



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Tesis doctoral

**Modelización de un captador eólico
de alta eficiencia**

Doctorando: Enrique Juan García-Bustelo García

Directores: Ramón Ferreiro García

José A. Orosa García

A Coruña 2012

Índice	
Resumen	7
Motivación	7
Objetivos	9
Desarrollo metodológico	11
Capítulo 1: Introducción	15
1.1. Factores en la conversión eólica	15
1.2. Perspectivas del potencial eólico	17
1.3. Panorama eólico español	20
1.3.1. Potencial eólico en Galicia	24
1.4. Líneas investigación y desarrollo	27
1.4.1. Modelos de energía predecible	27
1.4.2. Transporte de energía eléctrica	28
1.4.3. Prototipos adaptativos	28
1.4.4. Concentradores eólicos	28
1.5. Referencias	31
Capítulo 2: Materiales y Métodos	35
2.1. Introducción	35
2.2. Materiales	35
2.2.1. Componentes del Túnel de Viento	36
2.2.2. Concentrador eólico	38
2.2.3. Convertidor de energía	45
2.2.4. Dispositivos de control	47
2.2.5. Dispositivos de medida	48
2.2.6. Software	49
2.3. Métodos	61
2.3.1. Modelo termodinámico del aire húmedo	61
2.3.2. Modelo fluido-dinámico del aire húmedo en el proceso	73
2.3.3. Dimensionado físico del modelo	82
Capítulo 3: Discusión de resultados	89
3.1. Diseño de un túnel de viento de aire húmedo	89
3.1.1. Introducción	89
3.1.3. Discusión	100
3.1.4. Referencias	106
3.2. Diseño del concentrador eólico	109
3.2.1. Introducción	109
3.2.2. Materiales y métodos	110
3.2.3. Discusión	117
3.2.6. Ensayo de laboratorio y simulación	127
3.2.7. Discusión	149
3.2.8. Referencias	151
3.3. Implementación de parques eólicos con concentradores	153
3.3.1. Introducción	153
3.3.2. Metodología	154
3.3.3. Discusión de resultados	155
3.3.3.4. Referencias	162
3.4. Efecto del cambio climático en parques eólicos	164
3.4.1. Introducción	164

3.4.2. Materiales y métodos	166
3.4.3. Discusión	168
3.4.4. Referencias	177
Capítulo 4: Conclusiones	181
4.1. Túnel de viento	181
4.2. Concentrador eólico	181
4.3. Parque eólico	181
4.4. Cambio climático	182
5. Figuras, tablas y simbología	183
6. Anexos	189
6.1. Aparatos	189
6.2. Patente	189
A Convertidor de energía	191
A. Dispositivos de control	195
A. Dispositivos de medida	197
7. Producción de la tesis	209
8. Agradecimientos	211

Resumen

Motivación

La transformación de la energía eólica en mecánica de rotación mediante convertidores eólicos es un procedimiento que se remonta a los orígenes de explotación de la naturaleza por el hombre. Este recurso natural y renovable ha sido a lo largo de los tiempos aprovechado mediante diferentes tipos de máquinas operando en condiciones de baja eficiencia bajo el coeficiente de Betz y durabilidad mecánica.

En la actualidad se ha avanzado en los sistemas constructivos mejorando los aspectos mencionados para obtener máquinas más robustas y energéticamente más eficientes. No obstante, dichas máquinas trabajan con un fluido complejo formado por un gran número de gases y vapor de agua; este fluido que denominamos habitualmente como aire húmedo puede cambiar su contenido energético ante variaciones de presión, temperatura y humedad.

Bajo el punto de vista energético con el fin de su aprovechamiento, el aire húmedo lo podemos considerar formado por una masa de aire seco constituido por: nitrógeno, oxígeno, anhídrido carbónico, argón, y vapor de agua, siendo este último componente el que varía en márgenes más amplios.

