponiendo un 6% de los casos en P1 y un 8% en P2. Lo más normal, por tanto son situaciones oscilatorias en torno a una posición fija, que supone un 69% de los casos en P1 y un 90% en P2.

Como hemos mencionado la frontera que se ha marcado para distinguir las posiciones de equilibrio de los movimientos oscilatorios ha sido subjetiva. De cara a clarificar el comportamiento del cuerpo incluimos, a continuación, una serie de figuras en las que mostramos las amplitudes máximas y mínimas alcanzadas por ambos prototipos. Estas amplitudes se calculan una vez que el efecto de la inclusión instantánea del viento ha desaparecido. Para asegurarnos de ello, consideramos exclusivamente los últimos 1.8 segundos de cada periodo de simulación.

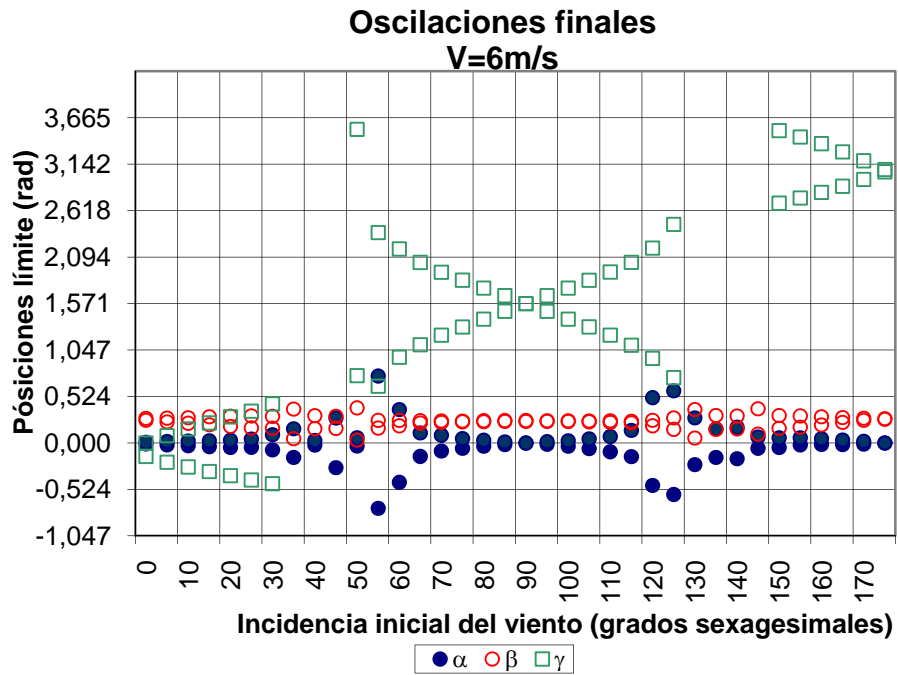


Figura 1.4-23 Movimientos finales; P1; V= 6 m/s

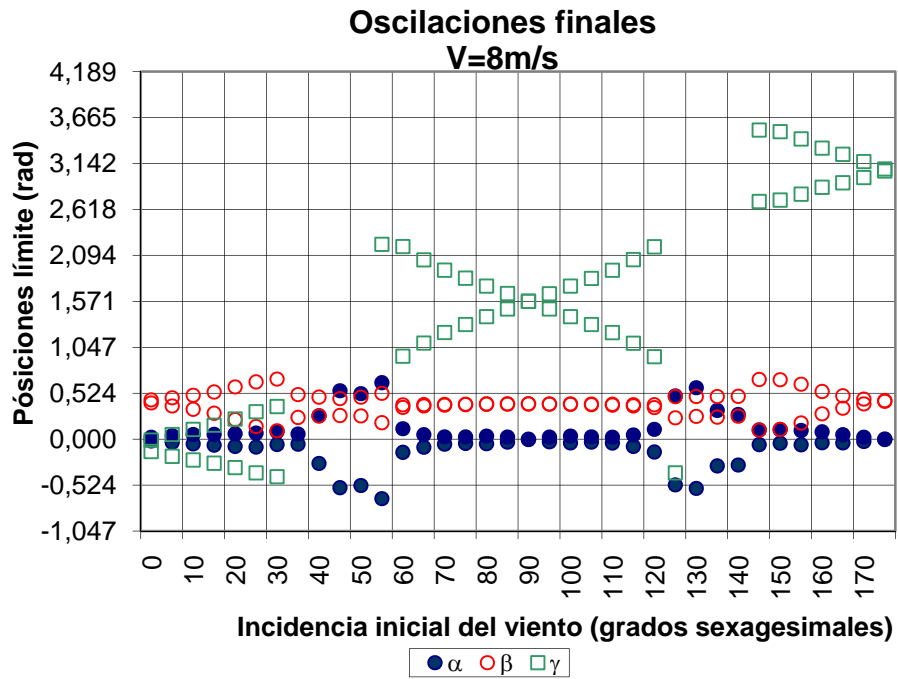


Figura 1.4-24 Movimientos finales; P1; V= 8 m/s

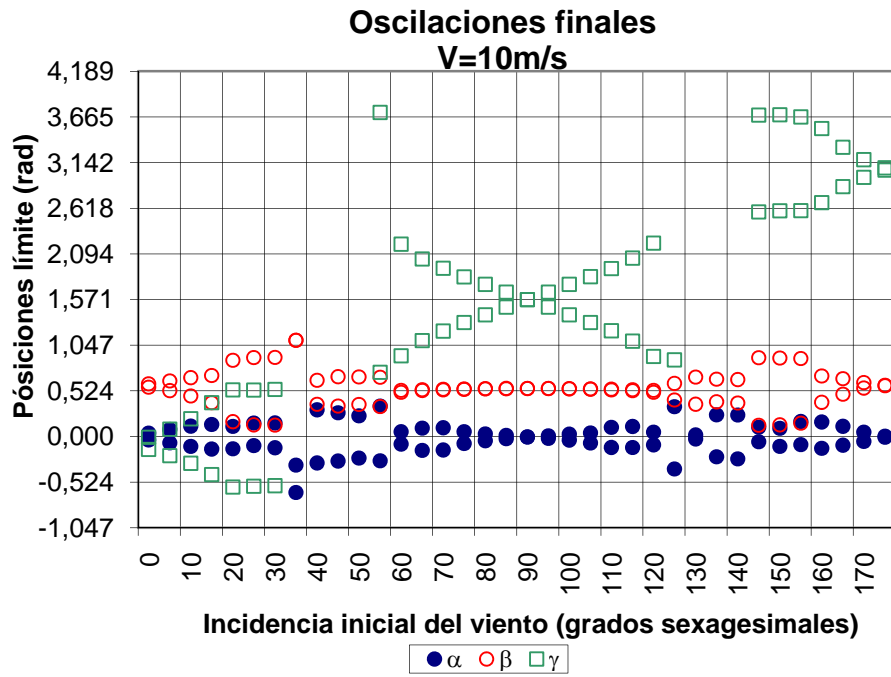


Figura 1.4-25 Movimientos finales; P1; V= 10 m/s

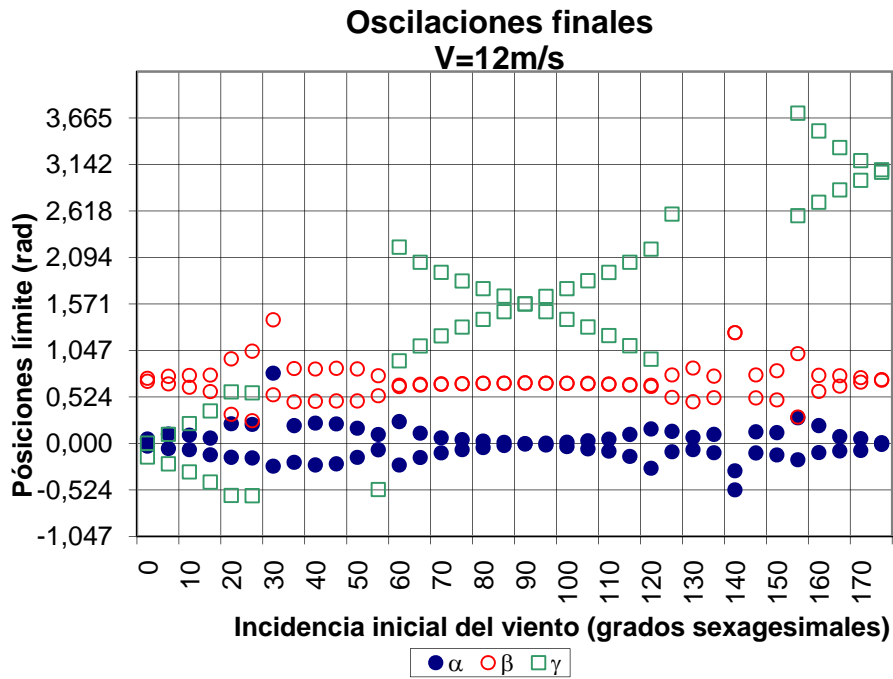


Figura 1.4-26 Movimientos finales; P1; V= 12 m/s

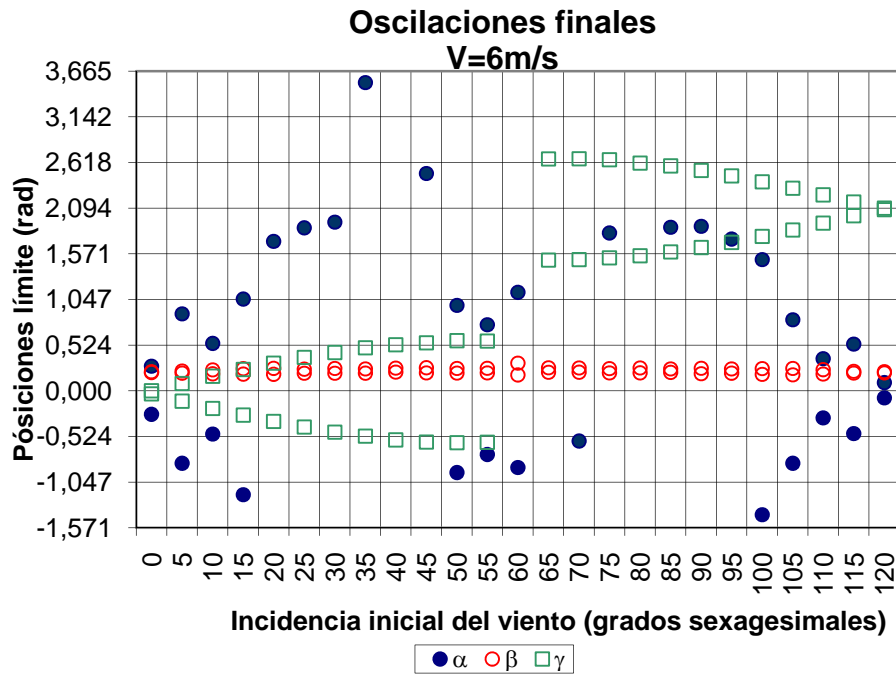


Figura 1.4-27 Movimientos finales; P2; V= 6 m/s

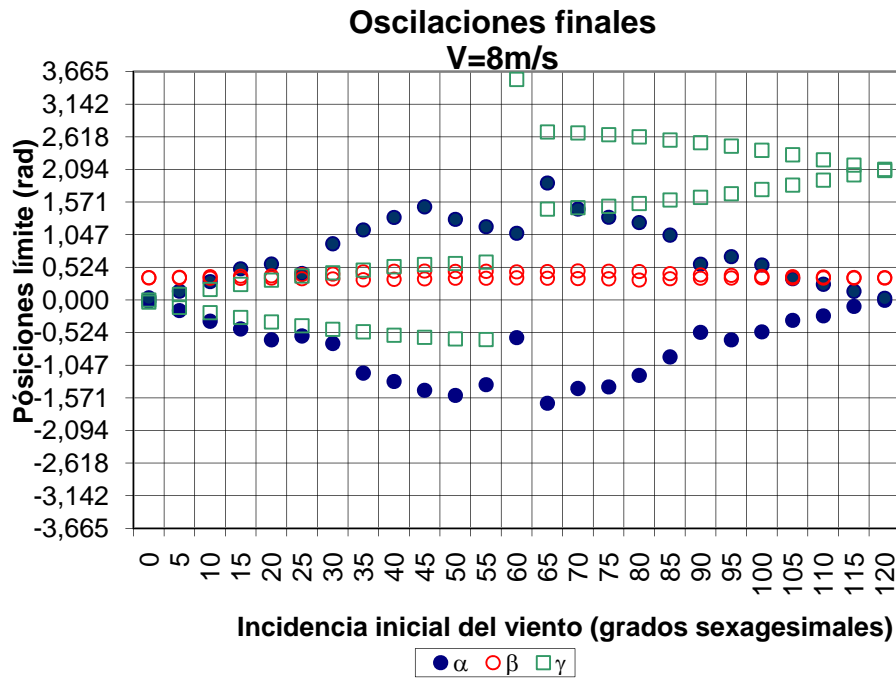


Figura 1.4-28 Movimientos finales; P2; V= 8 m/s

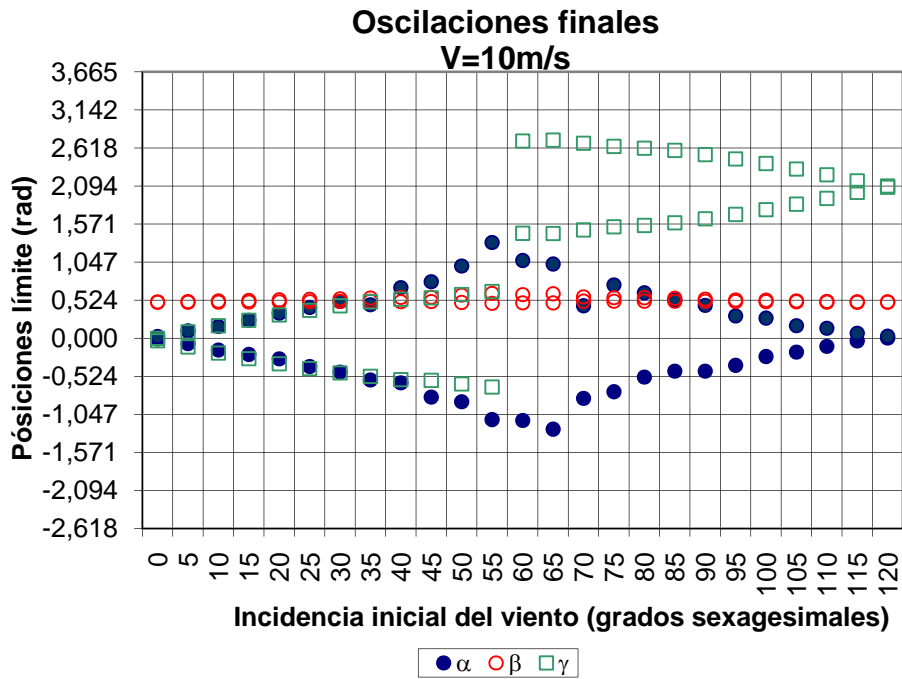


Figura 1.4-29 Movimientos finales; P2; V= 10 m/s

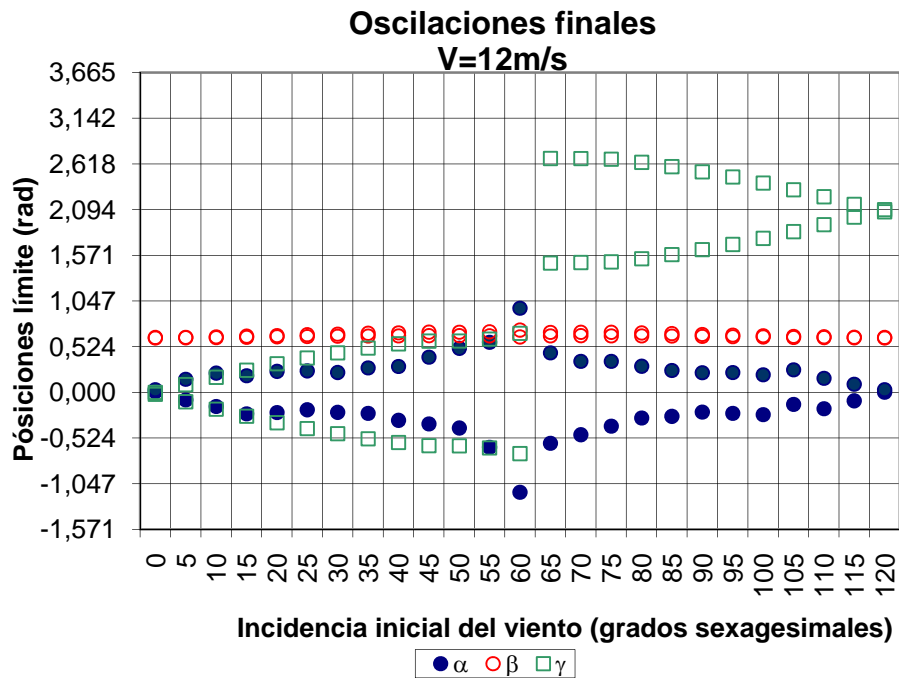


Figura 1.4-30 Movimientos finales; P2; V= 12 m/s

En estas gráficas se observan con claridad las diferencias entre ambos prototipos que hemos mencionado anteriormente. Los ángulos en los que no aparecen datos en  $\gamma$  se deben a que el cuerpo ha entrado en una dinámica de giros completos, por lo que escapa del rango contemplado en la figura.

#### 1.4.2.3 Descripción de las oscilaciones

Como se ha visto en el apartado anterior, la tipología más frecuente es aquella en la que se produce un movimiento oscilatorio del cuerpo en torno a una posición de equilibrio. En ocasiones, como la mostrada en la figura 1.4-11, este movimiento presenta similitudes con el movimiento sinusoidal.

A continuación vamos a ahondar en las características de estas sinusoides analizando sus amplitudes y periodos de oscilación, lo que haremos para cada uno de los movimientos considerados:  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ .

Debido a la compleja variación de la fuerza ejercida por el viento a lo largo del tiempo no es posible obtener una ecuación analítica que nos permita conocer el periodo de oscilación del cuerpo. En su lugar se ha realizado un análisis de los resultados numéricos en el que el periodo se entiende como el tiempo transcurrido entre dos máximos y la amplitud como la diferencia entre los valores máximo y mínimo observados en dicho periodo.

Debido a las características del movimiento, variables con el tiempo, los resultados obtenidos no muestran un periodo o amplitud únicos, si no valores variables en el tiempo. Tomamos la media de estos valores como valor característico del movimiento considerado y su desviación típica como estimador de la regularidad de la onda estudiada.

A continuación presentamos, para los tres movimientos, los resultados obtenidos, para todo el espectro de ángulos y velocidades de viento analizadas.

- **Movimientos en  $\gamma$ :**

Las figuras 1.4-31 y 1.4-32 muestran las amplitudes de las sinusoides en este movimiento para ambos prototipos.



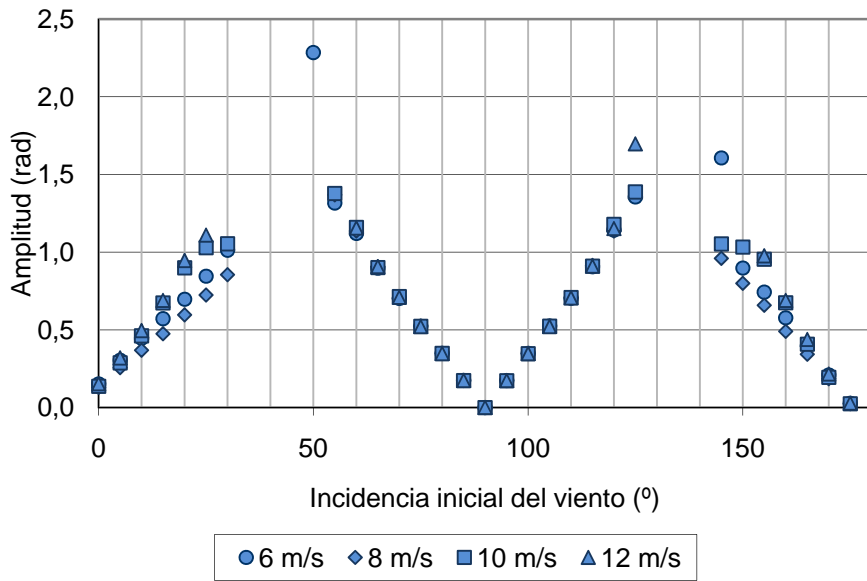


Figura 1.4-31 Amplitud de oscilación;  $\gamma$ ; P1

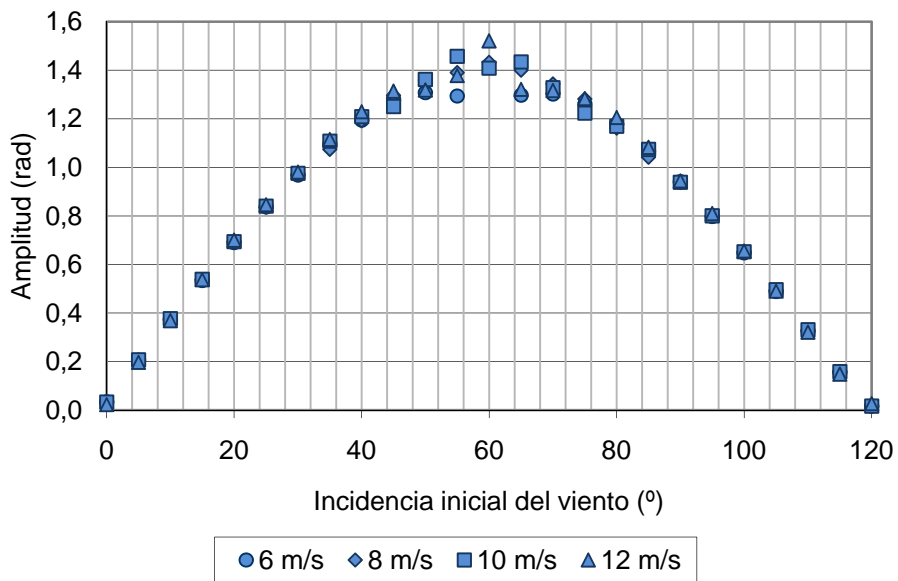


Figura 1.4-32 Amplitud de oscilación;  $\gamma$ ; P2

Es interesante observar como las amplitudes dependen de la dirección de incidencia del viento, pero no de su velocidad. Además, la amplitud es máxima cuando la orientación inicial del viento coincide con la bisectriz de dos palas y mínima cuando lo hace con alguna de las palas.

Sin embargo la velocidad del viento sí que influye en el movimiento del cuerpo. La figura 1.4-33 muestra la situación para el prototipo 1, en esta figura se aprecia como las variaciones en periodo, debidas a diferencias en la velocidad son del mismo orden de magnitud que las que provocan las variaciones en el ángulo de incidencia inicial del viento (no presentamos la figura correspondiente a P2, pero muestra diferencias similares).

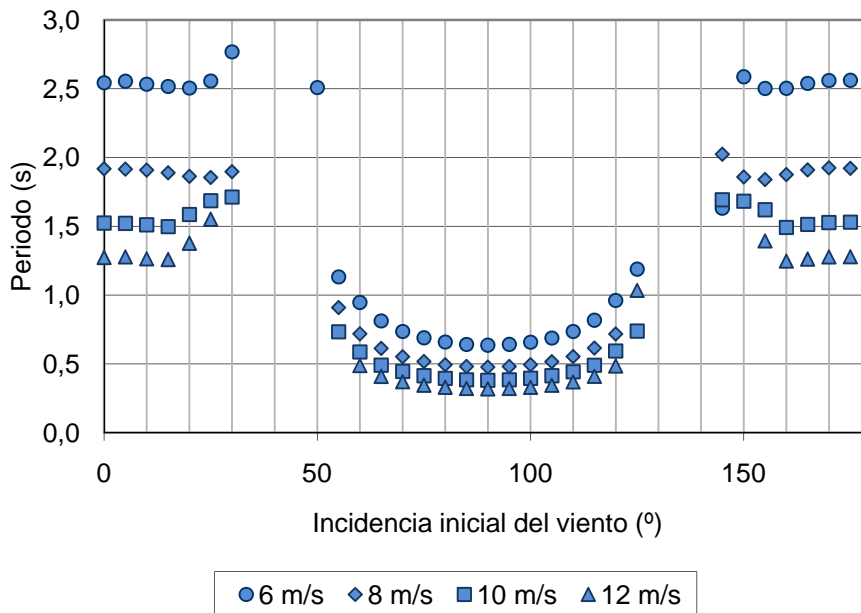


Figura 1.4-33 Periodo de oscilación;  $\gamma$ ; P1

Para analizar la dependencia del periodo respecto de la velocidad del viento hemos adimensionalizado los valores obtenidos multiplicándolos por la velocidad del viento y dividiéndolos por la altura media de las caras (21.5 cm), así obtenemos:

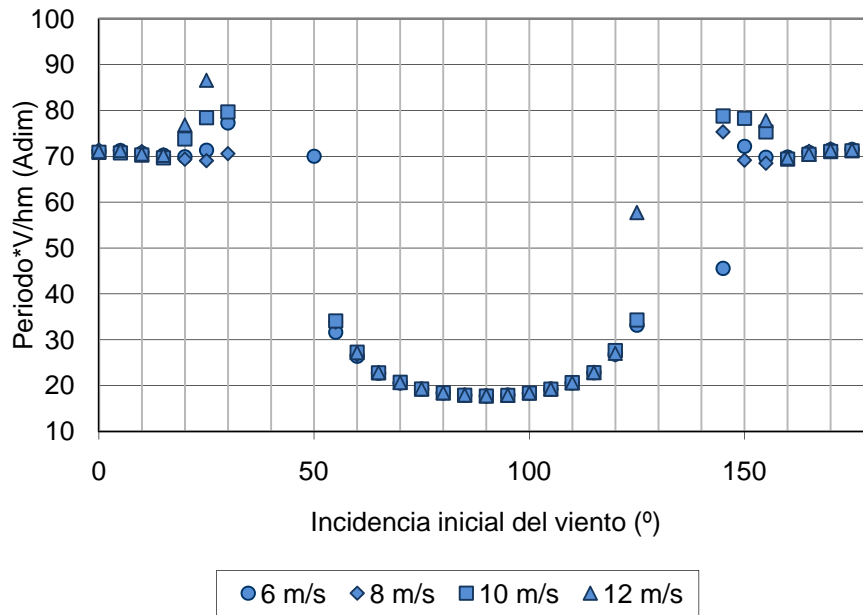
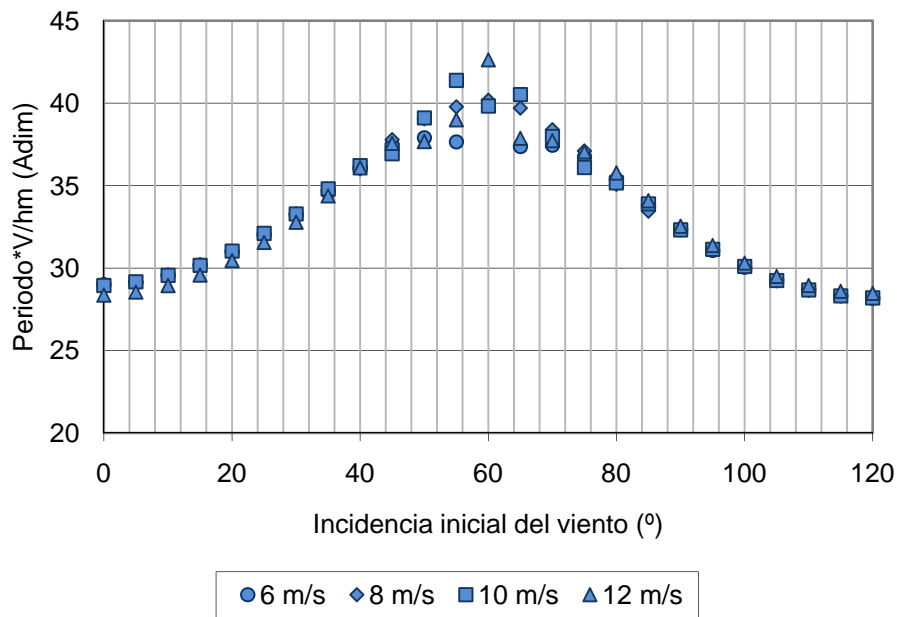


Figura 1.4-34 Periodo de oscilación adimensionalizado;  $\gamma$ ; P1

Como vemos el periodo adimensionalizado en P1, para la mayoría de las incidencias, es independiente de las velocidades consideradas y bastante homogéneo para el resto de las incidencias.

Por otro lado también llama la atención la existencia de dos zonas claramente diferenciadas tanto en esta figura como en la 1.4-33 que parecen mostrar dos sinusoides de diferentes características. Estas zonas están separadas por los ángulos en los que el cuerpo entra en una dinámica de giros completos en torno a su eje. En la zona central el viento incide con ángulos entre 60-120°, en el caso periférico los ángulos van de 330-30°. En ambos casos, por tanto, el viento es relativamente paralelo a una de la palas del prototipo, en la primera zona es paralelo a la más pequeña y en la segunda a la de mayor altura. En ambos casos hay una pala que está sometida a presiones importantes, es la diferencia en la superficie de las palas la causa última del diferente comportamiento.

Como hemos indicado, el periodo del segundo prototipo presenta una dependencia análoga de la velocidad. En la figura 1.4-35 presentamos directamente los datos adimensionalizados:



**Figura 1.4-35 Período de oscilación adimensionalizado (I);  $\gamma$ ; P2**

Es de destacar que en este caso no parecen existir dos tipos de ondas. Además observamos como, en este caso, el máximo de la variable analizada se produce en la zona central, en un ángulo de incidencia correspondiente a la bisectriz de dos palas. Los mínimos se alcanzan para una incidencia inicial de 0°.

En la figura 1.4-36 observamos como la desviación estándar de la amplitud depende también, fundamentalmente, del ángulo de incidencia inicial.

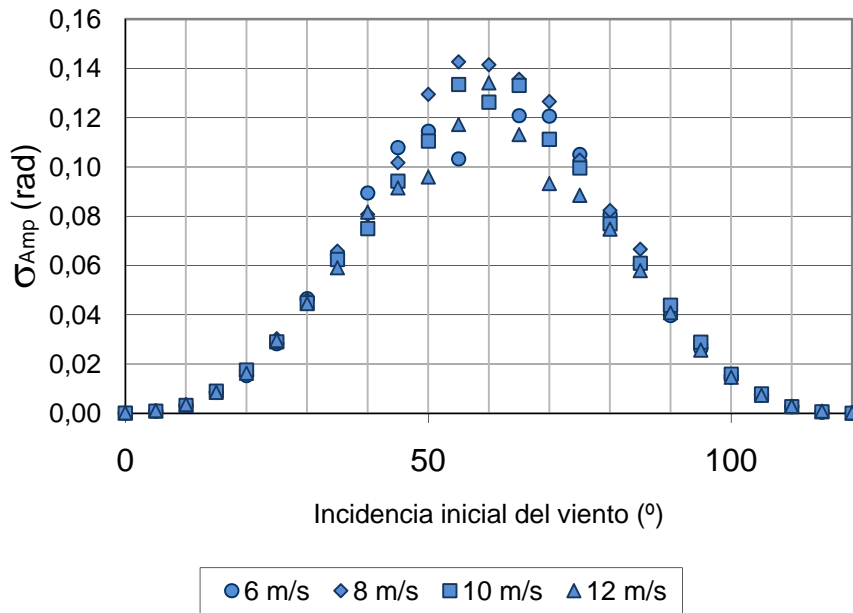
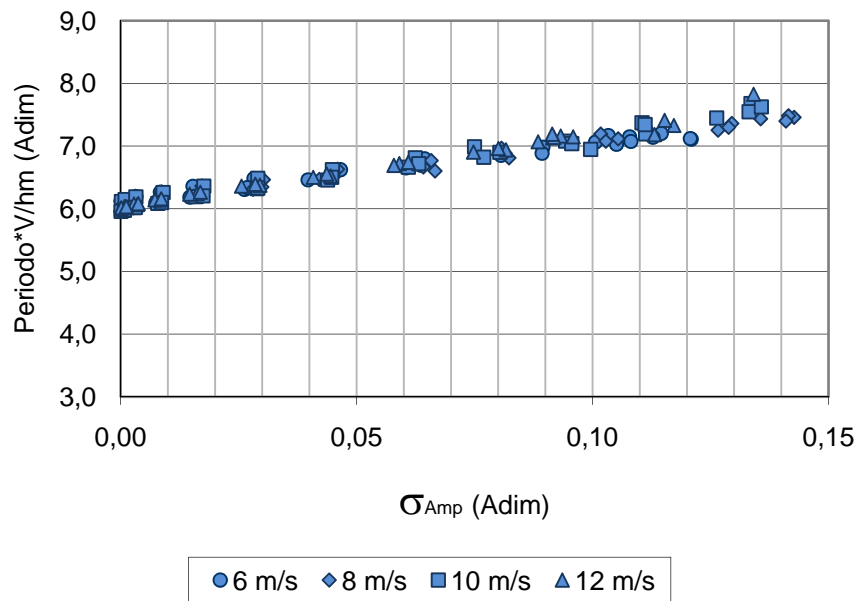


Figura 1.4-36 Desviación típica de la amplitud; γ; P2

De la observación de las figuras 1.4-35 y 1.4-36 se deduce que las incidencias iniciales del viento donde se dan los mayores periodos adimensionalizados la sinusoide se está apartando de una geometría perfecta. Esta impresión se confirma en la figura 1.4-37 donde se representa el periodo adimensionalizado contra la desviación típica de la amplitud. Esta figura pone de manifiesto que esta relación es de tipo lineal.



**Figura 1.4-37 Período adimensionalizado;  $\gamma$ ; P2**

Esto refuerza la idea de que las desviaciones observadas no se deben a la presencia de ondas de diferente naturaleza sino a la distorsión, por la presencia de inestabilidades, de una misma onda.

En el caso del prototipo 1, sin embargo, obtenemos dos líneas claramente diferenciadas, como observamos a continuación y que vienen a confirmar la presencia de las dos familias de sinusoides que comentábamos más arriba:

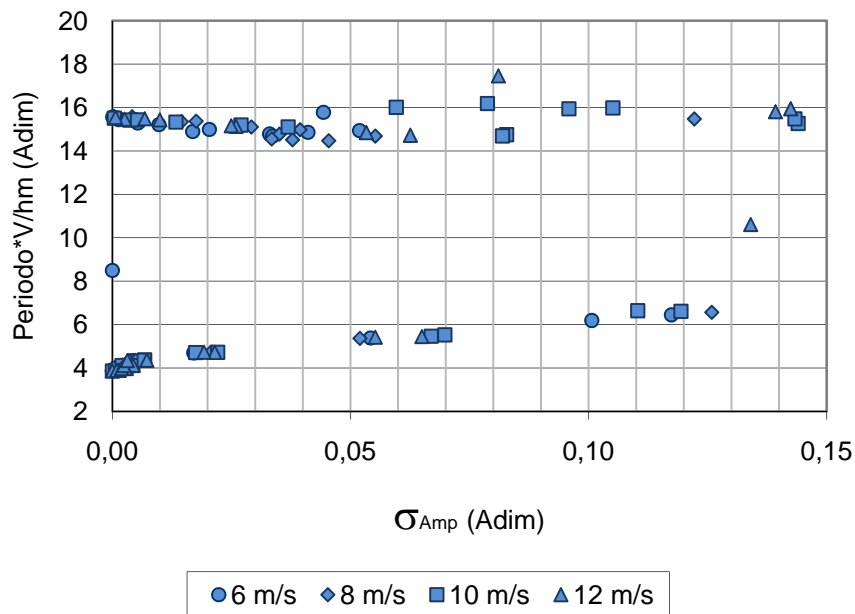


Figura 1.4-38 Período de oscilación adimensionalizado;  $\gamma$ ; P1

▪ **Movimientos en  $\beta$ :**

Como ya hemos visto en el movimiento en  $\beta$  las oscilaciones tienden a amortiguarse conforme pasa el tiempo. Esto provoca que en término de amplitudes no sea posible encontrar patrones fijos al margen de este decaimiento. Este hecho se pone de manifiesto observando los valores de las desviaciones típicas de las amplitudes, que en  $\beta$ , tienden a ser 8 ó 10 veces superiores a las de  $\gamma$ .

Centrándonos en los periodos, se hace más difícil que en el caso de  $\gamma$  encontrar características comunes. Una de las razones radica en que ninguno de los dos prototipos presenta sinusoides claras. A modo de ejemplo, para el prototipo 1, a una velocidad de 8m/s, la desviación típica media de los periodos de los 36 casos analizados es del 15% del valor medio, mientras que en  $\gamma$ , este valor es tan sólo del 2%. Esto provoca que las oscilaciones tengan una mayor heterogeneidad que en caso de los movimientos en torno al eje.

Aún así existen ciertas características que son dignas de mención. La más clara es la tendencia de las oscilaciones a presentar un periodo adimensionalizado constante aunque función de la velocidad del viento. De esta manera, podemos apreciar, en el prototipo 2 la siguiente figura:

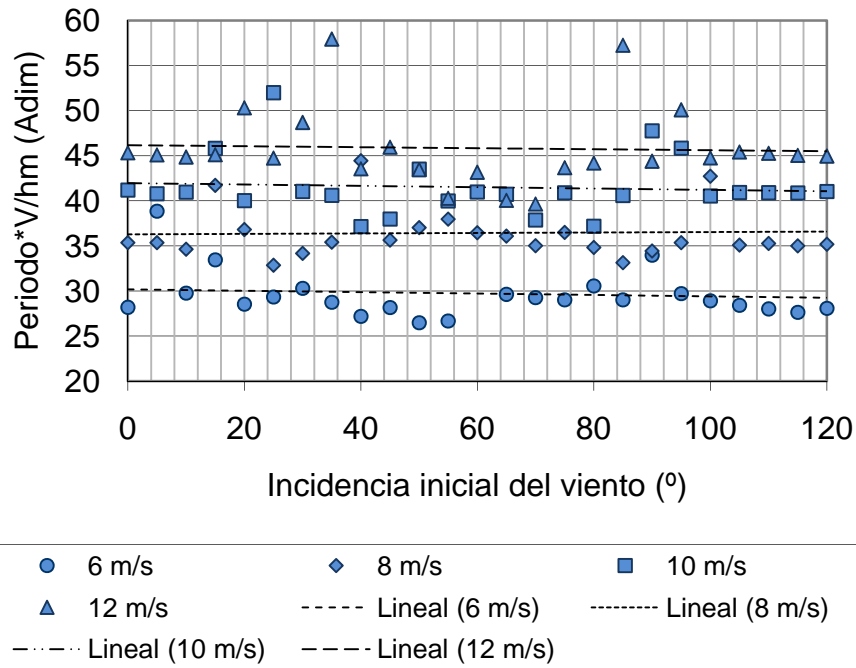


Figura 1.4-39 Periodo de oscilación adimensionalizado;  $\beta$ ; P2

Se observa como un ajuste lineal por mínimos cuadrados de los valores obtenidos para cada velocidad resulta en rectas prácticamente horizontales. Podemos por tanto concluir que, independientemente de la orientación inicial del viento, los periodos medios adimensionalizados que se observan tienden a una cantidad única, función de la velocidad del viento.

Al contrario de lo que ocurría en  $\gamma$ , en este caso no existe una correspondencia lineal y directa entre las desviaciones típicas de la amplitud observada y el periodo adimensionalizado.

El prototipo 1, por otro lado, presenta unas características más complejas. La dualidad observada en términos de las oscilaciones en  $\gamma$ , también se observan en este sentido de giro, lo que provoca que la figura que



presentamos a continuación muestra, también, dos zonas claramente diferenciadas.

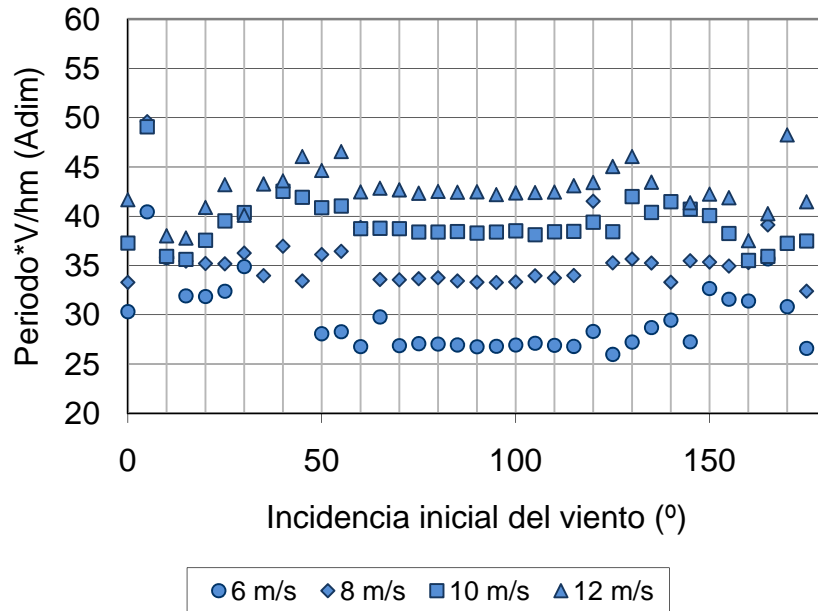


Figura 1.4-40 Periodo de oscilación adimensionalizado;  $\beta$ ; P1

Se puede comprobar cómo en la zona central de la gráfica, para cada velocidad de viento, se observa un periodo adimensionalizado prácticamente constante. Sin embargo, en ambos extremos de la figura los periodos se contraen, observándose menores diferencias entre los periodos observados para diferentes velocidades del viento.

En este caso tampoco se ha observado una relación directa entre las desviaciones con respecto a los valores medios de las amplitudes y los periodos adimensionalizados.

▪ **Movimientos en  $\alpha$ :**

El movimiento en  $\alpha$  es, sin duda, el más complejo de los observados. Como hemos visto, además, el comportamiento de ambos cuerpos presenta diferencias importantes en este movimiento.

En términos de las amplitudes no es posible encontrar un patrón único. Los valores que se obtienen dependen tanto de la velocidad como de la

orientación inicial del viento. En el caso del prototipo 1 observamos en la figura 1.4-41 como el valor de estas amplitudes presenta un máximo, para todas las velocidades, en torno a los ángulos de 45° y 135°, mientras que se reduce progresivamente conforme nos acercamos a una posición en la que la orientación inicial del viento tienda a ser paralela a una de las palas. Esto se debe a que para orientaciones del viento próximas a 45° y 135° el cuerpo va a oscilar en su movimiento en  $\gamma$  en torno a las orientaciones que mayores fuerzas transversales provocan.

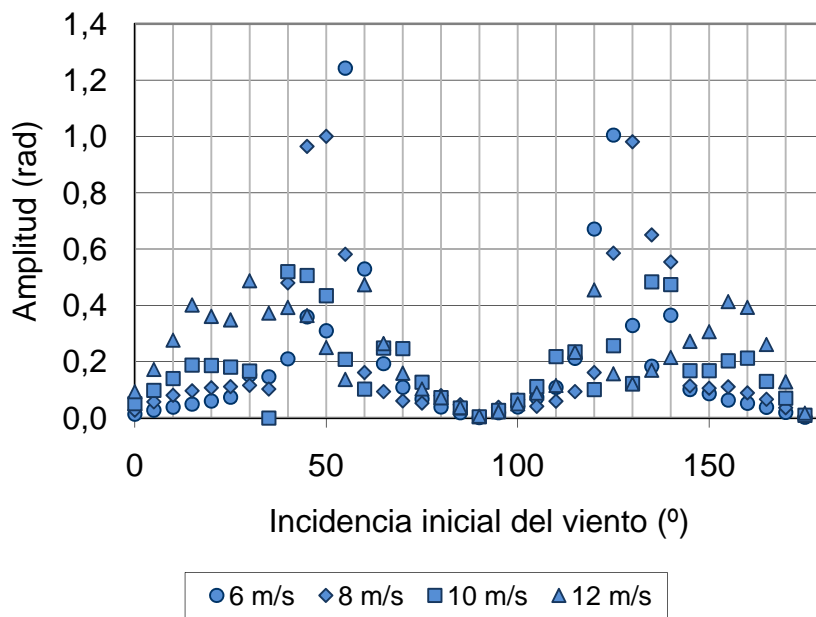


Figura 1.4-41 Amplitudes;  $\alpha$ ; P1

En la siguiente figura podemos observar un comportamiento análogo para P2.

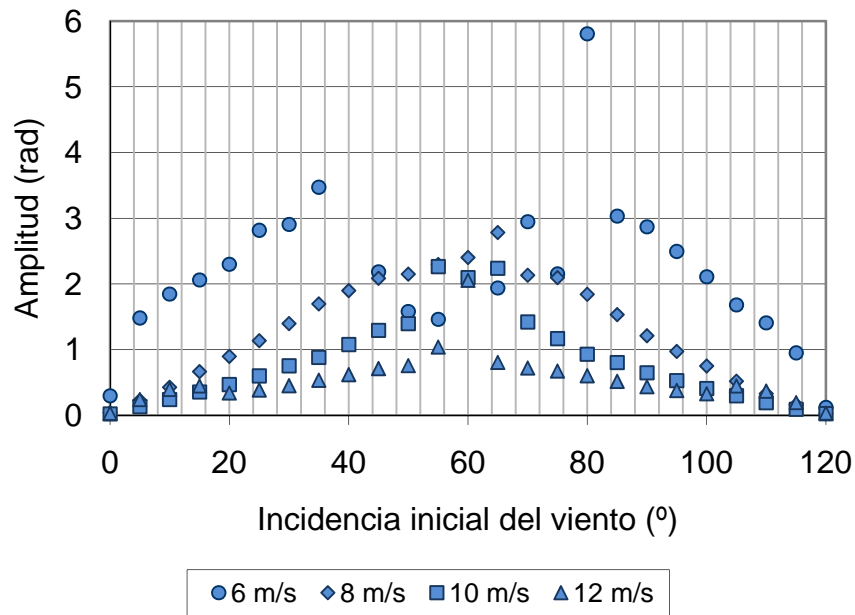
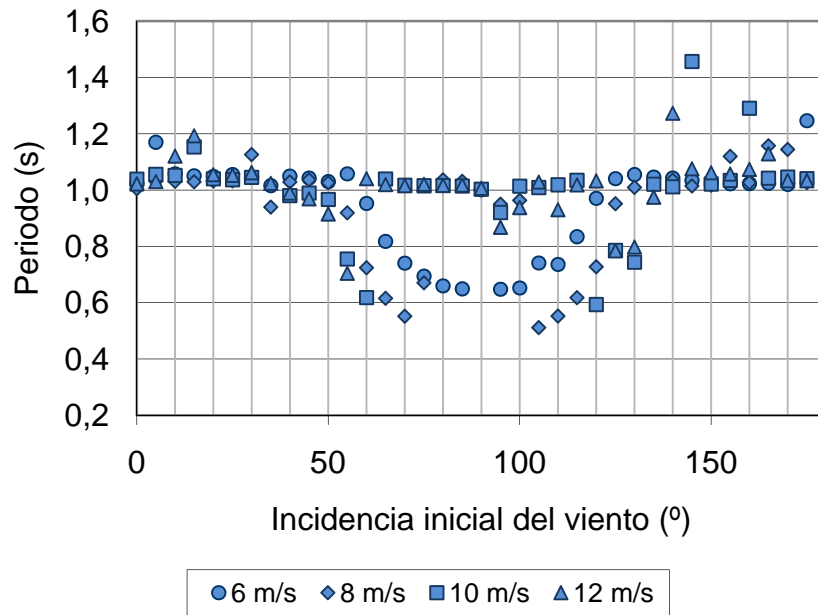


Figura 1.4-42 Amplitudes;  $\alpha$ ; P2

Como ya sabíamos las amplitudes en este segundo prototipo son mucho mayores que en el primero, fenómeno que muestra claramente la figura anterior. Los valores que no están representados son aquellos en los que el cuerpo ha entrado en una dinámica de movimientos complejos. Observamos, al igual que con el prototipo 1, como las máximas amplitudes tienden a ubicarse en la bisectriz de dos de las palas.

En términos de periodos, ambos prototipos tienen un comportamiento claramente diferenciado. El prototipo 1 presenta unos periodos de oscilación en torno a un segundo, independientemente de la velocidad y de la orientación inicial del viento (ver figura 1.4-43). Sólo nos alejamos de esta conducta para bajas velocidades en el entorno de 50° a 150°, en el que estos periodos tienden a disminuir. Esta zona es, precisamente, aquella en la que se producen movimientos de tipología diferente en  $\gamma$ . Parece, por tanto que las oscilaciones en dicho eje de giro afectan, para bajas velocidades, al movimiento en  $\alpha$ .



**Figura 1.4-43 Período de oscilación;  $\alpha$ ; P1**

En P2, sin embargo, tenemos un comportamiento completamente diferente. En este cuerpo los periodos de oscilación en  $\alpha$  dependen de la velocidad del viento y sólo alcanzan un patrón fijo relativamente independiente de la velocidad del viento una vez adimensionalizados. En la figura 1.4-44 se observa como la mayoría de las observaciones siguen un mismo patrón aunque con algunas excepciones.

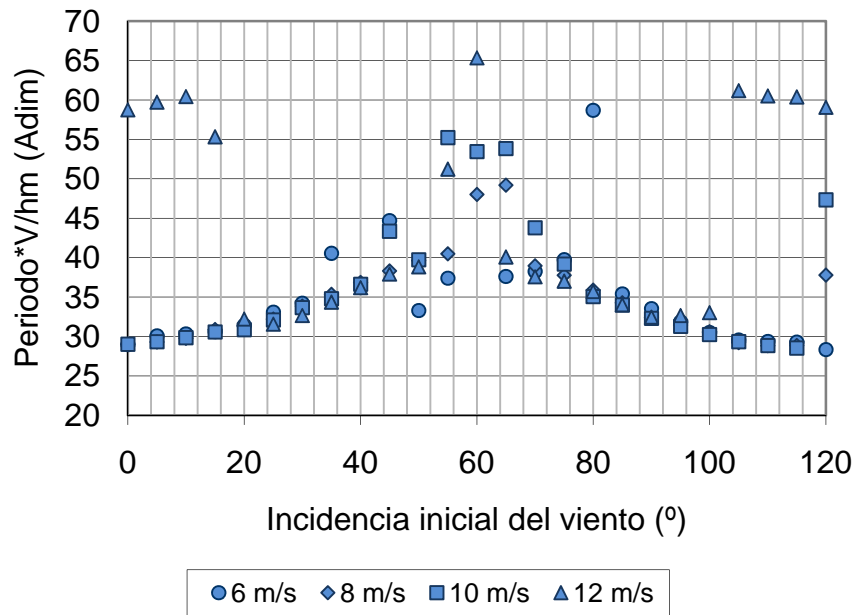


Figura 1.4-44 Período de oscilación adimensionalizado;  $\alpha$ ; P2

Vemos como se observa un patrón creciente conforme la orientación inicial del viento se aleja de la que marca alguna de las palas hasta encontrar unos máximos en la bisectriz de dos de ellas.

▪ **Resumen:**

El análisis que hemos realizado de las sinusoides que describen el movimiento de los dos prototipos nos ha permitido apreciar interesantes propiedades en términos de amplitudes y periodos de oscilación. El movimiento en  $\gamma$  queda descrito con bastante precisión en los casos en los que cada prototipo presente movimientos en torno a una posición de equilibrio: su amplitud y periodo son predecibles conociendo la orientación inicial y la velocidad del viento.

Los movimientos en  $\beta$  no se caracterizan con una amplitud única ya que ésta tiende a amortiguarse conforme avanza el tiempo. Por otro lado, los periodos de oscilación presentan importantes variaciones, sin embargo, una vez adimensionalizados, para cada velocidad de viento, tienden a ser constantes, por lo que sí que es posible conocer en qué magnitud se van a producir, dependiendo, como hemos indicado, de la velocidad del viento.

Los movimientos en  $\alpha$  conceden la oportunidad de ser analizados en términos tanto de amplitudes como de periodos. Lamentablemente en ambos prototipos las amplitudes son dependientes tanto de la orientación inicial como de la velocidad del viento. En términos de periodos, por primera vez, ambos prototipos tienen un comportamiento radicalmente diferente. P1 presenta unos periodos en general independientes de la velocidad y de la orientación inicial del viento. Sólo escapan de este patrón las orientaciones iniciales del viento entre  $50^\circ$  y  $130^\circ$  y sólo para bajas velocidades. P2, por el contrario presenta unos periodos dependientes tanto de la velocidad como de la orientación inicial del viento. Afortunadamente, adimensionalizando los periodos eliminamos la dependencia con respecto de la velocidad.

Como conclusión, con este análisis hemos conseguido caracterizar en cierta medida los tres movimientos analizados, siendo ahora capaces de predecir de manera apriorística alguna de sus características.

#### 1.4.2.4 Balance de fuerzas

Las ecuaciones que rigen la dinámica de los prototipos están compuestas por una serie de términos en los que se integran las diferentes fuerzas que actúan sobre el cuerpo. Su análisis nos va a permitir explicar las dinámicas que hemos observado al resolver las ecuaciones de movimiento.

En primer lugar vamos a trabajar con la ecuación que rige el movimiento en  $\beta$ , que enunciamos en (1.61). En ella vamos a proceder a realizar un cambio de variable a cada término no constante y no adimensional, de tal manera que cada una de estas variables quede como el producto de un número adimensional multiplicado por una variable característica del cuerpo o su entorno, como mostramos a continuación:

$$\begin{aligned} A_r^o &= \frac{A_r}{H^2}; & d_{FY}^o &= \frac{d_{FY}}{H}; & V^o &= \frac{V}{\sqrt{}}; \\ I_\beta^o &= \frac{I_\beta}{MH^2}; & m^o &= \frac{m}{M}; & d_P^o &= \frac{d_P}{H}; \\ t^o &= \frac{t}{T}; \end{aligned} \quad (1.68)$$

Las cantidades características se corresponden en el modelo con las siguientes magnitudes:

- $T$  : Tiempo característico
- $H$  : Altura del prototipo
- $v$  : Velocidad del viento
- $M$  : Masa del prototipo

La nueva definición del tiempo nos lleva a tratar la variación temporal de  $\beta$  como:

$$\beta' = \frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{T} \frac{d\beta}{dt^o};$$

$$\beta'' = \frac{d^2\beta}{dt^2} = \frac{1}{T^2} \frac{d^2\beta}{dt^{o2}} \quad (1.69)$$

Si desarrollamos el cuadrado del lado derecho de (1.61), aplicamos los cambios de variable expuestos en (1.68) y las expresiones de (1.69), tenemos:

$$\frac{d^2\beta}{dt^{o2}} = \frac{T^2 \rho H v^2}{2M} \frac{F_Y^a A_r^o d_{FY}^o V^{o2}}{I_\beta^o} \cos^2(\beta) + \frac{\rho H^3}{2M} \frac{F_Y^a A_r^o d_{FY}^o{}^3}{I_\beta^o} \left( \frac{d\beta}{dt^o} \right)^2$$

$$- \frac{\rho T H^2 v}{M} \frac{F_Y^a A_r^o V^o d_{FY}^o{}^2}{I_\beta^o} \cos(\beta) \frac{d\beta}{dt^o} - \frac{g T^2 d_p^o m^o}{H I_\beta^o} \text{sen}(\beta) \quad (1.70)$$

Donde en cada sumando hemos agrupado separadamente los términos de valores adimensionales, los términos con dimensión y las funciones de  $\beta$ .

Dentro de los términos adimensionales, todos los que tienen un superíndice "o" son del orden de la unidad ya que son términos con poca variación y han sido divididos por una magnitud característica de esa cantidad. El término  $F_Y^a$  se ha mostrado en los ensayos, también, del orden de la unidad.

Analizando las dinámicas en  $\beta$ , se observa que los valores máximos de  $\beta$  son del orden de 0.4, y que los periodos son siempre del orden de la unidad. De aquí podemos concluir, por un lado, que el valor adecuado para  $T$  en (1.69) es  $T \approx 1$ , que el coseno es siempre de orden 1 y que el término en seno tiene orden máximo la unidad.

Por otro lado, de (1.69), como  $T \approx 1$ , se tiene que  $\frac{d\beta}{dt^0} \approx \beta'$ . Teniendo en cuenta el valor de las amplitudes máximas y el de  $T$  deducimos que  $\beta'$  está, siempre, entre 0.3 y 0.6, y por tanto es menor que 1 en todo caso. Por tanto:

$$\frac{d\beta}{dt^0} \leq 1 \quad (1.71)$$

De todo lo anterior podemos afirmar que tanto los productos de los términos adimensionales como los que son función de  $\beta$  que aparecen presentes en la ecuación (1.70) son para el primer término del orden de la unidad y para el resto, a lo sumo, de ese mismo orden.

Pasamos a continuación al análisis de los términos con dimensiones. Estos términos dependen de una serie de parámetros característicos que son extraídos de las propiedades físicas de los prototipos ( $H$ ), de las condiciones ambientales impuestas a los mismos ( $\vee$ ) o de las dinámicas observadas ( $T$ ). Estos términos son:

$$\begin{aligned} T_{\beta 1} &= \frac{T^2 \rho H \vee^2}{2M}; \\ T_{\beta 2} &= \frac{\rho H^3}{2M}; \\ T_{\beta 3} &= \frac{\rho T H^2 \vee}{M}; \\ T_{\beta 4} &= \frac{g T^2}{H}; \end{aligned} \quad (1.72)$$

La interpretación física de estos términos es la siguiente:

- $T_{\beta 1}$  está relacionado con la fuerza ejercida por el viento. Tiende a separar al cuerpo de su posición de equilibrio vertical.
- $T_{\beta 2}$  y  $T_{\beta 3}$  suponen una corrección a  $T_{\beta 1}$  por la velocidad del cuerpo.
- $T_{\beta 4}$  está relacionado con la fuerza de la gravedad y tiende a llevar el cuerpo a la posición vertical.