Conocida la potencia eólica que posee una masa de aire en movimiento y que viene expresada según la ecuación 0.1.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (0.1)$$

ρ es la densidad (kg/m^3)

A es el área (m^2)

v es la Velocidad (m/s)

Esta expresión nos indica que la energía eólica es directamente proporcional a la densidad, superficie normal a la corriente de fluido incidente y también varía con la tercera potencia de la velocidad.

La ingeniería actual concentra sus esfuerzos en lograr máquinas que operen con mayor superficie de área barrida, asumiendo como no manipulables los valores de densidad y velocidad del aire que se consideran impuestos por el medio natural y evaluables a través de mapas eólicos zonales, siendo este el indicativo más recurrido para la colocación de la máquina eólica más adecuada a un emplazamiento dado.

La falta de estimación de datos en cuanto a presión, temperatura y principalmente humedad del aire origina imprecisiones importantes a la hora de evaluar el contenido energético que posee la masa de aire húmedo para la multitud de situaciones que se pueden presentar y ello motiva la realización de

un estudio pormenorizado de su incidencia en la transformación energética llevada a cabo en los generadores eólicos.

El contenido energético de una determinada masa de aire húmedo viene expresado por su entalpía específica, ecuación 0.2.

$$h = m_v \cdot \lambda_0 + c_{pv} \cdot m_v \cdot T + c_{pa} \cdot m_a \cdot T \quad (0.2)$$

m_v masa de vapor de agua

m_a masa de aire seco

λ_0 calor latente de condensación

c_{pv} calor específico del vapor de agua

c_{pa} calor específico del aire seco

T Temperatura de mezcla

Ésta expresión pone de manifiesto la dependencia de la energía en función de la masa de vapor de agua presente, y del calor latente en el cambio de estado.

De igual modo, también se establece una relación entre las velocidades incidente y saliente del dispositivo transformador dependiente de la entalpía según la ecuación 0.3.

$$v_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2) + v_1^2} \quad (0.3)$$

Por tanto, podemos concluir que el contenido de humedad define el estado energético del aire a través de la entalpía y esta a su vez, es el parámetro determinante sobre la velocidad de la vena fluida; parámetro que participa en la potencia disponible de forma exponencial según la ecuación 0.1.

Teniendo en cuenta estas dependencias puede esperarse que, cualquier dispositivo capaz de actuar sobre la humedad, temperatura y presión del aire húmedo alterando sus valores, produzca una modificación en la velocidad del fluido y por tanto también sobre la potencia eólica extraída.

Es motivo de esta tesis realizar un análisis de la incidencia de estos parámetros sobre la transformación energética que se realiza en los convertidores eólicos, para ello se tendrá en cuenta factores termodinámicos, geométricos y fluido dinámicos.

Objetivos

En base a los motivos que dan lugar a la realización de esta tesis, planteados en el apartado anterior, los objetivos a alcanzar son múltiples y están encaminados a obtener conclusiones que indiquen la conveniencia o no de actuar sobre la temperatura, presión y humedad del aire húmedo para obtener una mejora en el rendimiento de la transformación energética respecto a los valores en los que a día de hoy operan las máquinas eólicas.

Como primer objetivo, se plantea el estudio psicrométrico de una corriente de aire húmedo que, bajo unas condiciones preestablecidas y manipulables de velocidad, temperatura y humedad circule a través de un volumen de control (concentrador) transformando parte de la energía que contiene en base a una disminución de presión. Esta transformación será dependiente de las condiciones de contorno en la entrada y salida así como de las secciones transversales de paso del tal forma que, cabe esperar una relación entre la sección de paso y las condiciones termodinámicas de entrada y salida, en las que la transformación energética sea máxima. Este objetivo, puede alcanzarse con la aplicación de los modelos termodinámicos que gobiernan el comportamiento del aire húmedo, y así obtener una geometría eficiente que indique las secciones de paso más convenientes en el proceso de dicha transformación.

Como segundo objetivo, se plantea el análisis y tratamiento de datos de la geometría obtenida mediante software informático en base a la mecánica de fluidos computacional. La consecución de este objetivo es muy reveladora en el aspecto de las conclusiones a alcanzar ya que, a diferencia del primer estudio, mediante su aplicación se obtienen resultados en relación a los parámetros de forma del volumen de control analizado; acercando por tanto el análisis teórico al comportamiento real.

Como tercer objetivo, se plantea la elaboración del modelo físico construido según la geometría estudiada, procediendo a su ensayo, comportamiento y comparación de los resultados obtenidos con los correspondientes a los modelos termodinámicos aplicados.

La operación óptima atiende al principio de Betz que establece el rendimiento máximo que puede obtenerse de una máquina eólica definida como la relación entre la energía utilizada y la energía disponible, a través del coeficiente de potencia y cuyo valor máximo viene indicado en la ecuación 0.4.

$$Cp_{\max} = \frac{\frac{8}{27} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3} = \frac{16}{27} = 0,59 \quad (0.4)$$

Se desprende que el valor máximo se alcanza cuando la relación de velocidades en el dispositivo transformador toma un valor $k = 1/3$. Para lograr este fin, se

analizará la conveniencia de disponer un difusor aguas abajo del dispositivo transformador que, convirtiendo energía de velocidad en energía de presión aproxime el funcionamiento de la máquina al coeficiente de potencia máximo establecido por Betz.

La aplicación de estos principios puede dar lugar a la consecución de máquinas eólicas más compactas que operando a coeficientes de potencia máximos resulten competitivas frente a otras máquinas existentes ya en el mercado, de mayor superficie de área barrida y que hoy día operan en valores lejanos al coeficiente máximo establecido por Betz tal y como se muestra en la figura 0.1.

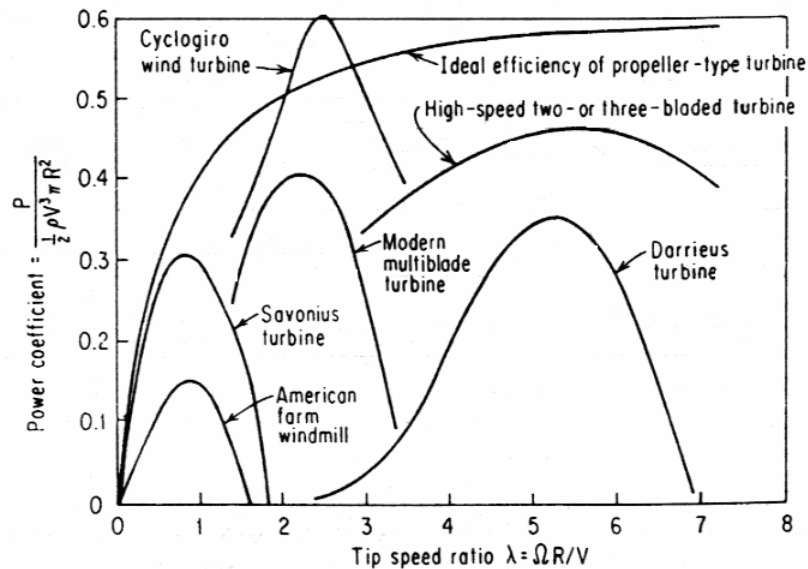


Figura 0.1. Coeficiente de potencia en las diferentes máquinas eólicas.

Se tratará de evaluar el incremento de potencial eólico al actuar sobre las propiedades termodinámicas del aire húmedo ya que esto puede traer como consecuencia el aprovechamiento de energía del viento a baja velocidad que presentaría la ventaja de construir máquinas de menor altura respecto a las existentes, evitando así los riesgos de accidentes laborales en cuanto a la instalación, manipulación y mantenimiento que gravan los equipos actuales.

Por último, como cuarto objetivo se realiza un estudio en relación al cambio climático previsible en un futuro próximo para evaluar la incidencia que tendrán las características termodinámicas de aire en la transformación de la energía eólica.