La masa del prototipo depende de las dimensiones del cuerpo, y por tanto de  $H$ . Suponiendo que para cualquier  $H$  el cuerpo tiene un espesor constante y que la relación anchura-altura del cuerpo se mantiene constante podemos decir que:

$$M \approx \rho_c H^2 \quad (1.73)$$

Donde  $\rho_c$  es una densidad dependiente del área del cuerpo, que, para un espesor de 5mm, vale  $11.13 \text{ Kg/m}^2$ . Por tanto los términos pasan a ser:

$$\begin{aligned} T_{\beta 1} &= \frac{T^2 \rho v^2}{2 \rho_c H}; \\ T_{\beta 2} &= \frac{\rho H}{2 \rho_c}; \\ T_{\beta 3} &= \frac{\rho T v}{\rho_c}; \\ T_{\beta 4} &= \frac{g T^2}{H}; \end{aligned} \quad (1.74)$$

Un  $T$  adecuado para este estudio es el del periodo de oscilación del cuerpo, que se ha mostrado en todos los movimientos estudiados del orden de un segundo. La velocidad característica del viento es del orden de unos 10m/s, mientras que  $H$  es del orden de la altura del cuerpo que, como se ha explicado anteriormente, puede considerarse del orden de 0.2. Por lo tanto, reemplazando en (1.74) obtenemos que:

$$\begin{aligned} T_{\beta 1} &= 27.40; \\ T_{\beta 2} &= 0.011; \\ T_{\beta 3} &= 1.10; \\ T_{\beta 4} &= 49.05; \end{aligned} \quad (1.75)$$

Como vemos hay dos términos de orden superior,  $T_{\beta 1}$  y  $T_{\beta 4}$ , quedando los otros dos relegados a un segundo plano. Por tanto el balance de fuerzas queda fundamentalmente representado por la relación entre la fuerza del viento y la fuerza gravitatoria. El efecto del cambio de la velocidad relativa

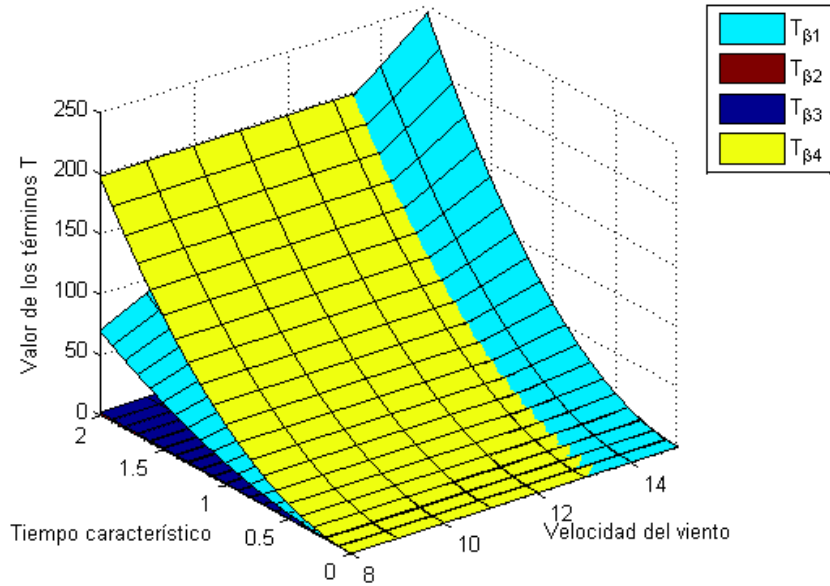
entre el cuerpo y el viento por la propia dinámica del primero es, siempre, de segundo orden.

Este equilibrio de fuerzas es el que marca la dinámica observada. La fuerza del viento, que siempre presenta el mismo sentido, tiende a separar el cuerpo de su posición de equilibrio. Si lo consiguen las fuerzas másicas entran en acción, teniendo siempre sentido contrario a las del viento. Dado que ambas son del mismo orden el cuerpo tiende a situarse en una posición de equilibrio o a oscilar con amplitudes reducidas en torno a ella, dependiendo de que ambas lleguen a un valor constante o varíen con el tiempo, lo que se afirma con la dinámica observada en el apartado 1.4.2.1.

Este es el balance obtenido para las condiciones de velocidad de viento impuesta y los periodos observados. Es interesante, sin embargo, analizar qué es lo que ocurre para otras condiciones diferentes. De esta manera para  $H = 0.2m$ , a partir de los valores obtenidos en (1.74) obtenemos que:

$$\begin{aligned}T_{\beta 1} &= 0.27T^2 v^2; \\T_{\beta 2} &= 0.011; \\T_{\beta 3} &= 0.11T v; \\T_{\beta 4} &= 49.05T^2;\end{aligned}\tag{1.76}$$

Que gráficamente resulta:



**Figura 1.4-45 Valores de los diferentes términos según el valor de  $T_{\beta 1}$ ,  $T_{\beta 2}$ ,  $T_{\beta 3}$  y  $T_{\beta 4}$**

Donde se puede observar como las superficies de  $T_{\beta 1}$  y  $T_{\beta 2}$  alcanzan en casi toda las situaciones valores mucho mayores que las otras dos.

En el movimiento en  $\alpha$ , el balance de fuerzas está expresado en la ecuación (1.66). Realizando los mismos cambios de variable que anteriormente, e incluyendo, además, los siguientes términos:

$$d_{F1}^0 = \frac{d_{F1}}{H}; \quad d_{F2}^0 = \frac{d_{F2}}{H}; \quad I_{\alpha}^0 = \frac{I_{\alpha}}{MH^2}. \quad (1.77)$$

Del mismo modo que antes, el cambio de variable en el tiempo fuerza que:

$$\alpha' = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{T} \frac{d\alpha}{dt^0};$$

$$\alpha'' = \frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{1}{T^2} \frac{d^2\alpha}{dt^{02}} \quad (1.78)$$

Con todos estos cambios podemos escribir la ecuación de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\alpha}{dt^2} = & \frac{F_X^a T^2 \rho H \sqrt{2} V^{o2}}{2M I_\alpha^o} \cos^2(\beta) + \frac{F_X^a \rho H^3}{2M I_\alpha^o} \left( \frac{d\beta}{dt^o} \right)^2 \\ & - \frac{F_X^a T \rho H^2 \sqrt{2} A_r^o d_{F1}^{o2} V^o}{M I_\alpha^o} \cos(\beta) \frac{d\beta}{dt^o} - \frac{F_Y^a \rho H^3}{2M I_\alpha^o} \frac{d^2\alpha}{dt^{o2}} \quad (1.79) \\ & - \frac{g T^2}{H} \frac{m^o d_p^o}{I_\alpha^o} \text{sen}(\alpha) \end{aligned}$$

De nuevo tenemos la ecuación que rige el movimiento expresada como una suma de productos de números con dimensiones por números adimensionales y por funciones de  $\alpha$  y  $\beta$ . Como en el caso del movimiento en  $\beta$ , los números adimensionales tienen valores del orden de la unidad. La única excepción es  $F_X^a$ , que tiene valores distintos en el prototipo 1 y en el prototipo 2. Sabiendo que  $F_Y^a$  es del orden de 1, lo relacionamos con él, de tal manera que  $F_X^a = \varepsilon F_Y^a$ , donde  $\varepsilon$ , conforme a lo mostrado en el apartado 1.3.4.4, es de orden 1 en el prototipo 2 y del orden de  $10^{-1}$  en el prototipo 1.

Dentro de los términos trigonométricos,  $\text{sen}(\alpha)$  debe ser analizado con mayor detalle ya que su comportamiento es diferente entre uno y otro prototipo.

Como hemos visto  $F_X^a$  determina las fuerzas inducidas transversales y por tanto, los valores de  $\alpha$ . En P1, por ser  $F_X^a$  pequeña, podemos afirmar que el valor de  $\alpha$  es del orden de  $10^{-1}$ , al estar en el caso de pequeñas oscilaciones podemos establecer que  $\text{sen}(\alpha) \approx \alpha \approx 10^1$ . En el prototipo 2, sin embargo, las oscilaciones sí son importantes, por lo tanto debemos tomar  $\text{sen}(\alpha)$  del orden de 1.

En este movimiento los periodos observados también son del orden de un segundo. Por tanto, análogamente al movimiento en  $\beta$ , la derivada temporal  $\frac{d\alpha}{dt^o} \approx \alpha'$  y de nuevo tiene, como mucho, orden 1.

Refiriéndonos a los términos con dimensiones, y utilizando de nuevo (1.73) para describir la masa, obtenemos las siguientes expresiones para los términos con dimensiones que rigen el comportamiento del cuerpo:

$$\begin{aligned}
 T_{\alpha 1} &= \frac{\varepsilon T^2 \rho \vee^2}{2 \rho_c H}; \\
 T_{\alpha 2} &= \frac{\varepsilon \rho H}{2 \rho_c}; \\
 T_{\alpha 3} &= \frac{\varepsilon \rho T \vee}{\rho_c}; \\
 T_{\alpha 4} &= \frac{\rho H}{2 \rho_c}; \\
 T_{\alpha 5} &= \frac{g T^2}{H};
 \end{aligned}
 \tag{1.80}$$

Cuyo significado físico es el siguiente:

- $T_{\alpha 1}, T_{\alpha 2}, T_{\alpha 3}$  y  $T_{\alpha 5}$  tienen el mismo significado que  $T_{\beta 1}, T_{\beta 2}, T_{\beta 3}$  y  $T_{\beta 4}$  respectivamente.
- $T_{\alpha 4}$  está relacionado con el rozamiento del aire.

Para los valores de  $T, H$  y  $\vee$  que propusimos al analizar el movimiento en  $\beta$  obtenemos:

Término	Valor	
	P1	P2
$T_{\alpha 1}$	2.274	22.740
$T_{\alpha 2}$	1.096E <sup>-3</sup>	1.096E <sup>-2</sup>
$T_{\alpha 3}$	1.096E <sup>-1</sup>	1.096
$T_{\alpha 4}$	1.096E <sup>-2</sup>	1.096E <sup>-2</sup>
$T_{\alpha 5}$	4.905	49.05

**Tabla 1.4-9 Fuerzas totales sobre el P1**

Vemos como, de nuevo, es el balance entre las fuerzas del viento y las del peso las que marcan la dinámica del cuerpo. Como hemos comentado, en el

caso del prototipo 1 este equilibrio se logra para oscilaciones de menor cuantía que para el prototipo 2.

Este resultado también explica las figuras que hemos mostrado anteriormente.

#### 1.4.2.5 Linealización de las ecuaciones de movimiento

Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de los prototipos, como se ha visto en el apartado 1.4.2.3, desembocan en un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales. Este sistema ha sido resuelto mediante un algoritmo basando en una formulación explícita de Runge-Kutta.

Las ecuaciones que hemos planteado no presentan una excesiva complejidad, no obstante podemos conseguir una garantía adicional sobre la corrección de la solución obtenida si linealizamos las ecuaciones, las resolvemos y comparamos las soluciones obtenidas en ambos casos. Esta linealización consiste en reemplazar todas las funciones trigonométricas y potencias que aparecen en ellas por términos lineales o constantes. En el caso de funciones trigonométricas, es bien conocido que para ángulos pequeños, son válidas las equivalencias:

$$\begin{aligned} \text{sen}(\phi) &\approx \phi; \\ \text{cos}(\phi) &\approx 1; \end{aligned} \tag{1.81}$$

Los restantes términos no lineales son los dependientes de la velocidad del cuerpo al cuadrado. Estos términos no son muy relevantes, ya que la velocidad del cuerpo siempre es un orden de magnitud menor que la del viento. Para su linealización se reemplazan por los módulos de las velocidades sin exponente.

De esta manera, podemos simplificar para la ecuación (1.61) que regía el movimiento en  $\beta$  hasta obtener:

$$\beta'' = \frac{V_v - d_{FY}\beta'}{|V_v - d_{FY}\beta'|} \frac{F_Y^a A_r}{2} \frac{1}{I_\beta} \rho (V_v^2 + d_{FY}^2 \beta'^2 - V_v d_{FY} \beta') d_{FY} - \frac{mg\beta d_p}{I_\beta} \tag{1.82}$$

Y a su vez la ecuación (1.66) se simplificaría hasta:

$$\alpha'' = \frac{V_v - d_{F1}\beta'}{|V_v - d_{F1}\beta'|} \frac{F_x^a A_r}{2} \frac{1}{I_\alpha} \rho (V_v^2 + d_{F1}^2 \beta'^2 - 2V_v d_{F1} \beta') d_{F1} - \frac{\alpha'}{|\alpha'|} \frac{F_y^a A_r}{2} \frac{1}{I_\alpha} \rho (d_{F2}^2 \alpha') d_{F2} - \frac{mg\alpha d_p}{I_\alpha} \quad (1.83)$$

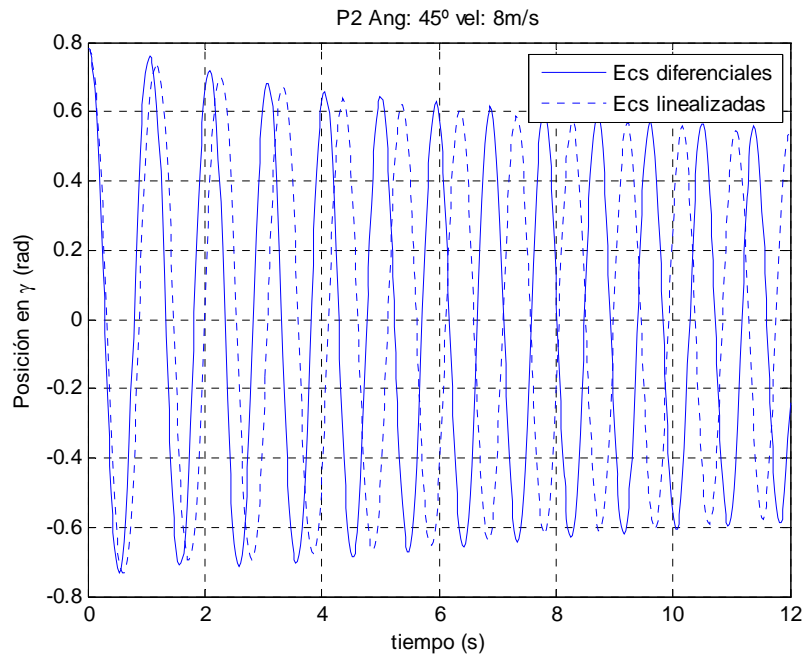
La tercera ecuación no necesita de simplificación alguna:

$$\gamma'' = \frac{M_d}{I_d} \quad (1.84)$$

Dentro de cada ecuación, a los factores  $F_x^a, F_y^a, M_d, d_{FY}, d_p, d_{F1}, d_{F2}$  se les aplica una interpolación lineal.

Con estas simplificaciones podemos conocer el comportamiento del cuerpo siempre y cuando permanezca en el rango de los pequeños movimientos. En este rango, si las ecuaciones no lineales se están resolviendo de manera adecuada, ambas soluciones deberán mostrar un acuerdo razonable.

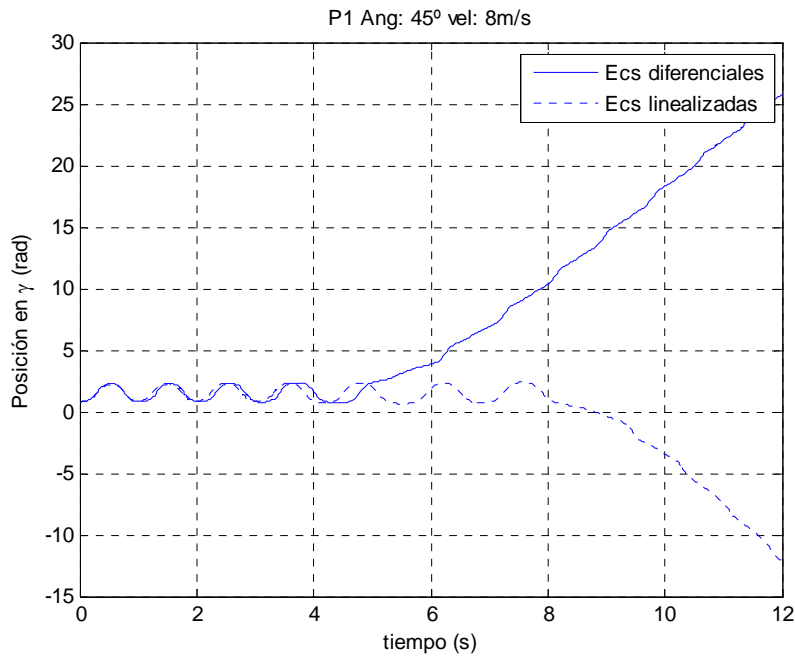
Los resultados obtenidos con esta comparación son, en general, muy satisfactorios. En  $\gamma$  la aproximación es notable, especialmente en los casos en los que el cuerpo no entra en dinámicas de rotación indefinida en torno al eje de unión. La figura 1.4-46 muestra un ejemplo. En él se observa un comportamiento muy similar entre ambas soluciones, con un ligero desfase en el periodo de las oscilaciones.



**Figura 1.4-46 comparación con ec. lineales;  $\gamma$ ; P2; Incidencia inicial:  $45^\circ$**

En los casos en que el cuerpo entra en una dinámica de giros completos ambos modelos discrepan acerca del momento en que el cuerpo comienza con tal dinámica. Debido a esto en algunos casos el sentido de giro también es distinto. Esto último no afecta a la frecuencia de reflejo de los destellos y por tanto no implica diferencia alguna en la funcionalidad del cuerpo. A excepción de estas dos diferencias la dinámica final es la misma, como se muestra en la figura 1.4-47

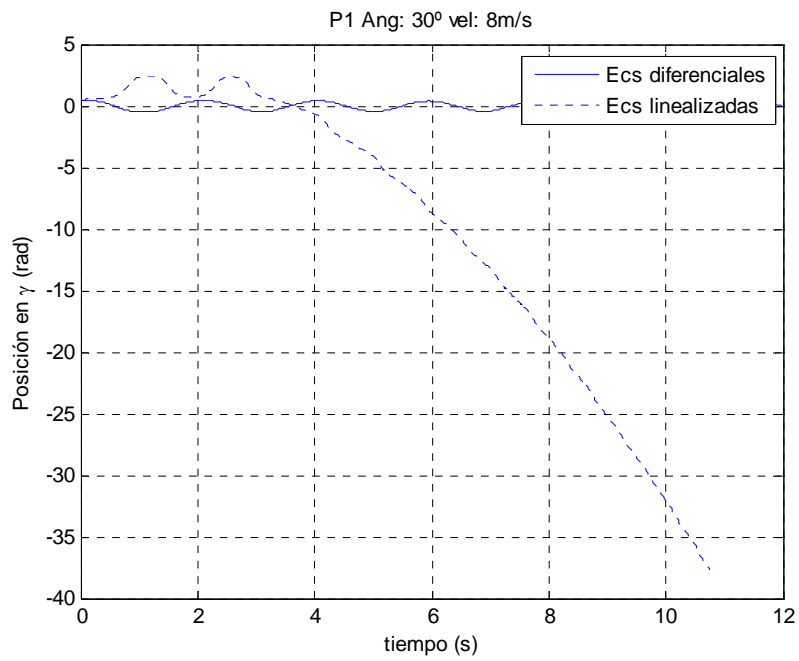




**Figura 1.4-47 comparación con ec. lineales;  $\gamma$ ; P1; Incidencia inicial:  $45^\circ$**

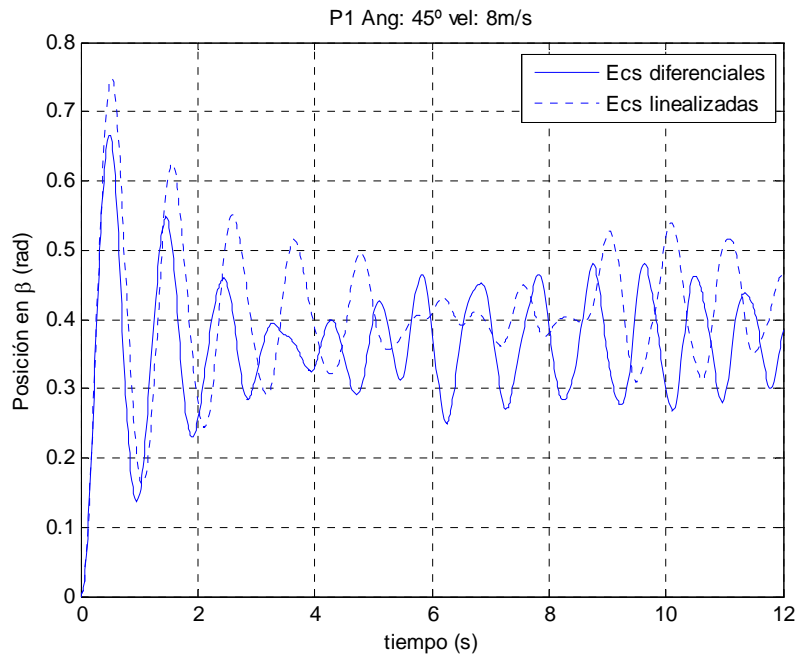
En cambio, aparecen diferencias de mayor relevancia en lo que respecta al valor frontera del ángulo inicial de incidencia del viento en el que los cuerpos comienzan el movimiento de rotación completa en torno al eje de unión. Así, para una velocidad de  $8\text{ m/s}$ , las ecuaciones lineales detectan la frontera en un ángulo de  $30^\circ$ , en vez del observado anteriormente de  $35^\circ$ .

Este hecho se pone de manifiesto en la figura 1.4-48 donde la solución por de las ecuaciones linealizadas predicen un régimen de giros indefinidos, mientras que el sistema no lineal predice un régimen de oscilaciones en torno a una posición fija.



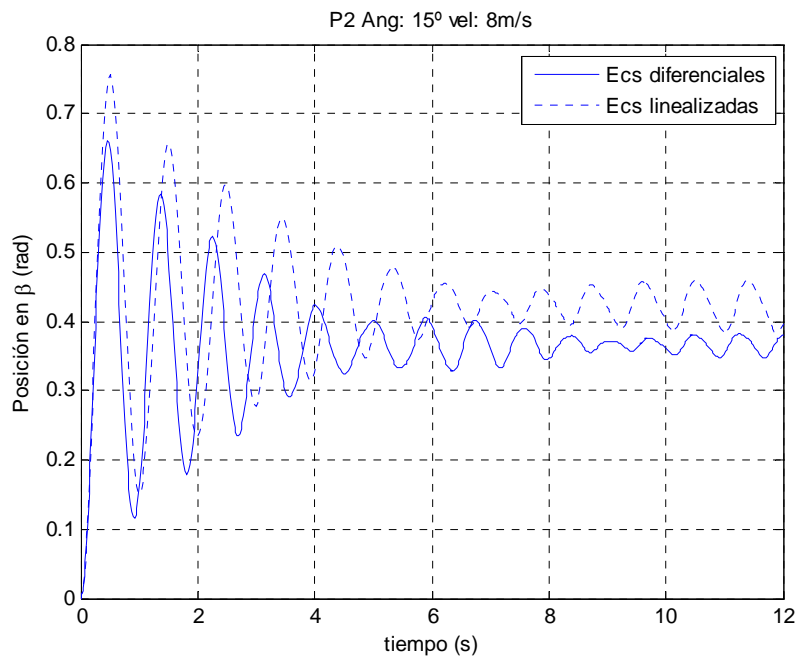
**Figura 1.4-48 comparación con ec. lineales;  $\gamma$ ; P1; Incidencia inicial:  $30^\circ$**

En  $\beta$ , también aparecen casos con soluciones muy concordantes, como el siguiente:



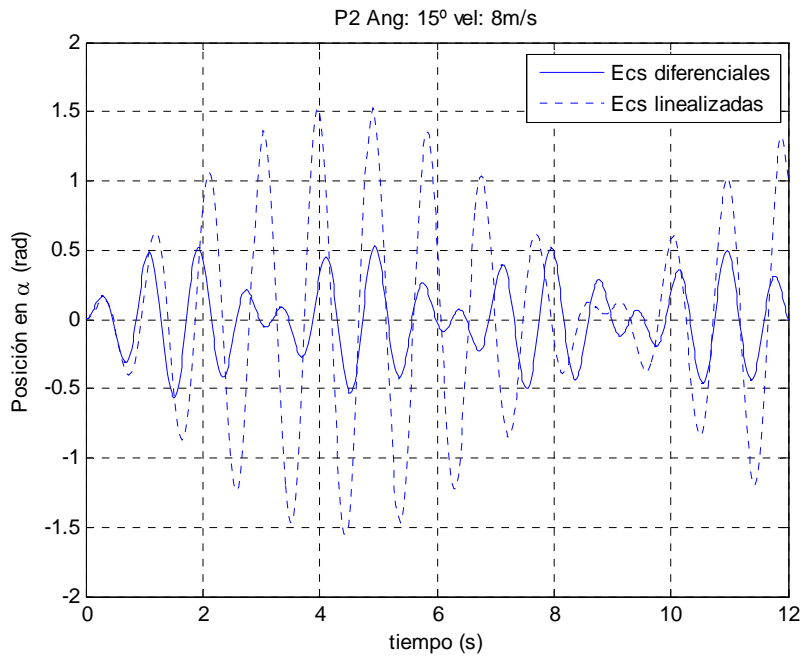
**Figura 1.4-49 comparación con ec. lineales;  $\beta$ ; P1; Incidencia inicial:  $45^\circ$**

Es de notar que en las situaciones de equilibrio se observa una tendencia de las ecuaciones lineales a predecir una posición de equilibrio a menor altura. Esto cobra sentido al considerar que la fuerza de la gravedad debe equilibrarse con una fuerza que es función de la velocidad en vez del cuadrado de la velocidad. A modo de ejemplo se expone un caso típico en la figura 1.4-50 :



**Figura 1.4-50 comparación con ec. lineales;  $\beta$ ; P2; Incidencia inicial: 15°**

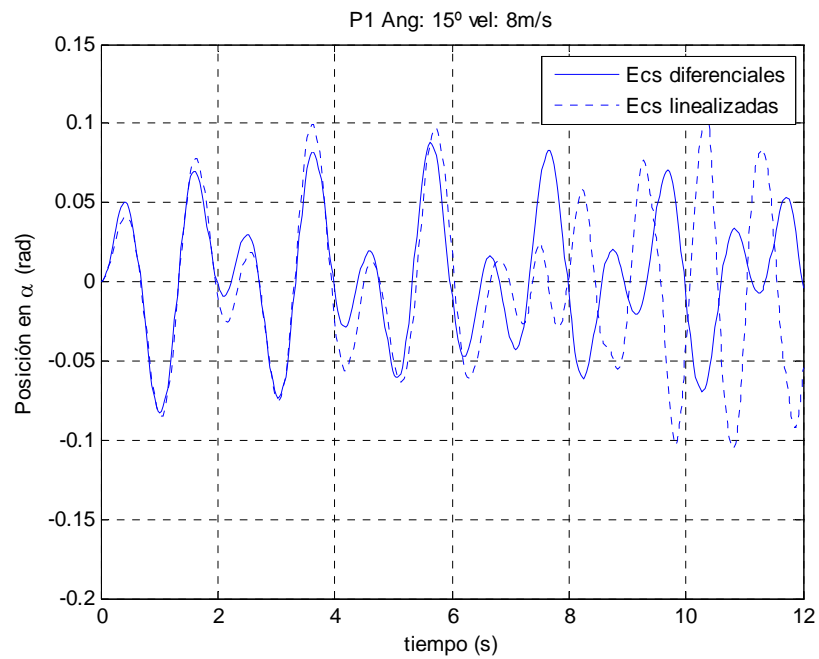
El movimiento que presenta mayores diferencias entre ambos sistemas de ecuaciones es el del prototipo 2 en  $\alpha$ , lo que se debe a la mayor complejidad del movimiento que, en la linealización fuerza la desaparición de efectos relevantes sobre la dinámica. La figura muestra un ejemplo de este caso 1.4-51:



**Figura 1.4-51 comparación con ec. lineales;  $\alpha$ ; P2; Incidencia inicial:  $15^\circ$**

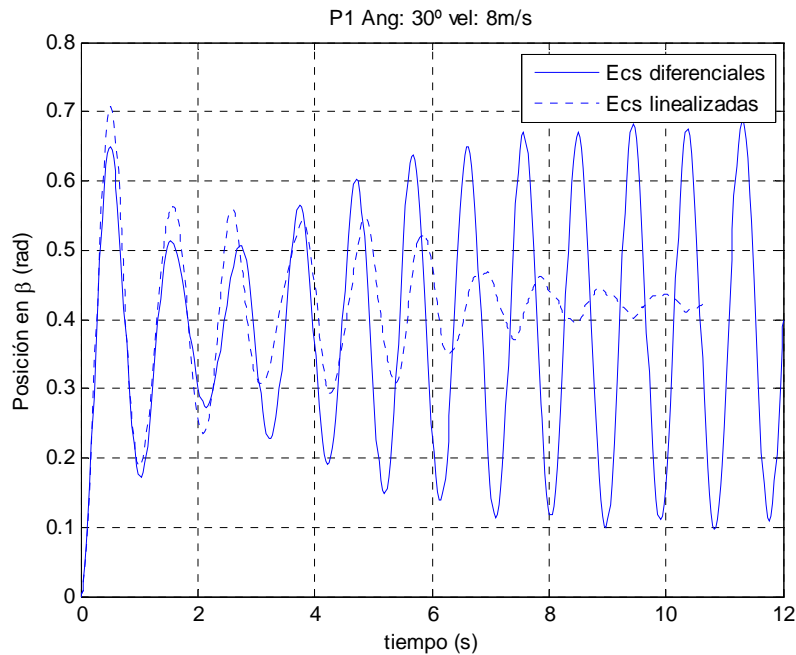
El movimiento, en los primeros instantes, presenta un comportamiento similar en ambos casos, sin embargo conforme avanza el tiempo, las divergencias entre ambos se magnifican. Es interesante observar como los periodos de las oscilaciones se mantienen en valores semejantes, siendo las amplitudes dónde se marcan las diferencias más ostensibles.

En el prototipo 1, por ser menor la fuerza inducida por el viento en este plano las predicciones se aproximan más:



**Figura 1.4-52 comparación con ec. lineales;  $\alpha$ ; P1; Incidencia inicial:  $15^\circ$**

Para movimientos de mayor amplitud en los que las simplificaciones utilizadas para las ecuaciones lineales no son válidas, las diferencias, como era de esperar se amplían. Se muestra un ejemplo en la figura 1.4-53 .



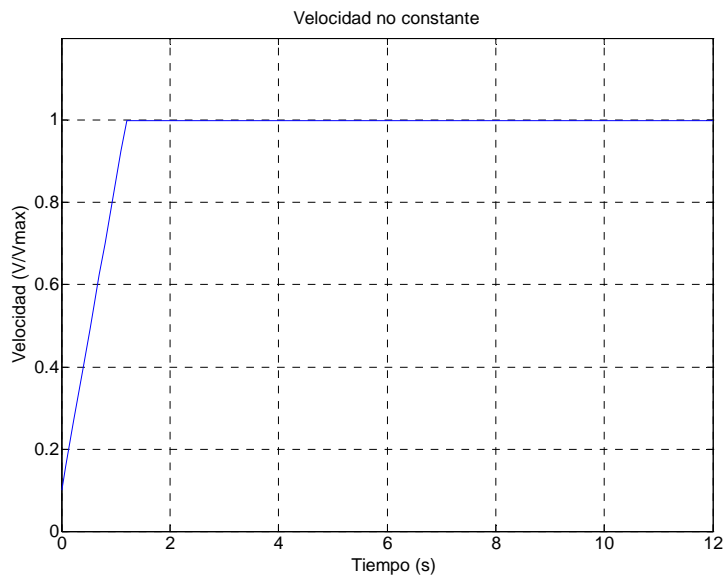
**Figura 1.4-53 comparación con ec. lineales;  $\beta$ ; P1; Incidencia inicial:  $30^\circ$**

En general con este sistema se demuestra que la solución obtenida para las ecuaciones de movimiento del prototipo es correcta en el rango de validez de pequeñas oscilaciones y velocidad reducida. Es importante destacar que las diferencias encontradas no marcan el límite del rango de validez, es decir, aquellos casos en los que ambas soluciones difieran no implican un error por parte del modelo utilizado. Las restricciones empleadas por el modelo linealizado son más duras y por tanto se espera un error mayor en ellas.

#### 1.4.2.6 Efectos del perfil temporal de la velocidad del viento

El objetivo de este capítulo es entender la dinámica de ambos prototipos para diferentes orientaciones a determinadas velocidades de viento constantes. En el modelo realizado se introduce la velocidad del viento de manera instantánea con un valor constante, desde el instante inicial hasta el final. Esto implica la inclusión de manera súbita de cargas sobre el prototipo. Resulta evidente que, en los primeros instantes, el movimiento del cuerpo será diferente si introducimos un régimen de velocidades menos

brusco. Sin embargo el efecto a medio y largo plazo que pueda derivarse del empleo de uno u otro régimen es más difícil de predecir. Para discernir la influencia del régimen de velocidades de viento utilizado sobre la dinámica final del prototipo se ha realizado una modificación del programa de tal manera que la velocidad aumente progresivamente. El régimen de velocidades introducido en este caso es el siguiente:



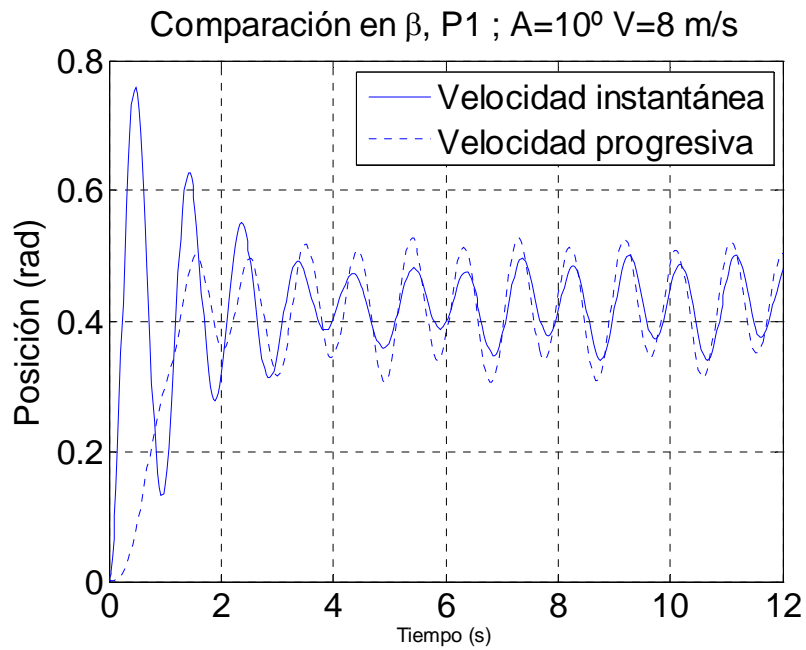
**Figura 1.4-54 Velocidad no constante: Esquema de aceleración**

Así, durante el primer 10% del tiempo de simulación el flujo sufre una aceleración constante hasta que la velocidad alcanza el valor definitivo, que se mantiene constante durante el resto del tiempo de computación. De esta manera se pueden comparar los regímenes estacionarios entre una y otra modelización.

- **Comportamiento del prototipo 1**

A la vista de los resultados se puede afirmar que la influencia sobre la dinámica final es escasa. Casos como el mostrado en la figura 1.4-55 son mayoritarios

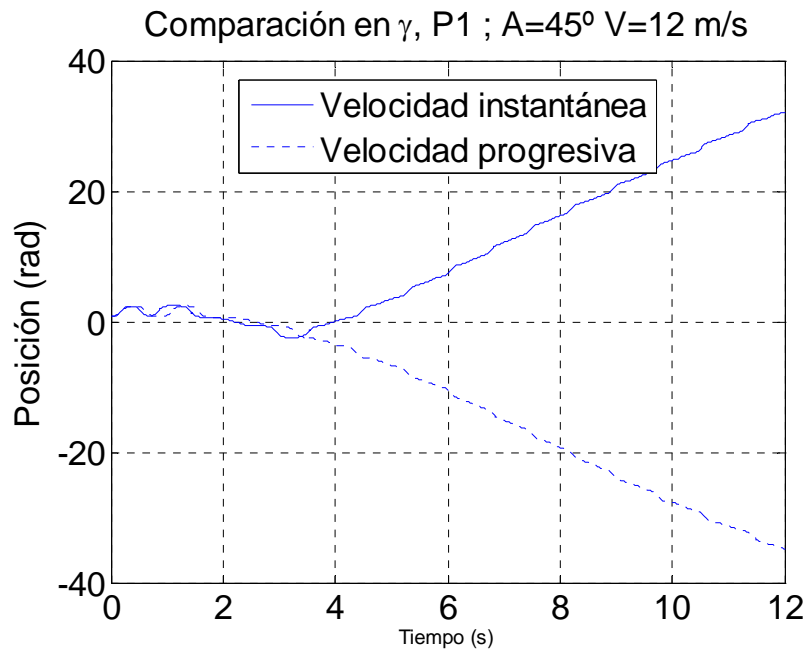




**Figura 1.4-55 Comparación de velocidades; P1; V=8 m/s; Incidencia inicial 10°**

Como se puede observar, en los instantes iniciales las dinámicas son completamente diferentes, si bien, conforme avanza el tiempo ambos se van haciendo similares hasta concluir en una dinámica muy pareja, con pequeñas diferencias en términos de amplitud y periodo. Siendo ésta la tónica general existen casos en los que se pone de manifiesto la relevancia del perfil de la velocidad empleado. Esto se produce cuando las características del movimiento son complejas.

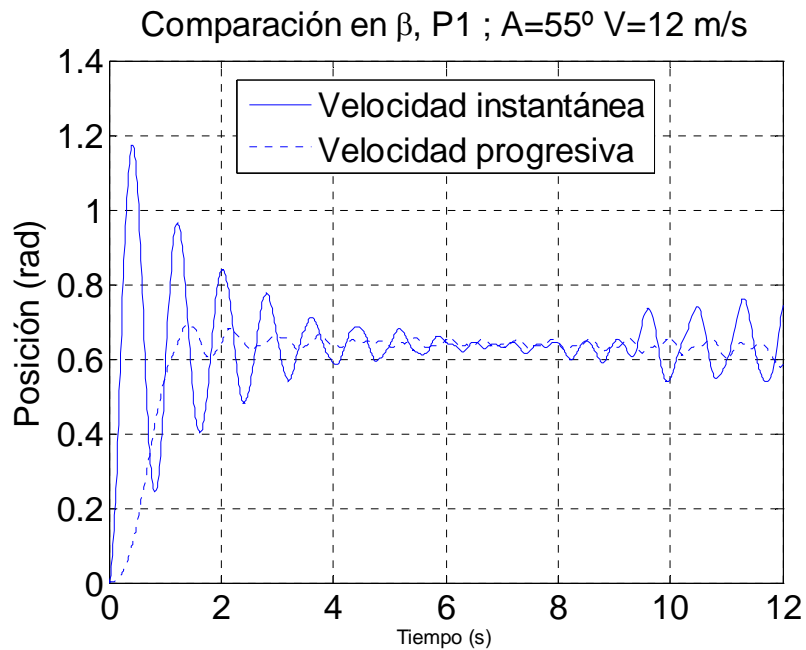
Una de estas situaciones surge cuando el cuerpo en una dinámica de giros completos con respecto al eje  $\gamma$ . En este caso ambos modelos difieren en el momento en que se produce el inicio de esta dinámica, lo que, en ocasiones puede dar también lugar a cambios en el sentido del giro del cuerpo:



**Figura 1.4-56 Comparación de velocidades; P1; V=12 m/s; Incidencia inicial 45°**

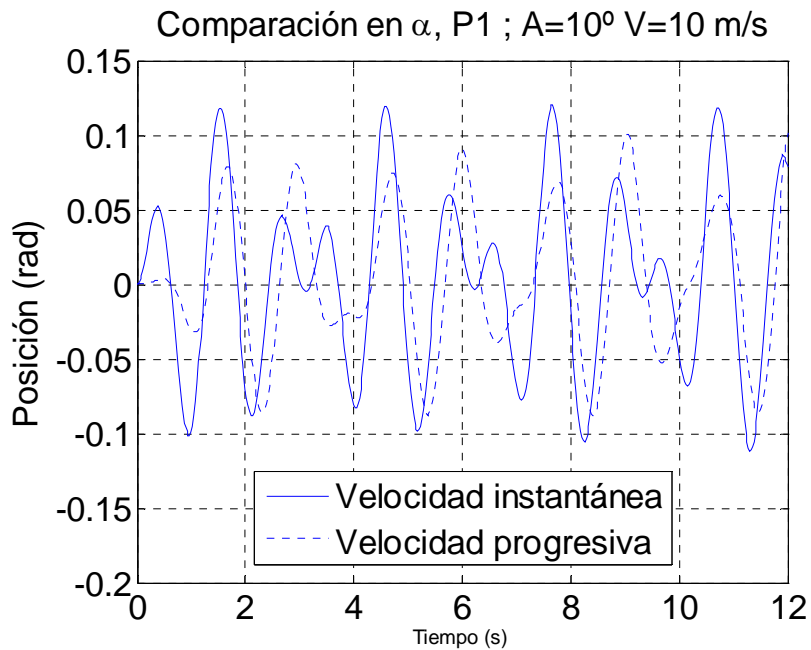
Pese a la diferencia entre ambas gráficas podemos observar como en la dinámica final las pendientes medias de ambos casos son casi idénticas y que la diferencia entre ambas se limita al sentido de giro que, como ya ha sido explicado, no tiene efecto alguno sobre la funcionalidad del prototipo.

Como se ha visto anteriormente, las fuerzas que el flujo ejerce sobre el cuerpo dependen fuertemente de la posición en  $\gamma$ . Por tanto las diferencias que pueda haber en el comportamiento de este ángulo, deben reflejarse en el movimiento en  $\beta$ , como podemos observar, a modo de ejemplo, en la figura 1.4-57 :



**Figura 1.4-57 Comparación de velocidades; P1; V=12 m/s;  
Incidencia inicial 55°**

En  $\alpha$  la dinámica final tiende a presentar diferencias según cuál sea el patrón de velocidades utilizado, independientemente del comportamiento en  $\gamma$ . Esto era esperable teniendo en cuenta que es el movimiento más caótico de los tres. Dentro de esta divergencia es notable que el patrón final de velocidades es semejante en ambas situaciones si bien en el caso de que la velocidad se introduzca de manera instantánea aparece un patrón con más cambios de sentido de la velocidad del prototipo. Un ejemplo típico de este comportamiento se muestra en la figura 1.4-58.



**Figura 1.4-58 Comparación de velocidades; P1;  $V=10$  m/s;  
Incidencia inicial  $10^\circ$**

Observamos como existe una similitud entre las posiciones de los máximos, si bien uno de cada dos picos en la velocidad instantánea es doble y presenta una menor amplitud, y en la progresiva es siempre único. Queremos señalar que esta diferencia no implicaría cambio alguno en la clasificación empleada en las tablas 1.4-3 a 1.4-6 .

▪ **Comportamiento del prototipo 2**

En  $\gamma$ , el prototipo 2 sólo encuentra diferencias en el caso en que el cuerpo entra en una dinámica de giros completos; esto es en el caso mostrado en la figura 1.4-59; donde las diferencias son similares a las comentadas para P1.

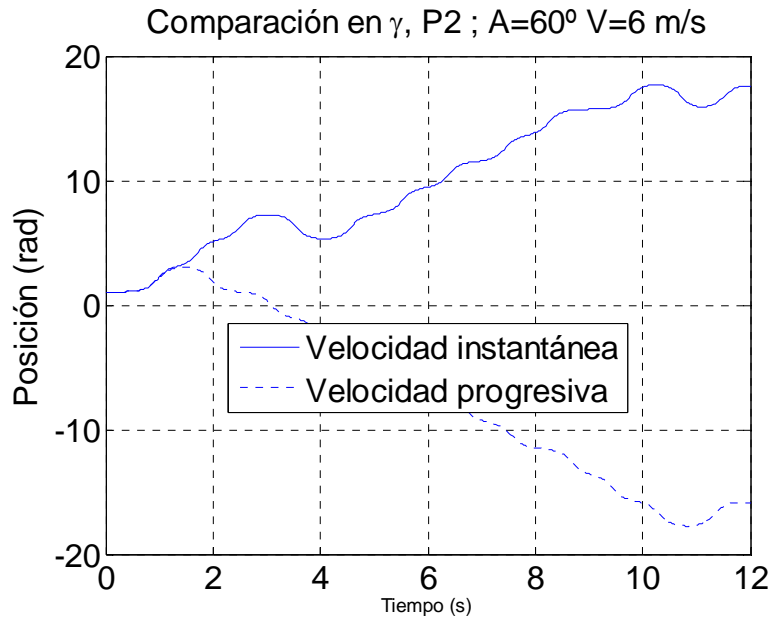


Figura 1.4-59 Comparación de velocidades; P2; V=6 m/s; Incidencia inicial 60° (I)

Al que igual que sucedía en el prototipo 1, estas diferencias tienen su reflejo en el movimiento en  $\beta$ :

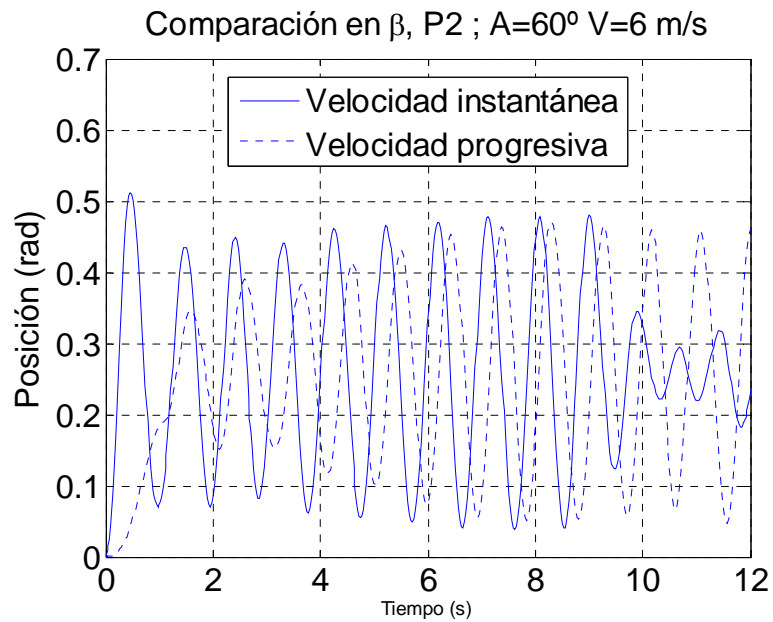


Figura 1.4-60 Comparación de velocidades; P2; V=6 m/s; Incidencia inicial 60° (I)

El resto de casos, tanto en  $\beta$  como en  $\gamma$  presentan un acuerdo muy notable.

En  $\alpha$ , sin embargo, el acuerdo entre ambos patrones de velocidad difieren. Las situaciones varían entre el acuerdo total (para bajas velocidades) como muestra la figura 1.4-61, pasan por casos con pequeñas diferencias en las amplitudes, como la mostrada en la figura 1.4-62 e incluso aparecen otros con diferencias más marcadas, que se producen cuando el cuerpo entra en una dinámica compleja, como se puede ver en la figura 1.4-63.

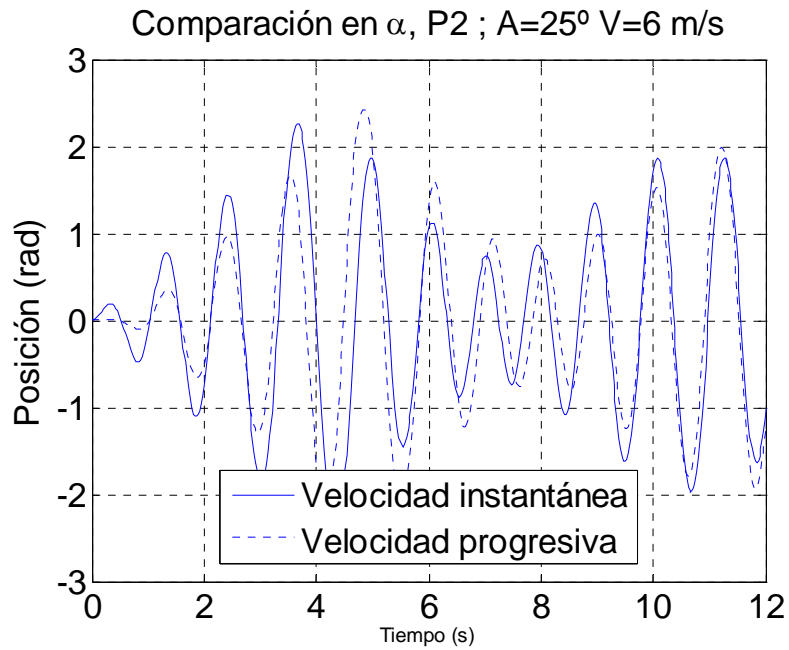


Figura 1.4-61 Comparación de velocidades; P2; V=6 m/s; Incidencia inicial 25°

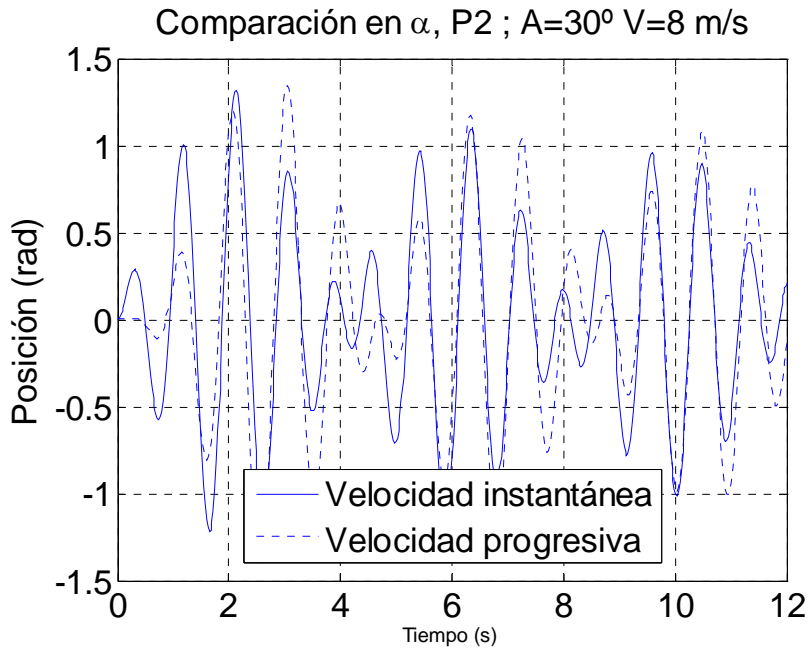


Figura 1.4-62 Comparación de velocidades; P2; V=8 m/s; Incidencia inicial 30°

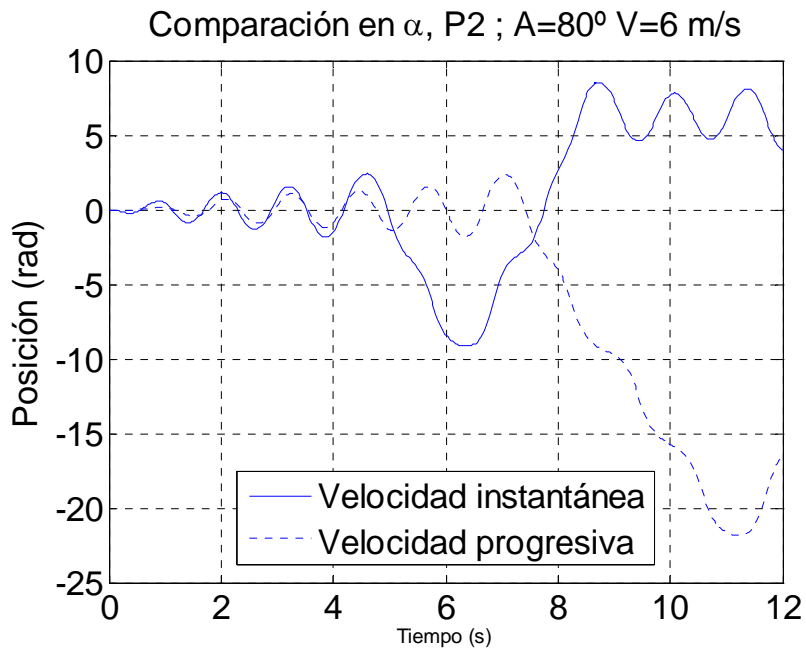


Figura 1.4-63 Comparación de velocidades; P2; V=6 m/s; Incidencia inicial 80°

### 1.4.2.7 Balance energético

El movimiento del prototipo es producto de la adquisición, por parte del prototipo, de parte de la energía cinética del viento que se transforma en energía cinética y potencial por parte del cuerpo. La energía cinética puede aparecer en los tres movimientos estudiados (movimientos en  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ ), poniéndose de manifiesto mediante su variación temporal ( $\alpha'$ ,  $\beta'$  y  $\gamma'$ ). La energía potencial sólo aparece cuando el cuerpo asciende como consecuencia de un movimiento pendular. Estos movimientos sólo pueden darse en torno a  $\alpha$  y a  $\beta$ . El movimiento en  $\gamma$  no influye sobre la altura del centro de gravedad del cuerpo, por lo que tiene influencia.

La formulación de la energía cinética sigue la conocida formulación:

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 \quad (1.85)$$

por tanto, para cada uno de los movimientos, tendremos que:

$$\begin{aligned} E_{c\alpha} &= \frac{1}{2} m (d_p \alpha')^2 \\ E_{c\beta} &= \frac{1}{2} m (d_p \beta')^2 \\ E_{c\gamma} &= \frac{1}{2} m (2b_{p1} \gamma')^2 \end{aligned} \quad (1.86)$$

Donde  $b_{p1}$ , como se explicó en el apartado es la anchura de la cara del prototipo 1 (cambiar por  $b_{p2}$  para la energía en P2)

A su vez la energía potencial viene dada por:

$$E_p = mgh \quad (1.87)$$

Por tanto

$$\begin{aligned} E_{p\alpha} &= mgd_p (1 - \cos(\alpha)) \\ E_{p\beta} &= mgd_p (1 - \cos(\beta)) \end{aligned} \quad (1.88)$$



De esta manera la energía total que en cada momento, cada prototipo ha extraído del fluido será la suma de estos cinco factores. Es decir:

$$E_T = E_{c\alpha} + E_{c\beta} + E_{c\gamma} + E_{p\alpha} + E_{p\beta} \quad (1.89)$$

El objetivo de esta sección es analizar la energía total que adquiere el cuerpo para diferentes casos de velocidad y dirección de viento, así como su reparto en las diferentes componentes energéticas.

En esta sección se ha representado el comportamiento de los prototipos a partir de  $V=8\text{m/s}$ , mientras que en anteriores representábamos, también, lo que sucedía para  $6\text{m/s}$ . La razón para ello es que el prototipo 2 responde con mucha lentitud a velocidades bajas de viento, tardando un tiempo más largo que en otras velocidades en alcanzar la situación de equilibrio. Su representación obligaba, por tanto, a emplear escalas temporales mucho mayores, incompatibles con el resto de velocidades. Sin embargo simulaciones realizadas han mostrado resultados similares a las del resto de velocidades, por lo que se ha optado por su exclusión de las figuras de cara a clarificar la comprensión del fenómeno.

Como se verá a continuación se ha encontrado que ambos prototipos se comportan de una manera similar en términos energéticos. La energía que cada uno extrae del flujo es dependiente del cuadrado de la velocidad del viento. Esta energía, en la mayoría de los casos, se almacena en forma de energía potencial en el plano YZ (posición en  $\beta$ ).

Resulta obvio a partir de las ecuaciones (1.88) y (1.89) que en los casos en los que la incidencia inicial del viento lleva al cuerpo a una situación de equilibrio, la energía total del cuerpo se mantiene constante en el tiempo a partir del momento en que dicha posición se logra, siendo igual a la energía potencial acumulada, dado que la cinética se hace cero.

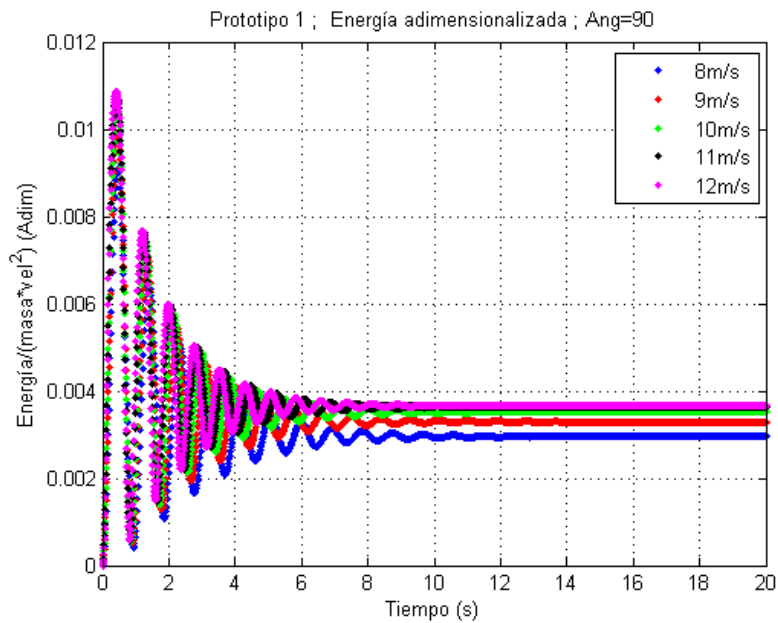
Por otro lado, en los casos en que el cuerpo oscila en algún sentido con velocidad considerable la energía cinética pasa a ser importante. Dado que en  $\alpha$  y en  $\beta$  la velocidad del cuerpo varía en valor absoluto entre valores máximos y cero, la energía cinemática es muy variable, lo que se traduce en oscilaciones de la energía total del cuerpo.