Desarrollo metodológico

Siendo la finalidad de este estudio evaluar la conveniencia de los concentradores eólicos en el aprovechamiento de la energía cinética del viento y con el fin de poder realizar ensayos reales que corroboren las hipótesis planteadas, se recurre a establecer unos parámetros de diseño en el modelo a construir que sean afines a los medios disponibles en el laboratorio de ensayos, tanto con respecto al diámetro del ventilador ubicado en el túnel de viento como con respecto a la instrumentación disponible.

Se establece así, generar el modelo físico de un concentrador con una superficie circunferencial de entrada de $0,5 \text{ m}^2$ a la que se le aplica el modelo matemático para generar la geometría de una tobera convergente que ofrezca una caída de presión lineal. Obtenidas las diferentes secciones intermedias, su longitud se limita en aquella que produce el cambio de estado del vapor de agua contenido en la masa de aire para unas condiciones de contorno en la sección de entrada preestablecidas. Mediante este procedimiento, puede evaluarse la variación de energía experimentada por el flujo de aire entre las secciones de entrada y salida del concentrador y que serán debidas fundamentalmente a la disminución de presión y al calor latente de condensación cedido por el vapor de agua.

El modelo físico evaluado será de sección circular persiguiendo una total simetría y de este modo evitar cualquier perturbación que por efectos de forma pueda perturbar el flujo y por tanto las mediciones realizadas.

Se configura así un concentrador consistente en una tobera convergente de caída de presión lineal con una sección de entrada de $0,5 \text{ m}^2$ y una longitud de 300 mm que se analizará bajo diferentes condiciones termodinámicas del aire en cuanto a velocidad, humedad, temperatura y presión.

El procedimiento consiste por tanto en realizar primeramente el modelo termodinámico que corresponde a los parámetros planteados implementando las ecuaciones que rigen el proceso mediante software EES (Engineering Equation Solver). Obtenida la geometría del concentrador implementada en el software EES, se hace necesario considerar los parámetros fluido dinámicos en relación a la forma del conducto ya que deben tenerse en cuenta factores como la rugosidad y la capa límite generada; para ello se recurre a la mecánica de fluidos computacional, generando dicha geometría en SolidWorks y tratándola en el software EFD.Lab v8 (Engineering Fluid Dynamics) que lleva integrado para el análisis del aire, la humedad relativa. Una vez realizado este paso, se procede a la generación física del modelo y ensayo en el túnel de viento a fin de obtener unos resultados reales comparables con los obtenidos por los dos procedimientos anteriores.

Capítulo 1

Capítulo 1: Introducción

1.1. Factores en la conversión eólica

Los emplazamientos óptimos para la producción de energía eólica no son abundantes por lo que la fabricación de nuevos y más eficientes generadores plantea todo un reto. En los últimos tiempos las tendencias apuntan al recondicionamiento de los parques eólicos existentes, estrategia con la cual puede conseguirse aumentar el rendimiento de un 5 a un 10%. Esto significa que las turbinas antiguas y desfasadas deben ser sustituidas por sus equivalentes modernas y eficientes. Respecto a la integración en la red se trabaja en la investigación de plantas virtuales (virtual power plant VPP) y el desarrollo de redes inteligentes (e-grid o smart grid).

La tecnología en diseño se orienta a la reducción de la carga, prolongación de la vida útil y a la aplicación de nuevos materiales y métodos de producción. Entre las mejoras conseguidas cabe destacar la disminución de masa del cabezal en las máquinas tripala.

Otro de los campos de investigación es el aumento de la vida operacional de las turbinas, las cuales se diseñan bajo un esquema de trabajo de veinte años. Esto supone aproximadamente 160.000 horas operacionales difícilmente alcanzables en la actualidad bien por condiciones atmosféricas adversas o de trabajos de mantenimiento del equipo.