Para mostrar los resultados obtenidos se hay optado por adimensionalizar la energía por el producto de la masa del prototipo y la velocidad del viento

al cuadrado. Los valores así obtenidos tienden a comportarse, en cada prototipo y para una orientación concreta, de manera semejante e independiente de la velocidad del viento.

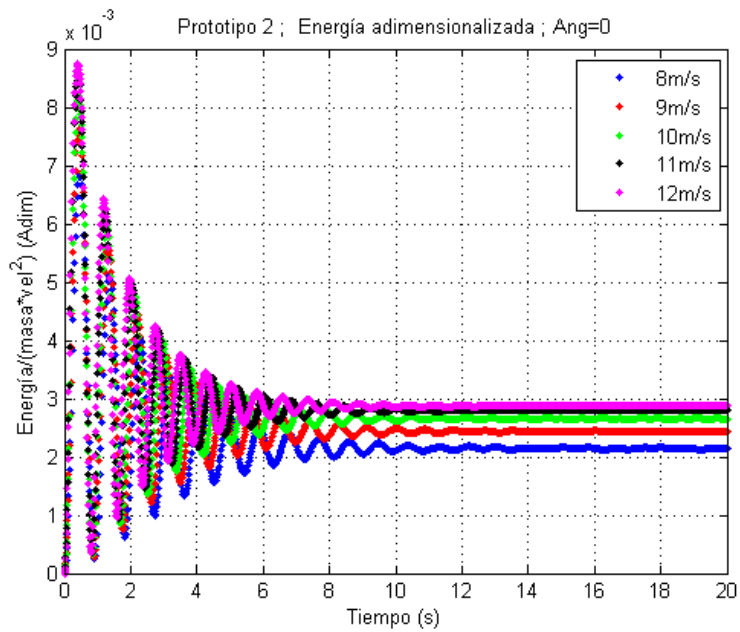
Orientaciones iniciales del viento diferentes, dentro del mismo prototipo, no provocan tampoco grandes diferencias. La energía oscila, en todos los casos, en torno a unos valores semejantes.

En primer lugar se presentan dos casos en los que, de acuerdo con lo indicado en las tablas 1.4-4 a 1.4-6 , el prototipo 1 tiende al equilibrio, por lo que la energía total, a partir de cierto momento, se mantiene constante tal y como se ilustra en la figura 1.4-64.



**Figura 1.4-64 Energía adimensionalizada; P1; Incidencia inicial: 90°**

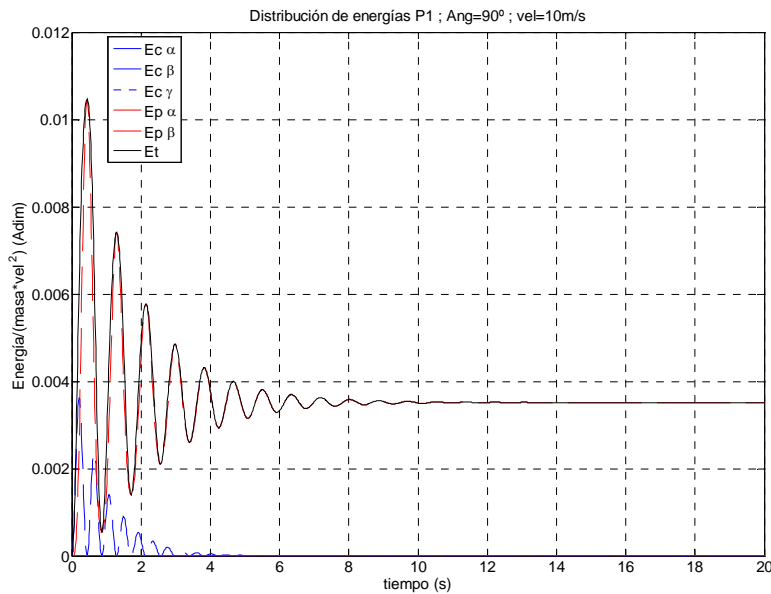
Lo mismo sucede para P2 en los casos de equilibrio:



**Figura 1.4-65 Energía adimensionalizada; P2; Incidencia inicial: 0°**

Es interesante observar que, en situaciones de equilibrio, ambos prototipos tienden a una energía límite adimensionalizada con escasa dependencia de la velocidad del viento. Esta energía es mayor en el prototipo 1 que en el 2, aproximadamente un 25% superior.

Como es lógico, la energía en esta situación de equilibrio, caracterizada por la práctica ausencia de movimiento, está mayoritariamente concentrada en la energía potencial adquirida por el movimiento en  $\beta$ . Este hecho se refleja en la figura 1.4-66 para el prototipo 1. No presentamos el diagrama correspondiente a P2 ya que es muy similar a este.



**Figura 1.4-66 Distribución de energía; P1; V=10m/s Incidencia inicial: 0°**

Tal y como hemos señalado, si trascurrido un cierto tiempo el cuerpo no ha encontrado una posición de equilibrio y se siguen produciendo oscilaciones en alguno de los movimientos posibles (ya sea,  $\alpha$ ,  $\beta$  o  $\gamma$ ), se producirán variaciones en la energía cinética que no tienen porque compensarse con las correspondientes de energía potencial asociadas, por lo que previsiblemente no se producirá una posición estable en términos energéticos. En la figura 1.4-67 podemos observar este fenómeno. Como se mostró en la figura 1.4-25 y en la tabla 1.4-5, en el caso analizado el cuerpo está oscilando en torno a una posición de equilibrio lo que provoca variaciones en  $E_{c\alpha}$  y  $E_{c\beta}$ . Aquí las variaciones son pequeñas ya que las oscilaciones también lo son. Es de resaltar el hecho de que la inestabilidad se produce en torno a una posición energética de valor similar al mostrado en la figura 1.4-67.

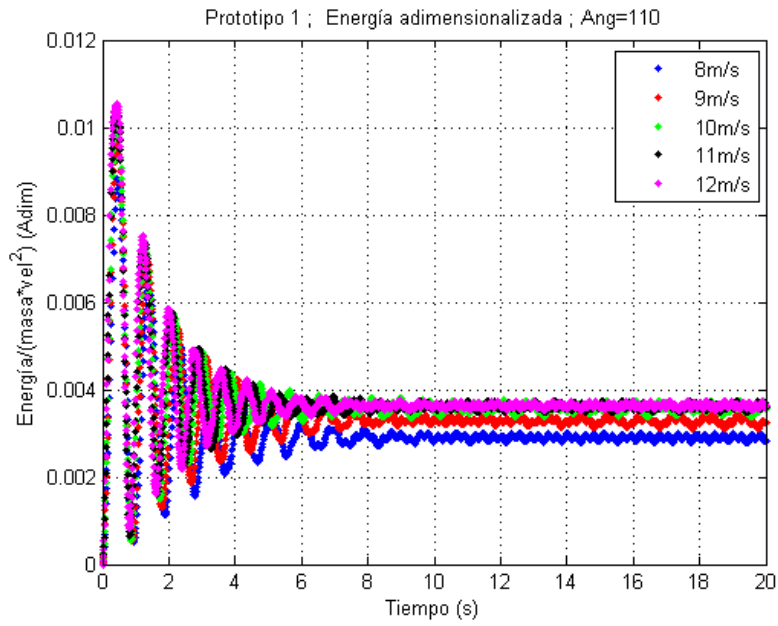


Figura 1.4-67 Energía adimensionalizada; P1; Incidencia inicial: 110°

El reparto de energía correspondiente se muestra en la figura 1.4-68.

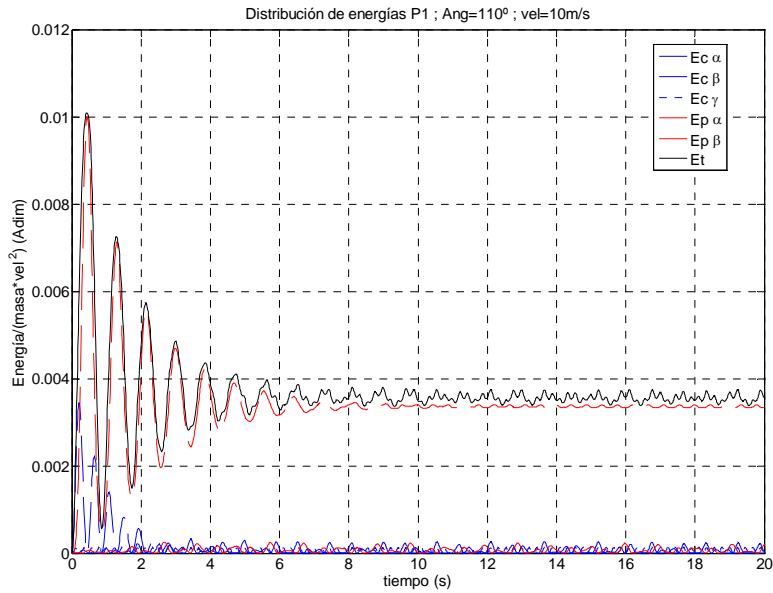
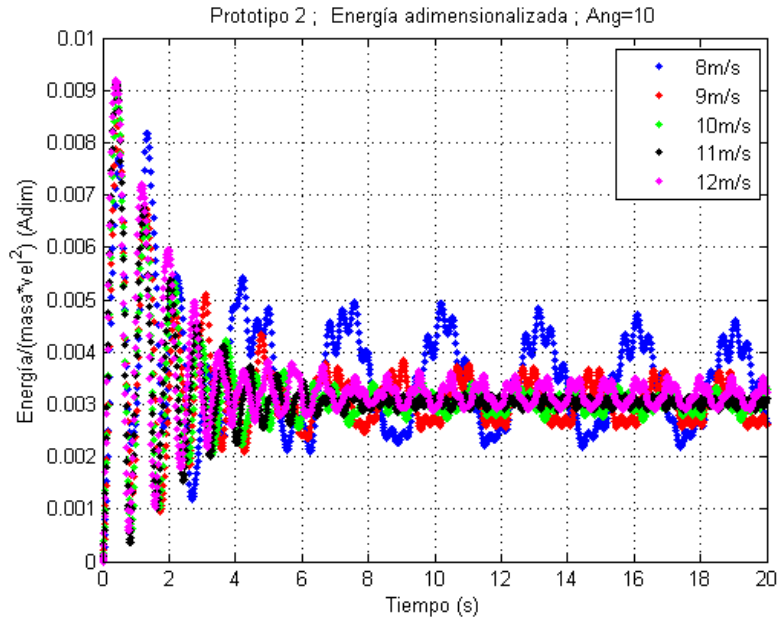


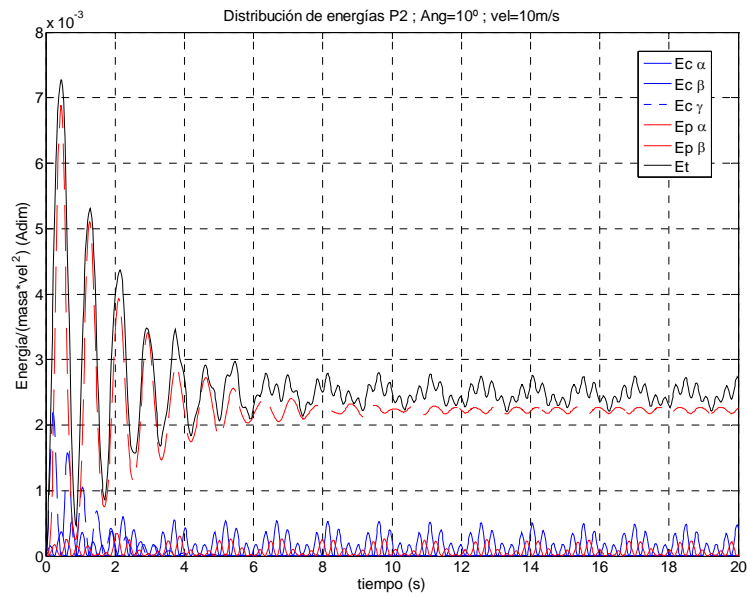
Figura 1.4-68 Distribución de energía; P1; V=10m/s Incidencia inicial: 110°

Esta tipología también puede observarse en el P2:



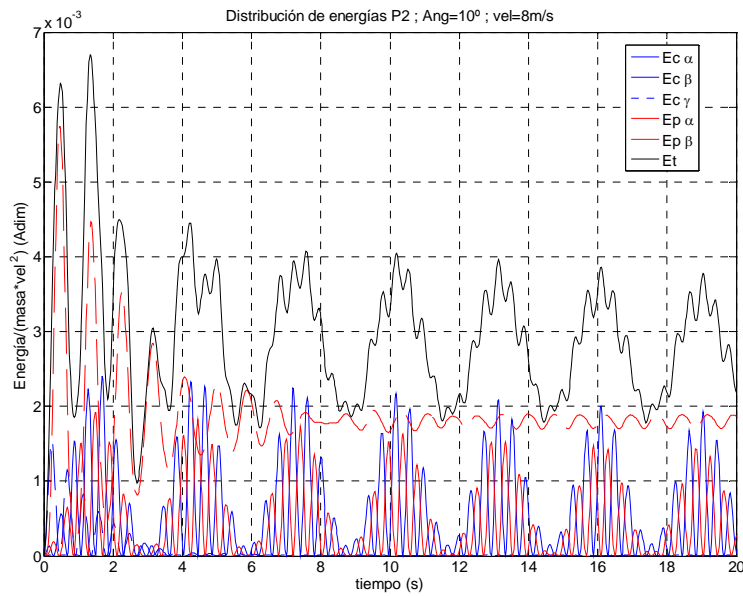
**Figura 1.4-69 Energía adimensionalizada; P2; Incidencia inicial: 10°**

De acuerdo con las tablas 1.4-5 y 1.4-6 el caso mostrado se corresponde con una situación de no equilibrio en  $\alpha$  y  $\gamma$ . En este caso las oscilaciones, para velocidades bajas de viento, son mayores de las observadas anteriormente, si bien parecen tender a un mismo valor. En la figura 1.4-70 representamos el reparto energético para una velocidad de 10m/s. En ella se observa como la energía potencial en  $\beta$  hace el aporte mayoritario en términos de energía pero los movimientos en  $\alpha$  y  $\gamma$  son los que originan la inestabilidad.



**Figura 1.4-70 Distribución de energía; P2; V=10m/s Incidencia inicial: 170°**

Sin embargo, para velocidades bajas la situación se transforma. Como vimos en el apartado 1.4.2.1, el movimiento, con velocidades de 8 m/s, se vuelve más errático, con amplitudes mucho mayores. Esto tiene su reflejo en las ecuaciones de energía que se muestran en la figura 1.4-71.

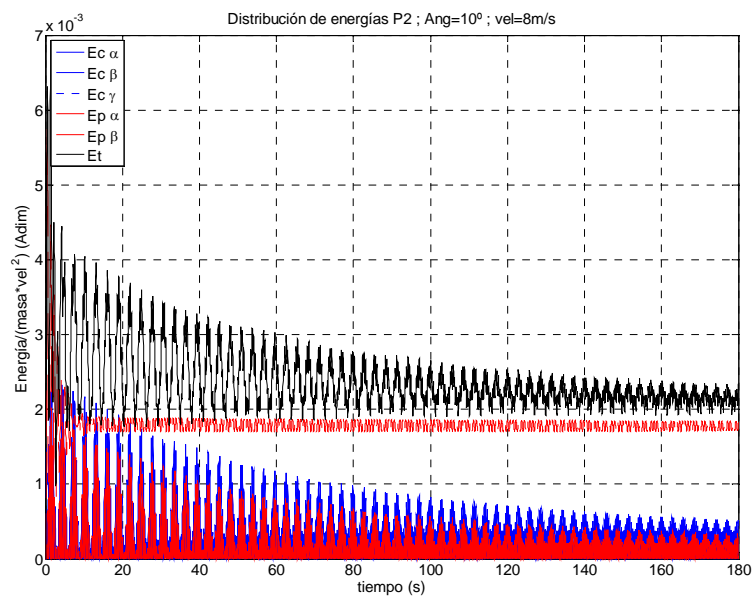


**Figura 1.4-71 Distribución de energía; P2; V=8m/s Incidencia inicial: 10°(l)**

En esta figura se observa como la aportación de la energía cinética llega a ser de la misma magnitud que la de la potencial. Por ello, tal y como señalamos anteriormente, la fuerte variabilidad de la primera marca la forma de la figura.

Ampliando el horizonte temporal de la figura 1.4-71 se muestra que, tal y como sugería la figura anterior, estas oscilaciones tienden a mitigarse hasta aproximarse a un valor límite similar al de los casos analizados anteriormente, entre 2E-3 y 3E-3:





**Figura 1.4-72 Distribución de energía; P2; V=8m/s Incidencia inicial: 10°(II)**

Dado que la contribución de la energía potencial de la pendulación en  $\beta$  es mayoritaria, cuando nos encontramos en un caso con fuertes pendulaciones en este eje la energía presenta las mayores alteraciones. Como mostramos en la figura 1.4-73.

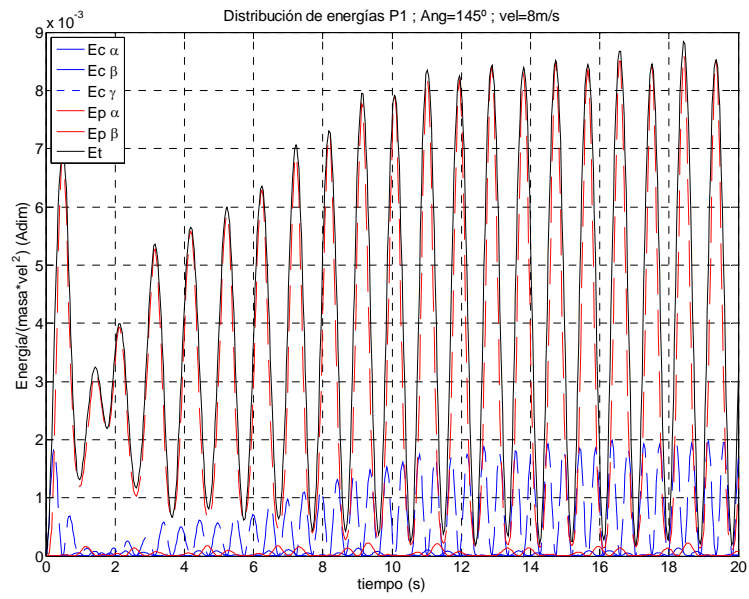


Figura 1.4-73 Distribución de energía; P1; V=8m/s Incidencia inicial: 145°

## 1.5 Conclusiones

En este capítulo se ha estudiado el comportamiento aerodinámico de dos cuerpos suspendidos. La aproximación al problema se ha realizado mediante un análisis mixto experimental-numérico, en el que una simulación computacional resuelve las ecuaciones de movimiento conforme a los datos obtenidos en ensayos de laboratorio.

El objetivo de los dos prototipos analizados es el de evitar que las aves colisionen, durante el vuelo, con las líneas de tendido eléctrico. Dado que la colisión se produce porque los pájaros no visualizan el elemento lineal, los dos cuerpos se suspenden del cableado suponiendo, en su dinámica, un obstáculo móvil de mayor dimensión y fácil visualización. De cara a aumentar la efectividad se disponen en las caras de los prototipos de bandas reflectantes que emiten destellos luminosos hacia las aves.

Para el adecuado funcionamiento de los cuerpos es importante que ambos presenten una dinámica correcta. Se buscan por tanto oscilaciones controladas que aumenten la visibilidad del objeto y permiten una emisión continua de haces de luz con dirección a las aves. Esta emisión debe abarcar el máximo volumen posible, es positivo que presente una cierta aleatoriedad que evite que las aves se habitúen a él.

La fase experimental del estudio ya ha revelado importantes diferencias entre ambos prototipos. Las fuerzas y momentos extraídos muestran distinto comportamiento para ambos cuerpos. Estas diferencias vienen dadas por la propia geometría de los cuerpos que, en el caso del prototipo 2, induce importantes fuerzas en la dirección trasversal a la dirección del viento. Por el contrario la fuerza en la dirección del viento y el momento de rotación son del mismo orden de magnitud en los dos prototipos.

Ambos cuerpos presentan las mismas ecuaciones de equilibrio que conducen a un sistema de ecuaciones diferenciales de tercer grado interdependientes. La resolución de dicho sistema permite predecir el movimiento del cuerpo en los tres ejes analizados.

Se ha validado el algoritmo de resolución de las ecuaciones diferenciales mediante su comparación con un sistema de ecuaciones lineales. Este último sistema se ha obtenido con las simplificaciones de pequeños movimientos. La comparación entre los dos ha sido satisfactoria, por lo que la resolución numérica cuando las oscilaciones no son excesivas se considera contrastada.

Los resultados se han calculado imponiendo una velocidad de viento uniforme desde el instante inicial, clasificando las dinámicas atendiendo a los movimientos que se observan en el estado final. Para valorar el efecto que tiene la inclusión de la velocidad de manera instantánea sobre las dinámicas finales se han contrastado dichos resultados con los que se obtendrían empleando un perfil de velocidades con una aceleración progresiva durante los instantes iniciales. En esta comparación se ha demostrado que, salvo algunas excepciones, el efecto del perfil de velocidades en los primeros instantes sobre la dinámica final que alcanza el cuerpo es despreciable.

Esto no despeja la incertidumbre acerca del grado de exactitud obtenida en los movimientos trasversales a la dirección del viento en el prototipo 2, en aquellos casos en los que el cuerpo entra en una dinámica compleja, en los que ambas simulaciones no arrojan los mismos resultados. Estos casos se producen a un intervalo concreto de velocidades de viento de entre 5.75 m/s y 7.90 m/s. La exactitud, por tanto, de dichas dinámicas no queda contrastada, sin bien, cualitativamente, sí que está recogiendo el fenómeno observado.

Del estudio estas dinámicas se extrae la presencia de determinadas tipologías de movimiento que se repiten para los tres movimientos analizados. La aparición de estas tipologías depende de la velocidad del viento, de su incidencia inicial y del prototipo que estemos analizando.

Analizando la dinámica de ambos prototipos concluimos que presentan algunas características mejorables. En el prototipo 2 destaca especialmente la aparición de importantes movimientos trasversales a la dirección del viento. Estas dinámicas se producen a bajas velocidades por la resonancia de dos de las fuerzas que lo integran y podrían llegar a provocar el fallo del prototipo por alcanzar  $180^\circ$  de amplitud y por tanto, en condiciones de

enganche reales, condicionar que quedara atrapado en la línea de distribución eléctrica.

El movimiento de este mismo prototipo en términos de giros en torno al eje de unión también parece presentar problemas ya que son pocas las incidencias iniciales de viento que lo conducen a una dinámica de giros completos en torno al eje de unión.

El prototipo 1 consigue realizar giros completos hasta en un tercio de los casos, si bien necesita de velocidades viento relativamente elevadas para ello.

En el movimiento pendular en la dirección del viento los resultados han mostrado que el cuerpo tiende a una posición de equilibrio estable. Esto, que podría parecer un problema por condicionar uno de los grados de libertad del movimiento del cuerpo, en realidad podría no serlo si atendemos a las características del flujo de viento cuyo módulo, en la naturaleza, presenta continuas variaciones. Al variar, por tanto, la velocidad del viento con el tiempo el prototipo podría no llegar a conseguir mantener una posición fija, y oscilando conforme a lo deseado.

Esta diferencia en el módulo de la velocidad, sin embargo, no afectaría positivamente al movimiento de rotación sobre el eje de unión ya que, como hemos visto, las amplitudes son independientes de la velocidad del viento.

El análisis energético de los estados observados muestra un comportamiento homogéneo en ambos prototipos. La energía final del cuerpo, si no oscila excesivamente en el estado final, tiende a una posición dependiente de la velocidad del viento al cuadrado. Si el cuerpo presenta oscilaciones en este estado final se producen alteraciones sobre este patrón estable. Las alteraciones son siempre periódicas y tienden, en general, a verse amortiguadas con el tiempo.

Con el análisis realizado parece posible introducir mejoras en el comportamiento de los prototipos. Introducir alteraciones en la aerodinámica que beneficien el giro en torno al eje de unión aportaría una mejor dinámica. Para ello bastaría con romper la simetría del cuerpo, buscando una tendencia al giro en uno de los dos sentidos posibles.

Para reducir los movimientos transversales al viento del segundo prototipo podría se podría aumentar la masa del cuerpo. La manera apropiada de distribuirla sería haciéndola coincidir con el eje de unión, de tal manera que no se aumentara la inercia al giro en el eje de unión, lo que sería contraproducente para la solución aportada anteriormente. Este aumento de la masa, sin embargo, supondría, en paralelo un incremento de la carga que tiene que soportar el cableado de las líneas de alta tensión.

Otra posible solución al problema pasaría por modificar por completo la forma del cuerpo, consiguiendo un prototipo cuya inercia al giro en torno al eje de unión fuera variable conforme aumentara la velocidad del giro. De esta manera se controlaría la velocidad angular y por tanto se podría determinar la frecuencia con la que se emiten los destellos.

## 1.6 Futuras líneas de trabajo

Los resultados obtenidos en este capítulo dejan abiertas numerosas vías de investigación, de entre las que destacamos.

El modelo realizado admite variaciones para acomodarlo a otras condiciones de trabajo. Entre ellas la de mayor interés pasa por modificarlo para el cálculo con velocidades de viento variables. Esto haría posible realizar predicciones conforme a condiciones atmosféricas reales. Con datos de viento de las localizaciones reales en las que se dispondrán los prototipos se podría realizar un estudio pormenorizado de las condiciones en un punto concreto.

Las soluciones propuestas en el apartado 1.5 a las deficiencias observadas, pasan por modificar la geometría de los cuerpos. Esta modificación cambiaría completamente el perfil de presiones observado y, como consecuencia, las fuerzas ejercidas. Realizar distintas modificaciones geométricas y calcular los movimientos que se producirían ahondaría en la comprensión del fenómeno. El modelo numérico realizado tendría que ser parcialmente modificado, pero el núcleo seguiría siendo válido.

Sería muy interesante plantear, en el modelo numérico el efecto que pueda producirse por una interacción más compleja entre el cuerpo y el viento. Introducir fenómenos de emisión de vórtices o simular la diferente acción del viento sobre el cuerpo atendiendo a la posición y velocidad de este mejoraría los resultados obtenidos, haciéndolos más próximos a la realidad.

Del mismo modo, conseguir simular, de alguna manera, el reparto de momentos que se produce cuando la conexión deja de estar idealizada y presenta diferentes eslabones también ayudaría a interpretar mejor lo que le sucederá al prototipo real estudiado.

## **Modificación del campo de viento en topografía compleja**

---

---

### **2.1 Antecedentes**

#### **2.1.1 Motivación del estudio**

El viento interacciona con muchos elementos de la naturaleza, alterando su estado de equilibrio. Entre los sistemas susceptibles de ser afectados se encuentran los embalses. La variación de las presiones ejercidas y de los esfuerzos tangenciales aplicados en superficie, suponen una fuerza que provoca el desplazamiento de la masa de agua y la variación de la inclinación de la termoclina. Esto se traduce en movimientos internos que condicionan la dinámica de los nutrientes, contaminantes, sedimentos, etc. presentes.

En la cuenca del río Guadalfeo se está llevando a cabo un estudio piloto para su gestión integral. Dentro de esta cuenca se encuentra el embalse de Rules, elemento puntual determinante del comportamiento del río. Los resultados mostrados en este capítulo se integran dentro de dicho estudio.



### 2.1.2 Características topográficas

El embalse de Rules se encuentra alimentado por dos ríos, el Guadalfeo y el Ízbor, afluente del primero. La cuenca vertiente hasta el embalse es de 633 km<sup>2</sup> para el primero y de 440 km<sup>2</sup> para el segundo.

La topografía de la cuenca está caracterizada por importantes elevaciones que encajonan su curso. No en vano, discurre en su primer tramo por las estribaciones de Sierra Nevada, cordillera que supera elevaciones de 3000 metros. La escasa distancia en planta desde ésta hasta el mar marca la complejidad de la topografía de la zona.

Al Norte del embalse se encuentran las faldas de Sierra Nevada, al Este la sierra de Contraviesa y al Oeste unas elevaciones que alcanzan en tan sólo unos 2 kilómetros en planta, cotas cercanas a los 1000 metros de altura. El resultado es un enclave natural situado en el centro de estas tres elevaciones (véase Figura 2.1-1) empleado para la ubicación del embalse artificial.



**Figura 2.1-1 Topografía de la zona en la que se enmarca el embalse**

Desde Rules, el río Guadalfeo desciende hasta llegar a su desembocadura, en Salobreña. En este recorrido desciende desde la cota 180 hasta la 0 del

nivel del mar. El río salva este desnivel en una distancia horizontal de 15 kilómetros, lo que supone un desnivel medio del 1.2%.

A unos 6500 metros de esta desembocadura el río se encuentra con otro accidente de importancia. En esta ocasión en forma de un desfiladero de paredes verticales. Este elemento viene marcado por la presencia en el margen Este del cerro de Escalate (654m de altura) y de otras elevaciones importantes (de hasta 371m de altura) en el margen contrario. El resultado es un cañón de paredes verticales de unos trescientos metros de altura que encajonan el cauce.

Desde este enclave hasta la desembocadura, el río avanza por una topografía sencilla de poca pendiente. Es de destacar que en este último tramo discurre en un cauce artificial.

Por tanto, la topografía de la zona es, tal y como se ha explicado, de gran complejidad (ver Figura 2.1-2) presentando unos fuertes condicionantes morfológicos que marcan las características del campo de viento.

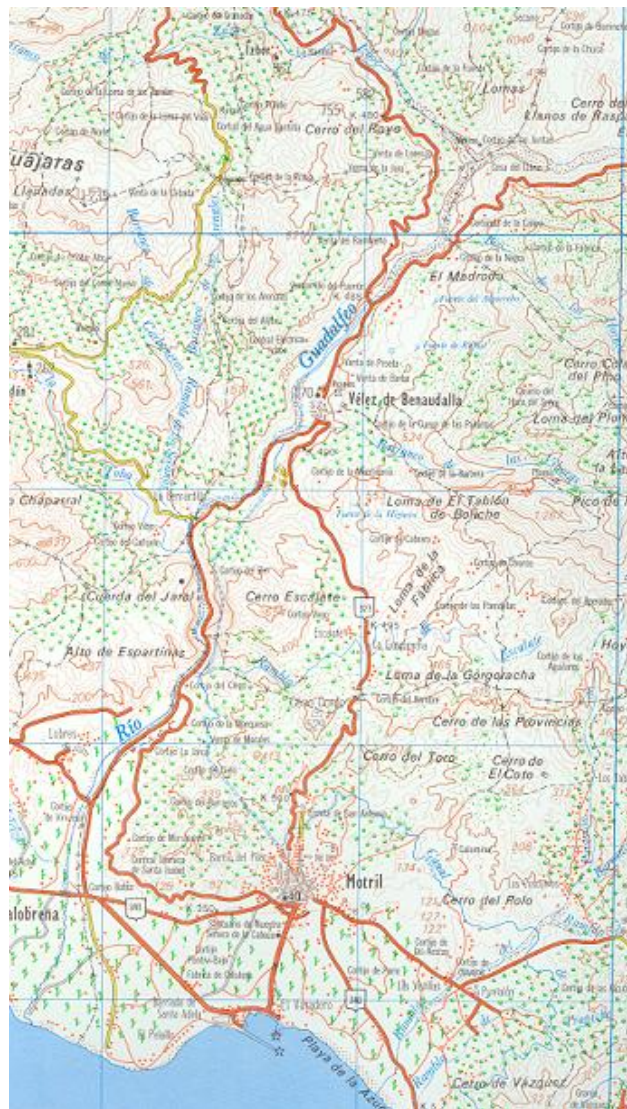


Figura 2.1-2 Topografía del cauce del río Guadalfeo

### 2.1.3 Objetivos específicos

En este estudio se pretenden alcanzar dos objetivos principales. El primero de ellos es conseguir simular el campo local de velocidades viento presente en la desembocadura del río Guadalfeo para vientos procedentes de dirección según cauce, esto es N28ºO. En esta dirección el viento procede

del mar, que es una superficie lo suficientemente extensa como para que el viento haya alcanzado una situación de equilibrio. Ésta es conocida como capa límite atmosférica (C.L.A) cuyas características se describen con más precisión en el apartado 2.3.1.

La modelización física de una C.L.A. consiste en la reproducción de sus características fundamentales: su campo de velocidades medias y sus características turbulentas.

Una vez conseguido este objetivo se pretende analizar la variación que sufre el campo de velocidades de viento cuando se enfrenta a una topografía real. En concreto se mostrarán los resultados obtenidos en una colina cercana a la desembocadura.

## 2.2 Planteamiento del problema

Como hemos señalado, en este capítulo pretendemos estudiar el campo de viento local en un área caracterizada por poseer una topografía de gran complejidad, la que discurre desde la desembocadura del río Guadalfeo, en Salobreña, hasta el embalse formado a raíz de la construcción de la presa de Rules.

Es la topografía la que condiciona el *modus operandi* de los trabajos a desarrollar. El viento incidente en la costa, de características sencillas por provenir de un área marítima (y por tanto de rugosidad constante) interactúa con los accidentes geográficos, dando lugar a un campo local de velocidades de viento complejo de características, *a priori*, desconocidas.

En el primer apartado de esta sección vamos a analizar las metodologías existentes para tratar el problema que estamos tratando. Como conclusión de este análisis elegiremos una de ellas. Una vez realizada la selección, en el segundo apartado, expondremos las líneas generales seguidas en los ensayos realizados

### 2.2.1 Posibles enfoques

Existen cuatro metodologías que permiten acercarse al conocimiento del campo local de velocidades de viento. Mediante: (a) modelos matemáticos, (b) simulaciones numéricas, (c) a partir de medidas en campo o (d) mediante modelos físicos en túnel de viento de capa límite. En el presente apartado se analizan sus características y se concluye cual es la metodología más adecuada para el problema que nos ocupa.

(a) *Modelos matemáticos.* Existen diferentes formulaciones que recogen las variaciones en velocidad que sufre el campo local de velocidades de viento al enfrentarse a diferentes obstáculos. Estas formulaciones hacen su predicción atendiendo a los parámetros geométricos del accidente geográfico que se esté analizando. Dado que se

busca una formulación que se pueda aplicar a diferentes situaciones, en general, los modelos se construyen para accidentes con geometrías de características sencillas: colinas aisladas, escalones, hoyas, pendientes suaves... El resultado de estos modelos suele ser una expresión matemática que permite calcular incrementos de velocidad respecto a una velocidad de referencia:

$$\Delta S(z) = \frac{\bar{U}(z) - \bar{U}_o(z)}{\bar{U}_o(z)} \quad (2.1)$$

Siendo:

$\Delta S(z)$  : Incremento diferencial de la velocidad

$U(z)$  : Velocidad a una altura  $z$  sobre el nivel del suelo

$U_o(z)$  : Velocidad de referencia, tomada a barlovento del obstáculo

De esta manera, conocidas las características de la velocidad del viento en un punto anterior al accidente, se puede obtener su variación cuando se enfrenta a él.

La limitación de estas formulaciones se deriva de que únicamente consideran accidentes aislados y de geometría simple. Esta simplificación, imprescindible para crear una formulación genérica, imposibilita el uso de esta metodología en el caso de una geometría compleja, como la que tenemos en el cauce del río Guadalfeo.

(b) *Métodos numéricos.* El análisis numérico de los campos de viento se basa en la resolución de las ecuaciones que rigen el movimiento del aire. De cara a simplificar un conjunto de ecuaciones irresolubles para geometrías complejas la mayoría de los estudios recurren al artificio de descomponer las magnitudes fundamentales en media y desviación con respecto a ésta (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS). El modelo de turbulencia empleado suele ser el  $k-\varepsilon$ , útil para el caso de que ésta sea homogénea e isotrópica.

Las predicciones realizadas mediante métodos numéricos consiguen una aproximación adecuada en el caso de colinas aisladas bidimensionales, sin

embargo para colinas múltiples sus predicciones tienden a sobreestimar los ratios de aceleración (BITSUAMLAK, et al. 2004)

Otro problema, derivado de las simplificaciones mencionadas, surge en el caso en que el flujo tenga características complejas, como variaciones locales fuertes, importantes flujos verticales o presencia de separación de flujo, fenómenos que para ser analizados necesitan de cargas computacionales muy grandes, sólo abordables, por tanto, para dominios espaciales reducidos.

La presencia de separación de flujo viene originada por la geometría del accidente. Fundamentalmente por la pendiente a sotavento de la colina. En el caso que estamos analizando, dada la complejidad del terreno presente, existen pendientes de gran magnitud por lo que la presencia de separación es segura.

Un segundo problema que presentan los métodos numéricos a la hora de abordar un estudio en una geometría real consiste en la dificultad de representar en las ecuaciones de Navier-Stockes de una manera adecuada la rugosidad del terreno. Comparaciones realizadas entre métodos numéricos y ensayos en túnel de viento muestran que las predicciones para colinas recubiertas de árboles pierden precisión comparadas con las obtenidas en el caso de colinas sin vegetación (BITSUAMLAK, et al. 2004). La rugosidad del terreno, además, afecta a la separación de flujo, encontrándose que mayores rugosidades (árboles, p.ej.) magnifican la separación.

A día de hoy la utilización de este sistema para predecir las aceleraciones del viento en situaciones que involucren topografías complejas es limitada, sin embargo los avances logrados auguran un futuro prometedor (BITSUAMLAK, et al. 2004).

(c) *Mediciones a escala real:* Este tipo de mediciones permiten disponer de datos a escala real del área estudiada. El problema que presentan es la enorme complejidad derivada de la necesidad de obtener mediciones en un área muy extensa y a diferentes alturas. Esto provoca dificultades técnicas y, adicionalmente, unos costes económicos excesivos.

Por otro lado existen otro tipo de condicionantes de tipo geográfico que pueden complicar excesivamente o incluso imposibilitar la ubicación de anemómetros.

(d) *Ensayos en túnel de viento:* Los ensayos en túnel de viento se basan en la reproducción a escala de las características del fenómeno que quiera ser estudiado. Para ello se realiza un modelo reducido de la topografía estudiada. Simultáneamente se calibra el túnel de viento para que a este modelo le lleguen las condiciones de flujo adecuadas. Mediante instrumentos de medida se procede posteriormente a evaluar las condiciones existentes en la zona de estudio.

Para realizar una perfecta simulación del fenómeno sería preciso escalar en la misma proporción todos los fenómenos intervinientes. Dado el excesivo número de parámetros físicos que interactúan esto se hace inviable.

La solución a este problema se aborda desde un análisis dimensional que estudia, teniendo en cuenta el objeto del ensayo, qué parámetros tienen mayor influencia sobre el fenómeno. De esta manera, se restringe la simulación de todas las variables físicas existentes a una serie de números adimensionales que son los que determinan la calidad de estas simulaciones (véase sección 2.4.2).

La gran ventaja de este tipo de aproximación frente a cualquiera de las otras tres es su menor dependencia de la complejidad de la geometría en la que se esté realizando el estudio.

Los problemas asociados a esta metodología son su incapacidad para representar vientos térmicos o fenómenos de carácter local tales como los vientos foëhn o chinook. Por otro lado, dadas las dimensiones de la topografía a representar, se hace imposible realizar un estudio para diferentes direcciones de viento. Se estudia, por tanto, el fenómeno para una única dirección, quedando el resto de las posibilidades fuera del alcance de la investigación.

#### *Selección de la metodología a emplear*

Como ya se ha expuesto en la sección 2.1.2 (Características topográficas) la topografía que marca el cauce por el que discurre el río Guadalfeo presenta



una gran complejidad. Complejidad que afecta, a su vez, el campo local de viento.

Estos condicionantes geográficos hacen que ni los modelos matemáticos ni la simulación numérica puedan abordar el problema con la precisión suficiente. Las medidas a escala real son técnica y económicamente inviables. Con estos condicionantes la metodología de análisis escogida es la simulación experimental, en la que se logren reproducir de manera fidedigna las características del campo local de velocidades de viento que existe en el embalse del río Guadalfeo.

## **2.2.2 Características del estudio**

### *2.2.2.1 Metodología adoptada*

Con el presente estudio se busca simular las características del campo local de velocidades de viento en la sección de la cuenca del río Guadalfeo comprendida entre su desembocadura y el embalse de Rules.

El primer paso del estudio consiste en reproducir de manera correcta el campo local de velocidades de viento existente en la desembocadura del río Guadalfeo. Las características de éste son conocidas, ya que proviene de una superficie lo suficientemente extensa como para que haya llegado a una situación de C.L.A., cuyas características quedarán descritas con más precisión en la sección 2.3.1.

El flujo resultante discurre a lo largo de un modelo topográfico a escala 1:3000 del cauce del río. En su desplazamiento sus características sufren modificaciones por el efecto de la topografía existente.

Tanto las mediciones destinadas a calibrar la capa límite en el interior del túnel como las destinadas a obtener datos de viento en algún punto del modelo son de velocidad de viento. Las necesidades de adquisición de medidas en el presente estudio son varias:

- Se necesitan mediciones de precisión. Si se quieren captar las oscilaciones que sufre la velocidad puntual con respecto a la media es necesario que el instrumento de medida utilizado sea capaz de discernir pequeñas variaciones de la velocidad del viento.
- Frecuencia de medición. Las fluctuaciones de la velocidad puntual del viento se pueden dar en un espectro amplio de frecuencia, de cara a lograr una buena percepción de las variaciones es necesario ser capaz de observar fluctuaciones unos 2000 Hz.
- Variación en altura. En el presente estudio se van a analizar las características del campo local de velocidades de viento, que son variables con la altura. Por ello es necesario que el sistema de medida empleado sea capaz de realizar mediciones a diferentes alturas.

### *2.2.2.2 Instrumentación*

Existen en el mercado diferentes instrumentos para realizar mediciones de velocidad de viento, desde sencillos tubos de Pitot, hasta sistemas basados en tecnología láser. En este estudio se ha optado por utilizar anemómetros de tecnología de hilo caliente. Al final de la sección 2.3.3 se realiza una comparación de las velocidades medidas con un anemómetro de hilo caliente y un tubo de Pitot.

Estos anemómetros se basan en la diferente resistividad de los metales según la temperatura a la que se encuentren. Están constituidos por un hilo de una aleación metálica conectado en sus dos extremos a una corriente variable que mantiene el hilo a temperatura constante. La temperatura del hilo, cuando está sometido a un flujo de aire, tiende a descender al aumentar la velocidad de éste. Para mantenerlo a temperatura constante se hace necesario incrementar la tensión en el mismo, que resulta, de esta manera, proporcional a la velocidad.

Durante el ensayo se han empleado dos tipos de anemómetro de hilo caliente. El primero es de un solo hilo y, por tanto, capaz de medir velocidades en una sola dirección. El segundo está compuesto por dos hilos que se cruzan formando un ángulo de  $45^\circ/135^\circ$  con el eje del anemómetro. De esta manera, según cuál sea la dirección del viento, cada uno de ellos tendrá una superficie expuesta diferente. Utilizando las diferencias en las

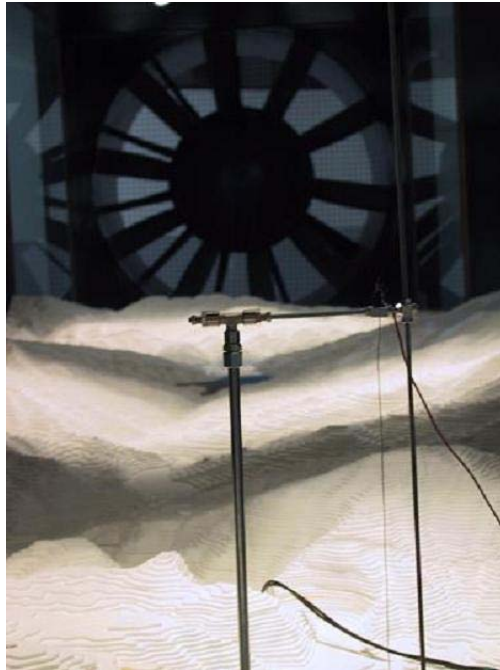
magnitudes del voltaje requerido en cada uno se puede inferir la dirección y magnitud de la velocidad de viento.

Obviamente este sistema es muy sensible a las variaciones ambientales de temperatura. Esto, unido a la precisión requerida, hace necesario que se realice una calibración previa a cada medida que se vaya a tomar. En esta calibración es importante tener en cuenta las variaciones de temperatura que durante el propio ensayo se puedan producir. Por ello se coloca una sonda termopar en el seno del flujo de aire durante la calibración y en el interior del túnel durante las mediciones. Esta sonda recoge las variaciones de temperatura y permite el ajuste de los datos obtenidos.

En el caso del anemómetro de un solo hilo la calibración se efectúa posicionando el hilo en el seno de un flujo de aire uniforme de velocidad conocida. La calibración se realiza cotejando los voltajes ofrecidos por el instrumento con las velocidades de viento incidentes. Para conocer estas velocidades se recurre a un transductor de presión. En una de las tomas se mide la presión existente en el seno del fluido, en la otra se mide la presión atmosférica, que coincidirá con la presión estática en el fluido. La diferencia entre ambas es la presión dinámica. Esta presión es función de la velocidad del viento como se mostró en la ecuación (1.45), por lo que se obtiene de manera directa.

En el caso del anemómetro bidireccional los datos de voltaje que envían los dos hilos son función de la dirección del viento. Para calibrar el sistema se sitúa el eje del anemómetro en diferentes ángulos con respecto al flujo de aire que esté circulando. Para todas las posiciones la velocidad del viento es la misma. De esta manera conforme el ángulo de ataque se aleja progresivamente del eje del anemómetro las diferencias entre los datos de ambos hilos irán aumentando. Analizando estas diferencias se puede realizar una curva de ajuste que permita conocer la dirección del viento.

El posicionamiento en vertical se logra mediante un mástil que se ancla a la solera del túnel, de su punto más alto surgen dos brazos. De uno de ellos pende una barra roscada que puede deslizarse en vertical. En el extremo inferior de esta barra se encuentra situado el anemómetro. El correcto posicionamiento del mismo se logra mediante dos tuercas que fijan su posición.



**Figura 2.2-1 Mástil en el interior del túnel de viento de capa límite**

Un problema que presenta el uso de este tipo de anemómetro es que es necesario ubicarlo en el interior del túnel, por lo que su presencia afecta a las condiciones del campo local de velocidades de viento a sotavento de la posición en la que esté ubicado. Sin embargo, en los experimentos a realizar, no medimos simultáneamente las características el viento en dos puntos, por lo que este efecto no tiene consecuencia alguna sobre este estudio.

### *2.2.2.3 Breve descripción del túnel de viento de capa límite*

El presente estudio analiza una superficie de gran amplitud. Para llevar a cabo el ensayo es necesario que las mediciones se realicen en unas instalaciones adecuadas. El túnel de viento I del CEAMA aporta las características necesarias para el buen fin de éste.

Las dimensiones de la cámara de ensayo del mismo son de 2.15m de ancho, por 1.8m de alto, con 15m de longitud hábil. Con estas dimensiones se dispone de un volumen suficientemente grande como para conseguir generar capa límite con métodos pasivos.

En su interior, el viento circula por la aspiración producida por una turbomáquina de gran potencia. Con ella se pueden conseguir velocidades de hasta 150 Km/h. La recirculación del aire es abierta por el recinto en el que se encuentra. El nivel de turbulencia máximo es  $< 0.3\%$ . Para más detalles ver Terrés-Nicoli y Losada (TERRÉS-NICOLI and LOSADA 2000).



**Figura 2.2-2 Exterior del túnel de viento de capa límite**

## 2.3 Capa límite atmosférica

### 2.3.1 Capa límite: Descripción y características

La capa límite atmosférica (C.L.A. en adelante) es el resultado de la interacción entre diversos factores. El motor principal del movimiento del aire son los gradientes de presión presentes en la atmósfera. Su efecto se modifica como resultado de las fuerzas inerciales: fuerza de Coriolis, fuerza centrífuga y los efectos dinámicos causados por la rugosidad de la superficie (terrestre o marítima). La viscosidad del fluido provoca, también, movimientos. Por último también aparecen dinámicas inducidas por los gradientes de temperatura, ya sea entre diferentes puntos de la masa de aire o entre el aire y la superficie terrestre. El resultado es un balance de fuerzas que provoca unos perfiles de velocidad de viento característicos.

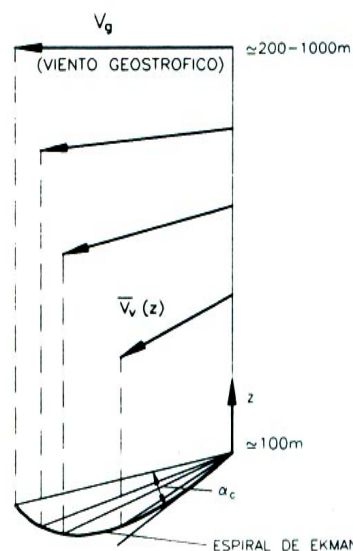
En la zona superior de la atmósfera los efectos del rozamiento con el suelo y de la diferencia de temperatura son inapreciables. Las fuerzas que rigen el movimiento del fluido son las inerciales y las debidas a los gradientes de presión. Bajo estas condiciones encontramos un perfil de velocidades constante y un flujo de viento esencialmente laminar.

A estas alturas la dirección del viento en ausencia de fuerzas inerciales, tendería a desplazarse desde los centros de altas presiones hasta los de bajas. Sin embargo la fuerza de Coriolis y la centrífuga provocan que el viento se desvíe de esta dirección adoptando, cuando alcanza el equilibrio, una trayectoria paralela a las isobaras, dejando las bajas presiones a la izquierda en el hemisferio norte y a la derecha en el sur.

En las capas bajas de la atmósfera el rozamiento entre el fluido y el suelo tienen una influencia mayor. Debido a él, se produce un intercambio de momento entre el flujo de aire y el suelo, que provoca una disminución de la velocidad media y una inyección de turbulencia. La deceleración del fluido se transmite en altura por efectos viscosos. El resultado es un perfil característico de velocidades denominado C.L.A. El espesor de la C.L.A. es función de la rugosidad que presente la superficie de contacto, y va desde 200-250 metros hasta pocos miles. Se puede considerar espesor de la capa

límite la altura en la que la velocidad del viento supone el 99% de la velocidad de gradiente.

A medida que nos vamos acercando al suelo el balance de fuerzas se altera. La fuerza de rozamiento va aumentando lo que distorsiona el equilibrio antes mencionado; como consecuencia la dirección del viento deja de ser paralela a las isobaras. El ángulo entre éstas y la dirección del viento aumenta a medida que nos acercamos al suelo. La representación de la variación del vector velocidad se denomina Espiral de Ekman y su forma esquemática es la que se muestra en la figura 2.3-1 . Este efecto es en general despreciable, ya que supone una desviación máxima de  $3^\circ$  o  $4^\circ$ , por lo que en nuestro estudio su efecto ha sido despreciado.



**Figura 2.3-1 Espiral de Ekman (extraído de (ROM 04.95 1995))**

La C.L.A. puede subdividirse en dos tramos:

- Capa límite superficial (alturas menores a 100m)
- Capa de transición o región de Ekman (desde 100m hasta el final de la C.L.A.).

Las capas límites se pueden clasificar según sus características. Esta clasificación atiende al peso específico de los efectos térmicos.

- *Capa Límite Neutral:* Es aquella en la que los efectos térmicos no son predominantes. El movimiento está determinado por el balance entre el gradiente de presión y las fuerzas inerciales.
- *Capa Límite Estratificada:* En ella el gradiente de temperaturas es suficientemente alto para afectar notablemente al perfil de velocidades. Induce, además, la presencia de una turbulencia térmica. Su simulación, por tanto, aumenta en complejidad. A su vez se puede subdividir en:
  - *Estable:* Existe un gradiente de temperaturas en la capa límite, pero se encuentra en situación de equilibrio.
  - *Inestable:* Este tipo de capa límite se da cuando las partículas del fluido ascienden a una velocidad que no les permite adaptar su temperatura a las nuevas condiciones de manera suficientemente rápida. Estas diferencias de temperatura se manifiestan en diferencias de densidad y fuerzan por tanto la aparición de nuevos movimientos, (SIMIU and SCALAN 1996)

La capa límite neutra, con una superficie del terreno horizontalmente homogénea, adquiere un perfil de velocidades medias que puede ser representado de manera simplificada por el siguiente perfil logarítmico:

$$\bar{U}(z) = \frac{U_*}{k} \ln \frac{z}{z_o} \quad (2.2)$$

donde  $\bar{U}(z)$  es la velocidad media del viento a una altura  $z$ ,  $z_o$ , es la altura de rugosidad superficial que depende de las características del terreno (ver tabla 2.3-1),  $k$  es la constante de Von Karman de valor 0.4 y  $U_*$  es la velocidad de fricción, definida como:

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \quad (2.3)$$

siendo  $\rho$  la densidad del fluido y  $\tau_o$  la fuerza de arrastre superficial por unidad de superficie. Esta fuerza, a su vez, puede ser expresada en función



de la velocidad del viento de gradiente o como función de la velocidad media a una altura de 10 metros:

$$\tau_o = \rho C_g U_{gr}^2 \tag{2.4}$$

$$\tau_o = \rho C_D (\bar{U}(10))^2 \tag{2.5}$$

Los valores de  $Z_o$ ,  $C_g$ , coeficiente geostrófico de arrastre, y de  $C_D$ , coeficiente de arrastre superficial se encuentran tabulados para diferentes condiciones de superficie.

TIPO DE SUPERFICIE	$Z_o$	$10^3 C_g$	$10^3 C_D$
Mar abierto y campo abierto sin obstáculos	0.001-0.01	0.7-1.2	1.9-3.4
Mar con oleaje muy fuerte y campo abierto, llano u ondulado, con obstáculos dispersos	0.01-0.3	1.2-2.2	3.4-13
Superficies boscosas, campos con obstáculos abundantes y pequeñas zonas urbanas	0.3-1.0	2.2-2.8	13-30
Superficies con grandes y frecuentes obstáculos y grandes ciudades	1.0-5.0	2.8-3.5	30-300

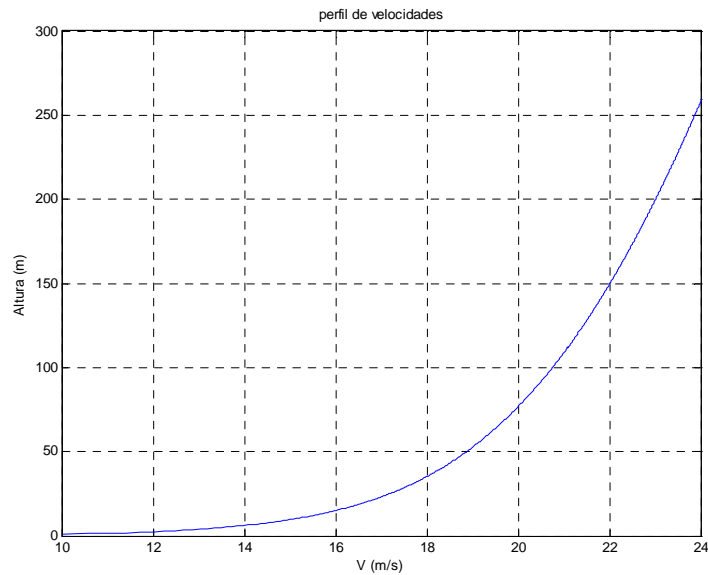
**Tabla 2.3-I Valores de  $Z_o$ ,  $C_D$  y  $C_g$**

El perfil logarítmico, por tanto, puede expresarse como:

$$\bar{U}(z) = \frac{\sqrt{C_g}}{k} U_{gr} \ln \frac{z}{z_o} \tag{2.6}$$

O bien:

$$\bar{U}(z) = \frac{\sqrt{C_D}}{k} U(10) \ln \frac{z}{z_o} \tag{2.7}$$



**Figura 2.3-2 Ejemplo de perfil de velocidades**

Esta formulación sólo es válida hasta una cierta altura, a partir de la cual su precisión decrece. En la capa de transición o región de Ekman puede recurrirse a un perfil empírico exponencial:

$$\bar{U}(z) = U_{gr} \left( \frac{z}{z_g} \right)^\alpha \tag{2.8}$$

El parámetro  $\alpha$  no tiene sentido físico, es un artificio matemático para poder obtener un ajuste adecuado,  $z_g$  es el espesor de la capa límite. Ambos dependen de la rugosidad del terreno sobre el que se encuentre el flujo de aire.

Para el perfil de velocidades ESDU (ESDU 82026) utiliza una formulación más compleja en la que incluye el uso del parámetro de Coriolis:

$$\bar{U}(z) = U_* \frac{\log\left(\frac{z}{z_o}\right)}{\log\left(\frac{10}{z_o}\right)} + 86.25 * \left( \frac{f \cdot z}{\bar{U}(10)} \right) \tag{2.9}$$

donde:

$f$ : Parámetro de Coriolis  $f = 2\Omega \sin(\phi)$ .

$\Omega$  : Velocidad de rotación de la tierra.

$\phi$  : Latitud del lugar.

La interacción entre el fluido en movimiento y la superficie terrestre, además de retardar el flujo, provoca la aparición de turbulencia, es decir de importantes fluctuaciones de la velocidad puntual del viento. No existe una definición de este fenómeno. En su lugar, la turbulencia se define mediante las propiedades que presenta: existencia de simetría según cual sea la escala observada, variación temporal de las distintas componentes de la velocidad, presencia de vorticidad transportada por el flujo medio, fenómeno de carácter tridimensional y distribución aleatoria en el espacio y en el tiempo, con componentes en un espectro continuo.

La turbulencia se crea por una transferencia de energía desde el movimiento medio hasta una turbulencia de tamaño característico grande, del mismo orden de magnitud que el de la longitud de mezcla.

Según la teoría desarrollada por Kolmogorov, esta energía se transmite desde estas escalas hasta otras más pequeñas sin pérdidas disipativas. Es en estas escalas menores en las que la energía se disipa en forma de calor. La escala para la que esta disipación sucede depende de la viscosidad del fluido. Por tanto, en el caso de que no exista una inyección de energía desde el movimiento medio, la turbulencia va decayendo progresivamente.