En aplicaciones marinas las exigencias son aún mayores, por cuanto debe considerarse la fiabilidad de la instalación, el desarrollo de estrategias de mantenimiento dedicado y optimización de la estructura de cimentación, existiendo así mismo una limitación en cuanto a las zonas costeras explotables debido a las líneas de tráfico marítimo. Otra cuestión clave es la reducción del riesgo económico operacional para lo cual deben hacerse predicciones de producción de energía eólica a largo plazo. Pero para estudiar la integración de la energía eólica en las redes de distribución y transporte deben utilizarse predicciones de energía eólica en el corto plazo. En este sentido se utilizan diferentes métodos de análisis que establece la distribución probable (F) en la dirección del viento (v), expresión 1.1.

$$F(V_k) = \exp\{-\exp[-\alpha(v_k - U)]\} \quad (1.1)$$

Los beneficios del factor escala para mejorar la productividad han impulsado en los últimos años una carrera en la que el premio es conseguir el máximo tamaño de las turbinas. Como consecuencia de ello, en el periodo de 1976-2006 la capacidad de las turbinas experimentó un aumento exponencial.

Actualmente la meta es conseguir turbinas de 10 MW, pero por ahora tan sólo dos fabricantes han llegado hasta los 6 MW – la segunda generación semi-

comercial Enercon E-126 (diámetro del rotor de 127 m), y el prototipo ERpower 6M (diámetro de rotor 126 m). Otros prototipos están escalando hasta los 6,5 y los 7 MW. Pero el gigante de los aerogeneradores es el anuncio de Clipper Britannia, que está desarrollando una turbina marina de 10 MW (diámetro de rotor de 150 m).

Las turbinas con tres alabes en el rotor, con control del ángulo de pala y la operación a velocidad variable son la tecnología actual de generación eólica. Pero en generadores marinos hay opciones para usar sistemas de dos alabes, consiguiendo disminuir con ellos la complejidad del montaje. Los rotores de dos alabes giran a más velocidad y son más ruidosos, pero ello no es un problema en ambientes marinos.

Los sistemas de trenes de transmisión de las turbinas eólicas pueden ser directos (sin caja de engranajes) o con engranajes, determinando un generador mono-etapa de baja velocidad (Multibrid) o con caja de engranajes de alta velocidad. Como consecuencia de las tendencias de escala en la fabricación de aerogeneradores, las cargas mecánicas del tren de transmisión a través de los engranajes de la turbina se han incrementado drásticamente desde 1990. El valor del par específico de la masa se ha incrementado desde 5 Nm/kg en 1990, a 7,3 Nm/kg en 1996, 11 Nm/kg en 2002 y hasta 15,5 Nm/kg en 2008. Estas exigencias han podido también reducir los factores de seguridad, y se han detectado fallos que pueden llegar a ser inaceptables.

Otro factor limitante en el crecimiento futuro de las turbinas es el tamaño del rotor. Alguno de estos factores competen a la logística del transporte y problemas de ensamblaje (longitud y masa), y otros se deben a la velocidad en la punta de los álabes del rotor (ruido, erosión, momento de inercia transversal). Las limitaciones de fabricación (espesor del material, imperfecciones relacionadas con la producción, métodos de control de calidad, etc.). Otros factores críticos que pueden frenar el desarrollo de las turbinas son las propiedades del material y la rigidez de los componentes. Cuando el tamaño del rotor se incrementa, los materiales trabajando conjuntamente tienden a introducir elasticidad creciente. Este fenómeno debe tomarse muy en cuenta.

El aumento del área barrida implica un aumento en el diámetro del rotor y esto obliga a realizar máquinas excesivamente altas para que la intensidad del aire incidente sea igual en todo el disco evitando el efecto de la capa límite terrestre. Esta altura en el proceso de montaje y reparación obliga al empleo de máquinas elevadoras específicas y un alto riesgo para el personal dedicado a estos fines bajo el punto de vista de la seguridad.

Las alturas alcanzadas por las palas en su rotación, bajo determinadas condiciones ambientales, dan lugar a la formación de escarcha que puede ocasionar temporalmente el desequilibrado dinámico del rotor obligando a su parada.

Así mismo, las características del viento intervienen de forma importante en varias áreas de trabajo relacionadas con los sistemas de aprovechamiento de la energía eólica:

Selección del emplazamiento más favorable para la instalación de los sistemas eólicos, dadas las acusadas diferencias locales de viento.