En un sistema sin inyección artificial de turbulencia, la producción y la disipación de energía se encuentran en equilibrio. Ésta es una de las hipótesis de Kolmogorov que sustentan la representación espectral de un estado de viento:

$$\frac{nS_{uu}(z, n)}{U_*^2} = 0.26 f^{*-2/3} \quad (2.10)$$

Donde:

$S_{uu}$  : Función de densidad espectral.

$f^*$ : Frecuencia en forma adimensional (La notación usual para este parámetro es  $f$ , en este texto se utiliza  $f^*$  para diferenciar del parámetro de Coriolis):

$$f^* = \frac{nz}{U(z)} \quad (2.11)$$

$n$ : Frecuencia característica.

Adicionalmente existen curvas empíricas que representan el espectro, como por ejemplo la dada por Plate (PLATE 1982):

$$\frac{nS_{uu}(z, n)}{u_*^2} = \frac{105 f^{*3}}{(1 + 33 f^{*3})^{5/3}} \quad (2.12)$$

muy similar a la que ofrece Kaimal et al (KAIMAL, et al. 1972)

$$\frac{nS_{uu}(z, n)}{u_*^2} = \frac{200 f^{*3}}{(1 + 50 f^{*3})^{5/3}} \quad (2.13)$$

Las frecuencias posibles en un campo local de velocidades de viento atmosférico cubren un amplio rango, desde frecuencias de 0.003 Hz hasta máximos de 2000 Hz. Los picos de frecuencia suelen aparecer para frecuencias de entre 0.02 y 0.1 Hz. Mediante el empleo del espectro de viento se pueden reconocer cuales son las frecuencias con mayor cantidad energética.

### 2.3.2 Capa límite: Métodos para su reproducción a escala

Ya en el siglo XVIII se pueden encontrar trabajos pioneros encaminados a determinar el efecto del viento en objetos y en la dispersión de contaminantes. Sin embargo los dirigidos a reproducir en un laboratorio las características del viento son mucho más recientes. De hecho es necesario esperar dos siglos más para que se trate de simular una capa límite de manera artificial.

Desde finales de la década de los sesenta han sido múltiples los avances logrados en este aspecto. Diferentes autores (JENSEN and FRANK 1963) con distintas metodologías han tratado de imitar de la mejor manera posible las condiciones que se dan en la naturaleza.

Ya se ha indicado anteriormente que el flujo de aire atmosférico en un punto concreto es el resultado de una interacción entre multitud de factores que se conjugan para dar lugar a un fenómeno de gran complejidad cuya simulación no resulta trivial.

Sin embargo, en el caso de que el fluido haya tenido un *fetch* de características homogéneas suficientemente largo el problema se simplifica ya que en este caso las características del campo local de velocidades de viento son similares a las que presenta un flujo de aire circulando sobre una superficie plana.

A la hora de simular una capa límite es fundamental plantearse cuales de los diferentes factores que interactúan tienen un mayor peso sobre el fenómeno. Eliminando aquellos de menor relevancia y simulando adecuadamente el efecto de los que tienen una influencia significativa podremos conseguir un flujo de viento con unas propiedades similares a las que se dan en la naturaleza.

El sistema que se utilice para generar la capa límite atmosférica deberá ser capaz de reproducir con fidelidad tanto la gradación de velocidad en altura como las características de la turbulencia del flujo, por ser éstas las características fundamentales del mismo.

La complejidad de la turbulencia se traduce en dificultades en su reproducción. Según Counihan y Armit (COUNIHAN and ARMITT 1967), representar la estructura de la atmósfera requeriría, en principio, un número infinito de parámetros. Su propuesta para modelarla adecuadamente es utilizar los siguientes parámetros:

- Intensidad de cada componente de la turbulencia, en función de la altura
- Escalas integrales de turbulencia
- Micro escalas de turbulencia
- Correlaciones entre las distintas componentes de la turbulencia
- Espectro de la turbulencia

Usualmente estas condiciones se relajan, representando, sólo las características fundamentales en cada estudio realizado.

La intensidad de la turbulencia se define de la siguiente manera:

$$I_u(z) = \frac{\sqrt{\overline{u'(z)^2}}}{\overline{U(z)}} \quad (2.14)$$

Donde  $u'(z)$  es la desviación de la velocidad puntual con respecto a la media, es decir, en un momento cualquiera:

$$U(z) = \overline{U}(z) + u'(z) \quad (2.15)$$

La generación de la capa límite es un proceso abierto. Son varios los métodos disponibles y cual sea el más adecuado depende tanto de los objetivos buscados como de las instalaciones disponibles (CERMARK 1995), (HUNT and FERNOHOLZ 1974).

Los sistemas de generación de capa límite se pueden dividir en dos categorías: pasivos y activos. Los primeros modifican el flujo por su mera presencia física. Son obstáculos que al bloquear parte de la sección modifican las características del flujo de aire. Mediante una parametrización adecuada de las dimensiones de estos elementos se consigue alterar las características del flujo para que se adapte a las deseadas. Los sistemas activos, en cambio, modifican las características del flujo de una manera dinámica, ya sea mediante la inyección de un segundo flujo o con su movimiento (por ejemplo utilizando álabes móviles).

La gran ventaja que presentan los sistemas activos sobre los pasivos es la inmediatez de su efecto que además puede controlarse desde el exterior del túnel. Son de gran utilidad en instalaciones de pequeña longitud en las que se hace necesaria una respuesta inmediata. El inconveniente de su uso estriba en una mayor dificultad a la hora de conseguir una capa límite de características similares a la natural.

Los sistemas pasivos, pese a conseguir resultados de mayor calidad, presentan la desventaja de necesitar una mayor superficie para que su efecto sea el deseado.

Los sistemas pasivos se subdividen en dos categorías: naturales y artificiales. Los sistemas naturales son aquellos que se basan en la creación de una rugosidad artificial en la solera del túnel con la que se induce una fuerza de arrastre similar a la que se encuentra el flujo en la naturaleza. Según la literatura existente (COUNIHAN and ARMITT 1967), si no hay ningún obstáculo individual de importancia, la C.L.A puede ser determinada conociendo sólo el valor de  $z_0$ . En términos de su reproducción esto se traduce en que en caso de disponer de la longitud necesaria, basta disponer de la rugosidad correcta para crear una capa límite adecuada.

Este sistema es reconocido por diferentes autores como el más adecuado para la reproducción de las características de la C.L.A.(COOK 1978). El problema que presenta, como ya se ha adelantado, es que el efecto de fricción provocado por la rugosidad se traslada en altura por la mezcla que produce la turbulencia, lo que constituye un proceso lento. Según se recoge en diferentes trabajos (COUNIHAN and ARMITT 1967) la altura a la que el campo local de velocidades de viento es modificado por un cambio en la rugosidad es 1/10 de la distancia horizontal al punto en el que se hay producido ese cambio. Esta ley es válida sólo para variaciones no muy grandes de la rugosidad.

Los sistemas pasivos artificiales tratan de acelerar el proceso de mezcla mediante la generación de una turbulencia añadida. Esto lo consiguen interponiéndose en el flujo para producir alteraciones en él. Con estas interferencias consiguen acelerar el proceso de mezcla en la capa límite. El problema principal que presentan es que la turbulencia creada decae con la distancia, al contrario de lo que ocurre en el caso de situar elementos de rugosidad, en los que se mantiene constante.

Los elementos pasivos artificiales más comunes son piezas verticales u horizontales (varillas) que se interponen en la trayectoria del flujo, generando vórtices. Una de las formas más usuales es la triangular. En la bibliografía especializada (IRWIN 1981) se encuentran parametrizaciones de las dimensiones adecuadas dependiendo de los parámetros  $\alpha$  y  $z_g$  de la capa límite que se esté buscando. Por otro lado Counihan (COUNIHAN 1968) afirma que los generadores triangulares producen una pérdida excesiva de momento en las capas bajas de la atmósfera y una pérdida insuficiente en las altas, por lo que aboga por la utilización de formas

geométricas de cuartos de elipse. Otra forma de generar estos vórtices es mediante varillas horizontales de diferentes diámetros.

Otro elemento pasivo artificial son las barreras de baja altura, con ellas se pretende mezclar la capa límite interna provocada por el cambio de rugosidad con la estela provocada por los generadores de vórtices.

Si por el contrario se busca crear una turbulencia homogénea en toda la sección del túnel lo usual es colocar un mallado regular que abarque toda la sección, cuidando siempre que la pérdida de carga provocada por su presencia no sea excesiva.

Es de destacar también el recurso utilizado en túneles de pequeñas dimensiones, que no pueden hacer frente a una simulación de toda la C.L.A. y por ello trabajan reproduciendo sólo parte de ésta (COOK 1973).

Las dos características del campo (variación de la velocidad media con la altura y presencia de turbulencia) están determinados por la interacción entre el flujo y el terreno. Sin embargo existen otros dos factores en la naturaleza que también influyen en el flujo y que son de difícil reproducción en un túnel de viento de capa límite: La fuerza de Coriolis y los gradientes de temperatura.

Ya hemos indicado que en nuestros experimentos vamos a prescindir del efecto de la fuerza de Coriolis porque a bajas alturas es pequeño. Este hecho no debería traducirse en errores apreciables en los resultados.

El calentamiento del suelo introduce gradientes de presión en el fluido, induciendo movimientos en el mismo, y modificando los valores de la turbulencia, incrementándola si el gradiente de temperatura es estable o reduciéndola si es inestable. La decisión acerca de la importancia relativa de este factor en el fenómeno global hay que tomarla comparando su efecto con el producido por los factores de carácter mecánico. En este sentido Cook (COOK 1978) afirma que el flujo puede considerarse adiabático para velocidades de viento superiores a 10m/s en las que la propia turbulencia del fluido ahoga a los efectos térmicos. En una aproximación más conservadora, ROM (ROM 04.95) propone un umbral de la velocidad media del viento  $\bar{U}(10)$  de 15m/s para que la C.L.A. pueda ser considerada neutra.

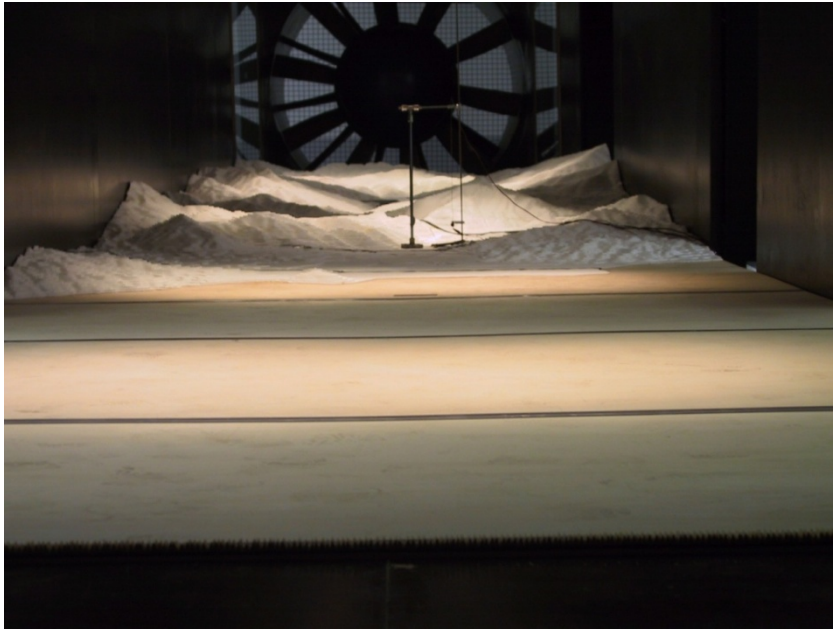


Esta velocidad que podemos considerar como punto de inflexión es un valor pequeño para los estudios usuales en ingeniería civil, en los que son valores superiores los que ponen en compromiso las estructuras que se estén tratando. Por ello normalmente los efectos térmicos son despreciados frente a los dinámicos. Como excepción en los estudios de dispersión de contaminantes estos efectos tienen un peso importante. En nuestro caso, sin embargo, este límite puede suceder en determinadas ocasiones en las que el flujo de viento circule a baja velocidad de viento.

Un último requisito de la simulación de la C.L.A. es que en sentido longitudinal no se produzcan pérdidas de carga elevadas que modifiquen la presión estática de manera artificial. Estas pérdidas son mayoritariamente producidas por el modelo al bloquear la sección. En este sentido según (CERMAK and NICHOLAS) el bloqueo de superficie no debe de superar el 5 o 10% de la sección total del túnel. Dadas las dimensiones que presenta nuestro modelo este problema no debería presentarse.

### **2.3.3 Sistema de generación empleado**

Para poder reproducir a escala el campo local de velocidades de viento en la zona de interés es de vital importancia que las características del flujo entrante en la desembocadura del río Guadalfeo sean lo más parecidas posible a las reales que, como hemos indicado, se corresponden con las de una C.L.A. completamente desarrollada sobre una superficie de agua. Posteriormente este flujo de aire se desplaza por el modelo, modificando sus características al irse encontrando con los diferentes accidentes topográficos que conforman el cauce fluvial.



**Figura 2.3-3 Túnel dispuesto para el ensayo**

Según la bibliografía especializada (ROM 04.95), la altura de una C.L.A completamente desarrollada en una capa de agua es de 200m. Teniendo en cuenta que la escala utilizada es 1: 3000, deberemos obtener en el túnel una capa límite de 70mm.

Además de generar una capa límite del espesor indicado, también es necesario simular un perfil de velocidades medias y de intensidad de turbulencia similares a los que se dan en la naturaleza. Ambos parámetros dependerán de la rugosidad existente en la solera del túnel (sistema pasivo natural) y de los elementos adicionales que puedan modificar estos perfiles (sistemas pasivos artificiales).

Dada la baja altura de la capa límite que queremos simular, la altura de rugosidad necesaria para reproducirla será muy baja. Se plantean dos posibilidades: la primera consiste en recurrir a la propia solera del túnel, la segunda en utilizar como rugosidad artificial la que brinda una moqueta de poca altura.

En el caso de la moqueta, la propia rugosidad del material debería ser suficiente para generar una capa límite de las características requeridas. En el caso de la solera del túnel se añade al inicio del túnel una barrera de baja altura (1.3cm). A esta barrera que llamaremos barrera1 (véase figura 2.3-4)

se la se le da un perfil dentado con el que se favorece una mezcla eficiente de la turbulencia.



**Figura 2.3-4 Barrera utilizada**

Tanto en el caso de la moqueta como en el de la propia solera del túnel con la barrera<sup>1</sup> se realizan mediciones a lo largo del eje central longitudinal del túnel, obteniendo perfiles de la capa límite a distintas distancias del inicio de la solera horizontal del túnel. En las figuras que siguen, identificaremos cada perfil con el número que indique esta distancia. Las alturas se miden, en el primer caso, con el cero en la superficie de la moqueta y en el segundo, de la solera. Nuestra intención es comprobar cual de los dos sistemas produce perfiles de velocidad y turbulencia más parecidos a los reales.

Todas las mediciones fueron realizadas con un anemómetro de hilo caliente, en el caso de la barrera I con uno de un solo hilo y, por razones que indicamos más adelante, en el caso de la moqueta con otro de dos hilos. Ambos permiten adquirir datos a altas frecuencias (4000Hz en nuestro caso).

En cada ensayo, el anemómetro se situó a diferentes alturas, desde un mínimo de 7mm u 8mm hasta los 225mm, cota que se estimaba superior al

espesor de la capa límite. Estas dimensiones a escala real corresponden a 21-24m y 675m. La frecuencia de muestro fue de 4000Hz, con mediciones de 180s.

Todos los ensayos se han realizado al mismo régimen de giro en el ventilador. Esta velocidad de giro marca la velocidad del viento en la sección de ensayo del túnel que, además, es función de factores ambientales como la humedad relativa o la temperatura.

Estas variables condicionan que las velocidades en el interior del túnel puedan variar, y explican que las velocidades de gradiente, medidas en todos los casos que se exponen a continuación, pese a ser similares ofrezcan pequeñas variaciones del orden de 0.1m/s.

De cara a evaluar la calidad de las simulaciones se han comparado los resultados obtenidos de velocidades medias con los que marcan ROM (ROM 04.95) y tanto estos perfiles como los de intensidades de turbulencia con los ofrecidos por la normativa británica ESDU (ESDU 82026) y (ESDU 83045).

A continuación reproducimos aspectos técnicos contenidos en estas normativas.

ROM (ROM0.4-95) emplea el perfil logarítmico, ya sea haciendo uso del coeficiente geostrófico de arrastre ó del coeficiente de arrastre superficial, véase ecuaciones (2.6) y (2.7), por motivos de accesibilidad a datos se ha optado por la segunda de estas formulaciones.

Tanto  $C_D$  como  $z_0$  están tabulados para las diferentes situaciones que se pueden presentar, existiendo correspondencia directa entre ambos. Para el caso de mar abierto sus valores se recogen en la tabla 2.3-1.

Para obtener el valor de  $\overline{U}(10)$  se recurre al ANEJO I de la ROM (ROM 04.95) en el que, dependiendo de la zona geográfica de España en que nos encontremos, obtenemos una gráfica de frecuencias acumuladas. Para obtener el valor concreto es necesario conocer la dirección de viento en que estemos interesados y la probabilidad acumulada de que el valor no sea superado. Se selecciona una probabilidad acumulada del 95% con el fin de cubrir la mayoría de los casos posibles.

En la dirección del viento del cauce, N28ºO, correspondiente a un NNE, según ROM la velocidad  $\overline{U}(10)$  correspondiente a una probabilidad del 95% es de 15 m/s.

Por las razones indicadas anteriormente, los perfiles de intensidad de turbulencia han sido comparados con los aportados por la ESDU 83045 (ESDU 83045) en donde se recoge:

$$I_u = \frac{\sigma_u}{\overline{U}(z)} = \frac{\sigma_u}{u_*} \frac{u_*}{\overline{U}(z)} \quad (2.16)$$

A su vez, según (ESDU 83045):

$$\frac{\sigma_u}{u_*} = 2.63\eta \left[ 0.538 + 0.09 \cdot \ln(z/z_o) \right]^m \quad (2.17)$$

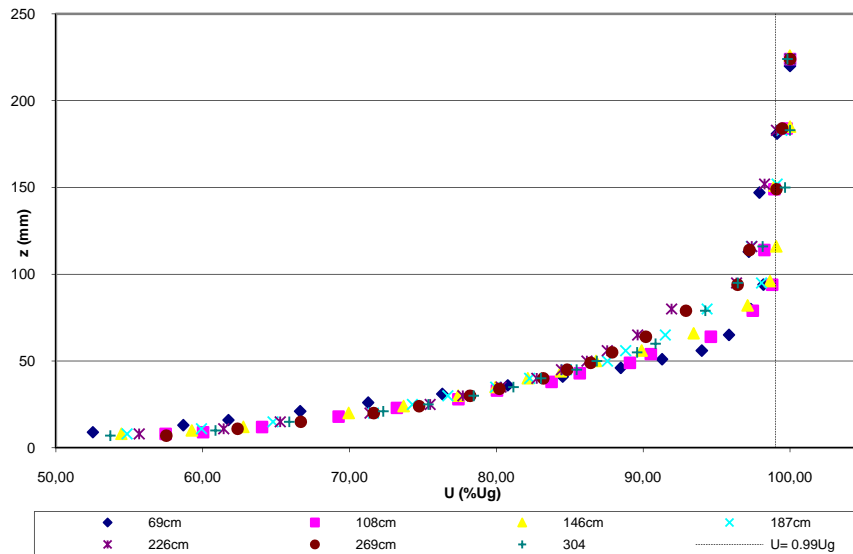
$$m = \eta^{16} \quad (2.18)$$

$$\eta = 1 - \frac{z}{\left( \frac{u_*}{6f} \right)} \quad (2.19)$$

A continuación vamos a realizar mediciones con diferentes configuraciones y las compararemos con los perfiles presentados en las normativas. En primer lugar mediremos el campo de viento cuando en la solera del túnel se dispone la barrera1.

En las figuras que siguen se presentan los valores medios de velocidad una vez adimensionalizados con la velocidad de gradiente, tomada ésta como la mayor de entre todas las mediciones.

La figura 2.3-5 incluye una línea vertical que marca la velocidad a la que se alcanza el espesor de la capa límite, como hemos señalado anteriormente esta velocidad es el 99% de la de gradiente y la altura a la que se alcanza determina el espesor de la capa límite.



**Figura 2.3-5 Espesor de capa límite para barrera1**

En esta figure se observa como en las mediciones más cercanas a la barrera el espesor de la capa límite es menor por no haber tenido distancia suficiente para desarrollarse completamente. Los perfiles que se obtienen resultan también más tendidos en las capas bajas, efecto provocado porque la turbulencia presente aún no ha tenido distancia suficiente para trasladar el efecto del rozamiento en altura.

De cara a realizar una comparación entre los valores obtenidos en el interior del túnel y los de los códigos ROM y ESDU las velocidades  $U(z)$  han sido adimensionalizadas con la velocidad a 300m. Se han convertido las medidas en la vertical en el túnel a escala real (3000/1). El dato de entrada en ambas formulaciones es la rugosidad superficial  $Z_0$ . Dado que ROM aconseja valores (a escala real) de entre 0.001m y 0.01m se han realizado comparaciones para ambos valores, los resultados obtenidos se muestran en las figuras 2.3-6 y 2.3-7. Su análisis se realiza una vez presentadas las mediciones correspondientes a la segunda fuente de turbulencias.

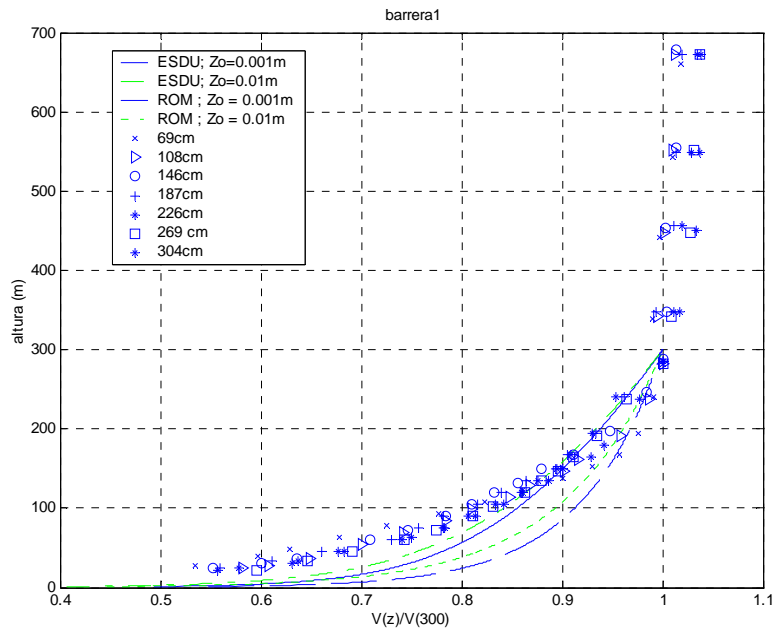


Figura 2.3-6 Perfil de velocidades medias con barrera1

Los datos de intensidades de turbulencia son los siguientes:

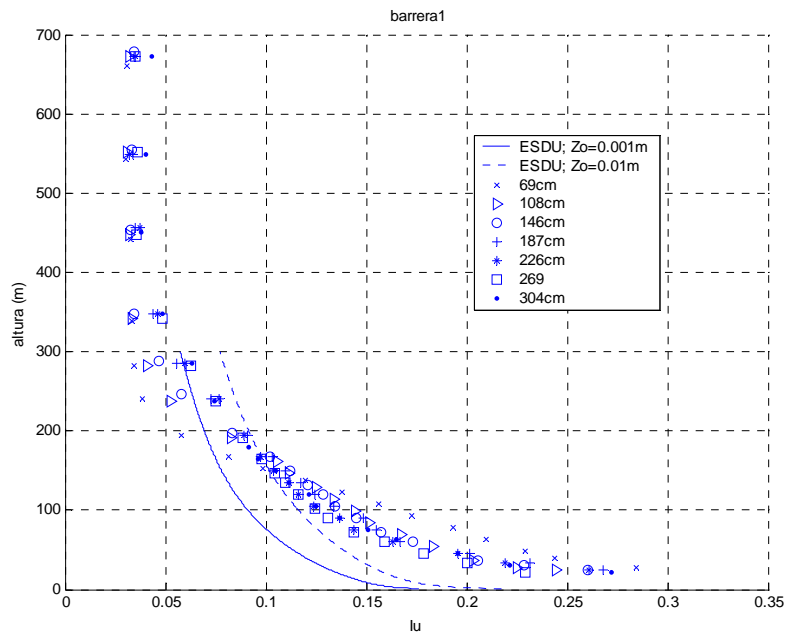


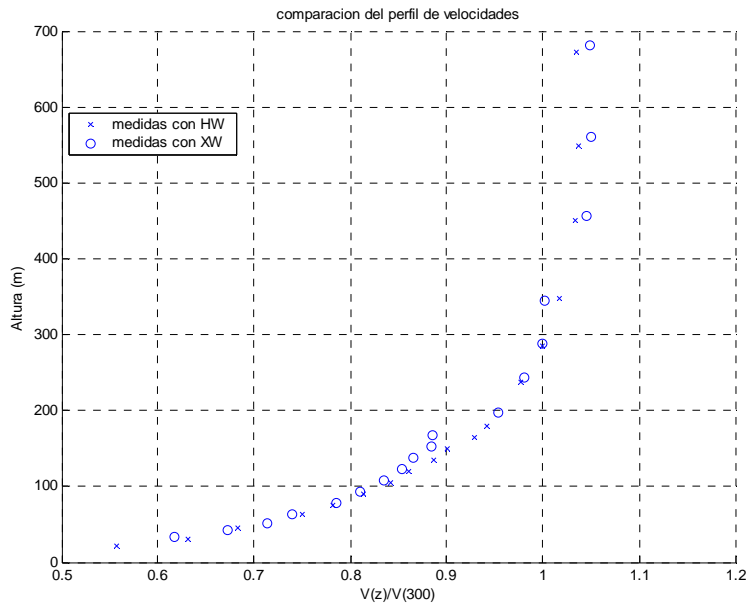
Figura 2.3-7 Perfil de  $I_u$  para barrera1

A continuación analizamos el caso en el que la solera del túnel es recubierta con una moqueta de poco pelo, lo que aumenta la rugosidad del suelo.

Como hemos indicado, a diferencia del caso de barrera1, las mediciones que se han realizado en este apartado se han realizado con un anemómetro de dos hilos. Esto se debe a que durante la primera medición, en el perfil situado a 69cm del origen se produjo la rotura del anemómetro de un hilo. El resto de las mediciones se hicieron con la sonda de dos componentes.

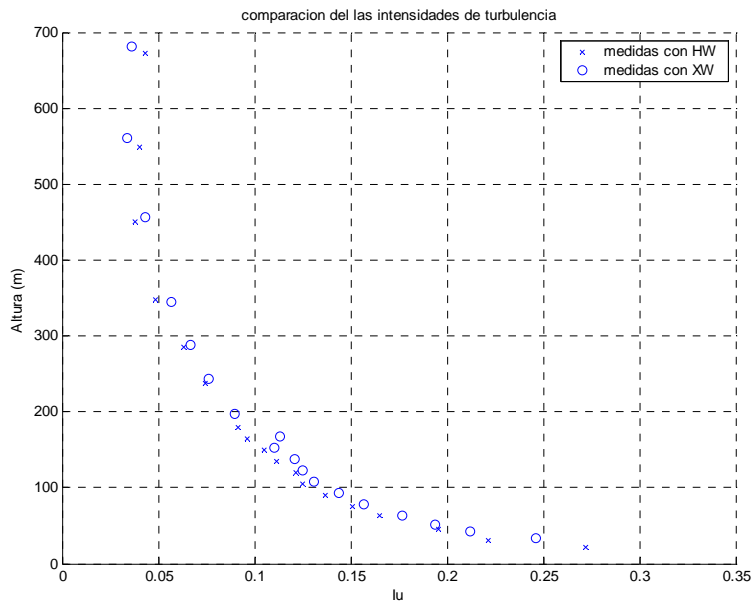
El cambio de anemómetro obligó a realizar un trabajo de validación de las mediciones obtenidas con ambos sistemas. Para ello, se repitió con el segundo de los anemómetros la medición del perfil de viento en  $x=304\text{cm}$  con la barrera1 dispuesta y se compararon los resultados obtenidos con los recogidos anteriormente con el anemómetro inutilizado.

Esta comparación se realiza en las figuras 2.3-8 para el perfil de velocidades y 2.3-9 para el de turbulencias. Se ha optado por presentar en estas figuras las velocidades adimensionalizadas con la velocidad a 300m y las alturas traducidas a escala real.



**Figura 2.3-8 Comparación entre anemómetros de uno y dos hilos (HW y XW respectivamente) para el perfil de velocidades medias**



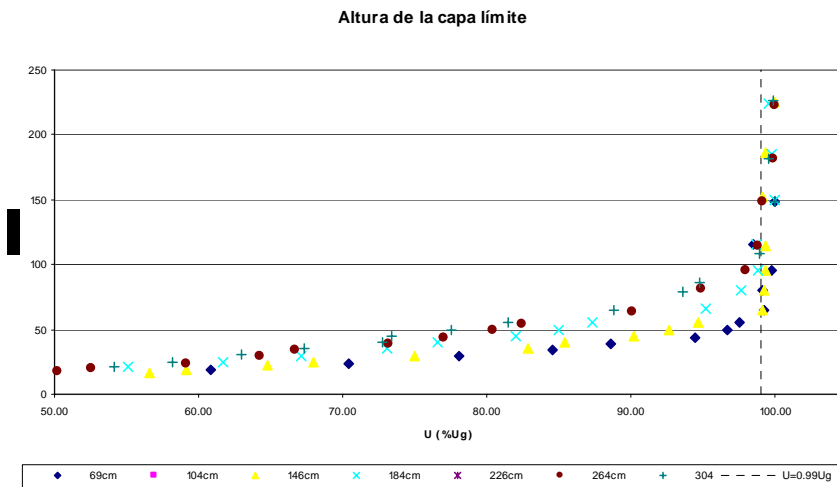


**Figura 2.3-9 Comparación entre anemómetros de uno y dos hilos (HW y XW respectivamente) para el perfil de intensidades de turbulencia**

Se puede observar una coincidencia notable entre las dos series de mediciones; lo que supone una garantía suficiente para poder admitir que no existen diferencias en las mediciones debidas a los dos instrumentos empleados. La diferencia más apreciable entre ambas series es la altura a la que comienzan las mediciones, a 9mm en el caso de un hilo y 12mm en el de dos. Este hecho es debido a que la segunda sonda por sus mayores dimensiones complica las mediciones a baja altura.

Es de destacar que las dos series fueron realizadas con un mes de diferencia y, además, a diferentes horarios. Las mediciones de la primera serie se realizaron entre las 14:05 y las 16:55 y las de la segunda entre las 18:33 y las 21:19. Por tanto, esta comparación, adicionalmente, muestra la independencia de los resultados de las mediciones respecto de posibles oscilaciones de las condiciones ambientales.

Una vez validado el cambio del sensor se presentan las figuras obtenidas cuando la solera del túnel se encuentra cubierta por la moqueta. Las velocidades, de nuevo, se encuentran adimensionalizadas con respecto a la velocidad de gradiente.



**Figura 2.3-10 Espesor de capa límite en el caso moqueta**

Se observa como este caso presenta las mismas características a baja altura que el anterior. Sin embargo, al haber aumentado el valor de la rugosidad, sus efectos se encuentran magnificados. Se observa así como la altura de capa límite en los primeros perfiles desciende hasta los 65cm.

A continuación mostramos la comparación de los datos obtenidos con los perfiles ofrecidos por los códigos ROM y ESDU :

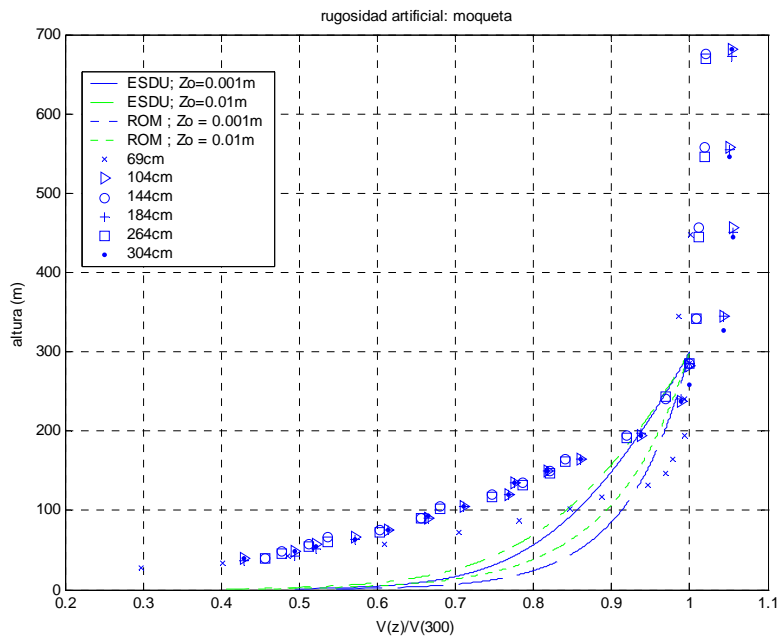


Figura 2.3-11 Perfiles de velocidades medias con moqueta

En cuanto a intensidades de turbulencia:

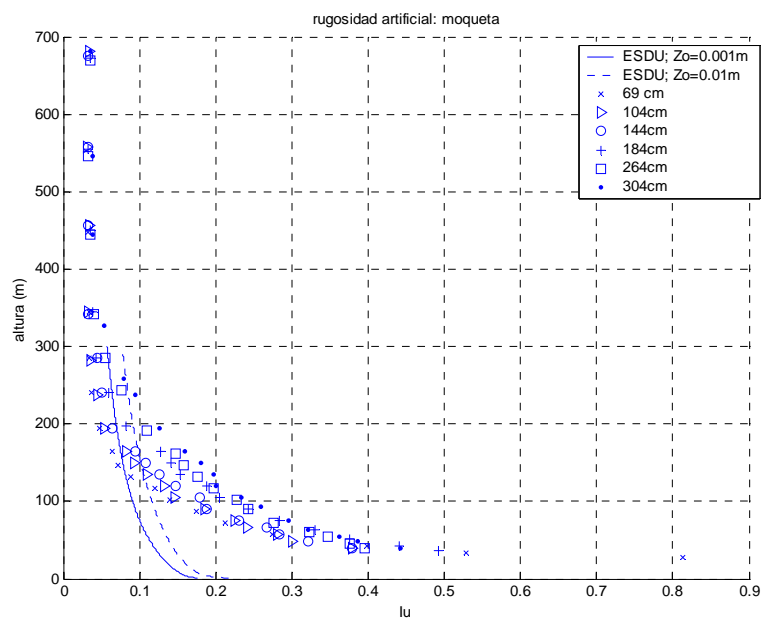


Figura 2.3-12  $I_u$  para moqueta

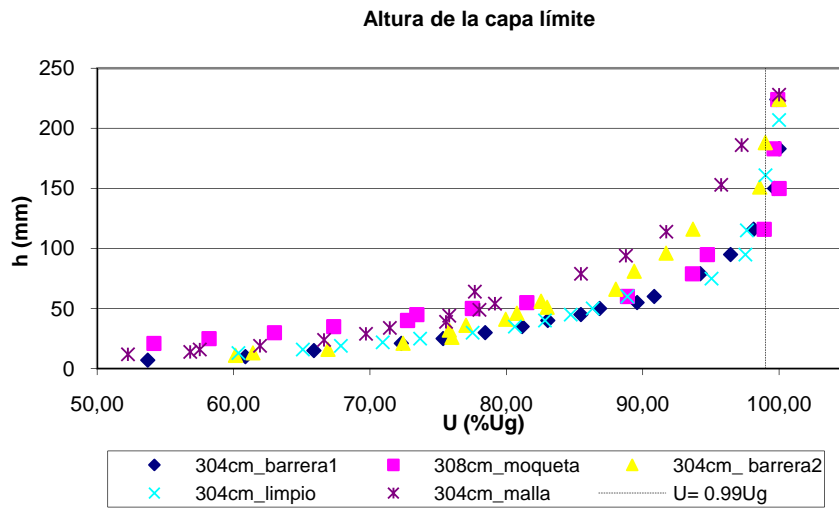
La comparación entre los resultados obtenidos muestran una mejor aproximación en el caso de las medidas realizadas sin moqueta y con la barrera de 1.3 cm que en la alternativa planteada con la moqueta.

Tanto en los perfiles de velocidad media, como en los de las intensidades de turbulencia, en el segundo caso las diferencias con los perfiles tanto de ROM (ROM 04.95) como de ESDU (ESDU 82026) son notables. En el primer caso, sin embargo, el acuerdo entre las medidas de velocidad media y las predicciones del segundo código es notable. En el caso del perfil de turbulencia la precisión del ajuste es menor.

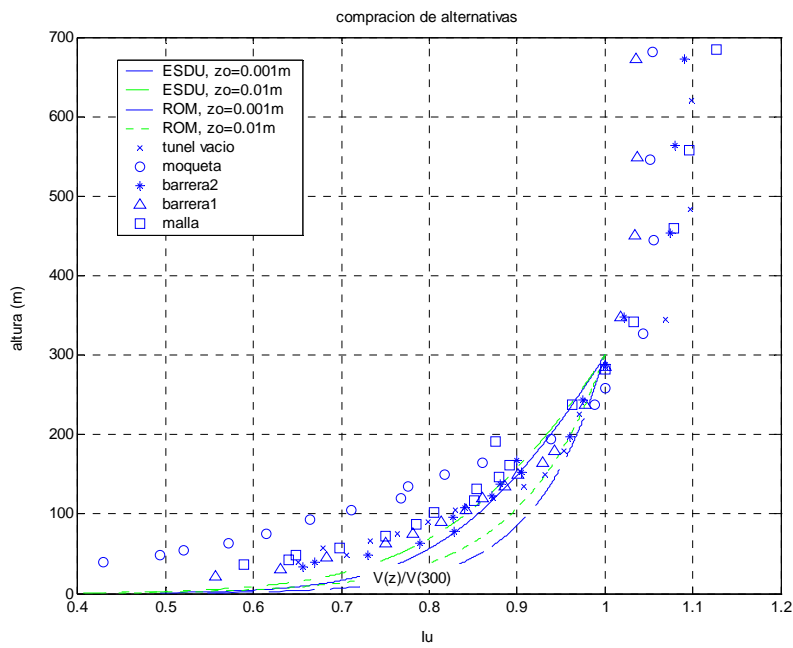
Para abordar este problema se realizó otra serie de ensayos en la que se barajaron otras configuraciones. Las alternativas consistieron en:

- a. Una barrera de diferente altura, en este caso de 2.5cm, denominada barrera2. Con ella se pretendía alterar el patrón de turbulencias a mayores alturas
- b. Ausencia total de elementos pasivos artificiales, es decir túnel en vacío. En este caso la turbulencia debería disminuir.
- c. Un mallado de baja altura. Las mallas, si están diseñadas adecuadamente, rompen determinadas escalas de turbulencia. En el periodo de realización de los ensayos el acondicionamiento del túnel está aún en una fase intermedia. Debido a esto podría ser que parte de la turbulencia detectada proviniera, en realidad, del exterior del túnel. Por esto, quizás, mediante la interposición de una malla se podría eliminar parte de estas componentes y conseguir valores más adecuados.

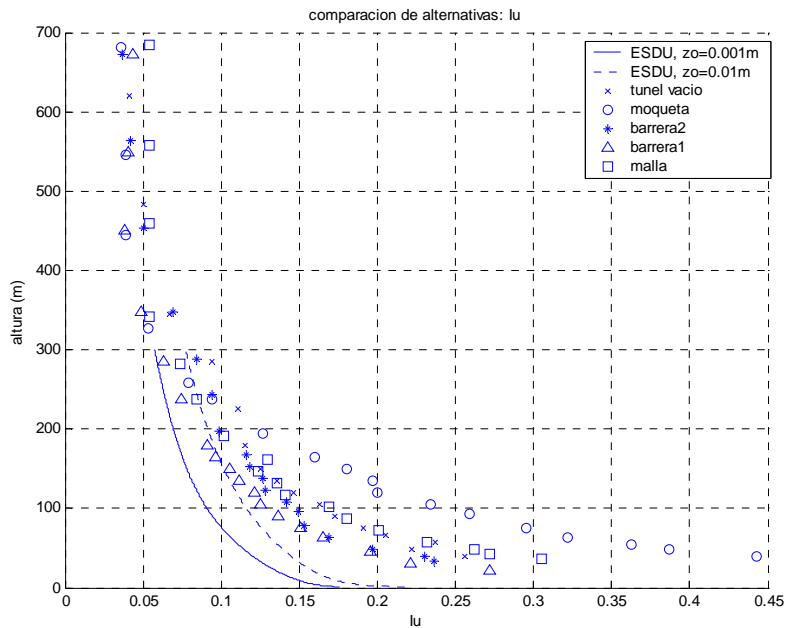
Decidimos elegir un único perfil para comparar todas las alternativas. Se escogieron los perfiles situados a 304cm del origen, en el que las capas límites se encontraban completamente desarrolladas. A continuación se presenta una figura con la comparativa entre los cinco sistemas utilizados:



**Figura 2.3-13** Altura de capa límite para las diferentes configuraciones



**Figura 2.3-14** Perfiles de velocidades medias para las diferentes alternativas



**Figura 2.3-15 I<sub>u</sub> para las diferentes alternativas**

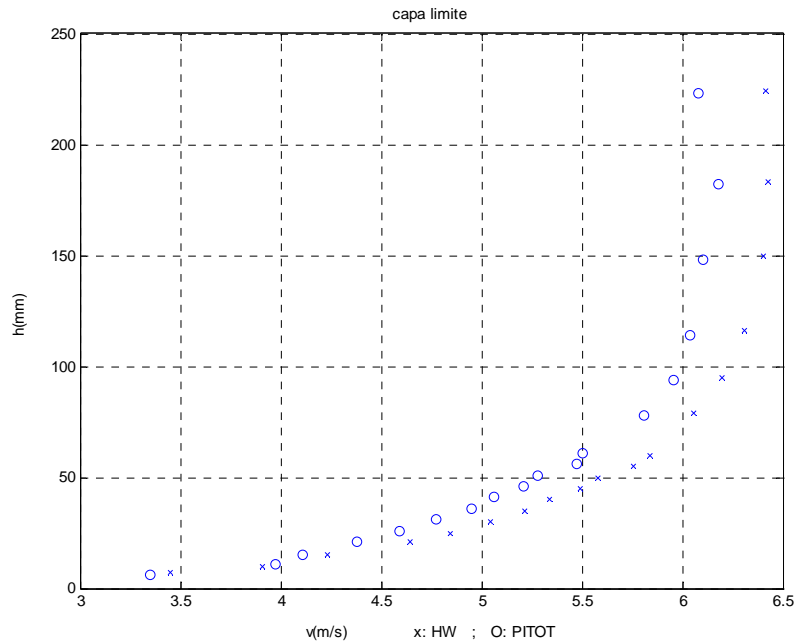
Comparando las cinco mediciones se observan pequeñas diferencias en términos de perfil de velocidades. Las excepciones son el obtenido con la malla a baja altura, que presenta una altura de capa límite mayor que en los otros casos y el correspondiente al caso en que la solera del túnel está cubierta por la moqueta. En este último caso el perfil presenta mayores deceleraciones en las capas bajas.

Se observa también como las intensidades de turbulencia que más se aproximan a las expuestas por el perfil ESDU son las logradas con la barrera1 dispuesta en la solera del túnel. En el resto de los casos las intensidades son mayores y por tanto se alejan aún más de las deseadas.

Es destacable el efecto logrado con el mallado de baja altura, la comparación de los datos obtenidos en este caso con los obtenidos con el túnel en vacío permite concluir que su efecto es inapreciable, lo que supone un apoyo sobre el correcto funcionamiento del túnel.

Finalmente, para tener una idea del funcionamiento del anemómetro de hilo caliente incluimos, en la figura 2.3-16, el perfil de velocidades de viento

obtenido con un anemómetro de un único hilo y el de un tubo de Pitot en un mismo punto del túnel de viento.



**Figura 2.3-16 Comparación anemómetro de hilo caliente y PITOT**

Al ser medidas realizadas durante el mismo ensayo no se han adimensionalizado. La diferencia en las mediciones entre ambos instrumentos es de unos 0.2m/s. Conviene destacar que tanto la precisión como la respuesta frecuencial de éste último es menor que la del anemómetro de hilo caliente y que este valor que está dentro del rango de error del sistema de medición empleado con el tubo de Pitot.

### 2.3.4 Capa límite obtenida

Como se ha indicado en la sección anterior, finalmente, se opta por utilizar la capa límite obtenida mediante la propia rugosidad de la solera del túnel y la barrera1 de 1.2cm al inicio del mismo. En esta disposición la capa límite parece completamente desarrollada desde los 269cm, ya que a partir de ese punto la variación de los perfiles observados es mínima. Sin embargo,

de cara a situarse del lado de la seguridad, se opta por situar el punto de inicio del modelo a 304cm.

#### 2.3.4.1 Características

Las características de la capa límite obtenida son las siguientes:

a) Altura:

Como hemos señalado en repetidas ocasiones, la altura de la capa límite es aquella a la que se alcanza el 99% de la velocidad de gradiente (que es la máxima velocidad medida en el perfil considerado). Por lo tanto esta altura se extrae directamente de los datos de velocidades obtenidos en función de la altura. Por las razones señaladas en la sección anterior para la distancia señalada se dispone del perfil de velocidades medido con los anemómetros de uno y dos hilos. En la tabla 2.3-2 se muestran ambos.

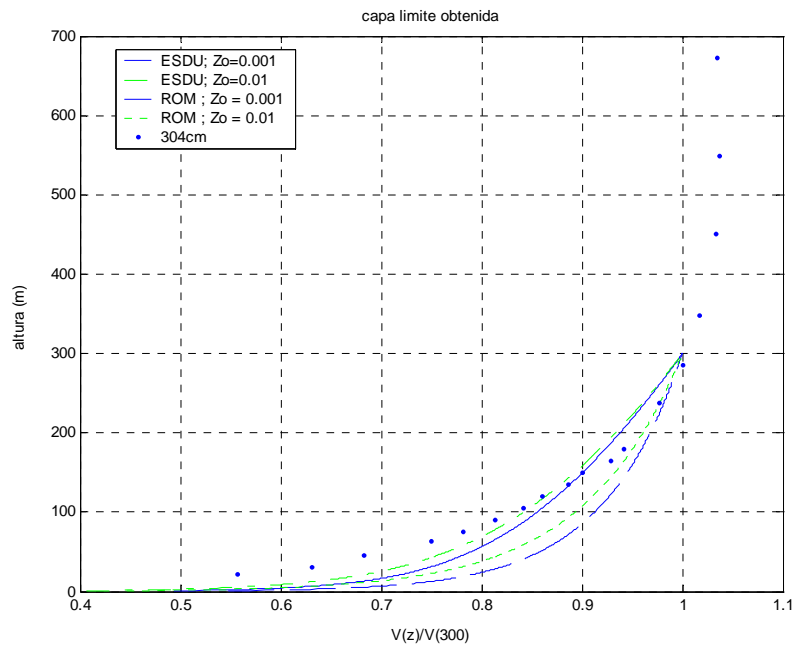
304 cm – Anemómetro de un hilo			304 cm -- Anemómetro de 2 hilos		
alturas	V media	%Vmax	alturas	V media	%Vmax
7	3.451	53.70	11	3.851	58.76
10	3.911	60.87	14	4.192	63.96
15	4.234	65.89	17	4.454	67.96
21	4.646	72.29	21	4.614	70.40
25	4.843	75.36	26	4.899	74.75
30	5.041	78.45	31	5.058	77.17
35	5.215	81.16	36	5.210	79.49
40	5.336	83.03	41	5.328	81.29
45	5.492	85.46	46	5.401	82.41
50	5.580	86.84	51	5.519	84.21
55	5.757	89.58	56	5.521	84.24
60	5.837	90.84	66	5.951	90.80
79	6.055	94.23	81	6.119	93.36
95	6.197	96.44	96	6.240	95.21
116	6.306	98.13	115	6.254	95.42
150	6.404	99.66	152	6.524	99.54
183	6.426	100.00	187	6.554	100.00
224	6.415	99.83	227	6.542	99.82
máximo	6.426		máximo	6.554	

Tabla 2.3-2 Altura de capa límite



En ambos casos la altura de capa límite se encuentra cercana a los 130 mm. Este valor, eliminando el factor de escala, se traduce en una altura de capa límite atmosférica de 390mm, valor superior al que estábamos buscando.

Las representaciones gráficas del perfil de velocidades y el de intensidades de turbulencias obtenidos junto con los propuestos en las normas ROM y ESDU se reproducen en las figuras 2.3-17 y 2.3-18.



**Figura 2.3-17 Perfil de velocidades medias de la solución obtenida**

En términos de intensidades de turbulencia se recogen los datos:

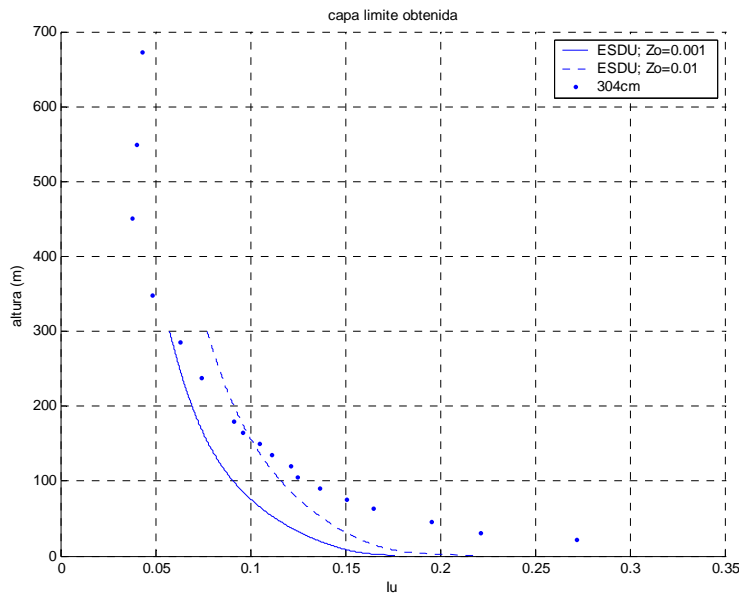


Figura 2.3-18 Perfil de  $I_u$  para la solución elegida

2.3.4.2 Ajustes

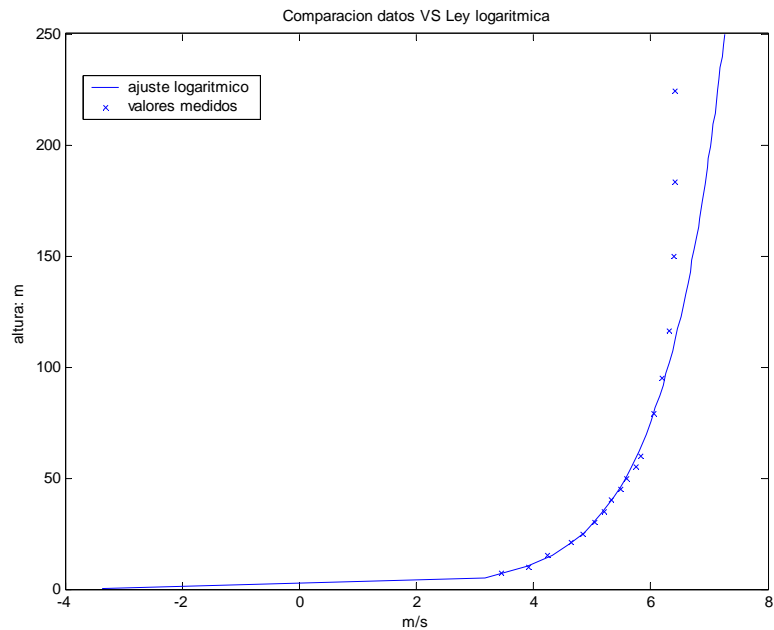
Una vez seleccionado el punto en el que se alcanza la capa límite perfectamente desarrollada y comprobado un ajuste adecuado a lo previsto por las normas ROM y ESDU, parece razonable tratar de buscar una función que describa la variación de velocidad del fluido al variar la altura. La determinación de esta función tiene relevancia porque permite identificar el valor que toman ciertos parámetros en la modelización realizada, lo que, a su vez, tiene importancia en la comprobación de ciertos aspectos referidos al modelado del fenómeno (ver apartado 2.4.2).

Para realizar esta tarea, buscamos los parámetros de ajuste con respecto a las dos leyes que caracterizan el comportamiento de una capa límite: leyes logarítmica y exponencial.

a) Ley logarítmica:

Se realiza, con los datos obtenidos, un ajuste a una ley logarítmica como la que se mostró en la ecuación (2.2). Éste nos permite averiguar los valores de  $Z_0$  y de  $U^*$  que nuestro sistema de generación de capa límite está provocando. De cara a realizar un ajuste adecuado se han utilizado desde el

más bajo de los valores en  $z$  hasta aquél en el que la capa se considera completamente desarrollada.



**Figura 2.3-19 Ajuste logarítmico**

Se observa que el ajuste obtenido es de gran calidad. Los valores que obtienen son los siguientes:

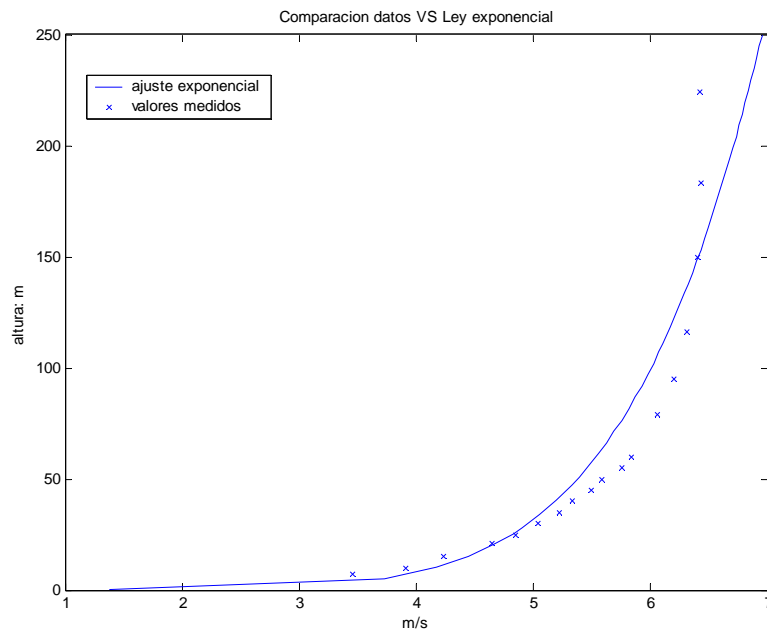
$$U_* = 0.4195 \text{ m/s}$$

$$Z_0 = 0.0002478 \text{ m}$$

#### b) Ley exponencial

Se realiza también un ajuste de los datos de velocidades medias obtenidas a una ley exponencial de velocidades como la expresada en (2.8).

El resultado que se obtiene es el siguiente:



**Figura 2.3-20 Ajuste a ley exponencial**

El valor obtenido para el parámetro  $\alpha$  es el siguiente:  $\alpha = 0.1598$

El mejor ajuste de los dos obtenidos es el del perfil logarítmico con los parámetros antes expresados.

## 2.4 Flujo en terreno complejo

### 2.4.1 Introducción

Los estudios experimentales realizados sobre topografías complejas tienden a comenzar con casos idealizados, como por ejemplo la interacción entre dos colinas de diferentes tamaños o el campo local de velocidades de viento que se produce cuando una capa límite atraviesa una serie de colinas sinusoidales. Estas geometrías presentan la ventaja de poder ser modificadas para estudiar los diversos factores que pueden actuar, tales como distancias entre accidentes, efecto de la pendiente, rugosidad del suelo, etc. Por otro lado, estos estudios tienden a considerar que no existe interacción entre diferentes planos longitudinales y, por ello, en muchas ocasiones se recurre a estudios bidimensionales: Es decir, se analiza el efecto que una elevación contenida en un único plano vertical produce sobre el flujo de viento contenido en dicho plano.

Otros estudios realizan análisis de lo sucedido sobre topografías reales no idealizadas. Algunos de estos estudios, para comprobar la bondad de sus predicciones, cotejan los resultados con datos obtenidos de mediciones a escala real. Existen, también, estudios que comparan las mediciones a escala real, las obtenidas experimentalmente y las predicciones obtenidas mediante métodos numéricos, (BITSUAMLAK, et al. 2004).

El caso más sencillo de topografía compleja es aquél en el que se estudian una serie de colinas de geometría regular. Los estudios realizados en este sentido tienden a utilizar formas sinusoidales. En ellos se describe el efecto de una elevación sobre el campo local de velocidades de viento en otras colinas situadas a sotavento de ésta.

Es conocido que en la cresta de una colina las velocidades medias del viento aumentan. Este fenómeno se debe a la aproximación entre sí de las líneas de corriente. Investigaciones realizadas muestran que, en el caso de una serie de colinas, el campo local de velocidades de viento en la primera de ellas coincide con el que se daría si se tratara de una colina aislada. En las subsiguientes este incremento se ve mitigado por la protección que las anteriores ofrecen (MILLER and DAVENPORT 1998).

Los efectos en la turbulencia también son notables. Si la pendiente de las colinas es suficiente (el valor necesario depende de otros factores como la rugosidad del terreno) aparece el fenómeno de separación en la cara de sotavento, lo que provoca la formación de una estela. En esta situación la distancia existente entre colinas tiene un papel determinante. En el caso de que no sea suficiente, la turbulencia extra producida en la estela alcanzará la siguiente elevación provocando un incremento en los valores obtenidos. El efecto de la rugosidad también es importante: la separación crece acusadamente con la rugosidad. Según los ensayos efectuados por Miller y Davenport (MILLER and DAVENPORT 1998) el efecto de la rugosidad puede elevar el valor de  $\Delta S$  hasta un 30%.

Athanassiadou y Castro (ATHANASSIADOU and CASTRO 2001) realizan un estudio en el que analizan dos series de nueve colinas bidimensionales idénticas, de ecuación:

$$z_s(x) = a_c(1 - \cos(2\pi x / \lambda_c)) \quad (2.20)$$

$\lambda_c$ : longitud de onda 330mm.

$a_c = h_c/2$ .

$h_c$ : altura de la colina.

La diferencia entre ambas series estriba en el parámetro  $h_c$  que se toma.

Este estudio realiza medidas de presión, demostrando así la importancia de la pendiente sobre el campo de presiones. Comparando los resultados obtenidos en las dos pendientes analizadas, se observan sobrepresiones un 36% veces mayores en la cara de barlovento y un 21% en la cresta de la colina en el caso de una pendiente mayor.

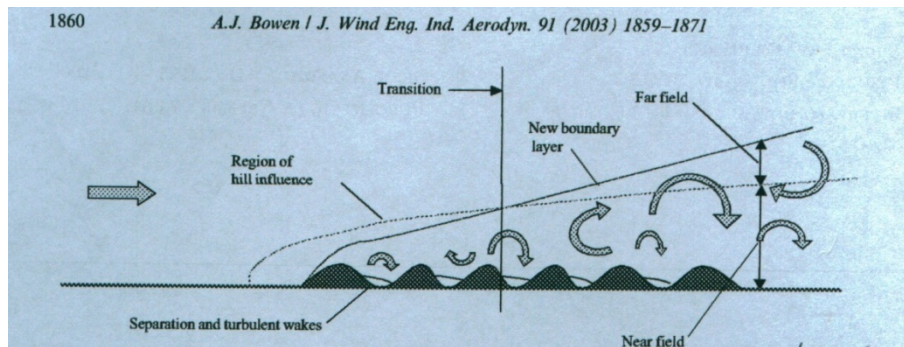
Bitsuamlak et al (BITSUAMLAK, et al. 2004) analizan la influencia de una colina bidimensional sobre las anteriores y posteriores tomando en cuenta sus tamaños relativos. Para ello realizan dos configuraciones diferentes. En la primera sitúa a barlovento una colina pequeña y a sotavento de ésta una de mayor tamaño. En la segunda configuración, la disposición es la inversa, encontrándose el flujo en primer lugar la colina de mayor dimensión. El resultado que obtiene es que los perfiles de velocidad son similares en la cresta de la colina de mayor tamaño para cualquiera de las dos configuraciones, siendo además, semejantes a los esperados en el caso de

que se encontrara aislada. Por el contrario en la colina pequeña el efecto según la configuración sí es apreciable. En esta colina las velocidades son mayores que las obtenidas en el caso de que la colina hubiera estado aislada. En el caso de que la colina de mayor tamaño se encuentre a barlovento el efecto es mayor, pero a sotavento, si está lo suficientemente cercana, su efecto también es apreciable. Este resultado, junto con los anteriormente expuestos de Miller y Davenport (MILLER and DAVENPORT 1998), marca la gran importancia que tiene el tamaño relativo de los accidentes topográficos que estén interactuando.

Por último, Besio et al (BESIO, MAZZINO and RATTO 2003) afirman que es posible considerar que existe un perfil logarítmico de velocidades sobre una serie de colinas sinusoidales si se consideran el parámetro  $U_*$  dependiente de  $x$ .

Como hemos visto, el fenómeno analizado, aún en situaciones simplificadas, es complejo, interviniendo en él multitud de variables diferente. Aún más complejo resulta el campo de viento en una topografía real. El primer problema consiste en analizar si las relaciones en este caso son análogas a las obtenidas para situaciones idealizadas. Existen trabajos (SIERPUTOWSKI, OSTROWSKI and CENEDESE 1995) en los que se comparan mediciones obtenidas en modelos de valles de geometría idealizada con las recogidas en un valle real aunque de geometría sencilla. Los resultados obtenidos demuestran la existencia de una analogía cualitativa entre ambas mediciones.

Por otro lado, los elementos de la topografía que perturban las condiciones del flujo de aire se hacen notar, primeramente en las capas bajas. Su efecto es apreciable en altura conforme nos alejamos de ellos. De esta manera, Bowen (BOWEN 2003) indica la existencia sobre terreno complejo de dos capas, una baja o capa interna y otra a mayor altura. Es la segunda la que viene determinada por las condiciones previas del terreno y la que, por tanto, tiene las características de una C.L.A. en el caso de que hubiera habido un *fetch* suficientemente extenso como para que ésta se desarrollara por completo. La capa baja sin embargo está influenciada por las perturbaciones en el flujo debidas a los cambios locales en las condiciones del nuevo terreno. Entre ambas capas se encuentra una capa de transición de espesor variable en la que se produce una transición suave entre ambas.



**Figura 2.4-1 Regiones de la Capa límite atmosférica (Bowen 2003)**

Cuando un campo local de velocidades de viento alcanza la cima de una colina situada en una topografía real aparecen, al igual que en el caso de colinas aisladas, incrementos de la velocidad. En general la geografía vecina ofrece protección frente a estos incrementos, obteniéndose valores menores que en el caso de una colina aislada. No obstante su previsión apriorística es inviable, dado que los posibles incrementos están notablemente influidos por las características peculiares de los accidentes geográficos precedentes. En el caso de la turbulencia los códigos manifiestan (MILLER and DAVENPORT 1998) una reducción de los valores de  $l_u$  (tanto en sentido longitudinal como transversal) para colinas aisladas. Sin embargo en el caso de la topografía compleja se pueden encontrar incrementos que pueden llegar incluso al 100% de los valores que existirían sin elementos topográficos aledaños (MILLER and DAVENPORT 1998).

En el caso del espectro de turbulencia las previsiones son inabordables dado que un espectro de características universales, en general, no puede encontrarse (TAMPIERI, MAMMARELLA and MAURIZI 2003).

Un factor de importancia en este tipo de estudios es la relación existente entre las alturas de los accidentes geográficos presentes y la de la propia C.L.A. Las características del campo local de velocidades de viento que tienen interés en los estudios suelen ser las situadas en las capas bajas de la atmósfera, casi siempre por debajo de los 100m de altura, que es donde se centran los análisis en ingeniería civil. Debido a esto, en simulaciones en áreas de topografía sencilla, basta con representar adecuadamente la porción más baja de la C.L.A. Si la topografía es de mayor complejidad las elevaciones de los accidentes geográficos pueden superar ese valor, por lo que se hace necesaria la reproducción de una proporción mayor de la C.L.A.



Parte de la complejidad en el estudio del campo local de velocidades de viento en topografías reales estriba, usualmente, en la necesidad de representar grandes áreas de terreno. Esto, obviamente, obliga a reducir la escala a la que se modela la geografía. La reducción geométrica máxima que puede emplearse corresponde a un ratio de 1:5000, que es la escala en la que se ponen de manifiesto dificultades a la hora de conseguir un modelo geométrico adecuado de los diferentes parámetros intervinientes (BOWEN 2003). En este sentido, la ASCE realiza idéntica recomendación.

### 2.4.2 Análisis dimensional

En las ecuaciones que rigen el movimiento de los fluidos se reflejan todas las fuerzas actuantes. Se puede conseguir cierta simplificación en estas ecuaciones si se reemplazan las variables involucradas por otras obtenidas como cocientes entre dos de ellas. Como resultado de esta operación, sustituiremos las variables iniciales por otras que sólo recogen la relación existente entre ellas. Evidentemente, las variables resultantes son adimensionales, en lo sucesivo, nos referiremos a ellas como variables adimensionales.

Si a escala real y de modelo dos variables tienen el mismo valor, entonces la relación entre ellas es la misma y por tanto sus efectos relativos también.

Para realizar la operación anterior, es necesario elegir las magnitudes que vamos a tomar como referencia para el resto. Estas variables de referencia son las siguientes:

- $L_r$ : Longitud de referencia.
- $V_r$ : Velocidad de referencia.
- $t_r$ : Tiempo de referencia.
- $T_r$ : Temperatura de referencia.
- $\Delta T_r$ : Variación de la temperatura de referencia.

Las ecuaciones simplificadas de Navier Stockes en función de las variables adimensionales queda (PLATE 1982):

$$\frac{1}{S_t} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \Delta) \vec{V} = -\Delta p_{ad} + \frac{1}{R_e} \Delta^2 \vec{V} - \frac{1}{R_o} \vec{k} \wedge \vec{V} + \frac{1}{F_r^2} \frac{\Delta T}{T} \vec{k} \quad (2.21)$$

Y, a su vez, la termodinámica (PLATE 1982):

$$\frac{1}{S_t} \frac{\partial \Delta T}{\partial t} + (\vec{V} \Delta) \Delta T = \frac{1}{P_r R_e} \Delta^2 \Delta T + \frac{E_c}{R_e} \phi_E \quad (2.22)$$

En las ecuaciones (2.21) y (2.22) intervienen los números de Rosby ( $R_o$ ), de Froude ( $F_r$ ), de Reynolds ( $R_e$ ), de Eckert ( $E_c$ ), de Prandtl ( $P_r$ ), y de Strouhal ( $S_t$ ) cuyas definiciones e interpretación se exponen un poco más adelante. El resto de variables son las siguientes:

- $\vec{V}$ : Vector velocidad, adimensionalizado con una velocidad de referencia.
- $p_{ad}$ : Presión, adimensionalizada con  $\rho V_r^2$ , donde  $\rho$  es la densidad del fluido.
- $\Delta T$ : Incremento de la temperatura media, adimensionalizada con  $\Delta T_r$ .
- $\vec{k}$ : Vector unitario con dirección vertical y sentido contrario al de la gravedad.
- $\phi_E$ : Energía disipada por unidad de volumen o masa.
- $\Delta$ : Pendiente de la curva de saturación del vapor de agua.

a. Número de Rosby

El número de Rosby mide la importancia de la fuerza de Coriolis. Supone el cociente entre la aceleración debida al gradiente de presiones y la motivada por la rotación de la tierra.

$$R_o = \frac{U_r}{L_r \Omega} \quad (2.23)$$

donde:

$\Omega$ : Velocidad angular de la tierra

Modelar este parámetro entraña una gran dificultad, dado que para ello haría falta hacer rotar el túnel alrededor de un punto alejado de él. La velocidad angular del túnel es cero y el valor de este número en modelo siempre va a ser infinito.

Las consecuencias de la inexactitud entre los valores reales y a escala radican en la ausencia total del efecto de Coriolis, lo que físicamente se traduce en la inexistencia de la espiral de Ekman. Como comentamos en la sección 2.3.1 para los estudios a poca altura su efecto no es de importancia.

b. Número de Froude

En la atmósfera existe una gradación de temperaturas provocada por la radiación solar que implica una gradación de densidades que, a su vez, induce una serie de movimientos en el fluido.

La importancia de los factores térmicos sobre el flujo depende de su peso específico comparado con el resto de los factores. Es usual comparar su efecto con el efecto cinético dependiente de la velocidad del viento. Este número es de gran importancia en estudios de análisis de dispersión de contaminantes. Para su cuantificación, en la literatura, se han propuesto los números de Richardson y Froude que, como veremos, son equivalentes. La expresión del número de Froude es:

$$Fr = \frac{V_r}{\sqrt{g' L_r}} \quad (2.24)$$

donde

$$g' = \frac{\Delta T_r}{T_r} g \quad (2.25)$$

$g$  : Constante gravitacional

El Número de Richardson se define como:

$$R_i = \frac{\Delta T_r L_r g}{T_r U_r^2} \quad (2.26)$$

Ambos están relacionados mediante:

$$R_i = \frac{1}{F_r^2} \quad (2.27)$$

Como ya hemos visto existen referencias (COOK 1973) que demuestran que los efectos de la temperatura pueden despreciarse para velocidades de viento  $\bar{U}(10) \geq 10m/s$ . ROM (ROM 04.95) propone un valor frontera más conservador,  $\bar{U}(10) = 15m/s$ . Sin embargo, según Bowen (BOWEN 2003), en el caso de flujos sobre topografía compleja es normal que exista una importante radiación solar sobre las laderas expuestas, por lo que pueden aparecer fuertes inestabilidades locales, incluso en presencia de vientos fuertes. Por otro lado este mismo autor remarca posteriormente que en el caso de topografías con alturas superiores a los 100m, en las que exista una velocidad de viento importante, las perturbaciones en el flujo por las condiciones superficiales son importantes, la turbulencia mecánica puede considerarse mayor que la térmica y por tanto puede despreciarse esta última.

La modelización de los efectos térmicos sobre el campo de viento queda fuera del alcance de este estudio. Las velocidades de viento que se simularan, en cualquier caso estarán próximos o superarán los límites marcados en este apartado. En los casos locales con velocidades menores se abre, por tanto, el campo a una futura investigación sobre los efectos térmicos.

### c. Número de Reynolds

En los estudios realizados en el interior de un túnel es habitual escalar geoméricamente el terreno sobre el que se está llevando a cabo el estudio. Sin embargo, la viscosidad no puede ser escalada sin cambiar el propio fluido. Esto provoca que los efectos viscosos tengan una mayor importancia en el modelo que a escala real en la naturaleza.

La relación entre las fuerzas de viscosidad y las inerciales del flujo se mide con el número de Reynolds.

$$R_e = \frac{U_r L_r}{\nu} \quad (2.28)$$

Donde:

$\nu$ : Viscosidad cinemática

Según el valor que adquiera el número de Reynolds el flujo puede tener características de flujo laminar, turbulento o de transición entre ambas.

El flujo que se va a dar en el cauce del río Guadalfeo va a ser turbulento. Es fundamental que en el modelo se mantenga esta característica. Según Bowen (BOWEN 2003) ésta se mantiene siempre que:

$$Re^* = \frac{U_* z_o}{\nu} > 5 \quad (2.29)$$

El valor de la viscosidad cinemática del aire, a las temperaturas consideradas es:

$$\nu = 1E-5 \text{ m}^2/\text{s}$$

Lo que unido al valor de las constantes  $U_*$  y  $Z_o$  obtenidas en el apartado 2.3.4.2 (ajuste a la ley logarítmica) que obtuvimos:

$$U_* = 0.4195 \text{ m/s}$$

$$z_o = 0.0002478 \text{ m}$$

Lo que arroja un  $Re^* = 10.4$ . Este valor garantiza que el régimen de turbulencia se mantiene en el modelo.

Donde se pueden plantear problemas van a ser en los flujos locales que se produzcan en determinadas áreas. Cuando el flujo se ralentice el peso de las fuerzas viscosas variará su relación con el de las dinámicas, provocando así que las características turbulentas deseadas puedan desaparecer.

d. Número de Eckert:

$$E_c = \frac{\rho V_r^2}{c_p \Delta T_r} \quad (2.30)$$

Donde

$C_p$ : Calor específico del aire

El número de Eckert relaciona la energía cinética con la entalpía, parámetro sin efecto sobre esta simulación.

e. Número de Prandtl:

$$P_r = \frac{\rho V c_p}{k_t} \quad (2.31)$$

$k_t$ : conductividad térmica del aire

Debido al valor de  $k_t$  es baja influencia cuando el fluido es el aire.

f. Número de Strouhal:

$$S_t = \frac{V_r}{L_r \cdot t_r} \quad (2.32)$$

El número de Strouhal es importante en el caso de que la emisión de vórtices impusiera fuerzas significativas sobre la estructura analizada. Dado que esta es una colina sobradamente estable su análisis tampoco es relevante.

### 2.4.3 Modelización realizada

Conseguido el patrón de vientos en el punto de la desembocadura queda reproducir el desarrollo del mismo a lo largo de la cuenca hasta alcanzar el embalse. Para ello se hace necesario disponer de un modelo a escala reducida de la topografía del río Guadalfeo, en la que el flujo se desarrolla.

Recordando los datos geográficos más relevantes de la zona que nos ocupa, tenemos que la distancia horizontal desde la desembocadura del río Guadalfeo hasta el embalse de Rules es de unos 15 kilómetros. La dirección que marcan estos dos accidentes es N 28°O. En esta dirección el propio embalse suma otros 5 kilómetros. De cara a asegurar que las condiciones de contorno de la maqueta no influyan en el campo local de velocidades de viento sobre el embalse es necesario dejar una distancia de otros 2 kilómetros libres antes de que ésta finalice. Esto arroja una distancia total de 22 kilómetros.

Además de la zona de interés, el modelo debe contener un área que permita asegurar que las paredes del propio túnel no interfieren en el flujo existente en la zona estudiada. Analizando la geometría se consideró que el ancho que debía quedar representado sería de unos 6km.

Como ya se ha expuesto en la sección 2.4.1 la escala geométrica a utilizar no debe de ser superior a 1:5000. Con estas tres premisas en mente se decidió utilizar una escala geométrica de 1:3000. De esta forma se representa una superficie de 24 kilómetros por 6.420 metros en una superficie en túnel de 8m x 2.14m, superficie que cubre todos los requerimientos anteriores y respeta las limitaciones impuestas por la escala.

El material escogido para la realización de la topografía del cauce fue planchas de poliestireno expandido. Este material presenta la ventaja de poder ser cortado con facilidad, siendo susceptible de ser laminado en planchas de pequeño espesor. Como la menor altura representable en el modelo coincide con el espesor de las planchas, para lograr la mayor precisión en altura posible, se buscaron planchas de pequeño espesor. La dimensión escogida fue de 4.5mm, lo que, aplicada la escala, arroja una precisión en altura de 13.5m. La superficie de las planchas es de 2.15m x 1m.

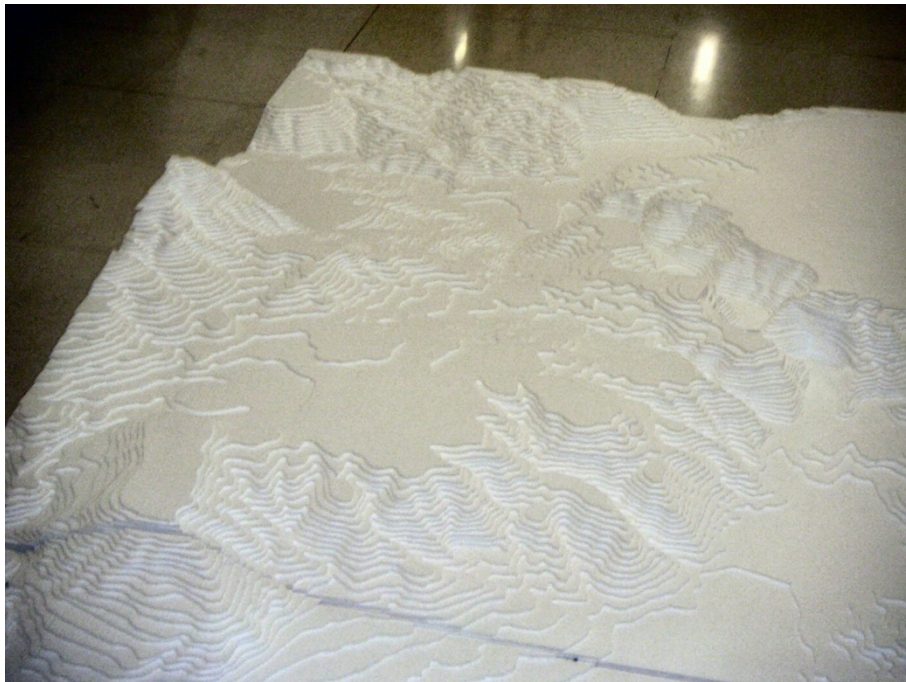
El proceso de corte y de pegado de las planchas es el que determina la precisión en horizontal. Para lograr la mayor posible se construyó en las instalaciones del CEAMA una máquina que cortaba las planchas de poliestireno, utilizando datos contenidos en archivos topográficos, de manera automatizada.

El sistema consiste en dos pares de raíles, uno con movimiento en horizontal y otro, solidario al primero, con movimiento en vertical. De esta manera se logra un sistema capaz de moverse en dos dimensiones. Cada uno de estos pares estaba accionado por un servomotor. Sujeto entre los dos raíles verticales existe un hilo de Niquel-Cromo que es calentado mediante la aplicación de corriente eléctrica. El hilo caliente, al contacto con la plancha de poliestireno, va cortándola de manera suave. Este sistema está rigidizado mediante una estructura metálica que, además, sirve de sujeción a las planchas de poliestireno.

El giro de los servomotores, que es el que marca el movimiento del hilo caliente y, por tanto, el perfil de corte, está dirigido por una controladora que recibe la señal de un ordenador. La señal del ordenador, a su vez, está gobernada por un programa informático capaz de leer archivos de CAD.

El error máximo en el proceso de corte depende de la propia precisión de los servomotores, que son los que accionan el sistema de corte. El error angular máximo de  $100/32000$  supone 0.40mm de error lineal. Las planchas de poliestireno son finalmente pegadas manualmente para formar la topografía. A su vez, el error en el proceso de pegado se deriva de la propia precisión que se logre en la adecuada colocación manual de las piezas. La estimación de éste es de 2mm. La composición cuadrada de ambos arroja un error total de 2.04mm.

Además de la geometría de la topografía existen en la maqueta dos accidentes más que deben ser modelados. Estos son la presa de Rules y la lámina de agua creada con ella.



**Figura 2.4-2 Modelo topográfico durante su construcción**

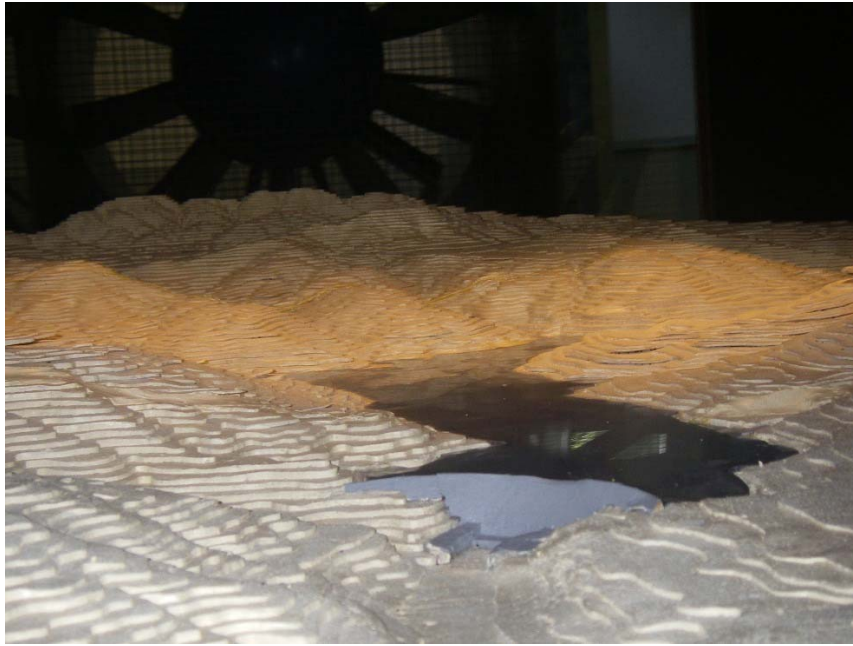
La presa de Rules también ha sido modelada con poliestireno expandido.



La lámina de agua se realizó con una plancha de 5mm de metacrilato. Este material puede ser perforado sin problemas de rotura, por lo que es adecuada para realizar un estudio de presiones. La superficie total de embalse es de 345Ha, por tanto la plancha de metacrilato utilizada ocupa  $0.38\text{m}^2$ .

Como hemos señalado, el resultado final es un modelo de 8 metros de largo por 2.14 metros de ancho, lo que representa una superficie en planta de  $17.12\text{m}^2$ , que a escala real representa  $154.08\text{Km}^2$ . Las cotas de nivel están realizadas cada 4.5 milímetros, es decir 13.5 metros a escala real. La cota máxima representada es de 1120m, mientras que la mínima se encuentra a nivel del mar.

El embalse puede ser analizado para diferentes grados de llenado sin más que colocar sobre el modelo la plancha de metacrilato que simule la superficie libre a la cota deseada. Aunque debido al espesor de las planchas de poliestireno las posibilidades son discretas. La cota máxima de llenado corresponde a 243m sobre el nivel del mar. La discretización de nuestro modelo, con cotas tomadas cada 13.5 m desde el nivel del mar, permite adquirir con exactitud dicho valor ( $243/13.5=18$  alturas). La maqueta permite, cambiando la plancha que simula la superficie libre de agua, simular otras alturas: además de esta altura se pueden realizar mediciones con otras planchas que simulen la superficie libre a diferentes cotas.

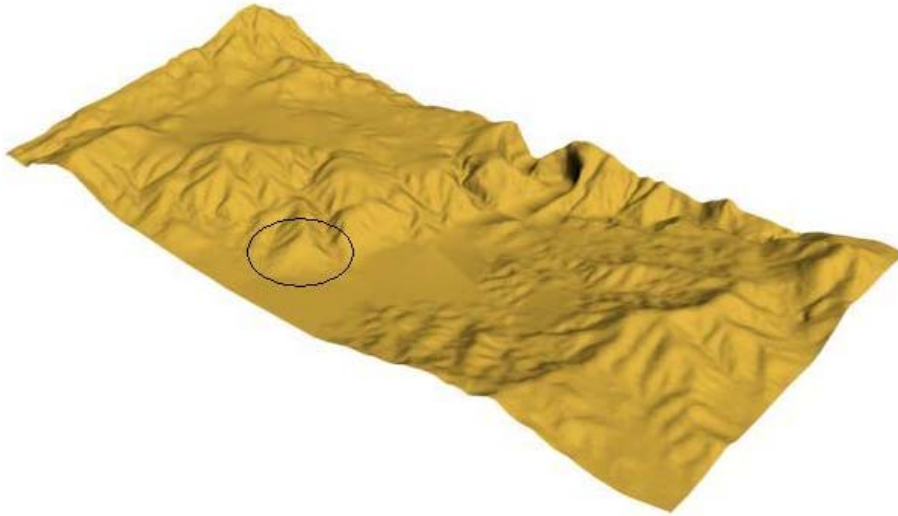


**Figura 2.4-3 Modelo (escala 1/3000) con lámina de agua.**

#### **2.4.4 Mediciones sobre el modelo**

Para analizar las modificaciones que sufre el campo de viento cuando una capa límite desarrollada se enfrenta a un accidente geográfico real se han realizado mediciones en una colina ubicada en la margen Este del cauce del río Guadalfeo. Se ha elegido la que se encuentra más cercana a la desembocadura.

Con el fin de observar como el viento se va modificando a medida que va superando el obstáculo, se han realizado mediciones en cuatro puntos: El primero está localizado en la desembocadura del río, con el fin de tener los datos de una capa límite completamente desarrollada que sirvan como elemento de comparación. Los tres restantes se sitúan en la falda de barlovento de la colina, a media altura, y en la cima de misma.

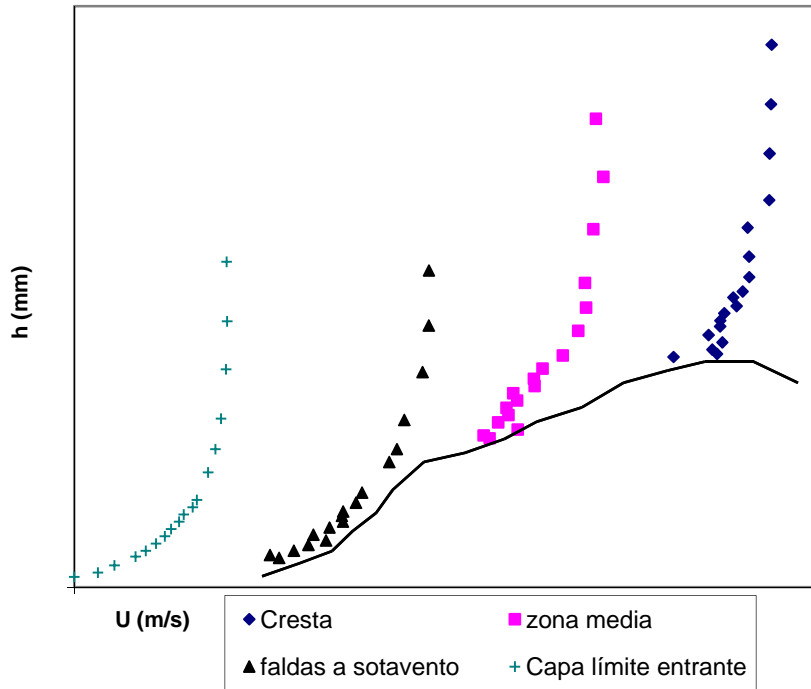


**Figura 2.4-4 Situación de la colina**

Los ensayos realizados tienen una adquisición de datos a una frecuencia idéntica a los destinados a encontrar la capa límite, es decir 4000Hz. Sin embargo, el tiempo de muestreo es menor, bajándose a 10 segundos.

El anemómetro, para sortear las dificultades que se derivan de la topografía del modelo se inclina 14 grados con respecto a la horizontal. De esta manera los datos obtenidos deben descomponerse para obtener la velocidad horizontal.

En las figuras 2.4-5 y 2.4-6 se muestra respectivamente los datos de velocidad de viento y de intensidades de turbulencia obtenidas. En la figura 2.4-5 se representa, de modo esquemático, la colina estudiada y, superpuesto a cada punto de estudio, el correspondiente mapa de velocidades. En cambio, en la figura 2.4-6 se han representado los cuatro mapas de intensidades de turbulencias en el mismo par de ejes.



**Figura 2.4-5 Desarrollo del campo de velocidades de viento al enfrentarse a una topografía real; colina analizada**

En la figura 2.4-5 se puede observar la diferencia cualitativa entre la capa límite entrante y las que se encuentran conforme el flujo va adentrándose en la colina. El análisis cuantitativo de las velocidades se recoge en las siguientes tablas, donde la tercera columna recoge las relaciones entre las velocidades observadas en el punto de que se trate  $\bar{U}(z)$  y las correspondientes de la capa límite, que denominamos  $\bar{U}_o(z)$ , obsérvese como la mayoría de estos cocientes supera la unidad, sobretodo en la cresta, corroborando la teoría según la cual la velocidad debería aumentar en este punto:

Cresta		
$z$	$\bar{U}(z)$	$\frac{\bar{U}(z)}{\bar{U}_o(z)}$
10	4.661	1.19
15	5.413	1.28
20	5.609	1.21
25	5.342	1.10
31	5.567	1.10
35	5.569	1.07
40	5.647	1.06
45	5.887	1.07
51	5.821	1.04
55	6.005	1.04
79	6.13	1.01
99	6.101	0.98
118	6.522	1.03
150	6.53	1.02
184	6.557	1.02
225	6.57	1.02

**Tabla 2.4-1 Comparación velocidades en cresta / velocidades en capa límite generada**

El mismo análisis, con respecto a los datos tomados a media altura ofrecen el siguiente resultado:

<b>A media ladera</b>		
$z$	$\bar{U}(z)$	$\bar{U}(z) / \bar{U}_o(z)$
10	4.464	1.14
14	5.128	1.21
19	4.747	1.02
24	4.946	1.02
29	4.908	0.97
34	5.117	0.98
39	5.04	0.94
44	5.456	0.99
49	5.442	0.98
56	5.611	0.97
82	6.305	1.04
98	6.458	1.04
115	6.435	1.02
152	6.599	1.03
188	6.794	1.06
228	6.649	1.04

**Tabla 2.4-2 Comparación velocidades a media altura / velocidades en capa límite generada**

<b>Faldas a barlovento</b>		
$z$	$\bar{U}(z)$	$\bar{U}(z) / \bar{U}_o(z)$
20	3.987	0.86
25	4.274	0.88
29	4.557	0.90
36	4.653	0.89
41	4.967	0.93
45	5.228	0.95
49	5.207	0.93
95	6.278	1.01
115	6.422	1.02
148	6.778	1.06
180	6.899	1.07
218	6.901	1.08

**Tabla 2.4-3 Comparación velocidades en la falda / velocidades en capa límite generada**

En cuanto a intensidades de turbulencia, en el gráfico de la figura 2.4-6 se observan descensos de los valores de las intensidades de turbulencia en las

faldas de la colina, este resultado es acorde con los obtenidos por diferentes autores, (HOLMES 2001), (ISHIHARA, HIBI and OIKAWA 1999)

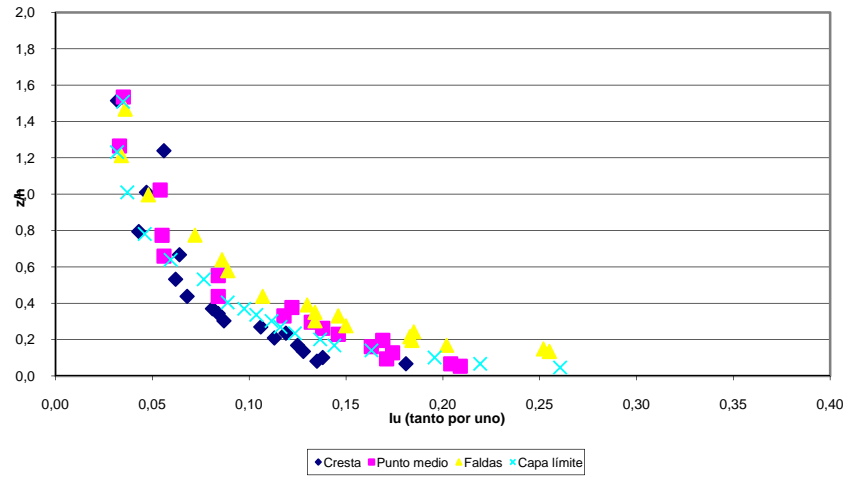


Figura 2.4-6 Intensidades de turbulencia en la colina

## 2.5 Mediciones a escala real

Como se explicó en el apartado 2.2.1 el estudio del fenómeno que estamos observando con mediciones a escala real es inviable tanto técnica como económicamente. Sin embargo esta línea de trabajo puede revestir utilidad de cara a realizar una validación de los resultados que se han obtenido en el túnel de viento de capa límite del CEAMA, al menos en lo que se refiere a los datos a nivel de superficie.

Con este enfoque se decide situar a lo largo de la cuenca del río Guadalfeo diferentes instrumentos de medida que recojan los valores de velocidad de viento reales que se están produciendo.

### 2.5.1 Objetivos

Únicamente se disponía de cinco anemómetros susceptibles de ser instalados al aire libre, sus ubicaciones se decidieron en dos fases. En una primera aproximación se seleccionaron aquellas áreas de mayor interés para su instalación, donde se decidió:

- Ubicación 1 (U1).- El modelo construido comienza en la desembocadura del río Guadalfeo. En este punto la capa límite generada deberá ser lo más similar posible a la capa límite atmosférica real. Por lo tanto es de gran interés ubicar un primer anemómetro en el punto en que el río vierte sus aguas, que puede ser utilizado para observar las características del viento que entra en el cauce.
- Ubicación 2 (U2).- La topografía por la que discurre el río Guadalfeo en la zona de estudio se caracteriza por la presencia de un valle de pendientes elevadas en una zona no demasiado lejana de la desembocadura. Se prevé que en dicha zona las características del aire adquieran una mayor complejidad. Por ello se decidió que la segunda zona de interés fuera la inmediatamente anterior a dicho accidente.



- Ubicación 3 (U3).- Siguiendo aguas arriba, el valle del Guadalfeo se encuentra flanqueado por dos elevaciones próximas. En el margen Este se encuentra el pico de Escalate (654m de altitud) y en el Oeste dos picos de menor altura (350m y 380m). Se plantea la posibilidad de ubicar un tercer instrumento de medida en uno de los dos picos del margen Oeste. Con él se podrá estudiar la velocidad del viento en lo alto de una elevación, accidente sobre el que hay gran cantidad de literatura.
- Ubicación 4 (U4).- Se elije como cuarta zona la inmediatamente anterior a la presa de Rules. Los datos de esta ubicación servirán para validar el correcto modelado del valle y por tanto, asegurar que el flujo que llega al embalse es equiparable al real.
- Ubicación 5 (U5).- Debe de estar en las inmediaciones del embalse con el fin de poder comprobar la correcta simulación de los vientos en la zona de mayor interés del estudio.

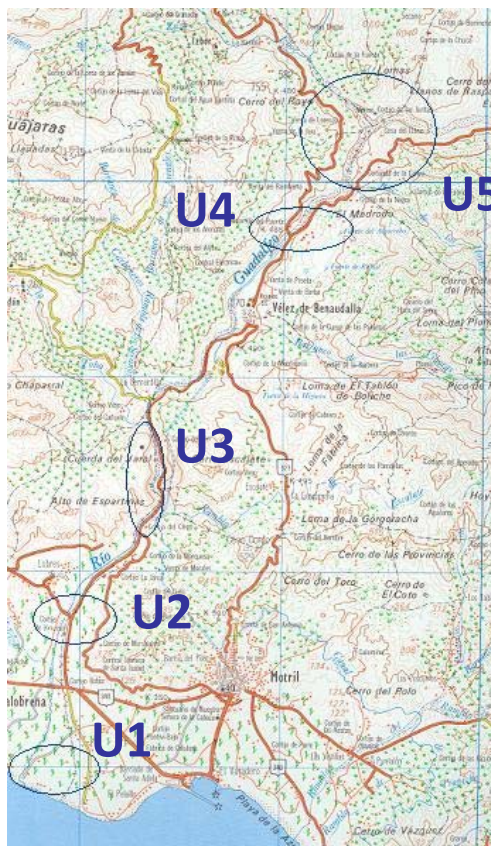


Figura 2.5-1 Ubicaciones de los anemómetros



**Figura 2.5-2 Ubicación de Anemómetro 1**

Una vez elegidas las zonas de ubicación de los aparatos, se realizaron diferentes salidas a campo para buscar los lugares concretos en los que disponer los anemómetros. Para la selección de los lugares concretos, el objetivo primordial era encontrar lugares despejados de edificaciones que pudieran modificar la circulación natural del viento. En este sentido, se dio preferencia a aquellas ubicaciones que permitiesen colocar el anemómetro a cierta altura. Otra característica deseable de las ubicaciones era el encontrarse en un área con algún tipo de vigilancia que evitase posibles actos vandálicos en el equipamiento.

Para la Ubicación 1 (U1) se logró la colaboración de un negocio local de Salobreña situado a escasos metros de la desembocadura del río. La idoneidad de éste se debe tanto a su situación, como al hecho de que tiene ubicado un foco en un poste de unos 10 metros de altura que existe para la iluminación nocturna del negocio.

La zona U2 se caracteriza por la presencia de vegetación y edificios de baja altura. Con el fin de eliminar las interferencias de esos elementos se dispone el anemómetro en la cornisa de un edificio perteneciente a Azucarera Montero S.A., cuya altura y situación le alejan de cualquier obstáculo para la dirección de viento que será estudiada.



**Figura 2.5-3 Edificio de ubicación de Anemómetro 2**

El anemómetro que se ubica en U3 está situado en una colina del margen Oeste del Río Guadalfeo. Ni ésta, ni Escalate (pico del margen Este) son accesibles con automóvil.

El anemómetro correspondiente al área U4 se ubica en un poste perteneciente a la Cuenca Mediterránea Andaluza, cercano a la presa de Rules. Al igual que en U1 y U2 al pertenecer la posición a una propiedad privada la integridad del aparato correrá un menor riesgo.

En el momento de comenzar el estudio, las obras de la futura autovía Granada-Motril se estaban desarrollando en la zona U5. Contactos establecidos con la dirección de obra lograron que se obtuviera el permiso necesario para disponer de un instrumento en la zona de obras.

### **2.5.2 Datos obtenidos**

La instrumentación utilizada consiste en anemómetros de cazoletas con una veleta direccional. Mediante un *datalogger* son capaces de enviar datos de velocidad y de dirección de viento vía conexión telefónica. Cada uno de estos aparatos tiene incorporado una tarjeta de red, de esta manera los datos pueden ser recogidos periódicamente desde las instalaciones del CEAMA sin necesidad de realizar visitas a campo, lo que es conveniente dada la situación de los anemómetros.



**Figura 2.5-4 Anemómetro en U1**



**Figura 2.5-5 Anemómetro en U2**

De esta manera acabamos situando cinco anemómetros con sistema de envío automatizado de los datos recibidos. El envío, realizado con periodicidad semanal, permite tratar los datos a distancia.

Sin embargo, dos de los cinco anemómetros planteados, sufrieron, durante el periodo de mediciones, rotura parcial o total del sistema, lo que impidió componer una serie temporal suficientemente larga como para su presentación en este documento. Los anemómetros malogrados son los situados en las ubicaciones 1 y 4. Presentamos, por tanto, los resultados obtenidos por los anemómetros 2,3 y 5.

Se incluyen los datos de un año hidrológico completo, el correspondiente al periodo comprendido entre Octubre de 2007 y Septiembre de 2008. Los datos se presentan bajo la forma de rosa de viento, con las frecuencias acumuladas para intervalos de 22.5º.

En estas representaciones se muestra, además, la frecuencia acumulada de cada una de las velocidades medidas. Los resultados son los siguientes:

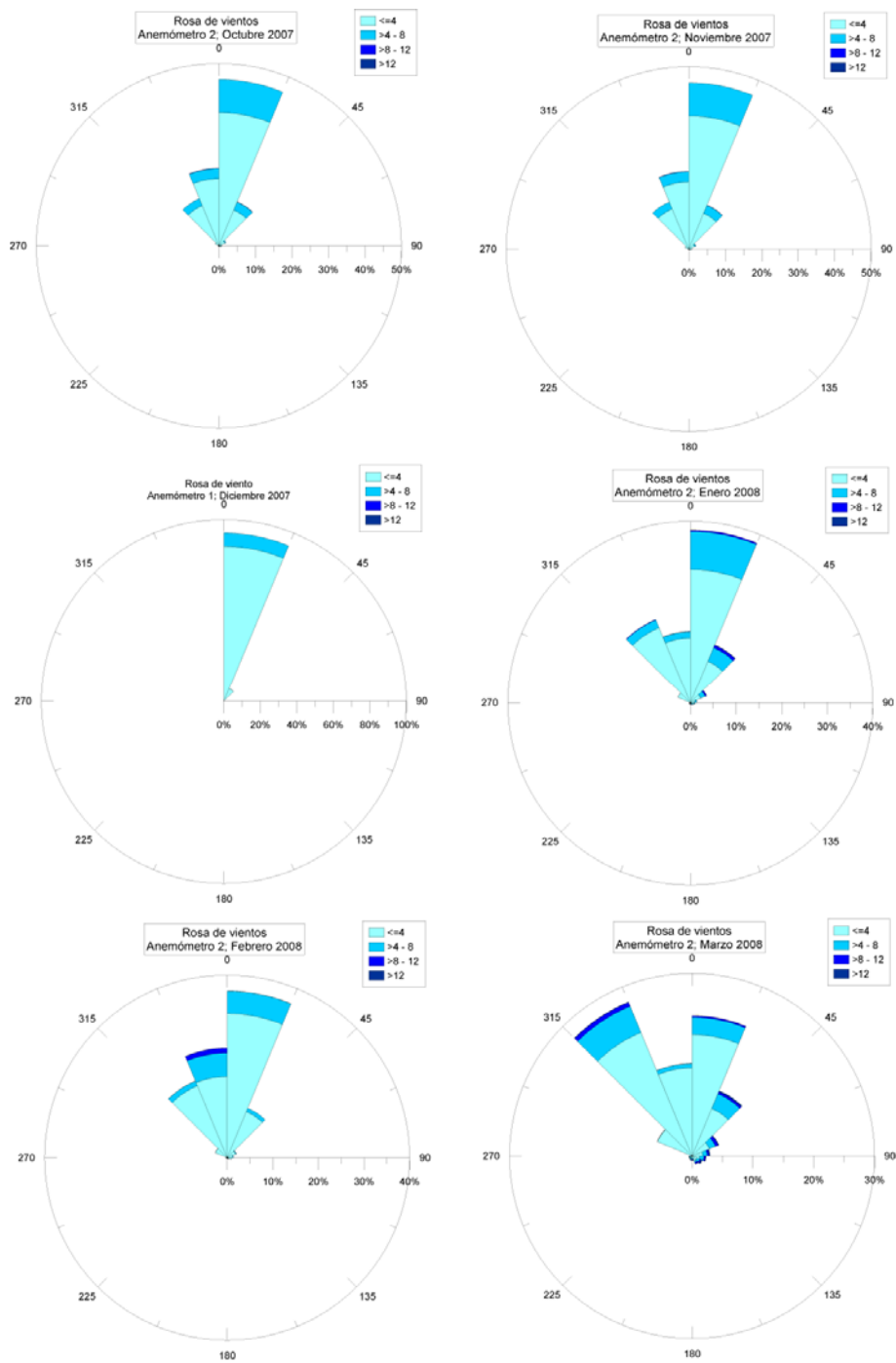


Figura 2.5-6 Rosa de viento; Anemómetro 2 (I)

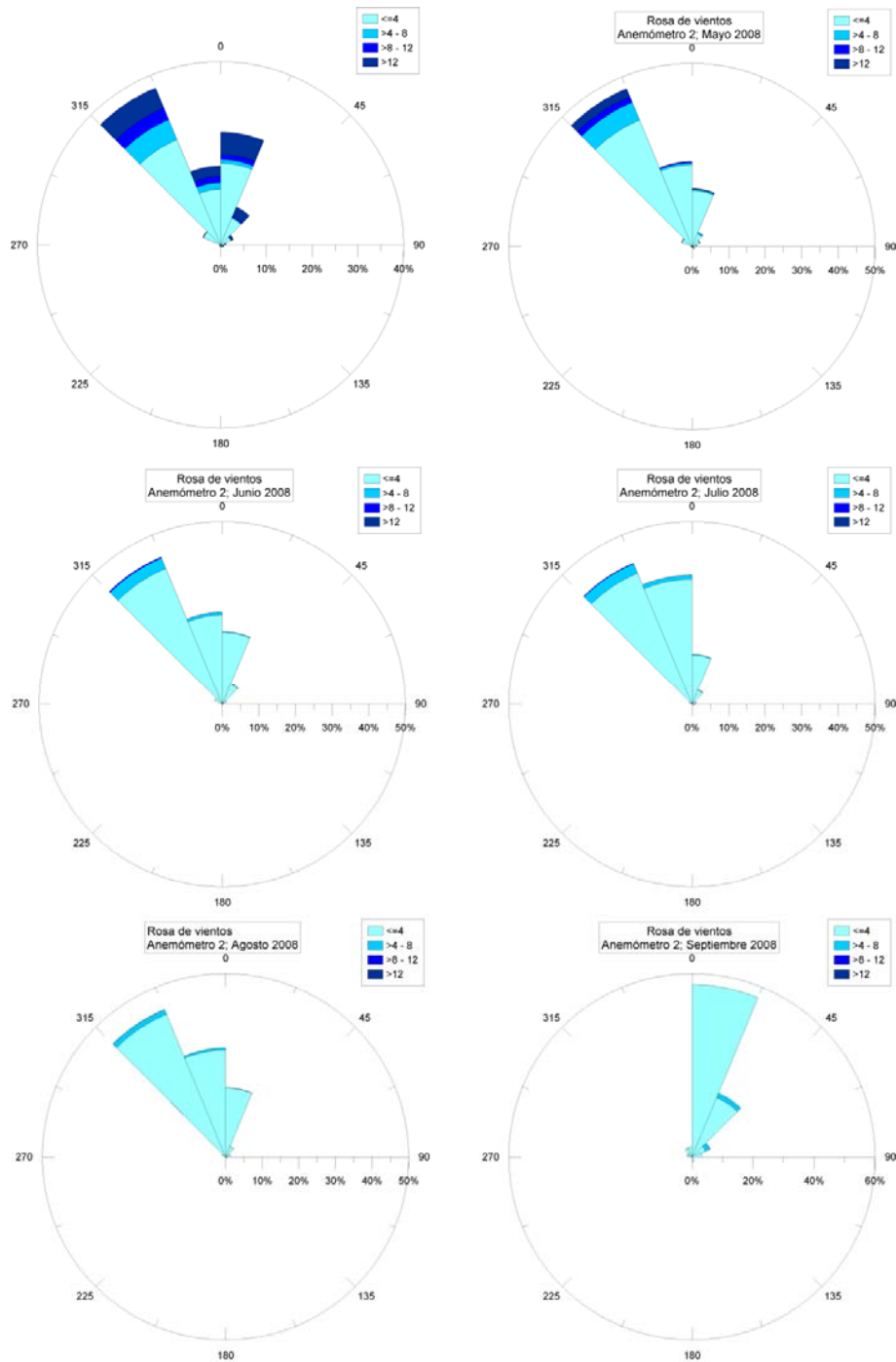


Figura 2.5-7 Rosa de viento; Anemómetro 2 (II)

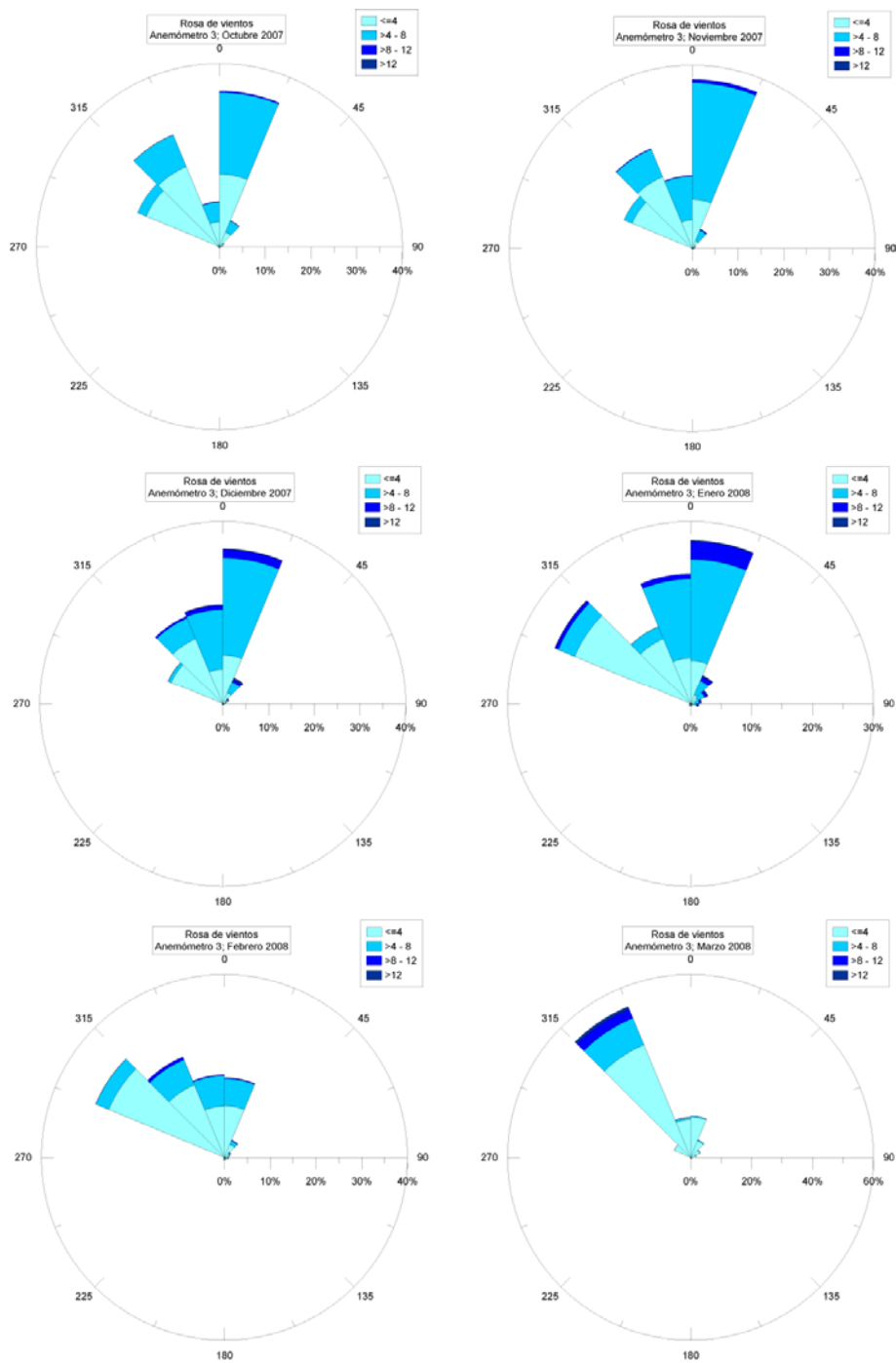


Figura 2.5-8 Rosa de viento; Anemómetro 3 (I)



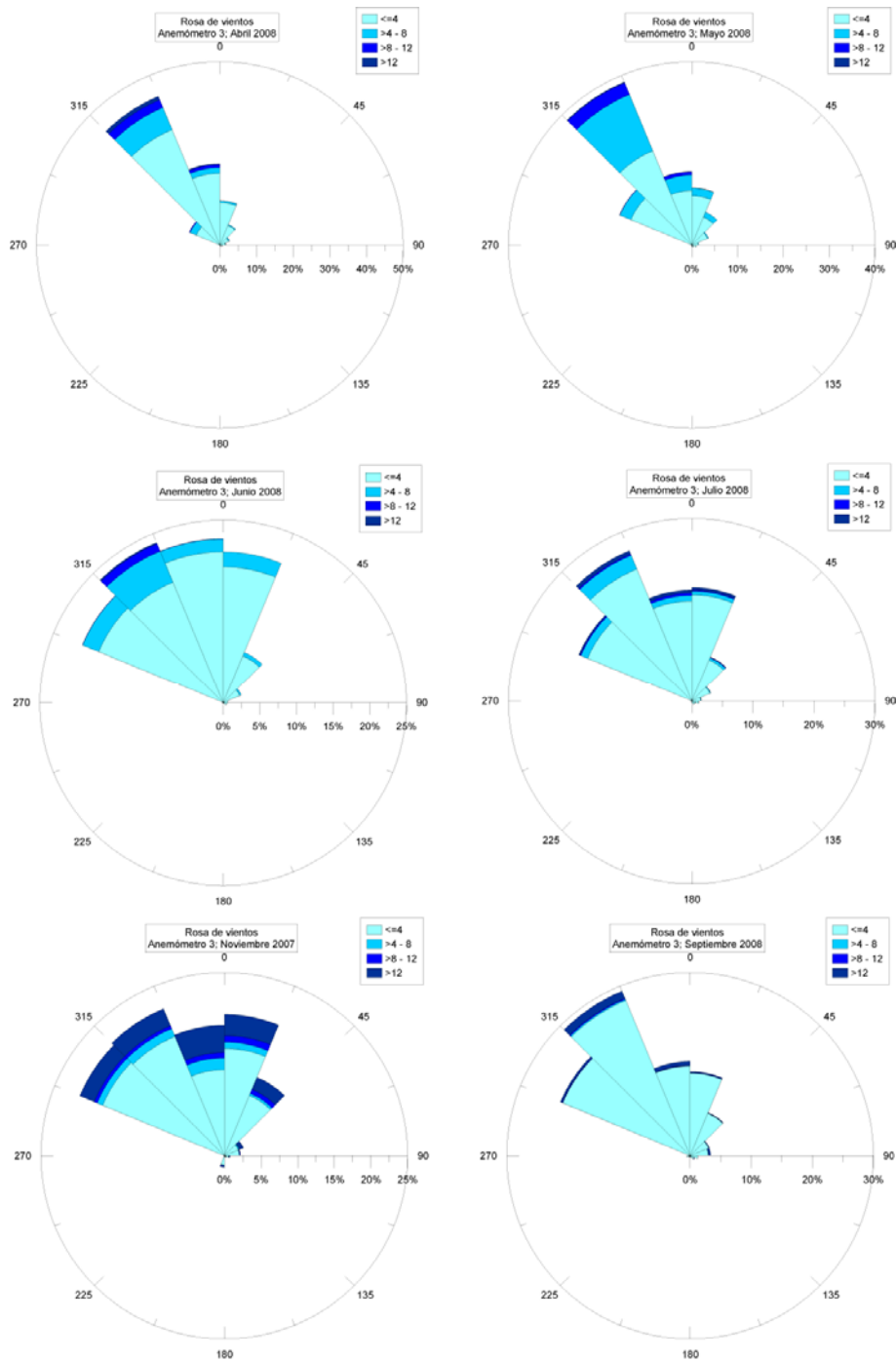


Figura 2.5-9 Rosa de viento; Anemómetro 3 (II)

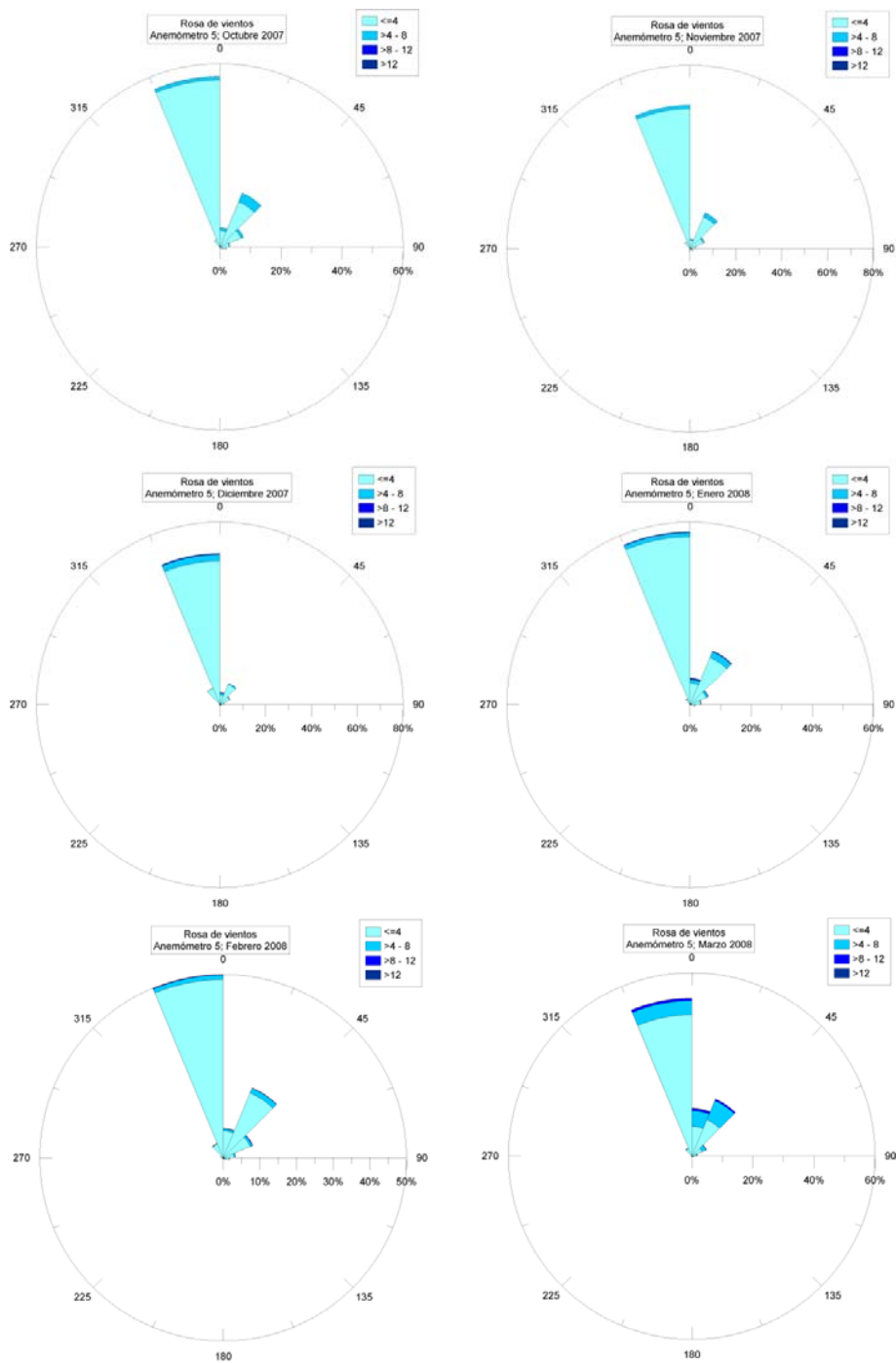


Figura 2.5-10 Rosa de viento; Anemómetro 5 (I)

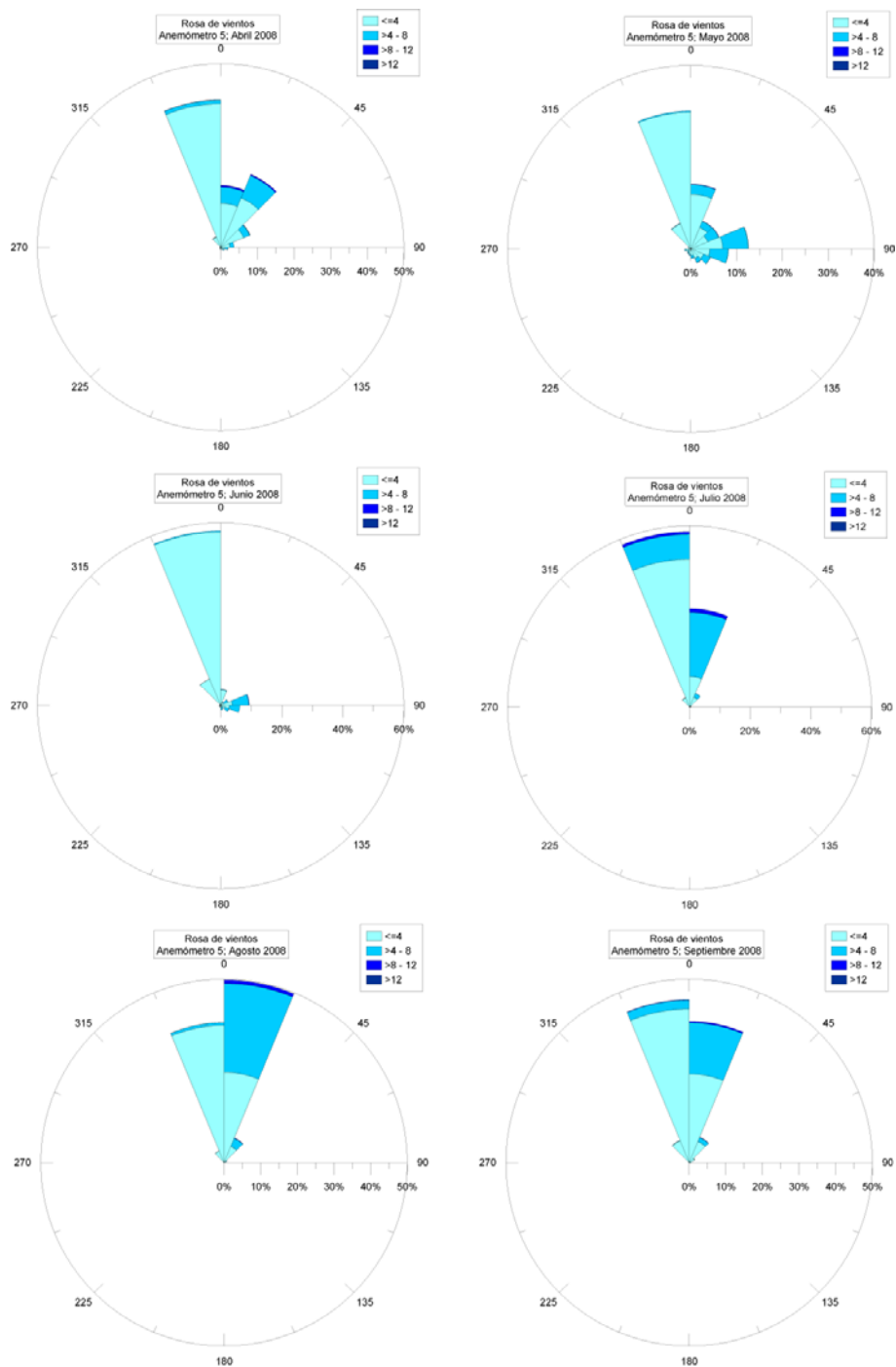


Figura 2.5-11 Rosa de viento; Anemómetro 5 (II)

Es interesante observar el comportamiento de los perfiles. Observamos, en los datos del anemómetro 2, como en todos los meses el viento entra en

una dirección proveniente del mar. Excepto en los meses de verano, esta dirección tiende a llevar la componente del cauce del río en un porcentaje elevado de casos.