Estimación o previsión de la producción energética y del funcionamiento global del sistema eólico, donde se consideran valores medios de viento y distribuciones diarias, estacionales, direccionales, etc., en lugares específicos o de interés.

Diseño del sistema, donde se tienen en cuenta las condiciones medias representativas y condiciones extremas de viento.

Operación y regulación del sistema eólico, donde intervienen aspectos como la predicción del viento para planificar el funcionamiento en tiempo real, así como las características del viento que influyen en la estrategia de operación y factores que afectan al mantenimiento o vida útil del sistema.

1.2. Perspectivas del potencial eólico

El mercado de las turbinas eólicas crece con especial fuerza desde 2007 en el que se activaron casi 30 GW, un volumen que duplica las cifras de 2006. De esta cantidad, Estados Unidos y China cuentan con casi el 48%. De cara al futuro se esperaba un enfriamiento del crecimiento pero los cambios en la Casa Blanca están haciendo que las perspectivas varíen. Se espera que China continúe con su expansión agresiva, pero también otras economías emergentes están trabajando en el sector eólico. La tabla 1.1 y 1.2 indica la evolución creciente en la explotación de energía eólica a nivel mundial.

Modelización de un captador eólico de alta eficiencia

Position 2010	Country / Region	Total capacity end 2010 [MW]	Added capacity 2010 [MW]	Growth rate 2010 [%]	Position 2009	Total capacity end 2009 [MW]	Total Capacity end 2008 [MW]	Total Capacity end 2007 [MW]	Total Capacity end 2006 [MW]
1	China	44.733,0	18.928,0	73,3	2	25.810,0	12.210,0	5.912,0	2.599,0
2	USA	40.180,0	5.600,0	15,9	1	35.159,0	25.237,0	16.823,0	11.575,0
3	Germany	27.215,0	1.551,0	6,0	3	25.777,0	23.897,0	22.247,4	20.622,0
4	Spain	20.676,0	1.527,2	8,0	4	19.149,0	16.689,0	15.145,1	11.630,0
5	India	13.065,8	1.258,8	10,7	5	11.807,0	9.587,0	7.850,0	6.270,0
6	Italy	5.797,0	950,0	19,6	6	4.850,0	3.736,0	2.726,1	2.123,4
7	France	5.660,0	1.086,0	23,7	7	4.574,0	3.404,0	2.455,0	1.567,0
8	United Kingdom	5.203,8	1.111,8	27,2	8	4.092,0	3.195,0	2.389,0	1.962,9
9	Canada	4.008,0	690,0	20,8	11	3.319,0	2.369,0	1.846,0	1.460,0
10	Denmark	3.734,0	309,0	8,9	10	3.465,0	3.163,0	3.125,0	3.136,0
11	Portugal	3.702,0	345,0	10,3	9	3.357,0	2.862,0	2.130,0	1.716,0
12	Japan	2.304,0	211,0	10,1	13	2.083,0	1.880,0	1.528,0	1.309,0
13	The Netherlands	2.237,0	15,0	0,7	12	2.223,0	2.235,0	1.747,0	1.559,0
14	Sweden	2.052,0	603,8	41,7	15	1.448,2	1.066,9	831,0	571,2
15	Australia	1.880,0	3,0	0,2	14	1.877,0	1.494,0	817,3	817,3
16	Ireland	1.428,0	118,0	9,0	16	1.310,0	1.027,0	805,0	746,0
17	Turkey	1.274,0	477,5	59,9	19	796,5	333,4	206,8	64,6
18	Greece	1.208,0	123,0	11,3	17	1.086,0	989,7	873,3	757,6
19	Poland	1.107,0	382,0	52,7	20	725,0	472,0	276,0	153,0
20	Austria	1.010,6	16,0	1,6	18	995,0	994,9	981,5	964,5
21	Brazil	920,0	320,0	53,3	21	600,0	338,5	247,1	236,9
22	Belgium	886,0	340,0	62,0	22	548,0	383,6	286,9	194,3
23	Romania	591,0	577,0	4.121,4	55	14,0	7,0	7,8	2,8
24	Egypt	550,0	120,0	27,6	26	435,0	390,0	310,0	230,0
25	Mexico	521,0	104,5	25,1	27	416,8	85,0	85,0	84,0
26	Chinese Taipeh	518,7	82,6	18,9	24	436,0	358,2	279,9	187,7
27	New Zealand	506,0	8,8	1,8	23	497,0	325,3	321,8	171,0
28	Norway	434,6	18,4	4,3	25	431,0	429,0	333,0	325,0
29	Korea (South)	379,3	48,9	14,0	28	348,4	278,0	192,1	176,3
30	Bulgaria	374,5	198,0	112,2	30	176,5	157,5	56,9	36,0
31	Hungary	295,0	94,0	46,8	31	201,0	127,0	65,0	60,9
32	Morocco	286,0	33,0	13,0	29	253,0	124,0	125,2	64,0
33	Czech Republic	215,0	24,0	12,6	32	191,0	150,0	116,0	56,5
34	Finland	197,0	52,0	35,4	33	147,0	143,0	110,0	86,0
35	Chile	170,0	2,6	1,5	39	167,6	20,1	20,1	2,0
36	Lithuania	154,0	63,0	69,2	36	91,0	54,4	52,3	55,0
37	Estonia	149,0	6,9	4,8	34	142,3	78,3	58,6	33,0
38	Costa Rica	123,0	0,0	0,0	35	123,0	74,0	74,0	74,0
39	Iran	100,0	18,0	22,0	38	82,0	82,0	66,5	47,4
40	Ukraine	87,4	0,6	0,7	37	90,0	90,0	89,0	85,6
41	Cyprus	82,0	82,0	∞	0	0,00	0,0	0,0	0,0
42	Croatia	69,8	43,0	161,0	46	26,7	18,2	17,2	17,2
43	Argentina	54,0	25,3	88,2	43	28,7	29,8	29,8	27,8
44	Tunisia	54,0	0,0	0,0	44	29,7	20,7	20,7	20,7