Los datos obtenidos muestran que en la posición del anemómetro 3, sin embargo, la dirección del viento ya se ha modificado sensiblemente como resultado de la interacción del flujo con los accidentes precedentes. Así mismo, podemos observar como las velocidades de viento han aumentado como resultado de las previsible aceleraciones que se producen en un accidente topográfico de la tipología de una colina.

Por último tenemos el perfil de velocidades en las proximidades del embalse de Rules. La rosa obtenida es el resultado del fuerte encajonamiento del cauce, que condiciona que se reduzca la libertad del fluido a la hora de moverse en determinadas direcciones, lo que, a su vez, obliga a que el viento siga, en casi todos los casos una única dirección. Por ello, la rosa del viento del último anemómetro abarca un arco menor de 45°.

## 2.6 Conclusiones

Los resultados obtenidos en términos de generación de capa límite son, en términos generales, adecuados. El perfil de velocidades logrado se aproxima notablemente al proporcionado por la norma ESDU (ESDU 82026) para una  $z_0$  de 0.01m.

Sin embargo la modelización realizada adolece de algunos defectos. En cuanto a altura de capa límite se ha obtenido 125mm, que suponen a escala real 375m. Este valor es superior al sugerido por la ROM (ROM 04.95 1995), que en las condiciones consideradas es de 200m. En términos de intensidades de turbulencia los datos recogidos no coinciden completamente con los esperados. Esto se manifiesta sobretodo en las capas bajas.

Estas dos comparaciones (altura de capa límite y perfil de intensidades de turbulencia) son indicativas de que el sistema de generación no es perfecto, apuntan a que la rugosidad empleada es, todavía, excesiva.

En las mediciones realizadas en el modelo, en la primera colina, se observan aceleraciones acordes con las previstas para la cima. Sin embargo cabe la posibilidad de que esto no sea un defecto del modelo porque esta diferencia puede venir motivada por el cambio en las condiciones de rugosidad de suelo.

En términos de intensidades de turbulencia se han encontrado descensos de los valores en la cima comparados con los obtenidos en la base. En las faldas de la colina los valores obtenidos son superiores a los de la intensidad de turbulencia en la capa límite. Esto parece estar de acuerdo con los resultados publicados en la literatura consultada (HOLMES 2001), (ISHIHARA, HIBI and OIKAWA 1999).

## 2.7 Futuras líneas de trabajo

El trabajo presentado deja abiertas varias posibilidades de cara a la realización de futuras investigaciones ya que en los estudios de campo de viento en topografía compleja queda aún un amplio campo sobre el que trabajar.

Disponer de una topografía compleja a una escala que permite trabajar sobre ella puede ser la base sobre la que sustentar trabajos orientados a comprender la modificación del flujo de viento cuando se encuentra con diferentes obstáculos. Siendo el abanico abierto muy amplio podría ser interesante realizar un estudio de las velocidades de viento observadas en todas las cimas que la topografía presenta y analizar si los incrementos son semejantes, si dependen de la altura de la colina, del resto de sus dimensiones, de su situación con respecto a las demás... etc. Dado que, probablemente, todos estos fenómenos intervendrán, su análisis podría dar lugar a una parametrización de las aceleraciones observadas conforme a la geometría y situación de cada accidente.

Este mismo estudio se puede realizar sobre el resto de los accidentes que la topografía presenta: perfiles a media altura, velocidades de viento en zonas encañonadas, diferencias entre los perfiles a sotavento y a barlovento... etc.

Como se ha expuesto, en este estudio no se ha analizado el efecto local que los gradientes de temperaturas puedan tener sobre el flujo de viento. Se hace interesante, por tanto, estudiar los perfiles de velocidad en dichas zonas para tratar, así, de caracterizar la influencia de la radiación local solar.

Sería de gran valor, por último, mediante los datos obtenidos, obtener algún modelo matemático que permitiera realizar algún avance en términos de predicción de las características del campo de viento en topografía compleja.



## Dinámica de los prototipos bajo viento complejo

---

---

### 3.1 Motivación

Los proyectos que han dado lugar a los dos primeros capítulos de esta tesis han sido planteados de manera independiente. Cada uno de ellos pretende dar respuesta a diferentes preguntas abordando dos campos complementarios de la ingeniería de viento.

El primero resuelve la dinámica de un prototipo de ahuyentapájaros mediante un estudio mixto experimental-numérico. Basándose en las presiones medidas en el túnel de viento sobre las aspas de los dos cuerpos se modelan las fuerzas ejercidas por el flujo sobre el cuerpo. Posteriormente, adoptando algunas simplificaciones, se plantean las ecuaciones dinámicas de los cuerpos, que son resueltas mediante un modelo numérico.

El segundo capítulo de esta memoria plantea la reproducción de las condiciones locales de campo de viento en la cuenca del río Guadalfeo. Para ello comienza por reproducir la capa límite entrante del mar para luego, con un modelo físico a escala, poder medir el campo de viento en cualquier punto de interés.

La complementariedad de ambos capítulos permite plantear el presente capítulo como cierre de la memoria. En él se utilizan los datos obtenidos en ambos para estudiar el comportamiento del ahuyentador de aves cuando se enfrenta a condiciones de viento reales no idealizadas.



Para ello se emplean los datos de viento obtenidos en el modelo topográfico de Guadalfeo como input del modelo numérico de los prototipos. Este flujo deja de ser constante en módulo y dirección, pasando a tener las características típicas del viento en una topografía compleja. Esto obliga a una modificación del modelo numérico empleado, que estaba diseñado para manejar vientos constantes, para poder introducir un viento con velocidad y dirección variable en el tiempo.

Los pasos a seguir para obtener los objetivos expuestos son:

- A) Obtención de datos de velocidad de viento en un punto del modelo topográfico. Estas velocidades, al estar escaladas, deben transformarse para poder ser empleadas como input del modelo numérico.
- B) Modificación del modelo numérico. Debe transformarse para aceptar un viento que pueda cambiar de manera de manera continua de módulo y dirección.
- C) Analizar casos con velocidades de viento cercanas a las empleadas en el capítulo 1 con el fin de poder analizar las semejanzas y diferencias con los resultados que se obtuvieron entonces.

Por último se aborda un apartado final en el que se somete a uno de los dos prototipos a los vientos medidos, in situ, mediante uno de los anemómetros situados en la cuenca del río Guadalfeo.

## 3.2 Velocidades de viento medidas

Se ha elegido una posición elevada dentro del modelo topográfico, coincidente con la posición del tercer anemómetro situado en el campo. Esta posición no es la pésima en términos de velocidades de viento, ya que no está situada en el punto de máxima altitud, pero sí que presenta una cierta complejidad ya que antes de que el viento procedente del mar haya llegado a ella ha tenido que atravesar algunos accidentes topográficos. El perfil de viento, por tanto, no es fácilmente predecible.

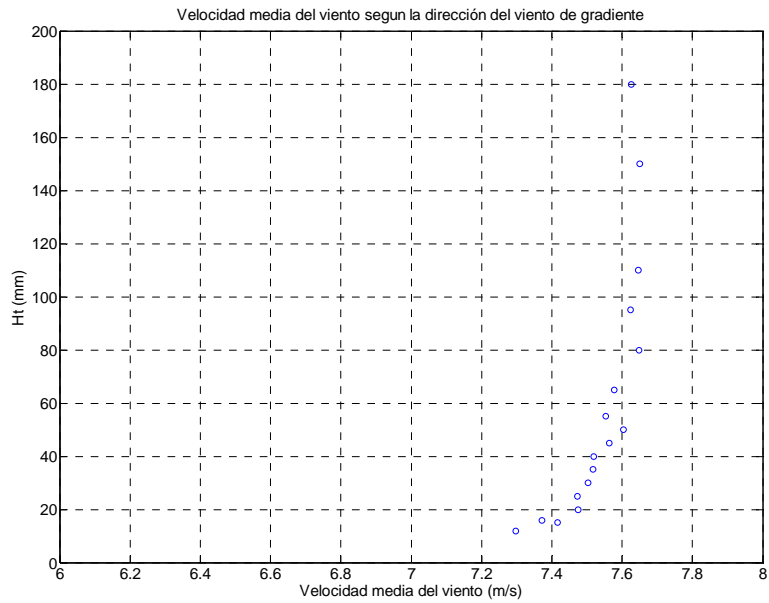
### 3.2.1 Mediciones en el túnel

Aunque la nueva toma de datos se hace a posteriori de los ensayos realizados para la calibración de la capa límite, se usa la misma instalación y las condiciones ambientales se tienen en cuenta de la misma manera que se expuso anteriormente (ver apartados 2.2.2.3 y 2.3.2). El instrumento de medición es, también, un anemómetro de hilo caliente de dos componentes.

La altura mínima a la que permite medir este anemómetro es de 13 mm. Esta altura corresponde, a escala real, a 39m de altura, lo que está dentro del entorno de las alturas alcanzadas por las líneas de alta tensión. Por tanto, supondremos que ésta es la altura a la que se encuentra situado el prototipo.

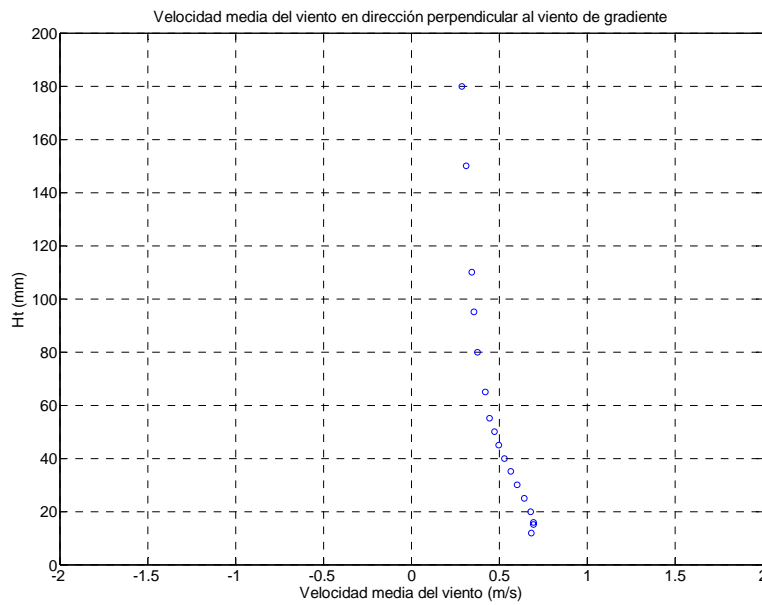
La velocidad de gradiente que se toma en este caso es del mismo orden que la que se tenía en el capítulo 2, aunque en este caso es algo mayor. Las mediciones realizadas muestran una velocidad de gradiente de 7.6m/s.

El perfil de viento que se obtiene, en la dirección del viento de gradiente, es el siguiente:



**Figura 3.2-1 Perfil de velocidad en la dirección del viento de gradiente**

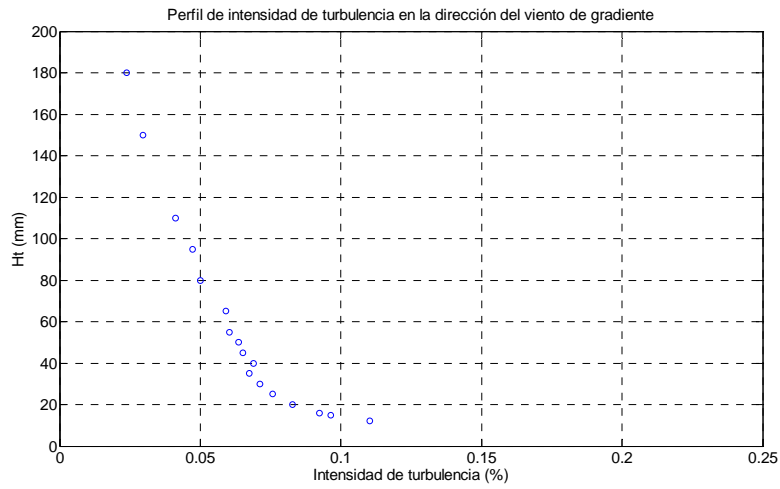
Como se puede observar el perfil obtenido se aparta del de una capa límite atmosférica, observándose importantes aceleraciones en las capas bajas, resultado acorde con las predicciones de la literatura existente. Por otro lado, las características topográficas de la zona provocan en este punto que aparezcan, también velocidades en sentido trasversal a la dirección del viento de gradiente. El perfil obtenido en esta dirección se muestra en la figura 3.2-2.



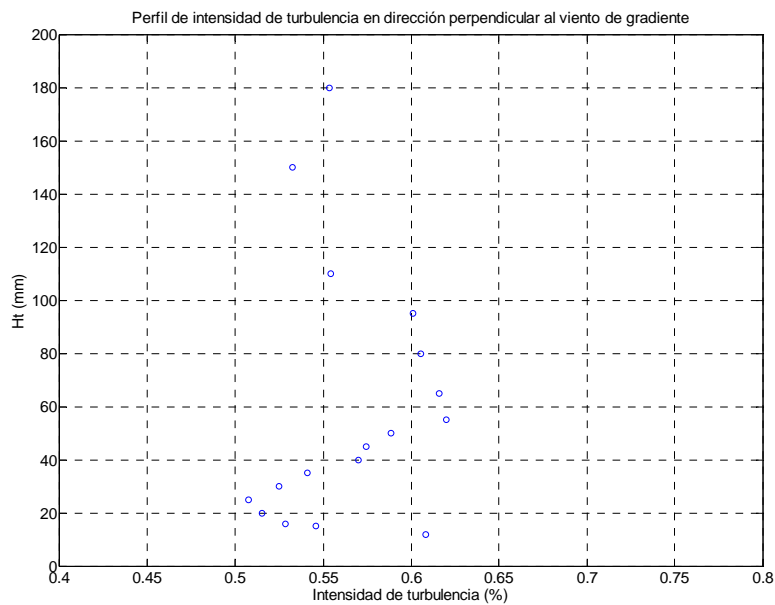
**Figura 3.2-2 Perfil de velocidad perpendicular a la dirección del viento de gradiente**

Las velocidades en esta dirección presentan un perfil interesante. Como se observa, a menores alturas el efecto de la topografía es mayor y, por tanto, aparecen velocidades de viento de mayor intensidad.

Ambas velocidades presentan también fluctuaciones en el tiempo. Para visualizar el orden de magnitud de las mismas ofrecemos, en las figuras 3.2-3 y 3.2-4, los perfiles de intensidad de turbulencia en las dos direcciones.



**Figura 3.2-3 Perfil de intensidad de turbulencia en la dirección del viento de gradiente**



**Figura 3.2-4 Perfil de intensidad de turbulencia perpendicular a la dirección del viento de gradiente**

De los datos presentados en este apartado se concluye que el viento real que se va a emplear en la modelización presenta importantes variaciones tanto en módulo como en dirección. Es el objetivo del apartado 3.3 la valoración de la relevancia de estas características.

### 3.2.2 Velocidades a escala real

Como ya mencionamos en el capítulo 2, los datos que se recogen en el modelo topográfico de la cuenca del río Guadalfeo sufren el escalado geométrico que las dimensiones del túnel imponen. Como se recordará, en él se adoptó una escala geométrica de 1:3000.

La velocidad del viento tiene dimensiones de longitud partido por tiempo. Por tanto, sobre ella, influye tanto el escalado geométrico como el temporal. El escalado temporal debe de ser aquél que permita que las velocidades de viento a escala real sean del orden de lo esperado.

La necesidad de este segundo escalado es obvia, ya que sin él, el viento estaría recorriendo distancias del orden de 1000 veces las reales. Dicho con otras palabras el fenómeno que en el laboratorio observamos en un segundo, a escala real lleva mucho más tiempo.

Dado que se busca la comparación con los datos obtenidos en el capítulo 1, debemos encontrarnos dentro del límite marcado por los resultados obtenidos con el modelo numérico. Optamos por tanto por realizar un análisis para una velocidad de gradiente en torno a los 12 m/s. Esta velocidad está dentro del rango de velocidades que Cook propone y cercano a los aconsejados por la ROM (ver apartado 2.3.2).

Los datos de velocidad obtenidos en la localización estudiada, en todo el periodo muestran una velocidad de gradiente media de 7.65 m/s, por tanto la escala de velocidades debe de ser, aproximadamente, igual a  $\frac{12}{7.65}$ .

Como hemos dicho la escala de la velocidad de viento depende tanto de la escala geométrica como de la escala temporal empleada según la relación

$$E_V = \frac{E_g}{E_t} \quad (2.33)$$

De donde:

$$\frac{7.65}{12} = \frac{1}{E_t} \frac{3000}{E_t} \quad (2.34)$$

Y por tanto:

$$E_t \approx \frac{1}{1900} \quad (2.35)$$

Los datos, en el túnel de viento, han sido adquiridos a una frecuencia de muestreo de 4000Hz, dado que  $\frac{1900}{4000}$  no permite una cifra exacta optamos por emplear una escala temporal

$$E_t = \frac{1}{1800}, \quad (2.36)$$

que condiciona que la frecuencia de adquisición de datos a escala real sea de  $\frac{1}{0.45s}$ . La velocidad de gradiente así obtenida es de 12.67m/s.

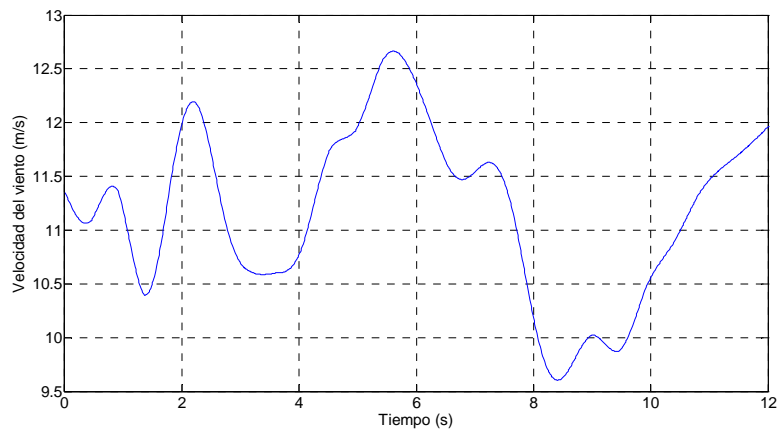
Para que la comparación con los datos obtenidos en el capítulo 1 tengan sentido necesitamos que los tiempos de estudio sean semejantes en uno y otro caso. Es por ello que en la resolución del modelo numérico se valora la dinámica durante 12s. Esto implica que necesitamos únicamente de 27 datos de la serie temporal para poder fabricarla. Se toman los 27 primeros datos.

Esto tiene una cierta relevancia en la velocidad del viento de las simulaciones. La velocidad de gradiente a la que se ha hecho referencia anteriormente, es la media de todas las mediciones realizadas en el túnel. Sin embargo, dada la variabilidad del fenómeno, la velocidad de gradiente media en estas 27 primeras mediciones es de 11.82m/s.

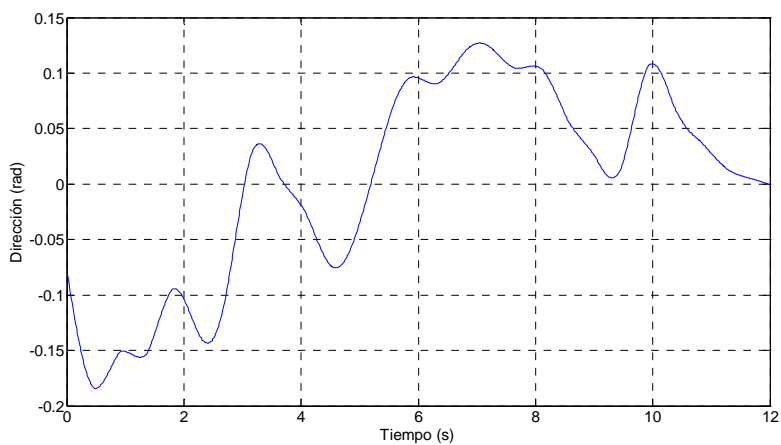
Para evitar cambios bruscos en la velocidad del viento, cuyo efecto, como ya hemos visto en la sección 1.4.2.6 pueden ser de importancia sobre la dinámica posterior, utilizamos una interpolación lineal que nos permite disponer de una serie temporal continua.

En la literatura consultada, encontramos un procedimiento diseñado precisamente para este fin (OETKEN, PARKS and SCHUSSLER 1979). En este trabajo se propone un método para incrementar la frecuencia de muestreo de una señal en un factor entero  $R$ . El procedimiento intercala  $R-1$  valores entre cada dos disponibles de modo que la señal resultante sea lo más parecida posible a los valores teóricos ideales. El criterio de evaluación del parecido entre la serie obtenida y la ideal teórica es el de los mínimos cuadrados (es decir: minimizar la suma de los cuadrados de los errores cometidos en la reconstrucción).

En las figuras 3.2-5 y 3.2-6 exponemos la serie temporal de velocidades y de direcciones de viento resultantes.



**Figura 3.2-5 Variación de la velocidad del viento**



**Figura 3.2-6 Variación de la dirección del viento**



De esta manera quedan completamente determinadas las características del flujo de viento que se va a imponer al modelo numérico del movimiento de los ahuyentadores de aves.

## 3.3 Dinámica de los prototipos bajo viento no homogéneo

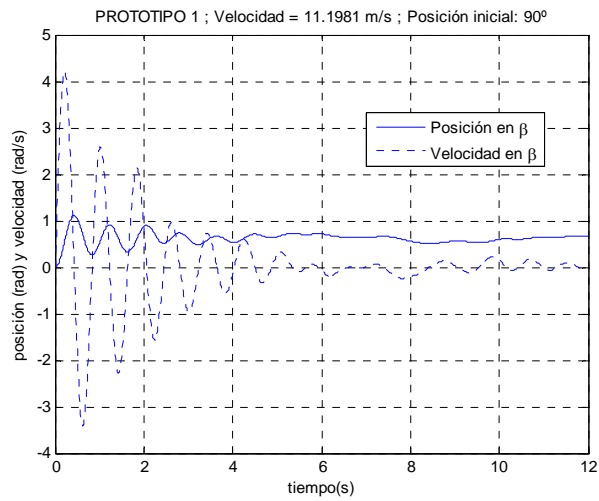
Para poder comparar los resultados de este apartado con los obtenidos anteriormente es necesario simular diferentes ángulos de incidencia de viento sobre los prototipos. En cada momento la dirección del viento se entiende como el ángulo que forma con el prototipo, valor variable en el tiempo. Se ha adoptado como dirección característica del viento, para cada simulación, la media de las mediciones obtenidas en el apartado anterior (ver figura 3.2-6). Es esta la orientación que se utiliza en la nomenclatura de figuras y tablas. En los ensayos se toman intervalos angulares de 5°.

De igual manera, la velocidad que se supone representativa de la simulación es la velocidad media de valor 11.20 m/s.

### 3.3.1 Simulaciones realizadas

La diferencia más importante entre las simulaciones realizadas en este capítulo y las correspondientes al capítulo 1, es que en aquí, las velocidades y direcciones del viento varían durante la simulación. Esto provoca que las dinámicas resultantes presenten características mixtas de las que se observaron en el apartado 1.4.2.1, habiendo desaparecido aquellas casuísticas que se dieron exclusivamente para intervalos angulares pequeños.

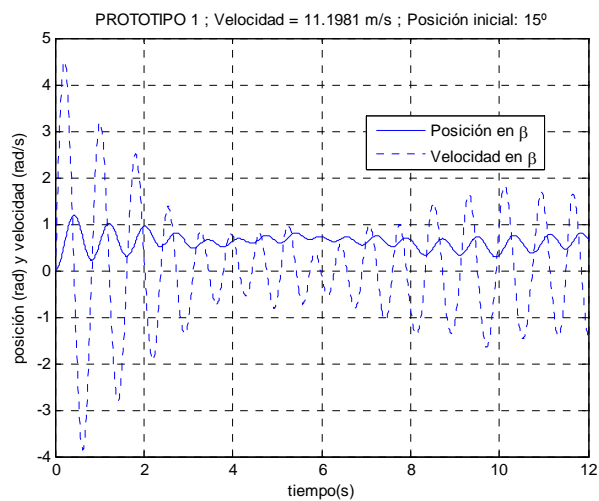
En términos del movimiento en  $\beta$ , la variación de la velocidad del viento provoca que nunca se alcance un equilibrio estable entre la fuerza que provoca y la del peso del cuerpo. En su lugar el punto de equilibrio va cambiando de posición acoplándose a la variación de la velocidad del viento.



**Figura 3.3-1** dinámica en  $\beta$ , viento Guadalfeo; 90°

Vemos como la posición en  $\beta$ , en los instantes finales, queda determinada por la variación de la velocidad del viento que observamos en la figura 3.2-5, cuando la velocidad del viento disminuye el cuerpo se aproxima a la vertical, mientras que si aumenta el cuerpo se aleja de dicha posición.

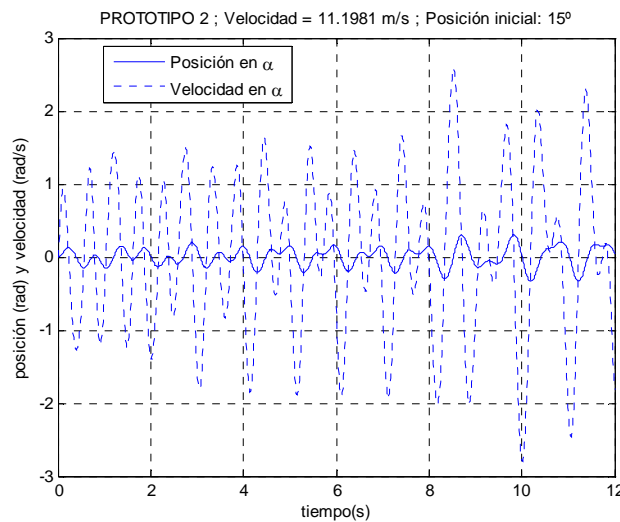
Por otro lado, también existen casos en los que se presentan variaciones de  $\beta$  sinusoidales como las que se observaban en el apartado 1.4.2.3, tal y como muestra la figura 3.3-2.



**Figura 3.3-2** dinámica en  $\beta$ , viento Guadalfeo; 15°

Estas situaciones se presentan cuando el cuerpo presenta oscilaciones periódicas importantes en el sentido de  $\gamma$ . Esto origina variaciones en la fuerza provocadas por el cambio de la orientación del viento que resultan mayores que las provocados por el cambio en el módulo de la velocidad del mismo. Sólo se han observado casos de este tipo en el prototipo1.

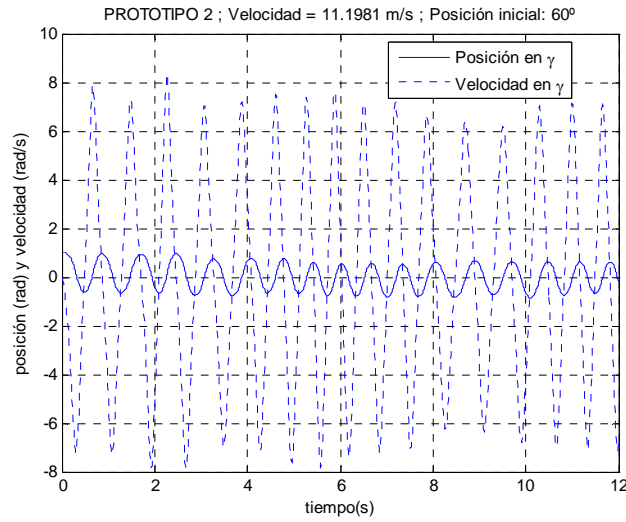
En el movimiento en  $\alpha$  observamos movimientos complejos similares a los movimientos oscilatorios, pero con unas formas algo más caóticas, que los alejan de las sinusoides perfectas. Un ejemplo representativo es el siguiente:



**Figura 3.3-3** dinámica en  $\alpha$ , viento Guadalfeo; 15°

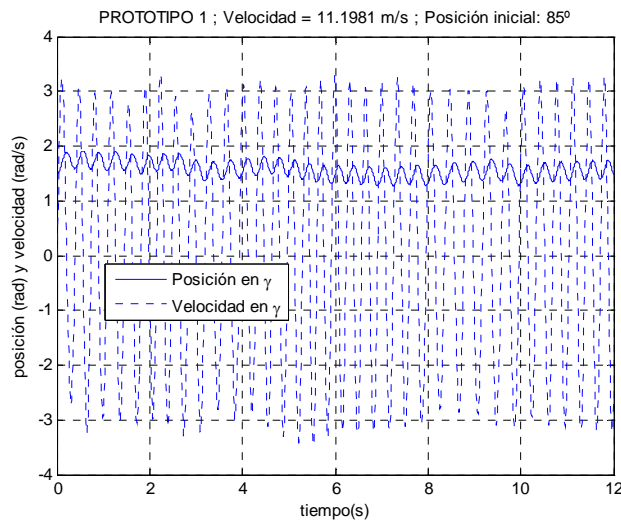
En  $\alpha$  no se observan, en ninguno de los dos prototipos casos que logren posiciones de equilibrio.

El movimiento en  $\gamma$  es el que más se asemeja al mostrado en el capítulo 1. La gran diferencia con respecto a aquél es que en este caso no existen situaciones de equilibrio. Al ser la orientación del viento variable siempre existe algún momento en el que el viento es capaz de sacar al cuerpo del estado estático y a partir de ese momento la dinámica continúa de manera indefinida. Presenciamos, por tanto, casos oscilatorios como el que presentamos en la figura 3.3-4.



**Figura 3.3-4** dinámica en  $\gamma$ , viento Guadalfeo; 60°

Esta tipología, como se observa en la figura 3.3-4 presenta variaciones de la posición media, producto de la variación del módulo de la velocidad en el tiempo. Este mismo fenómeno se puede observar con más claridad en la figura 3.3-5, donde por ser de menor cuantía las amplitudes de las oscilaciones el efecto resulta más evidente. Hay que resaltar la diferencia de escalas verticales entre las dos figuras que enmascara el hecho de que en la segunda, las velocidades y oscilaciones sean menores.



**Figura 3.3-5** dinámica en  $\gamma$ , viento Guadalfeo; 85°

La otra tipología presente es aquella en la que el cuerpo es capaz de moverse en giros continuos en torno al eje de unión, como el caso que mostramos a continuación:

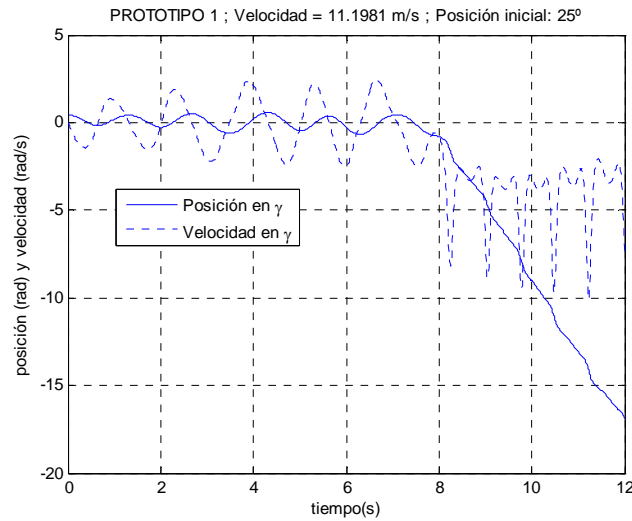


Figura 3.3-6 dinámica en  $\gamma$ , viento Guadalfeo; 25°

### 3.3.2 Casuística

Al igual que hicimos en el apartado 1.4.2.2, a continuación vamos a clasificar, para los dos prototipos y las diferentes orientaciones de viento, el tipo de movimiento que se produce. Se ha añadido un nuevo tipo de movimiento denominado equilibrio dinámico en el que se clasifican todos los casos similares al de la figura 3.3-1. El resultado es el siguiente:

		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	
P1	$\alpha$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	o
	$\beta$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	d	d	d	d	d	d
	$\gamma$	X	X	X	X	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	X	X	X	X	X	X
P2	$\alpha$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	$\beta$	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d
	$\gamma$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>V = 11.20 m/s</b>																				
		90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	
P1	$\alpha$	o	o	o	o	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	$\beta$	d	d	d	d	d	d	d	d	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	$\gamma$	X	X	X	X	X	X	X	X	▽	▽	▽	▽	▽	X	X	X	X	X	X
P2	$\alpha$	X	X	X	X	X	X													
	$\beta$	d	d	d	d	d	d													
	$\gamma$	X	X	X	X	X	X													

X Oscilaciones      o Eq. estático      d Eq. dinámico      ▽ Giros completos

Tabla 3.3-1 Casuística para viento en topografía compleja

Estos casos se pueden agrupar, tal y como se hizo anteriormente, para analizar el número de casos de cada tipología por prototipo y movimiento.

	P1						P2					
	11.20 m/s						11.20 m/s					
	$\alpha$		$\beta$		$\gamma$		$\alpha$		$\beta$		$\gamma$	
	casos	%	casos	%	casos	%	casos	%	casos	%	casos	%
X	31	86.1	23	63.9	22	61.1	24	100	0	0	24	100
o	5	13.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
▽	0	0	0	0	14	38.9	0	0	0	0	0	0
d	0	0	13	36.1	0	0	0	0	24	100	0	0

Tabla 3.3-2 Probabilidad de cada tipo de movimiento

Observamos como en el prototipo 1 existen sólo dos tipologías de dinámica para cada movimiento. En P2, sin embargo, esto se reduce, siendo cada movimiento completamente homogéneo.

La gran mayoría de los casos estudiados en el primer prototipo corresponden a oscilaciones en torno a un punto fijo, dándose también tipologías de equilibrio para  $\alpha$  y  $\beta$  y giros completos para  $\gamma$ .

En P2,  $\alpha$  y  $\gamma$  sólo presentan oscilaciones en torno a una posición fija, mientras que  $\beta$ , en todos los casos consigue llegar a una posición de equilibrio dinámico.

La velocidad media empleada en estas simulaciones es similar a 12m/s, que fue una de las empleadas en el capítulo 1. Por ello resulta interesante comparar esta tabla con la que obtuvimos para cada prototipo bajo una velocidad constante de 12m/s.

En el movimiento en  $\alpha$  observamos como en el prototipo 1 la casuística es prácticamente idéntica, habiendo descendido en un 5.5% la frecuencia de casos en equilibrio, que se han transformado en oscilaciones en torno a una posición fija. En el prototipo 2 han desaparecido los dos casos en los que el cuerpo permanecía estático, que han pasado a ser de oscilaciones en torno a un punto de equilibrio.

En  $\beta$ , el prototipo 2 se comporta de manera idéntica. P1, por el contrario, presenta alguna diferencia. Se observa una disminución de casos de dinámica en torno a una posición fija (17% menor) que se transforman, junto con la totalidad de los casos de equilibrio estático, en casos de equilibrio dinámico. Esta nueva tipología supone el 36% del total de los casos analizados.

En el prototipo 1, refiriéndonos al movimiento en  $\gamma$ , desaparecen los dos casos de equilibrio estático que se presentaban en los ángulos de 90º y 175º, transformándose en movimientos en torno a una posición fija. Por otro lado, desaparecen algunos casos de oscilaciones para transformarse en movimientos de giros completos en torno al eje de unión, por lo que el efecto global es un aumento de estos últimos que, como recordamos, es el tipo de movimiento más indicado para conseguir el efecto deseado.

En el prototipo 2 también se observa una transformación similar, desapareciendo los casos de equilibrio. Sin embargo siguen sin presentarse casos con giros completos en torno al eje de unión.

Al igual que se hizo en el capítulo 1, a continuación representamos gráficamente las amplitudes que se han observado, siendo éstas la diferencia entre el valor máximo y el mínimo una vez que el impulso generado por la inclusión brusca del viento ha desaparecido.



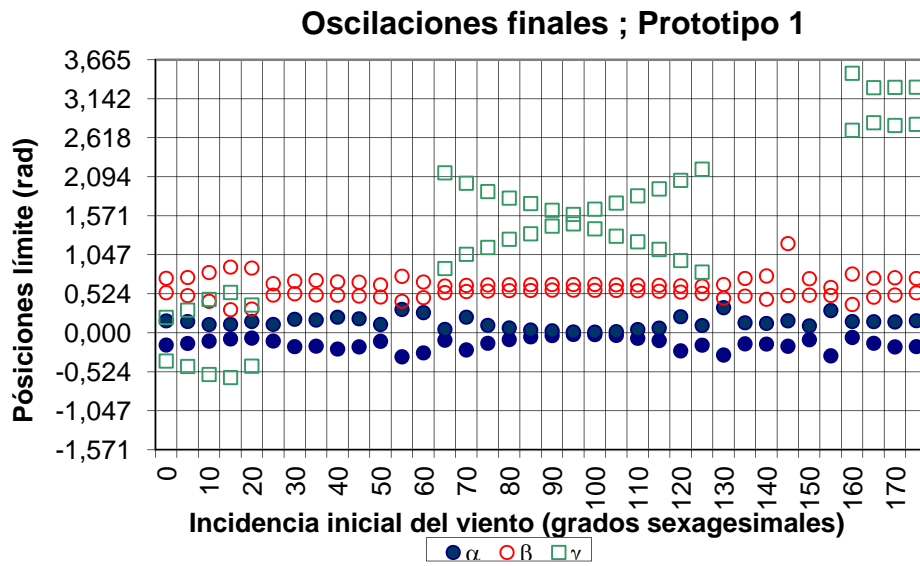


Figura 3.3-7 Amplitud en los movimientos finales; P1; Velocidad de viento Guadalfeo

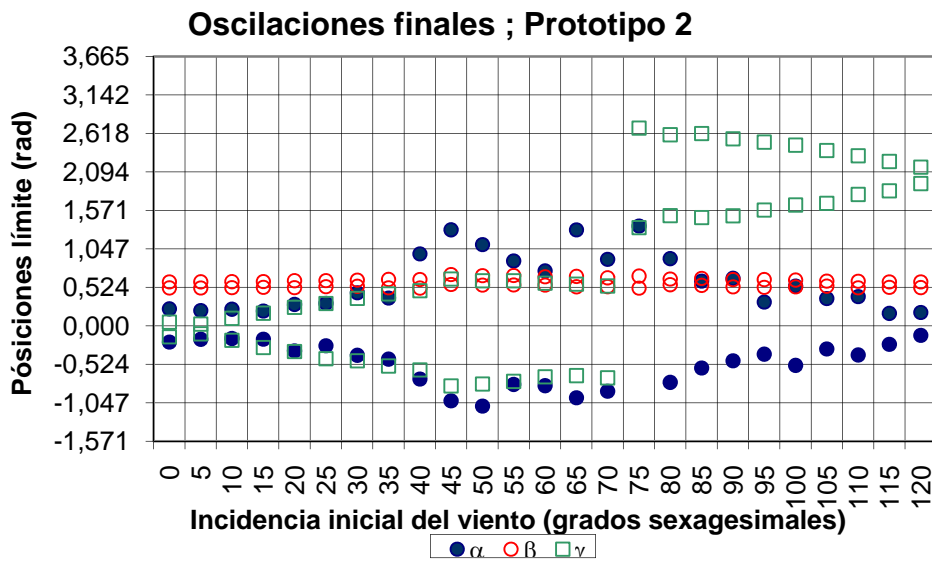


Figura 3.3-8 Amplitud en los movimientos finales; P2; Velocidad de viento Guadalfeo

La comparación entre estas figuras y las que mostramos anteriormente muestran importantes semejanzas. Destaca la mayor amplitud de los movimientos en  $\alpha$  en el prototipo 2, que han aumentado considerablemente. Las amplitudes en  $\beta$  aumentan algo, consecuencia de

la variación en el tiempo de la velocidad de viento. En  $\gamma$  el resultado es prácticamente igual.

En P1 las amplitudes en  $\alpha$  y en  $\gamma$  no presentan apenas variaciones y en  $\beta$  solamente de pequeño valor, motivados de igual manera que la variación en el prototipo 1.

## 3.4 Dinámica de los prototipos bajo viento real

El estudio realizado hasta el momento ha permitido comprender el comportamiento de los dos prototipos bajo diversas condiciones de viento: En primer lugar en condiciones de flujo homogéneo y en segundo con flujo simulado en el interior de un túnel de viento. El objetivo de este apartado es presentar un intento de aplicación de la metodología presentada en esta memoria al estudio aerodinámico de los dos prototipos al enfrentarse a condiciones de viento reales.

El objetivo último no es el de estudiar las diferentes tipologías de movimiento que puede presentar el cuerpo, que ya han sido tratadas en profundidad en el apartado 3.3.1. En su lugar se analizará la idoneidad de los prototipos para cumplir la función para la que han sido diseñados bajo condiciones de viento medido en la atmósfera.

Enlazando con lo expuesto en el capítulo 1.2.2, se considerará que el cuerpo no cumple la función para la que ha sido diseñado en el caso de que ocurra una de las dos siguientes posibilidades:

- Modo de fallo: El cuerpo queda atrapado en el cable de alta tensión.
- Parada operativa: El cuerpo no consigue una dinámica adecuada.

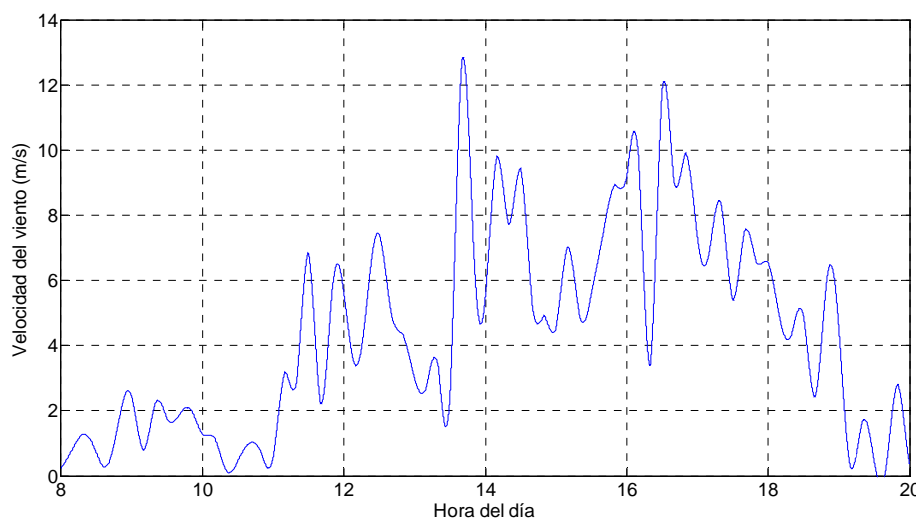
Como se observa, no hemos incluido entre los posibles defectos el caso en que se produzca el fallo por rotura de alguna de sus partes, por estar fuera del alcance de este estudio, ni el caso en que no exista viento suficiente, ya que esta posibilidad debe abordarse considerando las condiciones de viento locales del área en el que se empleó el prototipo.

En adelante vamos a considerar que el modo de fallo 1 se produce cuando el cuerpo alcanza, en  $\alpha$  o en  $\beta$ , amplitudes excesivas, lo que se tomará cuando en cualquiera de estos dos movimientos se rebasa una posición máxima de  $80^\circ$ . Estamos, por tanto, ante un criterio que consideramos bastante conservador.

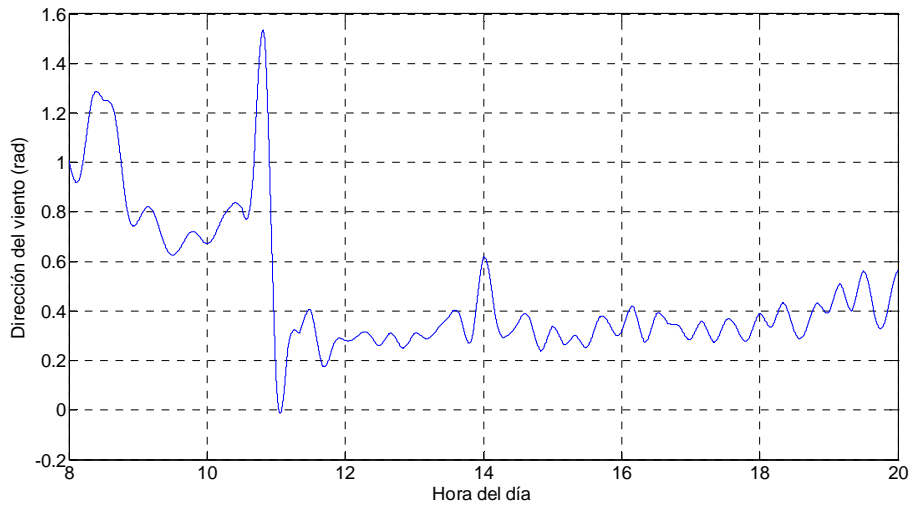
El modo de fallo 2 se produce cuando el cuerpo no consigue tener una velocidad mínima de rotación en torno al eje de unión. Consideramos que esto sucede cuando la velocidad media del mismo no es capaz de hacerle dar una vuelta completa en un periodo de seis segundos.

Para llevar a cabo este estudio hemos empleado datos de viento obtenidos en un día de muestreo completo en el cauce del río Guadalfeo. Se han empleado los datos del anemómetro de la ubicación 2, cerca de la desembocadura, en Salobreña. El factor que convierte a este anemómetro en el más adecuado para esta sección radica en ser el más alto de los cinco. Con una altura cercana a los 20m se aproxima al orden de magnitud de las que pueden darse en los tendidos de alta tensión.

Los datos corresponden al día 12 de Febrero de 2008, con los datos obtenidos entre las 8.00 y las 20.00 (el periodo con luz diurna). Este día presenta unas buenas condiciones de viento con situaciones de calma a viento moderado. Los datos se recogen con una frecuencia de adquisición de diez minutos, que obviamente resulta un tanto parca a la hora de realizar la simulación numérica. Para paliar este inconveniente se ha realizado una interpolación numérica similar a la expuesta en el apartado 3.2.2, que ofrece los siguientes resultados en términos de velocidad y dirección:



**Figura 3.4-1 Velocidad del viento; Ubicación 2; 12/2/2008**



**Figura 3.4-2 Dirección del viento; Ubicación 2; 12/2/2008**

A partir de esta entrada de datos, mediante el modelo numérico que modificamos y empleamos en el apartado 3.3.1, podemos resolver las ecuaciones de movimiento y calcular, en cada instante, la posición y velocidad del prototipo.

Lamentablemente la complejidad de los movimientos en el prototipo 2 han imposibilitado conseguir resultados mediante el modelo numérico presentado, por eso analizamos, exclusivamente, lo que sucede en el caso del prototipo 1.

Los resultados obtenidos muestran una nula probabilidad de fallo en el modo 1 para las condiciones simuladas. En todo el periodo observado nunca se ha producido una dinámica que ponga al prototipo en una situación de riesgo real para su modo de operación.

Sin embargo sí que se han observado bastantes instantes en los que el cuerpo no ha presentado una dinámica adecuada. Los casos en los que el cuerpo ha tenido una velocidad de rotación excesivamente lenta en el plano de rotación con respecto al eje de unión han supuesto un 68% del tiempo de simulación empleado, es decir 6 horas y 57 minutos. Este alto porcentaje, en parte, se debe a las bajas velocidades de viento en las primeras y últimas horas del día.

Podemos por tanto, concluir, que en la ubicación elegida, en el día seleccionado no existe riesgo para el fallo del prototipo. Sin embargo su funcionalidad se encuentra limitada durante una buena parte del día.

## 3.5 Conclusiones

El objetivo del presente capítulo es evaluar la dinámica de los dos prototipos bajo condiciones de viento real. Para ello se emplea el modelo numérico descrito en el capítulo 1 junto con el campo de viento simulado en el capítulo 2. Los resultados obtenidos muestran diferencias y semejanzas notables.

Las dinámicas observadas son muy similares a las que teníamos anteriormente, especialmente en  $\gamma$ . En términos estadísticos, analizada la frecuencia de cada tipología, las diferencias también se han mostrado mínimas.

En el campo de las diferencias, quizás la más llamativa sea la aparición de una nueva tipología para el movimiento en  $\beta$ . En ella se producen variaciones suaves a consecuencia de la propia variabilidad del módulo del viento. Dada la suavidad de las variaciones observadas, hemos denominado a esta situación como equilibrio dinámico.

Esta variación de la velocidad del viento también tiene su reflejo en la dinámica en  $\gamma$ , que ofrece, en estas simulaciones variaciones temporales similares a las obtenidas en  $\beta$ . En  $\alpha$ , por ser un movimiento más caótico estas alteraciones son inapreciables.

Por otro lado la variabilidad del fenómeno atmosférico, en términos de dirección, provoca que, en algún momento, el viento siempre sea capaz de sacar al cuerpo de su estado de reposo. Como consecuencia, la tipología de equilibrio estático desaparece tanto para el movimiento en  $\gamma$  como para el movimiento en  $\alpha$ .

En términos estadísticos el cambio, sin embargo, no se traduce en grandes diferencias. Se observa una ligera mejoría en el prototipo 1 en cuanto a la frecuencia de aparición de dinámicas con giros completos en torno al eje de unión y el hecho de que en  $\beta$  el equilibrio sea dinámico es, también, positivo, ya que amplía el volumen abarcado por los reflejos del sistema. En

el prototipo 2, los cambios han sido mínimos, sólo siendo relevantes en  $\beta$ , con las mismas consecuencias positivas que en P1.

Se ha realizado, también, un intento de simulación de la idoneidad de una ubicación para el posicionamiento de los prototipos. El modelo numérico realizado no ha sido capaz de resolver las ecuaciones para uno de los dos prototipos. El otro no presenta riesgos en su funcionamiento en el día simulado, aunque en periodos de tiempo importantes no parece cumplir con la función dinámica que se le supone.



## 3.6 Futuras líneas de trabajo

Con este capítulo se pretende modelar el comportamiento del prototipo bajo unas condiciones de viento realistas. Los resultados obtenidos muestran el efecto que, sobre la dinámica, tienen los cambios en módulo y dirección del flujo de viento. Las líneas de trabajo que se abren con él son las siguientes.

Por un lado hemos analizado la dinámica en una posición elegida con criterio subjetivo. Sería interesante obtener datos de viento en la posición real en que se fuera a ubicar el sistema destinado a ahuyentar las aves para comprender las características del campo de viento en dicha posición para el caso real de viento.

Por otro lado, el modelo numérico empleado sigue presentando las mismas simplificaciones que en el capítulo 1. La unión que se utiliza en el modelo numérico supone una simplificación de la real. Sería interesante atacar el problema de la unión modelando el diferente reparto de momentos que se va a producir entre los diferentes eslabones.

Otra limitación del estudio realizado se deriva de la unidireccionalidad del viento de gradiente empleado. Sería interesante realizar un análisis con datos de viento de un periodo mayor en el que se observaran cambios de dirección de mayor magnitud de los empleados aquí.

Por último se hace necesario una mejora del sistema numérico empleado para la resolución de las ecuaciones de movimiento, ya que en uno de los dos prototipos no ha sido capaz de resolver las ecuaciones de movimiento.

---

## Apéndice A

# Presiones obtenidas (I)

---

---

En el presente apéndice mostramos las presiones medias obtenidas en los ensayos realizados en la fase 1 de toma de datos realizada en el túnel de viento de capa límite. Se presentan los datos de los dos prototipos, utilizando la nomenclatura presentada esto se corresponde con los datos de P1F1 y P2F1. Como ya se ha explicado en el apartado correspondiente se ha realizado una interpolación sobre dichos datos para poder presentar unos mapas de presiones sobre cada una de las caras. Los datos así conseguidos son:

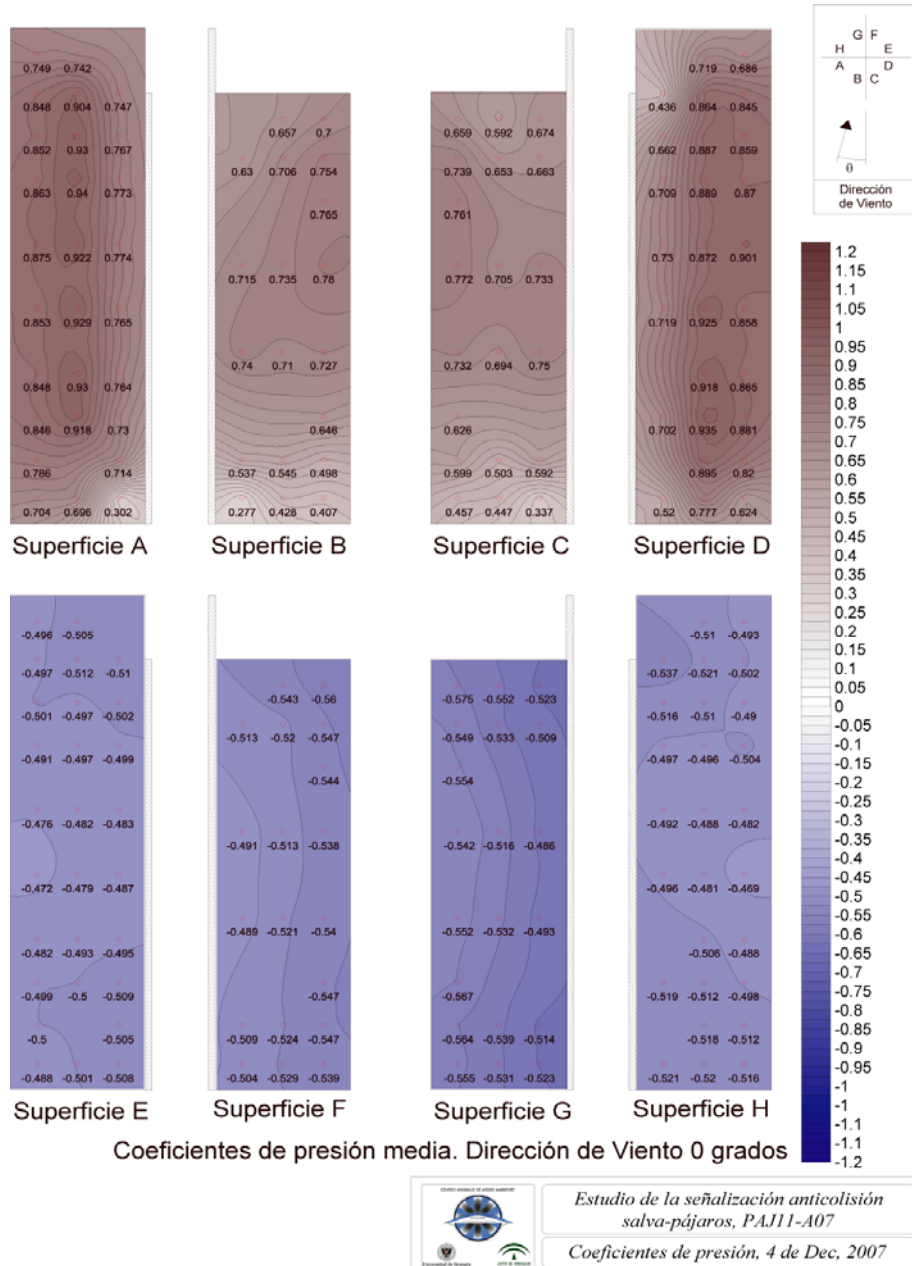
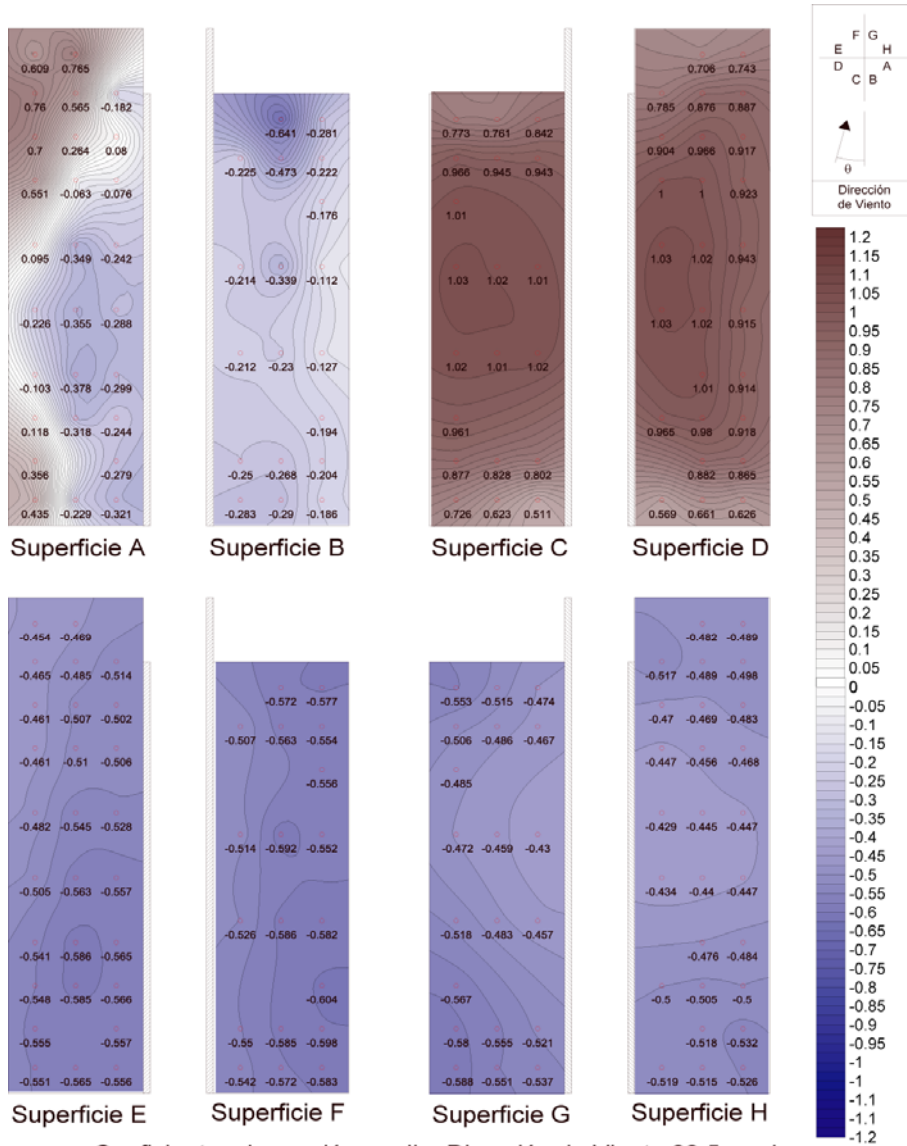
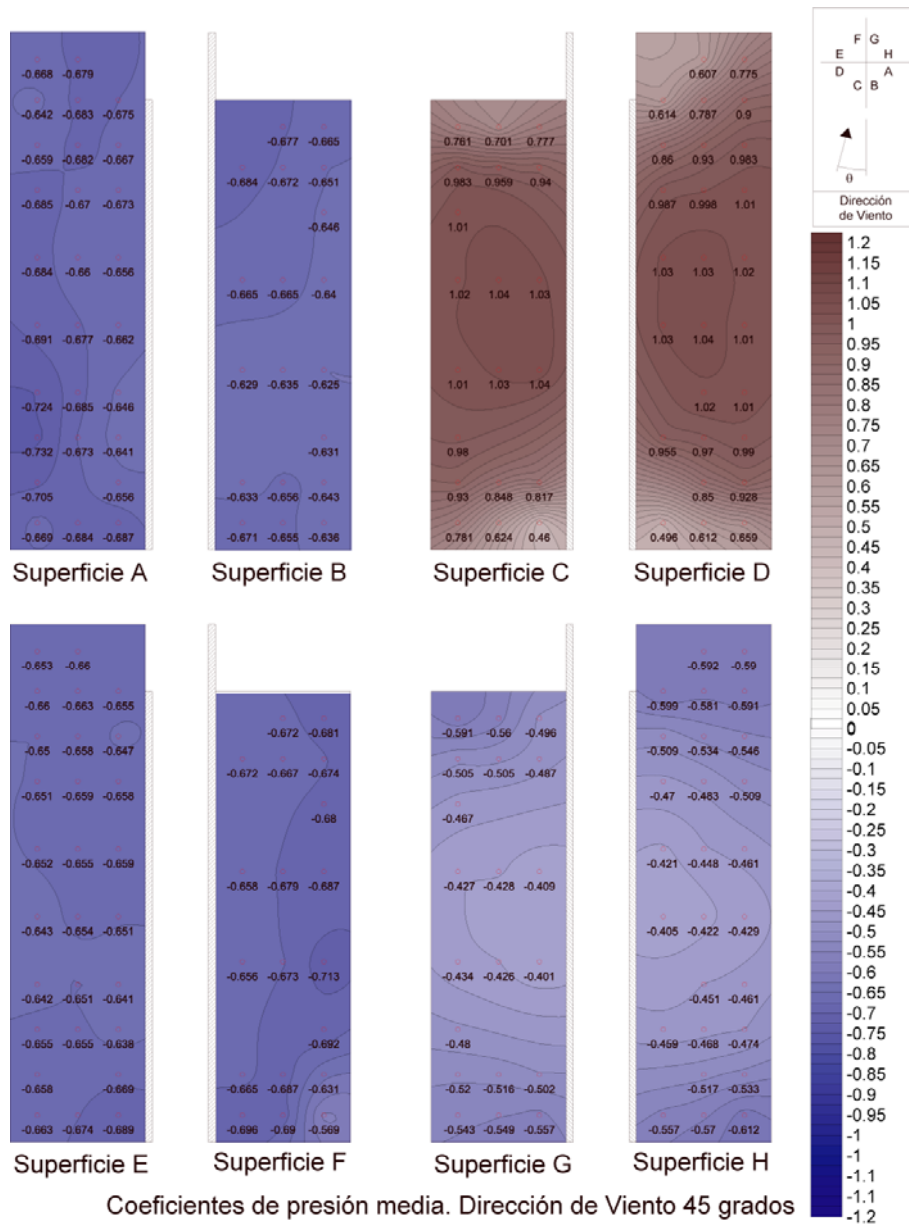


Figura A-1 Coeficientes de presión; P1F1; Ángulo de incidencia: 0°



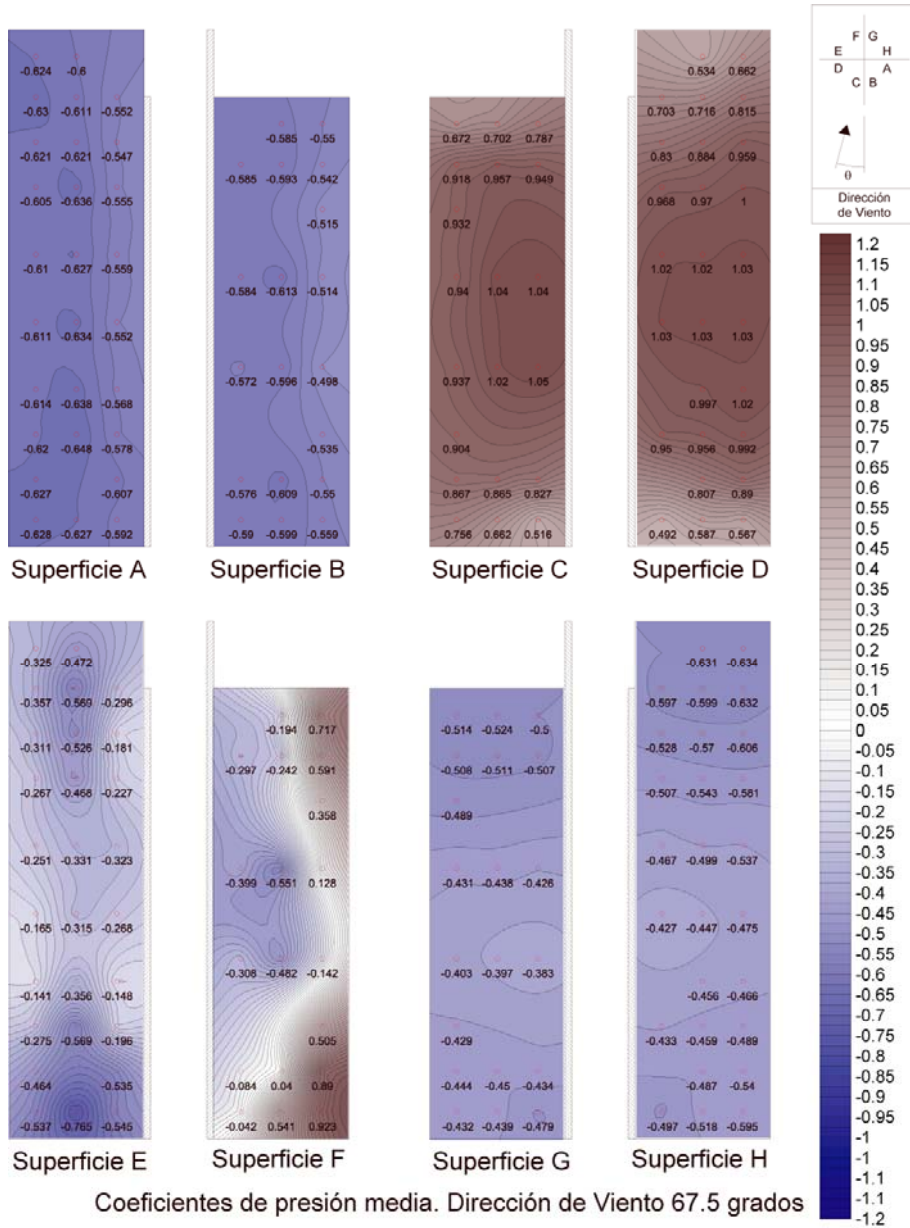
	Estudio de la señalización anticolidión salva-pájaros, PAJ11-A07
	Coefficientes de presión, 4 de Dec, 2007

Figura A-2 Coeficientes de presión; P1F1; Ángulo de incidencia: 22.5°



	Estudio de la señalización anticollisión salva-pájaros, PAJ11-A07
	Coefficientes de presión, 4 de Dec, 2007

Figura A-3 Coeficientes de presión; P1F1; Ángulo de incidencia: 45°




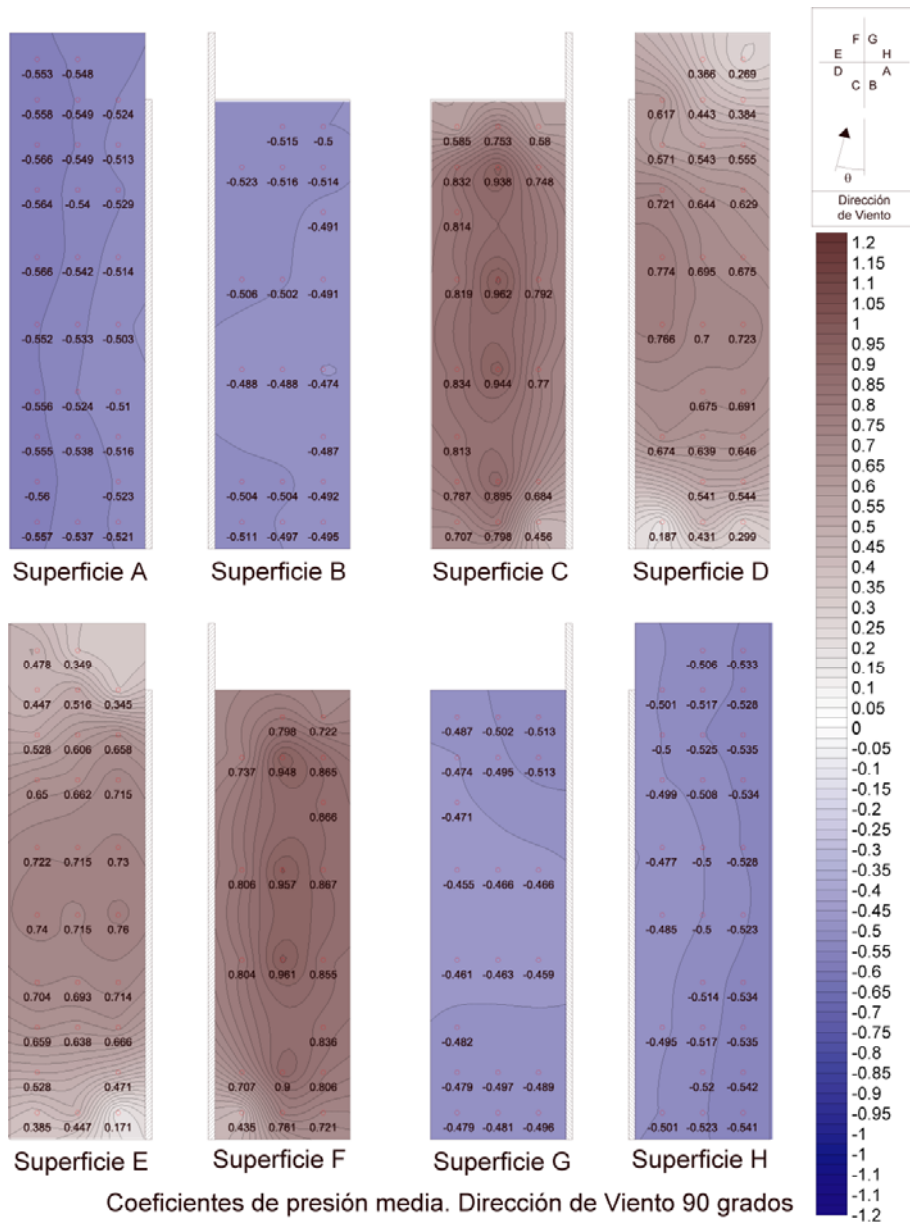


 Estudio de la señalización anticollisión  
 salva-pájaros, PAJ11-A07  
 Coeficientes de presión, 4 de Dec, 2007

Figura A-4 Coeficientes de presión; P1F1; Ángulo de incidencia: 67.5°

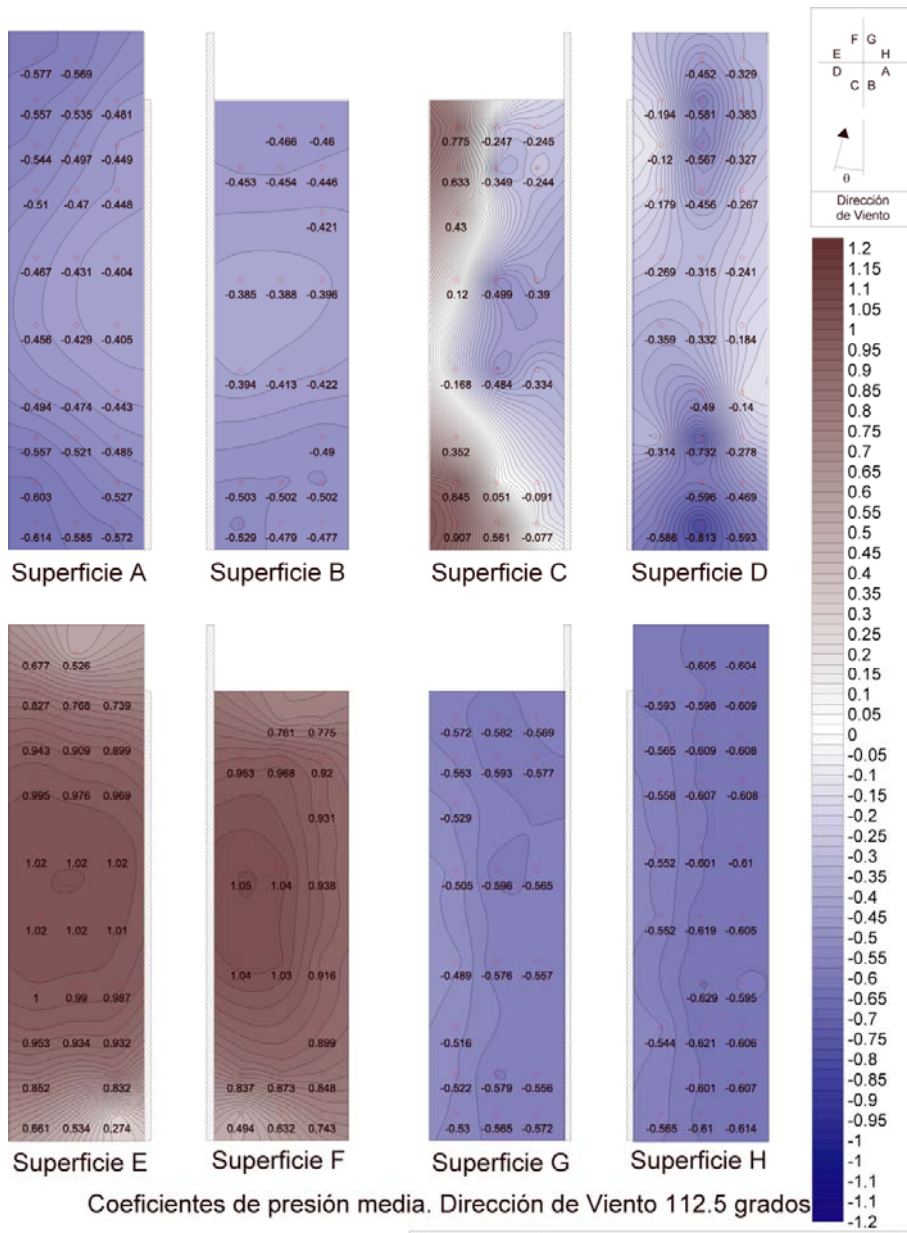




*Estudio de la señalización anticollisión  
salva-pájaros, PAJ11-A07*  
*Coeficientes de presión, 4 de Dec, 2007*

Figura A-5 Coeficientes de presión; P1F1; Ángulo de incidencia: 90°



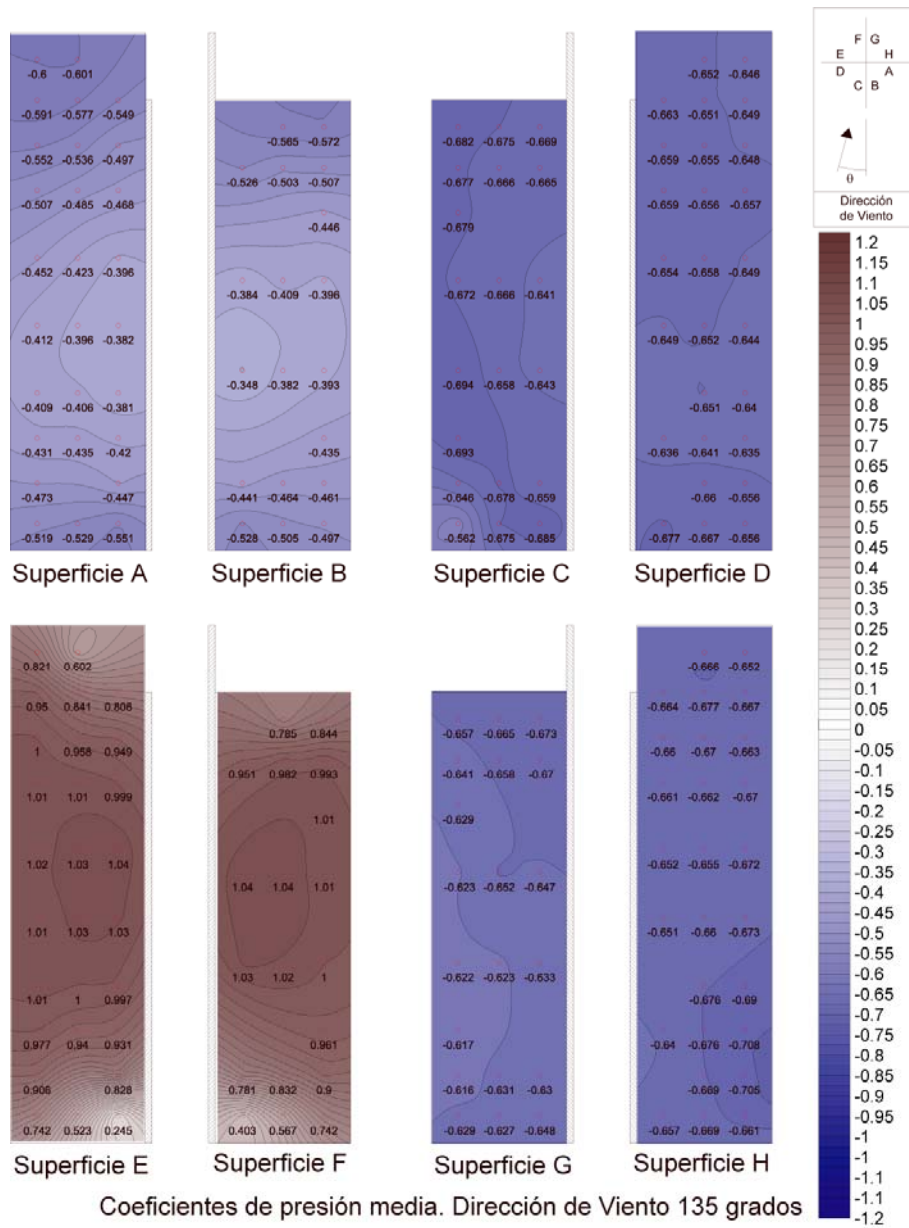


*Estudio de la señalización anticollisión  
salva-pájaros, PAJ11-A07*

*Coefficientes de presión, 4 de Dec, 2007*

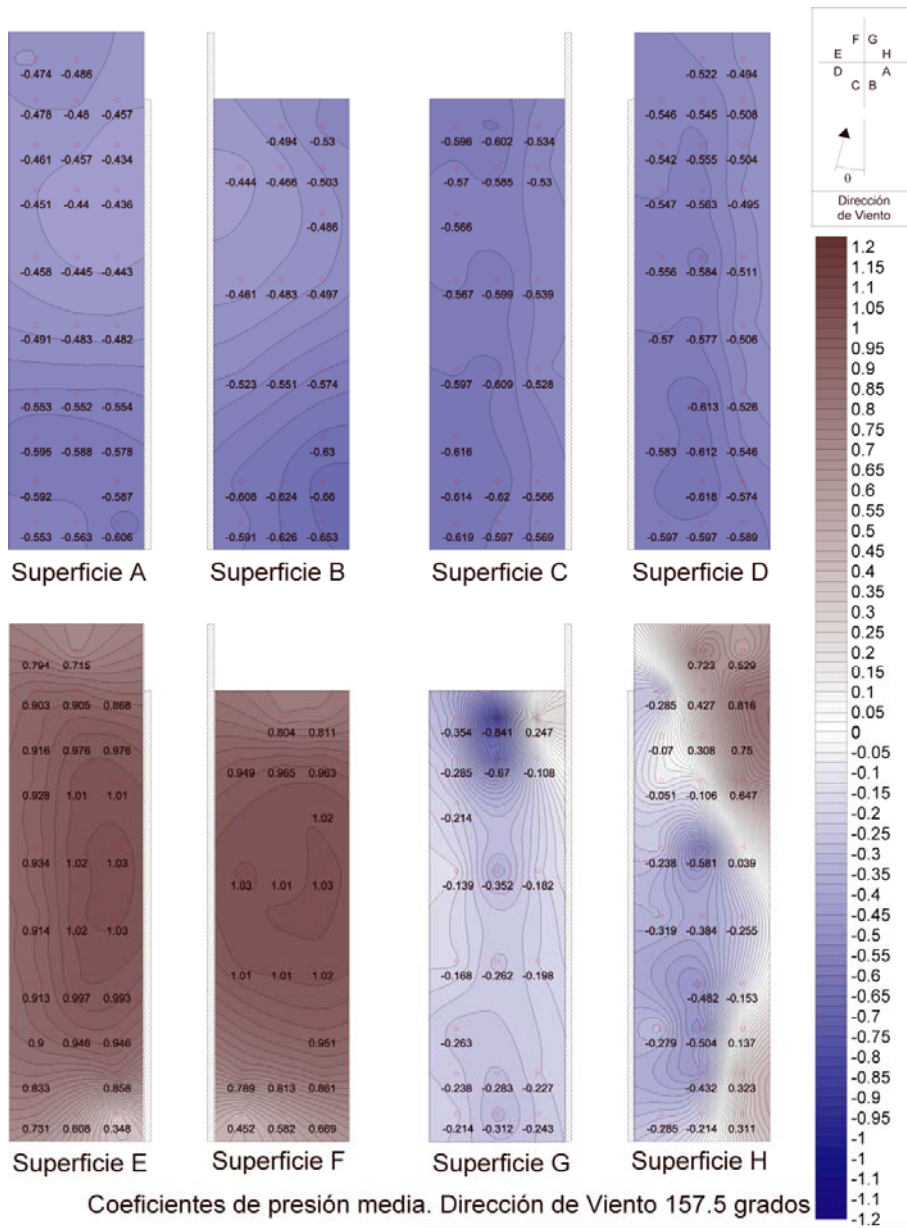
Figura A-6 Coeficientes de presión; P1F1; Ángulo de incidencia: 112.5°





	Estudio de la señalización anticollisión salva-pájaros, PAJ11-A07
	Coefficientes de presión, 4 de Dec, 2007

Figura A-7 Coeficientes de presión; P1F1; Ángulo de incidencia: 135°



	<p>Estudio de la señalización anticollisión salva-pájaros, P.AJ11-A07</p>
	<p>Coefficientes de presión, 4 de Dec, 2007</p>

Figura A-8 Coeficientes de presión; P1F1; Ángulo de incidencia: 157.5°

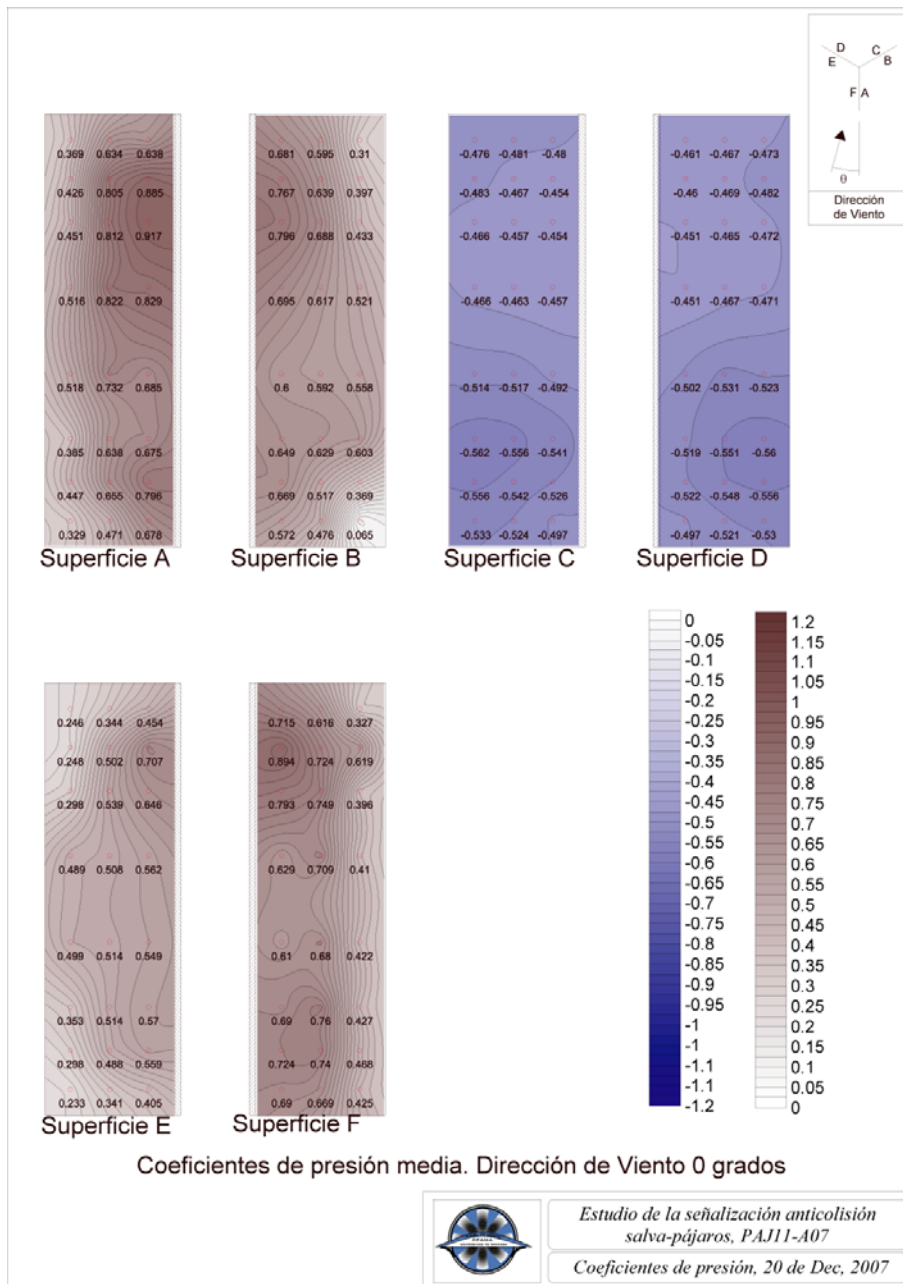


Figura A-9 Coeficientes de presión; P2F1; Ángulo de incidencia: 0°

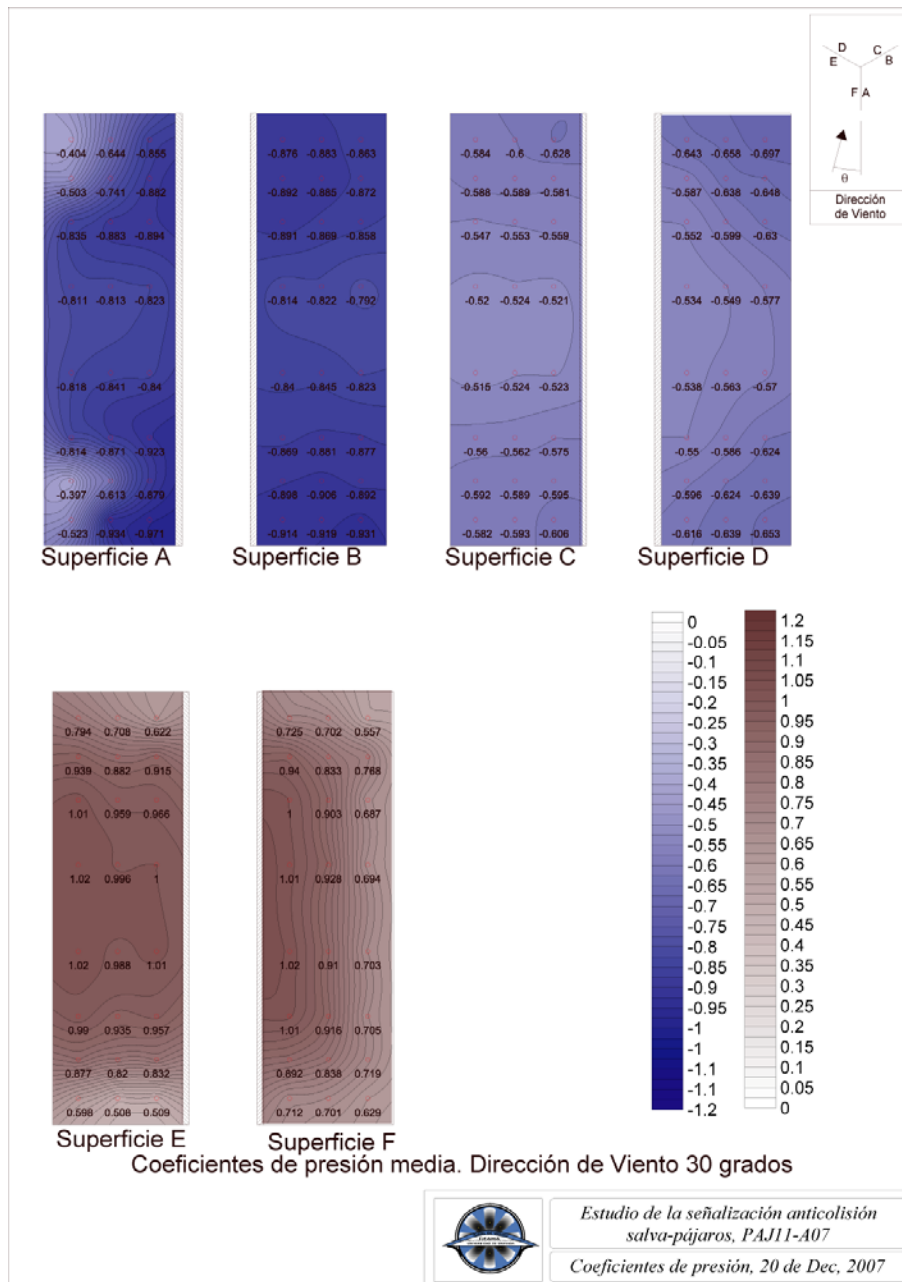


Figura A-10 Coeficientes de presión; P2F1; Ángulo de incidencia: 30°

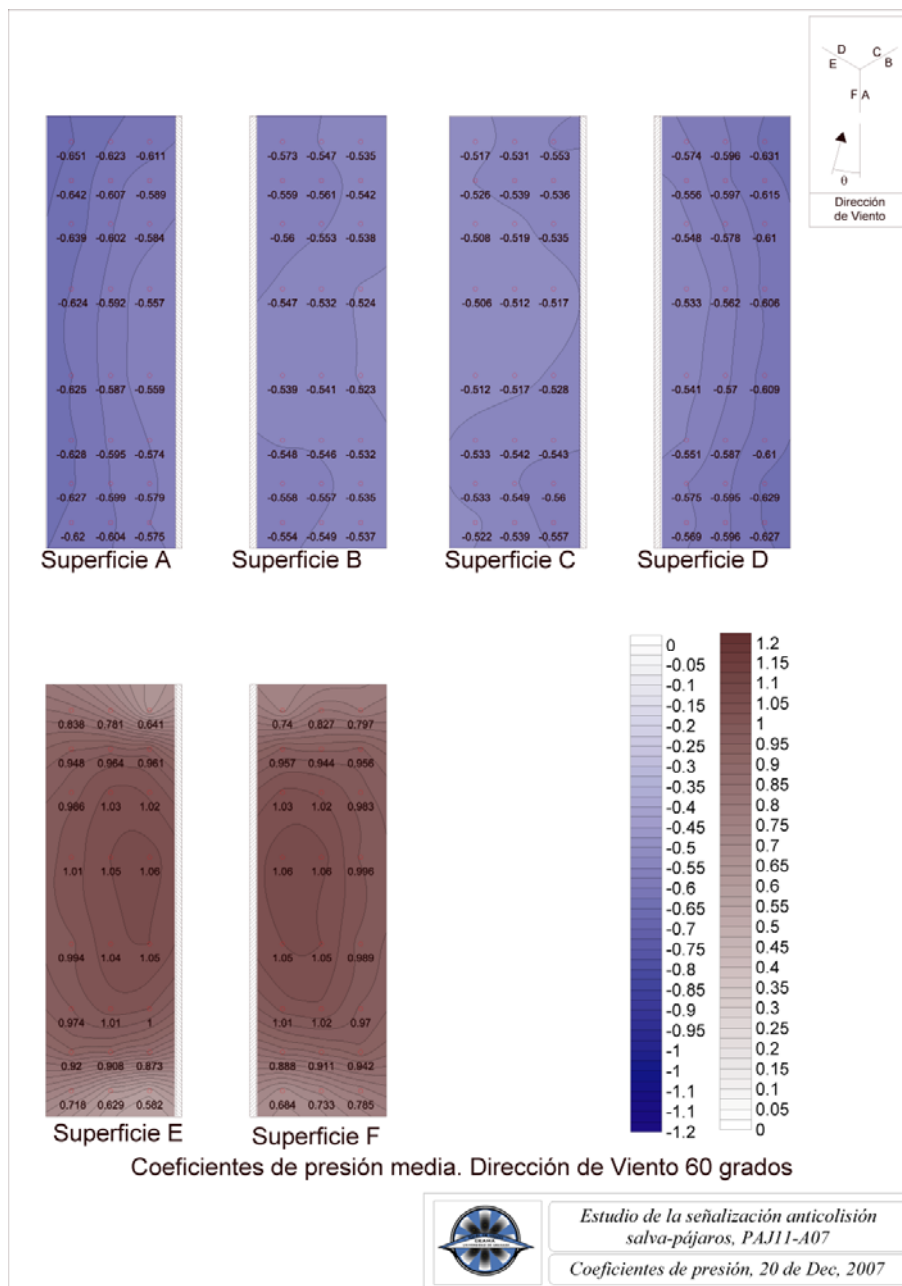


Figura A-11 Coeficientes de presión; P2F1; Ángulo de incidencia: 60°

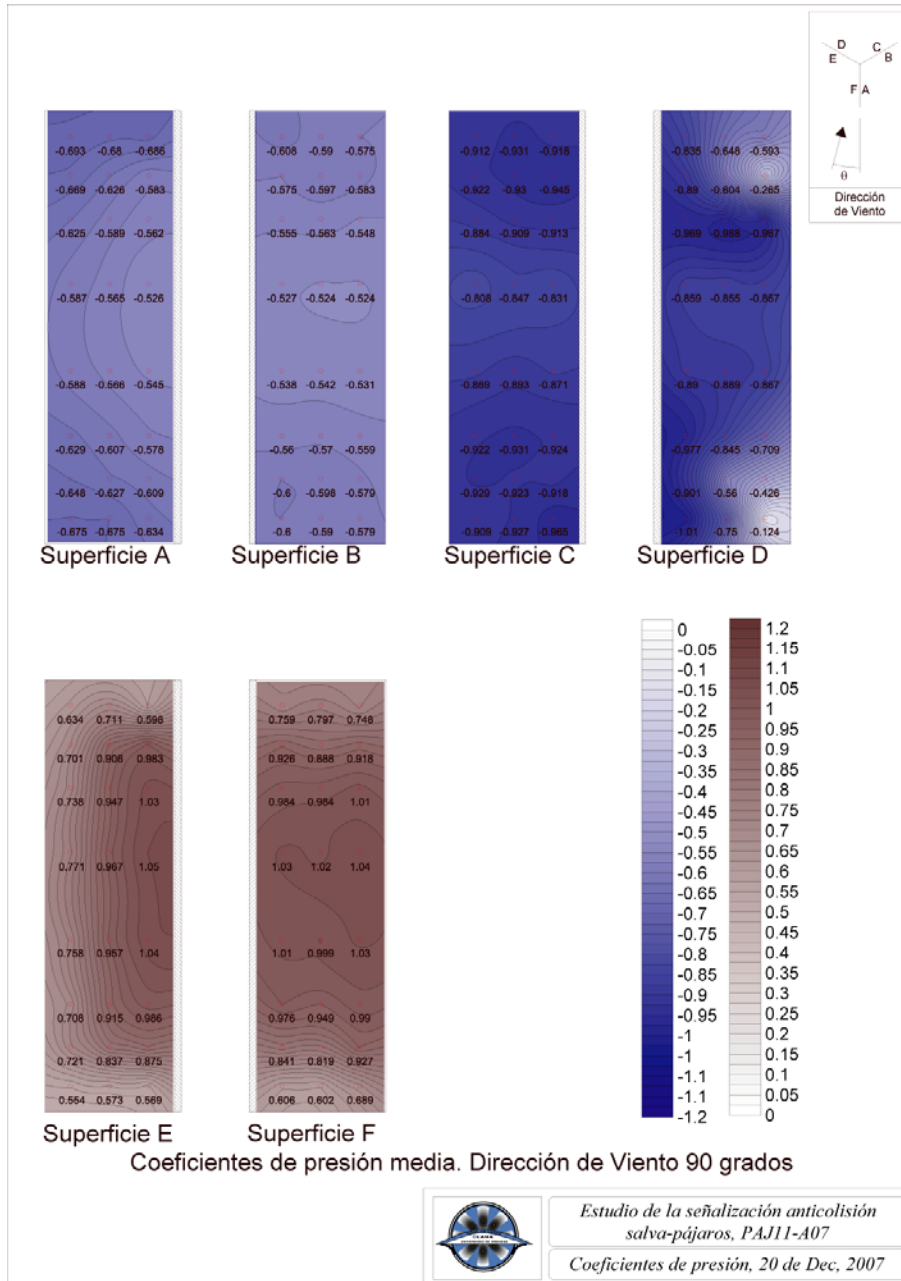


Figura A-12 Coeficientes de presión; P2F1; Ángulo de incidencia: 90°



## **Presiones obtenidas (II)**

---

Al igual que en el Apéndice1, en el presente mostramos las presiones medias obtenidas en los ensayos. En este caso los correspondientes a la fase 2 de toma de datos realizada en el túnel de viento de capa límite. Se presentan los datos de los dos prototipos, utilizando la nomenclatura presentada esto se corresponde con los datos de P1F2 y P2F2. Como ya se ha explicado en el apartado correspondiente se ha realizado una interpolación sobre dichos datos para poder presentar unos mapas de presiones sobre cada una de las caras. Los datos así conseguidos son:



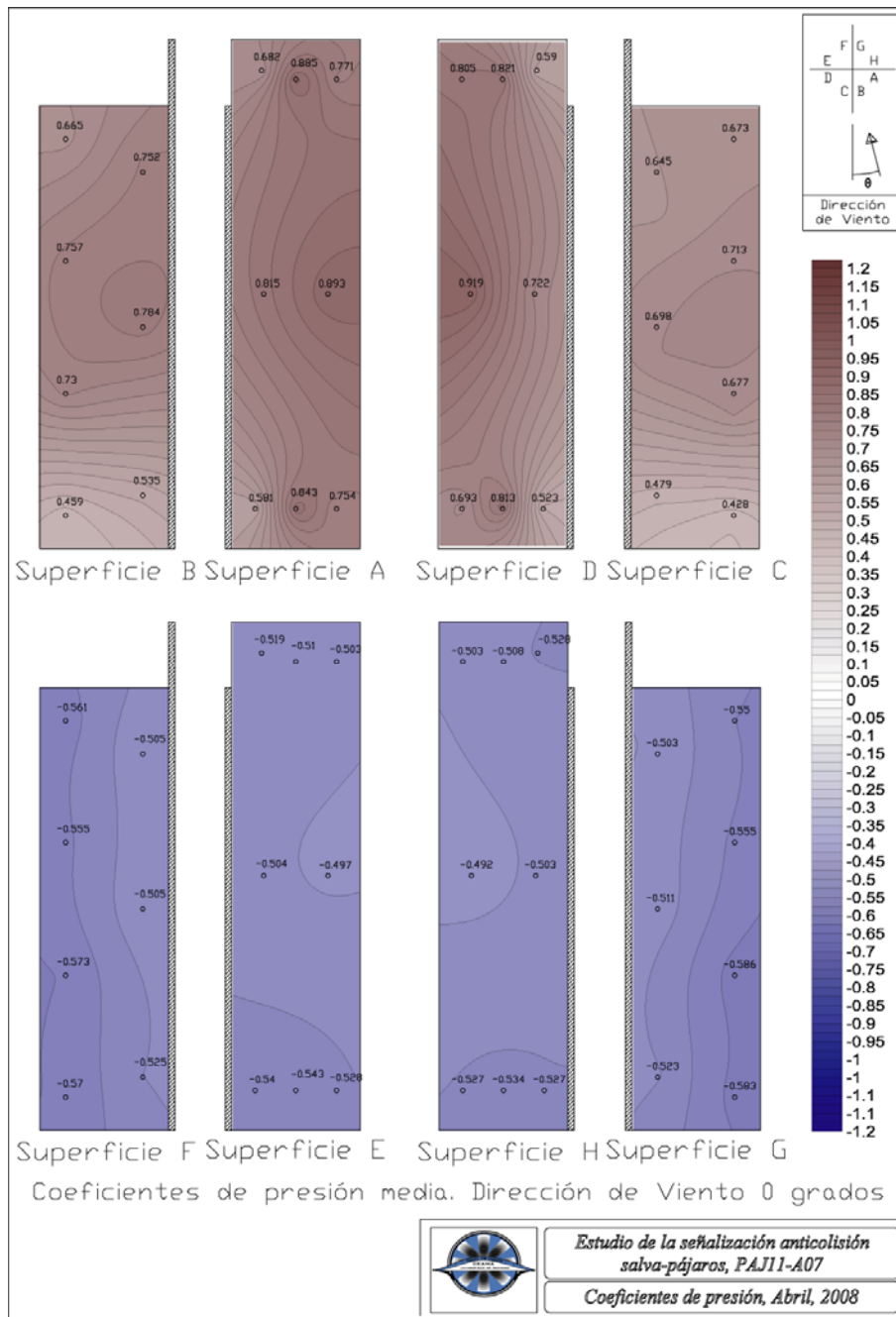


Figura B-1 Coeficientes de presión; P1F2; Ángulo de incidencia: 0°

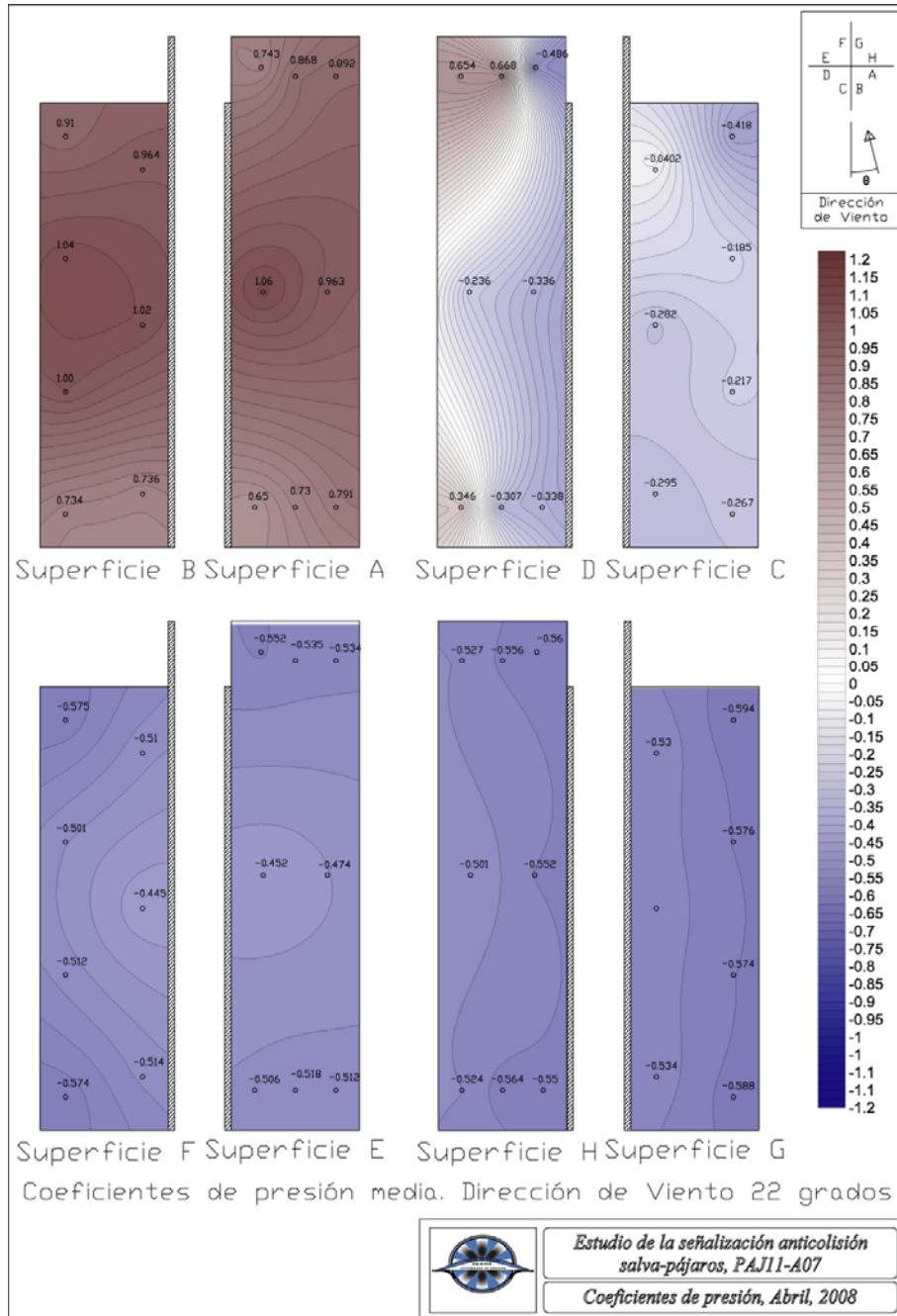


Figura B-2 Coeficientes de presión; P1F2; Ángulo de incidencia: 22.5°

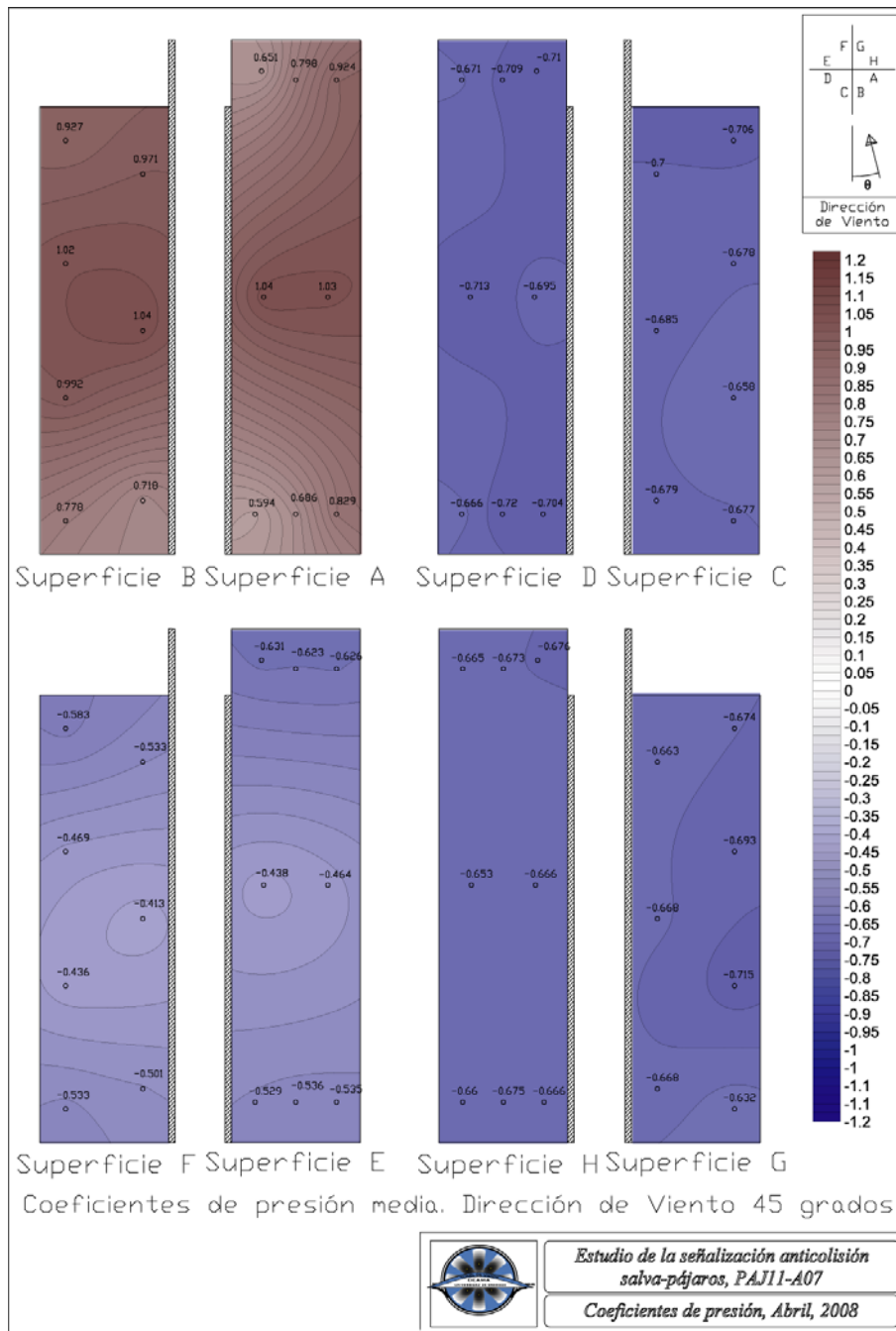


Figura B-3 Coeficientes de presión; P1F2; Ángulo de incidencia: 45°

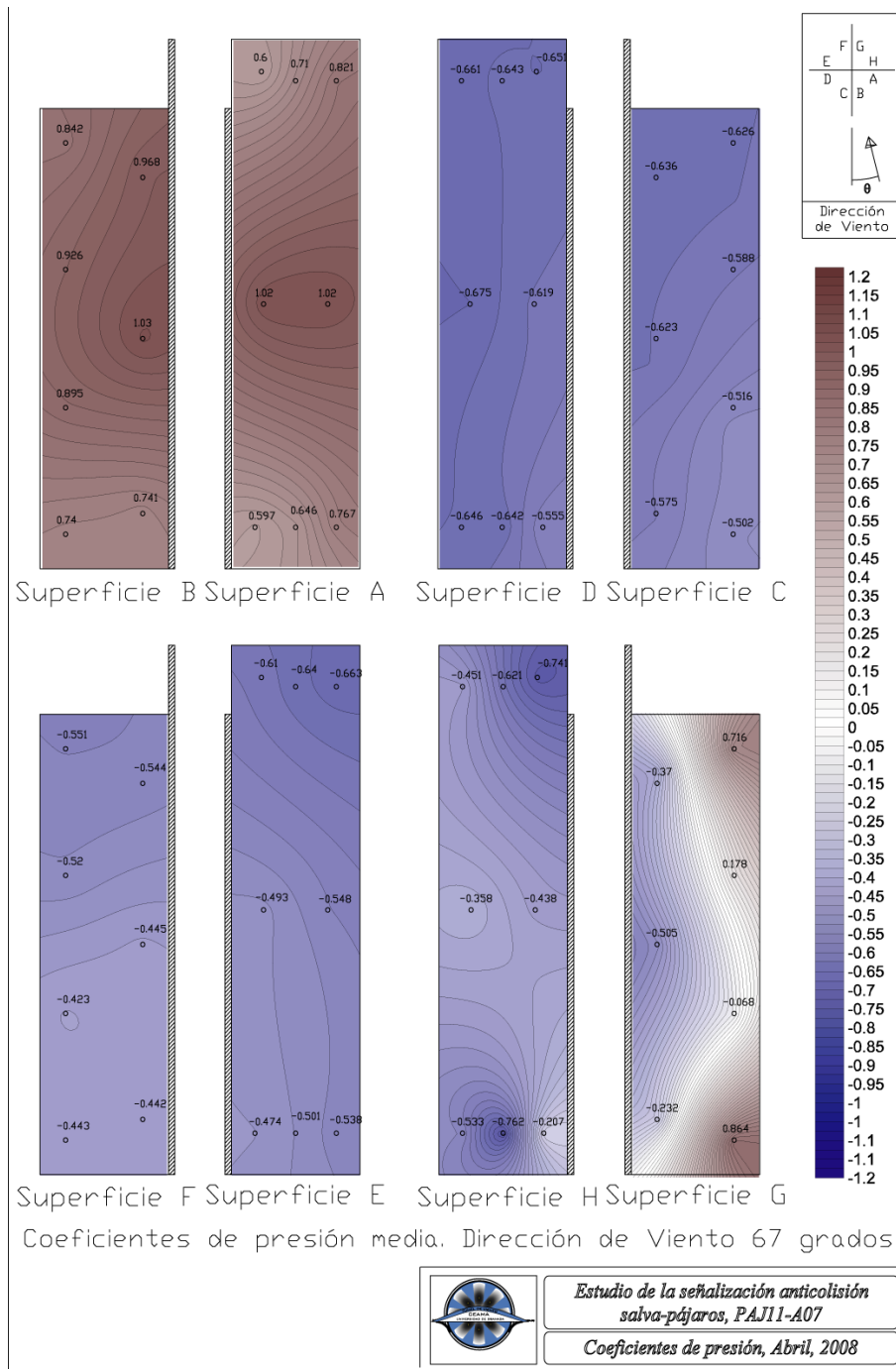


Figura B-4 Coeficientes de presión; P1F2; Ángulo de incidencia: 67.5°

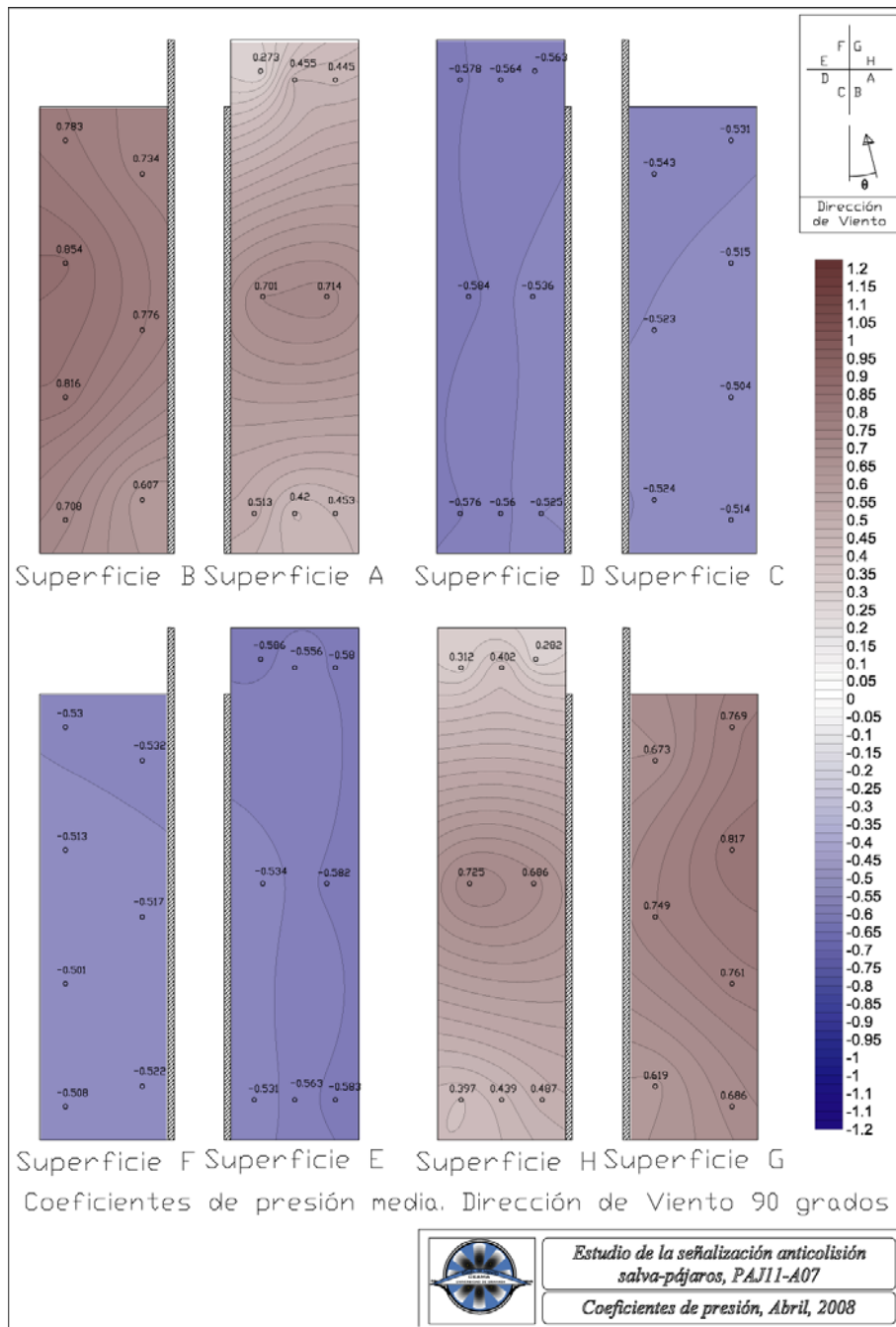


Figura B-5 Coeficientes de presión; P1F2; Ángulo de incidencia: 90°

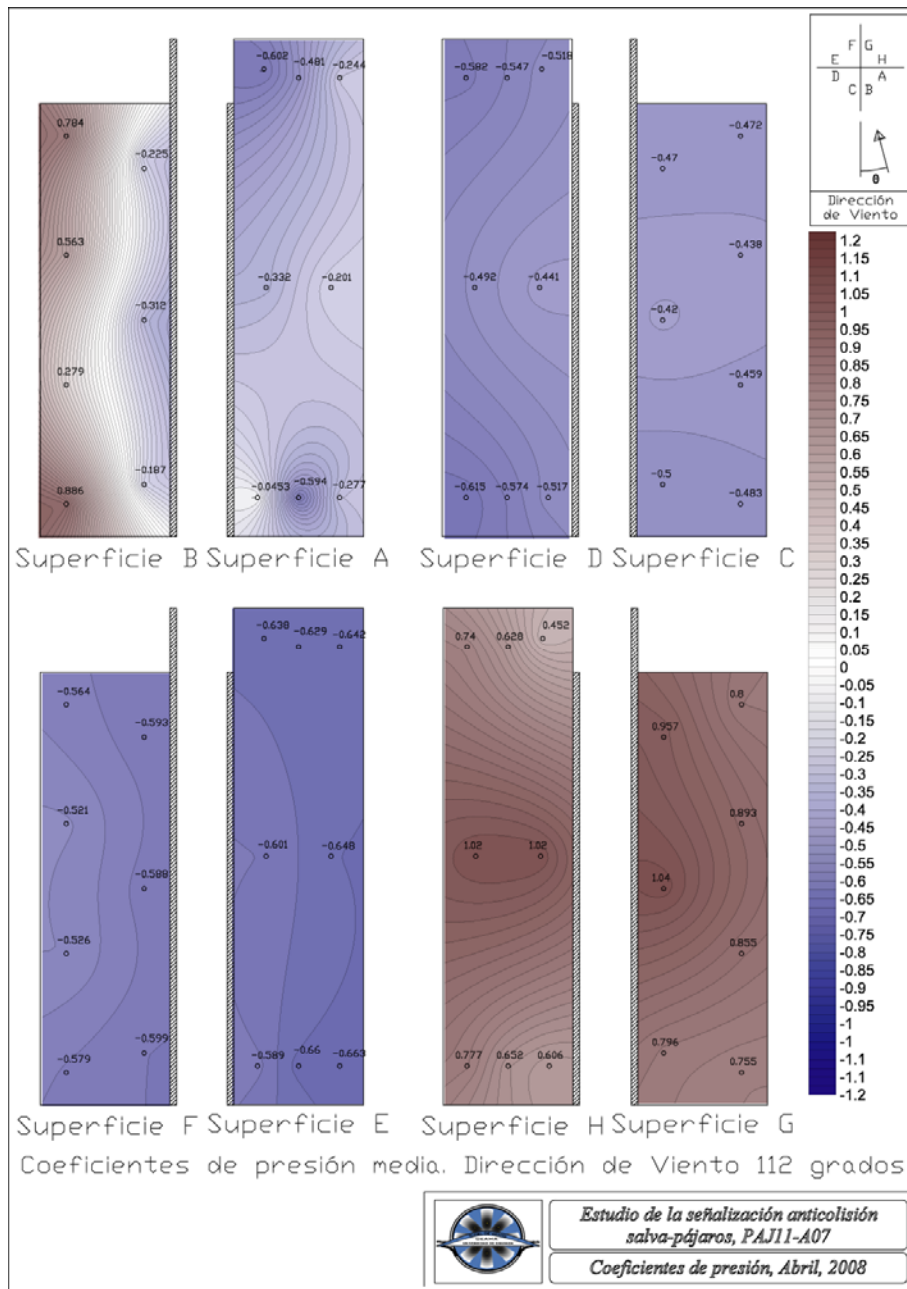


Figura B-6 Coeficientes de presión; P1F2; Ángulo de incidencia: 112.5°

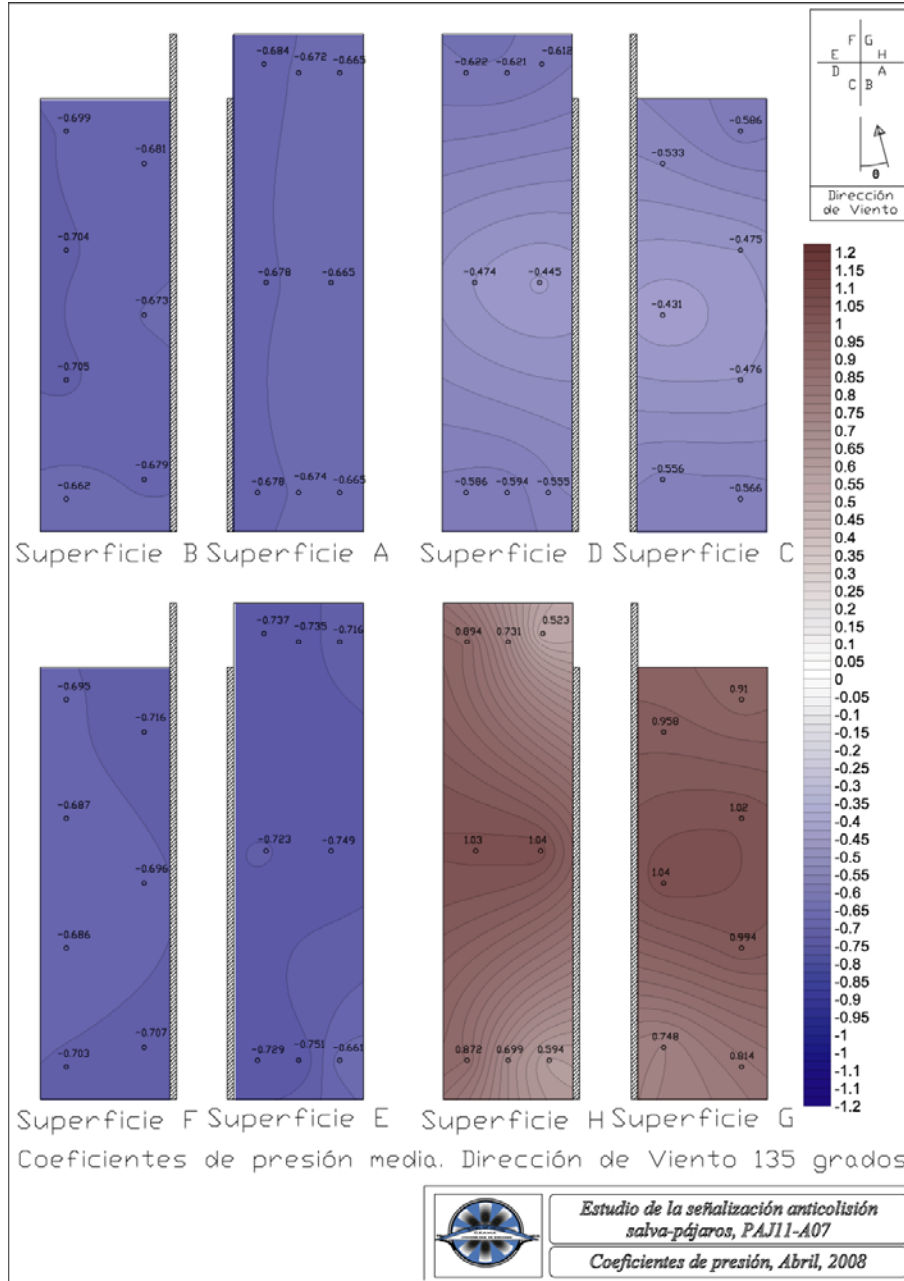


Figura B-7 Coeficientes de presión; P1F2; Ángulo de incidencia: 135°



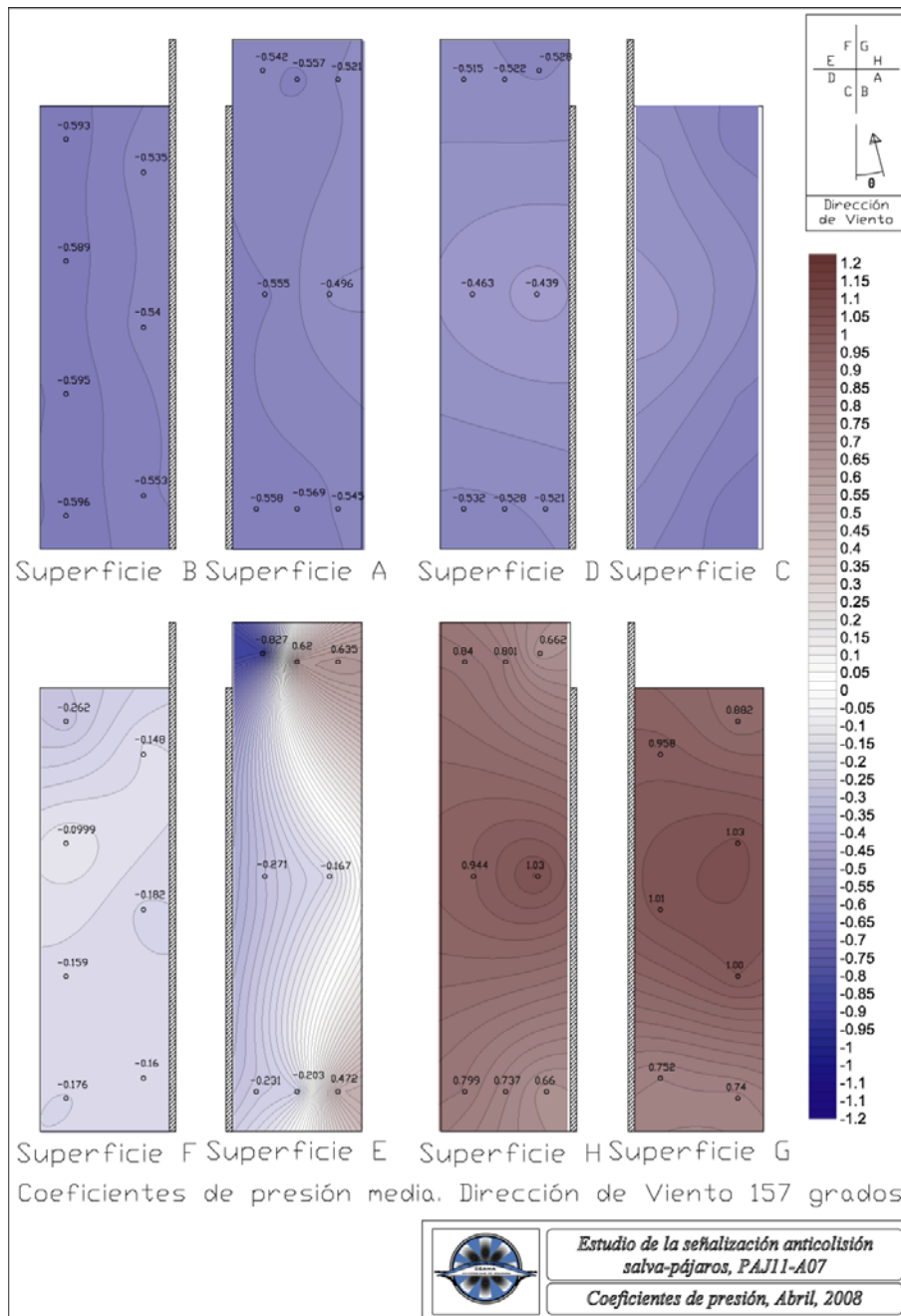


Figura B-8 Coeficientes de presión; P1F2; Ángulo de incidencia: 157.5°



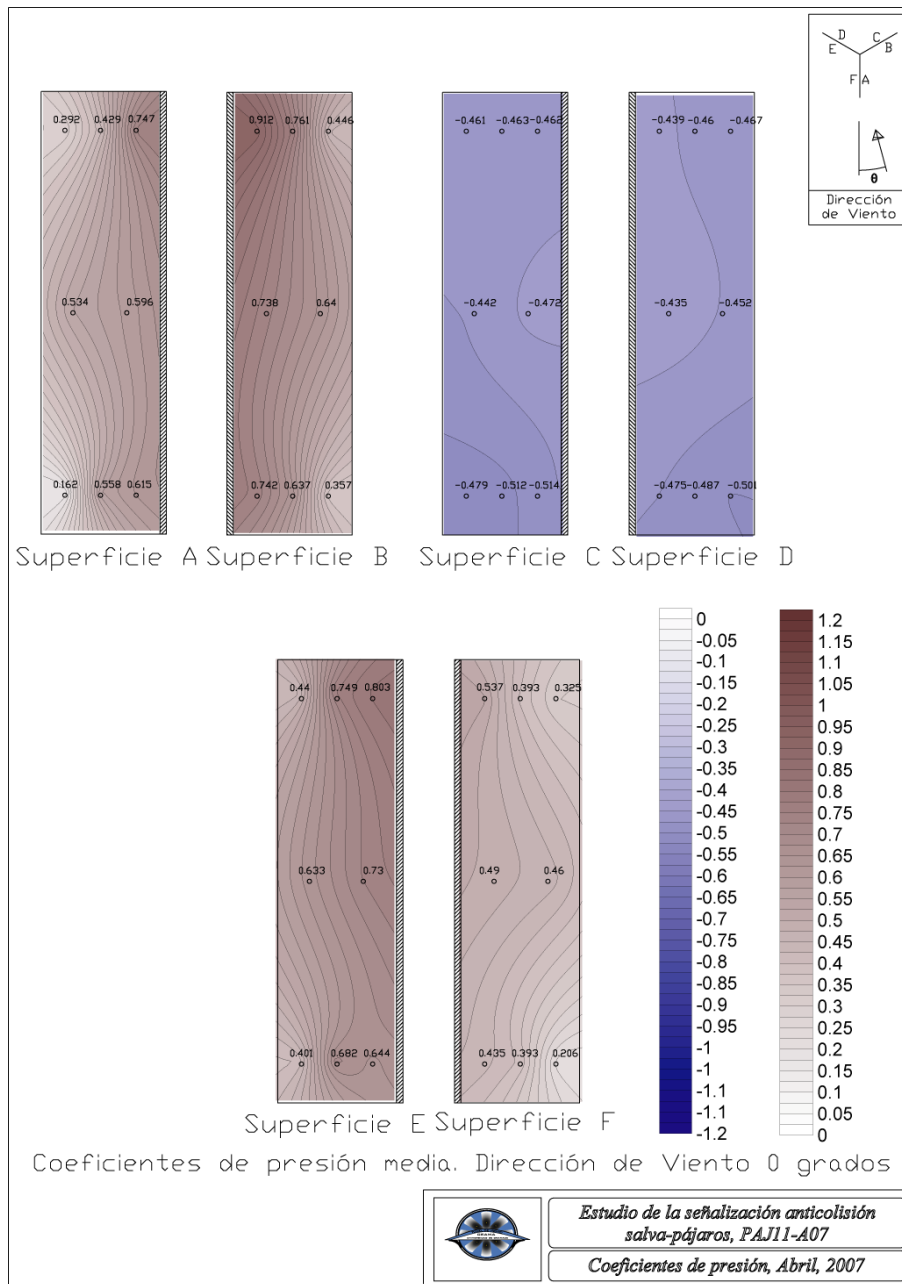


Figura B-9 Coeficientes de presión; P2F2; Ángulo de incidencia: 0°

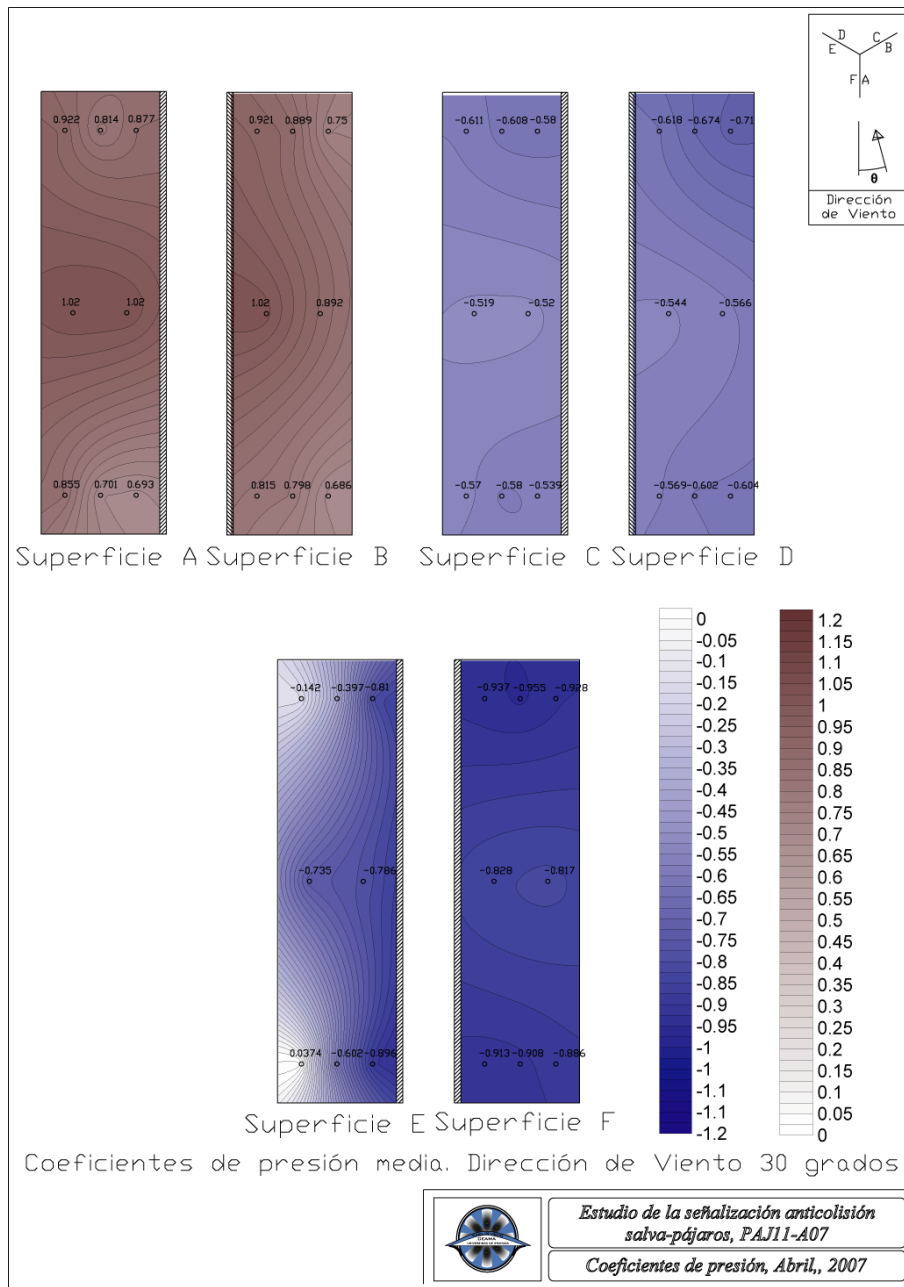


Figura B-10 Coeficientes de presión; P2F2; Ángulo de incidencia: 30°

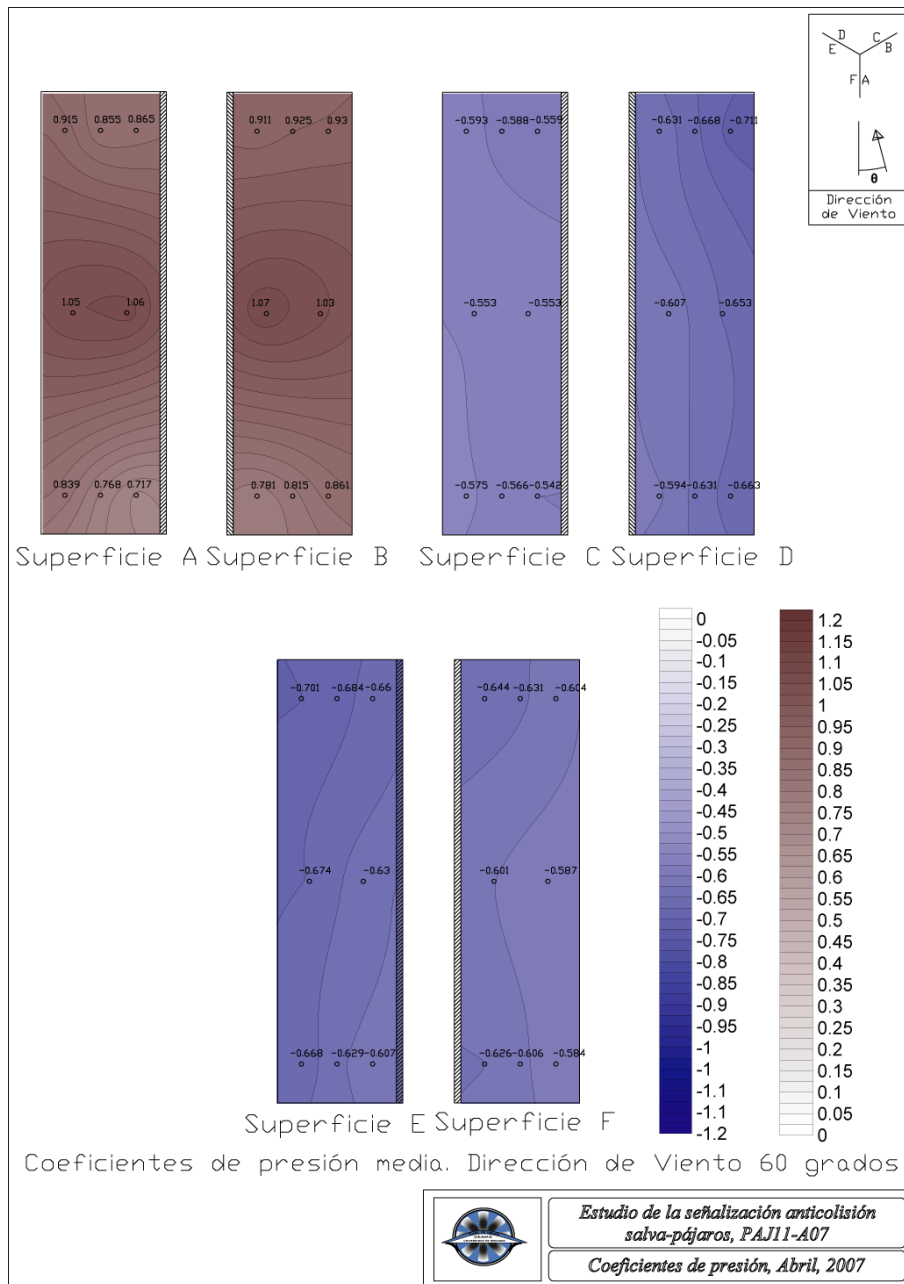


Figura B-11 Coeficientes de presión; P2F2; Ángulo de incidencia: 60°

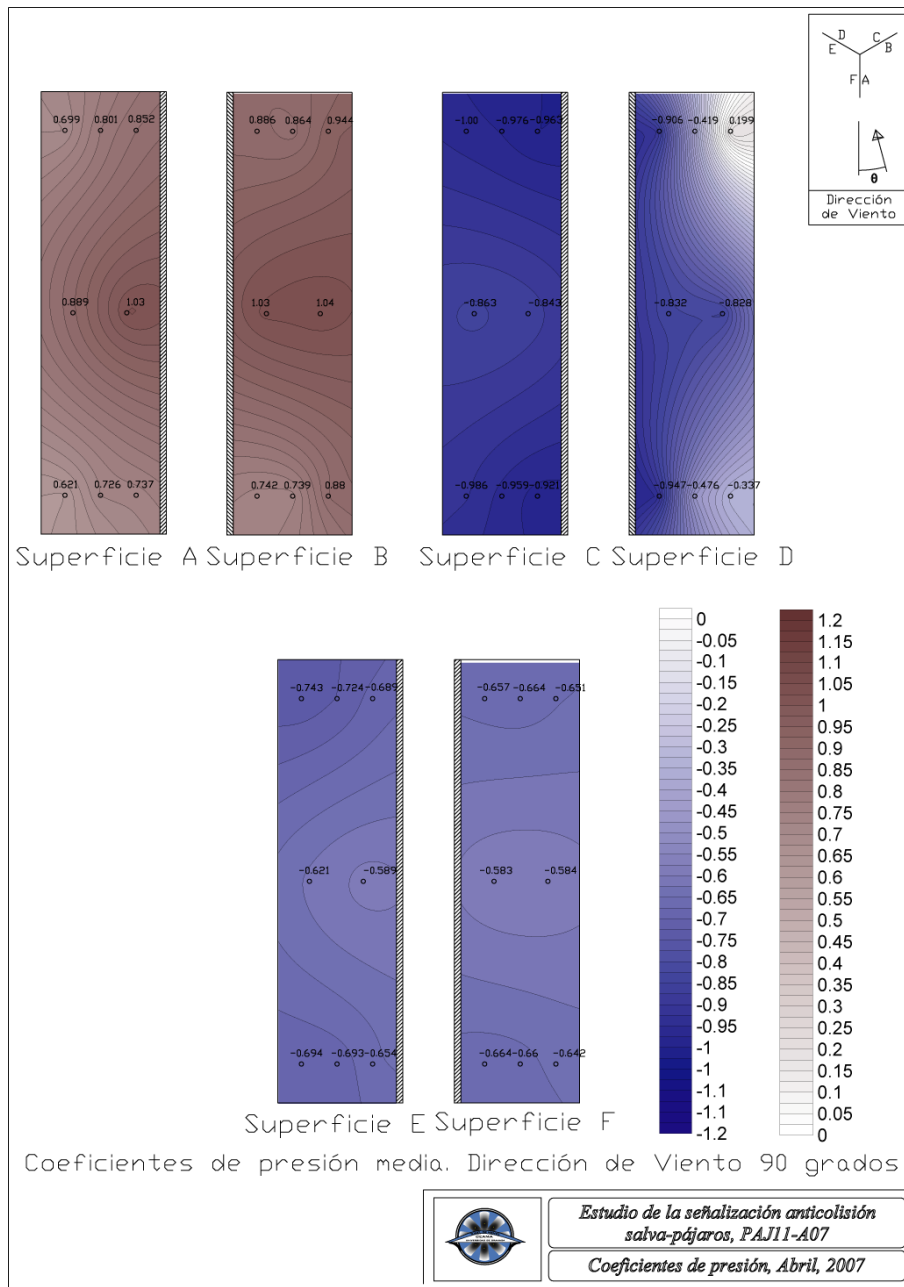


Figura B-12 Coeficientes de presión; P2F2; Ángulo de incidencia: 90°



## Resultados espectrales

A continuación mostramos los resultados espectrales obtenidos del análisis de las series temporales obtenidas. Mostramos los valores para las dos fuerzas ejercidas ( $F_x$  y  $F_y$ ) y para el momento de rotación en torno al eje de unión ( $M_z$ ). Complementariamente se ofrecen los espectros de las velocidades. Los datos se muestran para los dos prototipos.

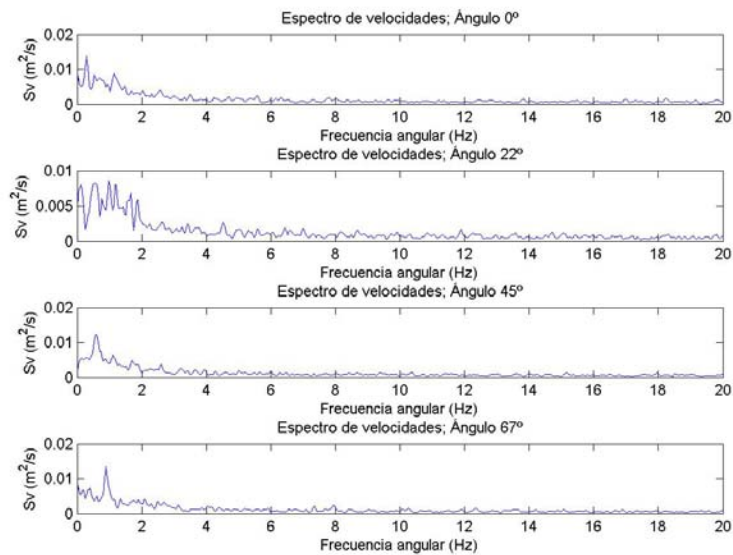


Figura C-1 Espectro de velocidades (I); P1

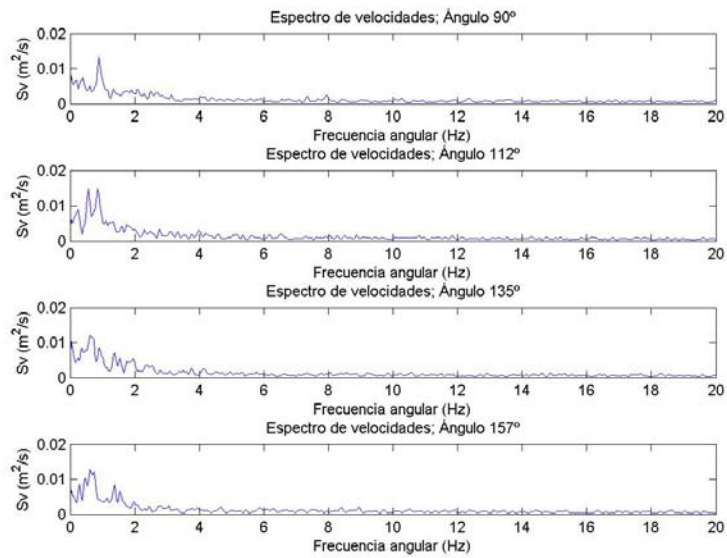


Figura C-2 Espectro de velocidades (II); P1

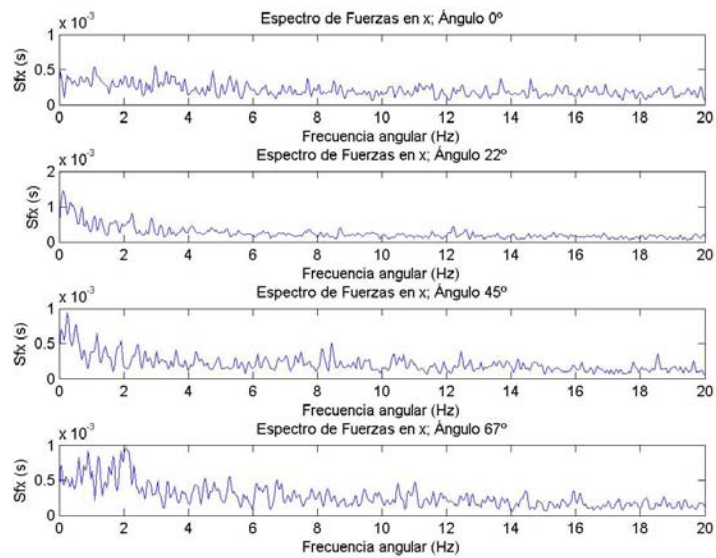


Figura C-3 Espectro de fuerzas en x (I); P1

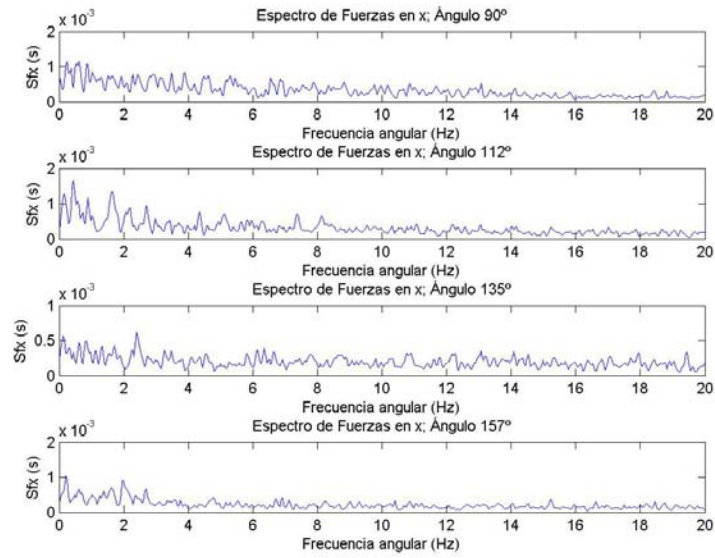


Figura C-4 Espectro de fuerzas en x (II); P1

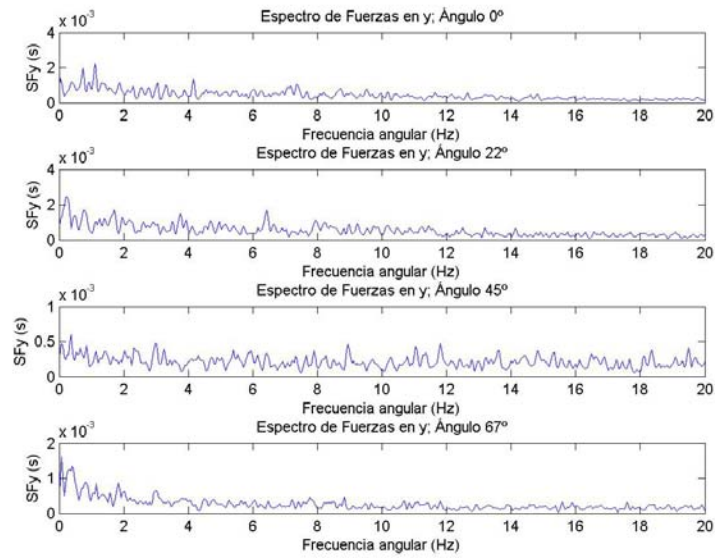


Figura C-5 Espectro de fuerzas en y (I); P1



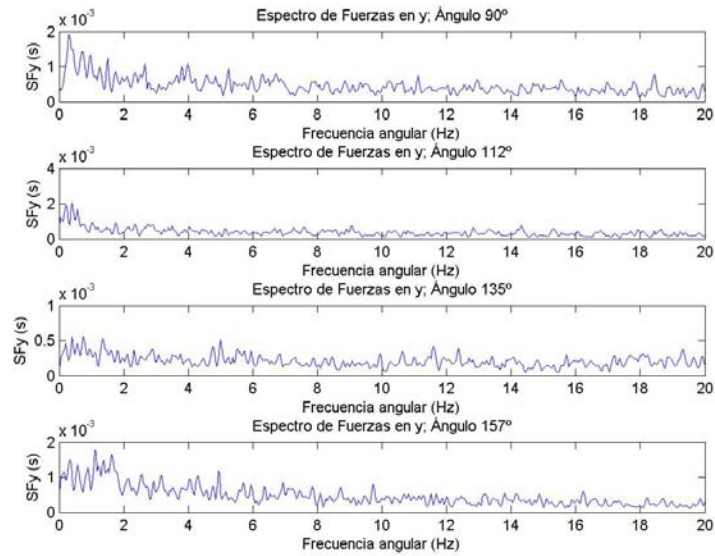


Figura C-6 Espectro de fuerzas en y (II); P1

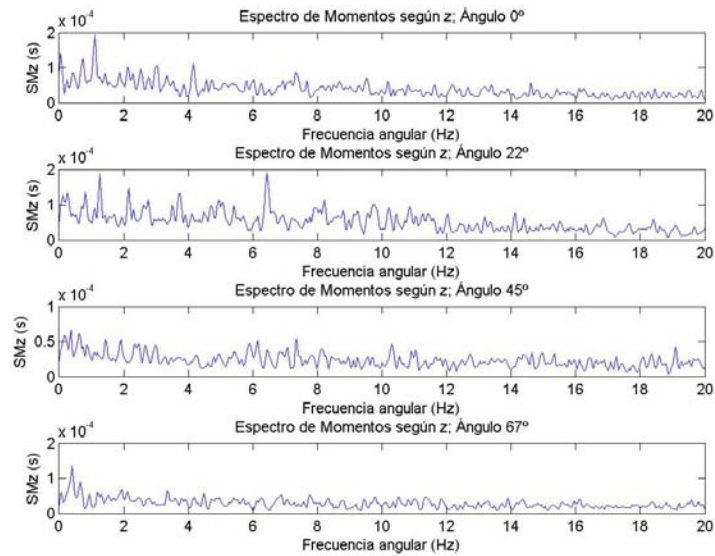


Figura C-7 Espectro de de velocidades; P2

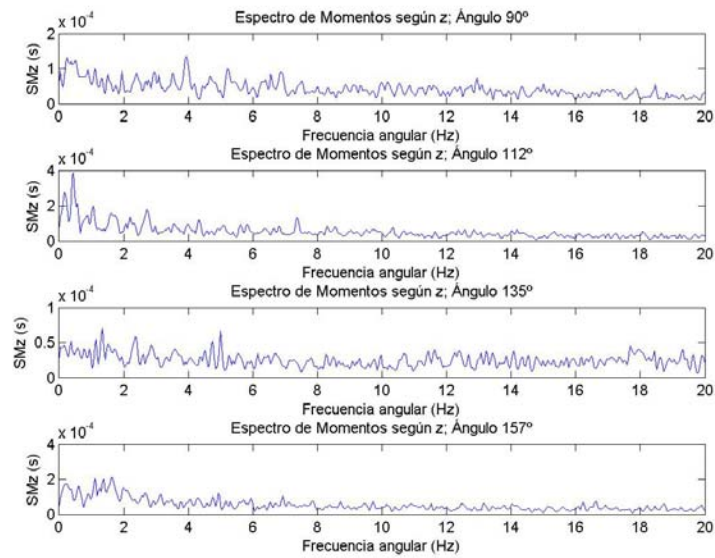


Figura C-8 Espectro de fuerzas en x; P2

Los resultados, para el prototipo 2, son:

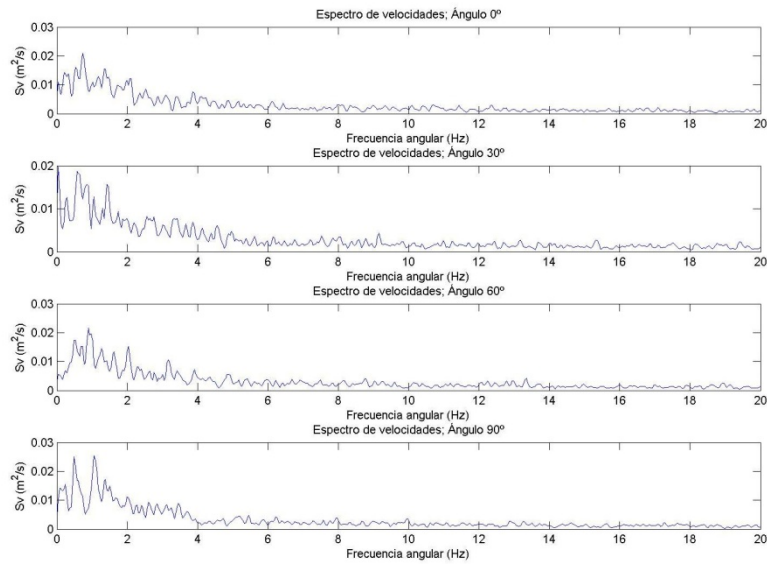


Figura C-9 Espectro de Fuerzas en y; P2

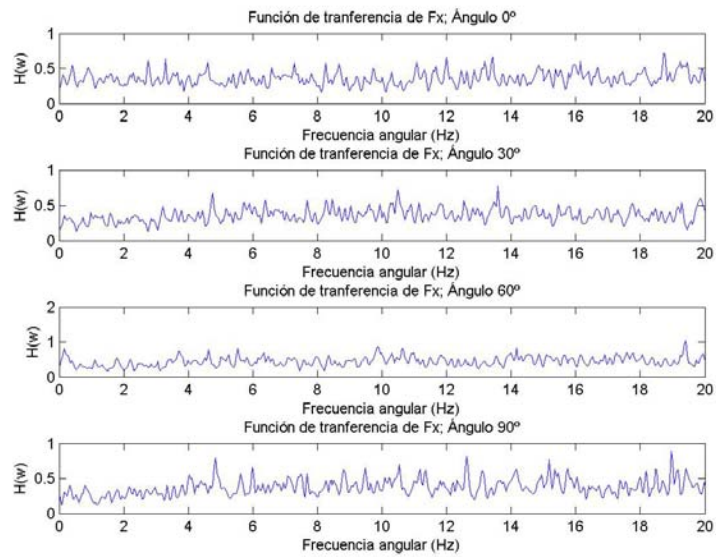


Figura C-10 Espectro de momentos en x; P2

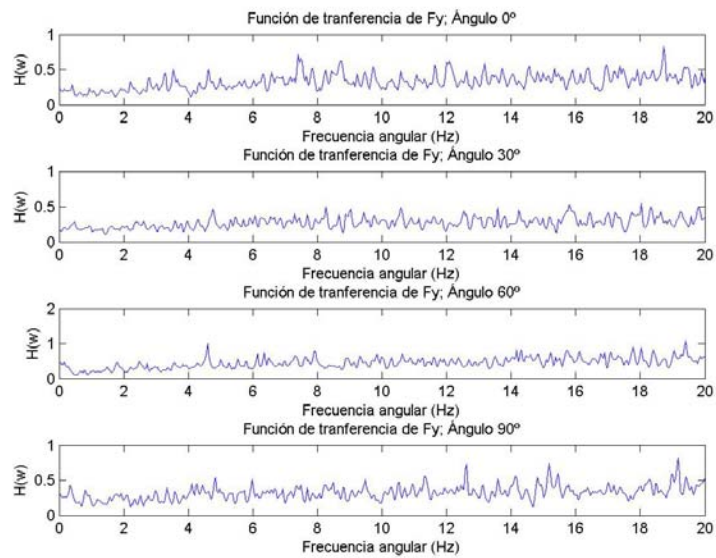
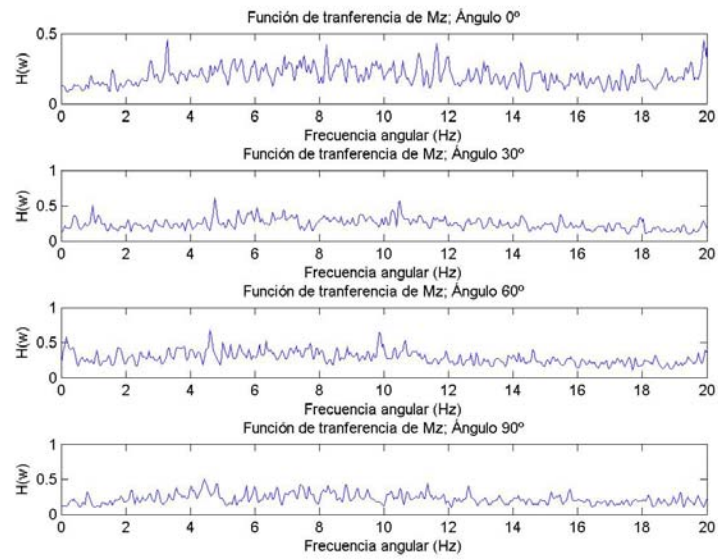


Figura C-11 Espectro de momentos en y; P2



**Figura C-12 Espectro de momentos en z; P2**



## Bibliografía

ALONSO, J.C., J.A ALONSO, and RODRIGO MUÑOZ-PULIDO. "Mitigation of bird collisions with transmission lines through groundwire marking." *Biological conservation* 67 (1994): 129-134.

ALONSO, JAVIER A., and JUAN CARLOS ALONSO. "Colisión de aves con líneas de transporte de energía eléctrica en España." In *Aves y líneas eléctricas*, 61-88. *Querqus*, 1999.

ATHANASSIADOU, M., and I.P. CASTRO. "Neutral flow over a series of rough hills: A laboratory experiment." *Boundary-Layer Meteorology* 101 (2001): 1-30.

BESIO, S., A. MAZZINO, and C.F. RATTO. "Local log-law of the wall in neutrally-stratified boundary-layer flows." *Boundary-Layer Meteorology*, no. 107 (2003): 115-142.

BEVANGER, K., and B. HENRIK. "Bird collisions with power lines - an experiment with ptarmigan." 99 (2001): 341-346.

BEVANGER, KJETIL. "Estimación de mortalidad de aves provocada por colisión y electrocución en líneas eléctricas; Una revisión de la metodología." In *Aves y líneas eléctricas*, 31-60. *Querqus*, 1999.

BITSUAMLAK, G.T., T STATHOPOULUS, F ASCE, and C. BÉDARD. "Numerical evaluation of wind flow over complex Terrain: Review." *Journal of aerospace engineering (ASCE)* 17, no. 4 (2004): 135-145.

BOWEN, A.J. "Modelling of strong wind flows over complex terrain at small geometric scales." *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 91 (2003): 1859-1871.

BOWMAKER, J. K. "The visual pigments, oil droplets and spectral sensitivity of the pigeon." *Vision Research (Pergamon Press)* 17 (1977): 1129-1138.

BROOKE, M. DE L., S. HANLEY, and S.B. LAUGHLIN. "The scaling of eye size with body mass in birds." *Proceedings: Biological Sciences (The Royal Society)* 266, no. 1417 (Febrero 1999): 405-412.

BURKHARDT, DIETRICH. "Birds, Berries and UV." *Die Naturwissenschaften (Springer-Verlag)*, no. 69 (1982): 153-157.

BURKHARDT, DIETRICH. "UV vision: a bird's eye view of feathers." *Journal of Comparative Physiology (Springer-Verlag)* 164 (1989): 787-796.

CAMPAYO MARTIN, J.J., J.A. RAMOS HERNANZ, I. ZAMORA BELVER, and A.J. MAZÓN SAINZ-MAZA. "Avifauna y tendidos eléctrico: actuaciones y posibilidades." Ponencia. <http://www.aedie.org/9CHLIE-paper-send/225-CAMPAYO.pdf>.

- CERMAK, J.E., and J. NICHOLAS. "Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures." *Manuals and Reports on Engineering Practice (ASCE)* 67 (1999).
- CERMARK, J.E. "Development of wind tunnels for physical modelling of the atmospheric boundary layer (ABL)." *A state of the art in Wind Wngineering. New Delhi: New Age International Publishers Limited, 1995. 1-25.*
- COOK, N.J. "On simulating the low third of the urban adiabatic atmospheric boundary layer in a wind tunnel." *Atmospheric Enviroment* 7 (1973): 691-705.
- COOK, N.J. "Wind tunnel simulation on the adiabatic atmospheric boundary layer by roughness, barrier and mixing devices methods." *Journal of Industrial Aerodynamics* 3 (1978): 157-176.
- COUNIHAN, J. "An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel." *Atmospheric Enviroment, 1968: 197-214.*
- COUNIHAN, J., and J. ARMITT. "The simulation of the atmospheric boundary layer in a wind tunnel." *Amospheric enviroment* 2 (1967): 49-71.
- "ESDU 74031." *Characteristics of atmospheric turbulence near the ground; single point data for strong winds (neutral atmosphere), 1982.*
- "ESDU 82026." *Strong winds in the atmospheric boundary layer; mean-hourly wind speeds, 1982.*
- "ESDU 83045." *Strong winds in the atmospheric boundary layer ; discrete gusts speeds, 1982.*
- GRASSÉ, P.P. *Zoología. Vol. 4. 4 vols. Barcelona: Toray-Masson, 1980.*
- HART, N. S. "The visual ecology of avian photoreceptors." *Progress in Retinal and Eye Research (Elsevier Science Ltd.)* 20, no. 5 (2001): 675-703.
- HART, NATHAN S. "The visual ecology of avian photoreceptors." *Progress in Retinal and Eye Research (Elsevier Science Ltd.)* 20, no. 5 (2001): 675-703.
- HOENEISEN, BRUCE. *La situación energética mundial. Quito: Universidad de San Francisco de Quito, 2006.*
- HOFFMAN, G., and H. VÖLKER. *Anatomía y Fisiología de las aves domésticas. Zaragoza: Acribia, 1968.*
- HOLMES, J.D. *Wind loading surfaces. New York: Spon Press, 2001.*
- HUNT, J.C.R., and H. FERNOHOLZ. "Wind-tunnel simulation of the atmospheric boundary layer: a report on Euromech 50." *Journal of fluid mechanics* 70, no. 3 (1974): 543-559.
- HÜPPOP, O. "Aircraft, wind turbines and overhead power lines: Disturbaances and obstacles as problems for birds." *Bird and aviation* 24, no. 2 (2004).
- IRWIN, H.P.A.H. "The design of spires for wind simulation." *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 7 (1981): 361-366.

- ISHIHARA, T, K. HIBI, and A OIKAWA. "A wind tunnel study of turbulent flow over a three-dimensional steep hill." *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 1999: 95-107.
- JANS, GUYONNE F.E., ALFONSO LAZO, and MIGUEL FERRER. "Use of raptor models to reduce avian collisions with power lines." *The raptor Research Foundation* 33, no. 2 (1999): 157-159.
- JANSS, GUYONNE F.E. "Avian mortality from power lines: a morphologic approach of a species-specific mortality." *Biological Conservation*, no. 95 (2000): 353-359.
- JANSS, GUYONNE F.E., and MIGUEL FERRER. "La electrocución de aves en los apoyos del tendido eléctrico: experiencias europeas." In *Aves y líneas eléctricas*, 155-174. *Querqus*, 1999.
- JANSS, GUYONNE F.E., y MIGUEL FERRER. «Avian electrocution mortality in relation to pole design and adjacent habitat in Spain.» *Bird Conservation International (BirdLife International)* 11 (2001): 3-12.
- JENSEN, M., and N. FRANK. *Model-scale tests in turbulent wind: Part I. Copenhagen: The danish technical press, 1963.*
- KAIMAL, J.C., D.A. WYNGAARD, Y. IZUMI, and O.R. COTÉ. "Spectral characteristics of surface-layer turbulence." *Quart. J.R. Meteorol. Soc* 98 (1972): 563-589.
- LEHMAN, ROBERT N., ALLAN R. ANSELL, MONTE G. GARRETT, A. DEAN MILLER, and RICHARD OLENDORFF. "Prácticas recomendadas para la protección e rapaces en las líneas eléctricas: la historia americana." In *Aves y líneas eléctricas*, 133-154. *Querqus*, 1999.
- MATHIASSEN, SVEN. "Cisnes y tendidos eléctricos, principalmente en Suecia." In *Aves y líneas eléctricas*, 89-120. *Madrid: Querqus*, 1999.
- MILLER, C.A., and A.G. DAVENPORT. "Guidelines for the calculation of wind speed-ups in complex terrain." *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 74 (1998): 189-197.
- MOYES, CHRISTOPHER D., and PATRICIA M. SCHULTE. *Principles of animal Physiology. San Francisco: Pearson, 2006.*
- NAVAZO, ALFONSO, and ALFONSO LAZO. "La nidificación de aves en la red de transporte de electricidad de España: Evaluación, prevención y corrección de la problemática asociada." In *Aves y líneas eléctricas*, 187-216. *Querqus*, 1999.
- OETKEN, G., T.W. PARKS, and H.W. SCHUSSLER. "8.1 A computer program for digital interpolator design." In *Programs for digital signal processing. New York: Digital Signal Processing Committee ; IEEE, 1979.*
- PLATE, E. (ed). *Engineering Meteorology. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.*
- "ROM 04.95." (*Acciones climáticas II: El viento ; Puertos del Estado*) 1995.



SIERPUTOWSKI, P., J. OSTROWSKI, and A. CENEDESE. "Experimental study of wind flow over the model of a valley." *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, no. 57 (1995): 127-136.

SIMIU, E., and R.H. SCALAN. *Wind effects on structures* 3rd edition. New York: John Wiley & sons, 1996.

TAMPIERI, F., I. MAMMARELLA, and A. MAURIZI. "Turbulence in complex terrain." *Boundary layer meteorology*, no. 109 (2003): 85-97.

TERRÉS-NICOLI, J.M., and M.A. LOSADA. "Proyecto de túnel aerodinámico de baja velocidad." *Grupo de Puertos y Costas ; Universidad de Granada*, 2000.

VAN ROOYEN, CHRIS S., and JOHN A. LEDGER. "Aves y estructuras eléctricas: Avances en sudáfrica." In *Aves y líneas eléctricas*, 217-243. *Querqus*, 1999.

VARELA, FRANCISCO J., ADRIAN G. PALACIOS, and TIMOTHY H. GOLDSMITH. *Vision, brain and behavior in birds*. Edited by Bischof and Zeigler. Cambridge: MIT Press, 1993.