Tabla 1.1. Evolución de la explotación de energía eólica a nivel mundial (I).

Position 2010	Country / Region	Total capacity end 2010 [MW]	Added capacity 2010 [MW]	Growth rate 2010 [%]	Position 2009	Total capacity end 2009 [MW]	Total Capacity end 2008 [MW]	Total Capacity end 2007 [MW]	Total Capacity end 2006 [MW]
45	Luxembourg	42,0	7,0	19,8	41	35,3	35,3	35,3	35,3
46	Switzerland	42,0	24,4	138,6	53	17,6	13,8	11,6	11,6
47	Nicaragua	40,0	0,0	0,0	40	40,0	0,0	0,0	0,0
48	Philippines	33,0	0,0	0,0	42	33,0	25,2	25,2	25,2
49	Latvia	31,0	2,0	7,0	45	28,5	26,9	27,4	27,4
50	Vietnam	31,0	22,3	254,3	57	8,8	1,3	0,0	0,0
51	Uruguay	30,5	10,0	48,8	50	20,5	20,5	0,6	0,2
52	Jamaica	29,7	0,0	0,0	52	54,0	20,0	20,0	20,0
53	Netherlands Antilles	24,3	0,0	0,0	47	24,3	12,3	12,3	12,0
54	Guadeloupe	20,5	0,0	0,0	49	20,5	20,5	20,5	20,5
55	Colombia	20,0	0,0	0,0	51	20,0	19,5	19,5	19,5
56	Russia	15,4	1,2	8,6	54	14,0	16,5	16,5	15,5
57	Guyana	13,5	0,0	0,0	56	13,5	13,5	13,5	13,5
58	Cuba	11,7	4,5	62,5	58	7,2	7,2	2,1	0,5
59	South Africa	10,0	2,0	25,0	48	8,0	21,8	16,6	16,6
60	Israel	6,0	0,0	0,0	59	6,0	6,0	6,0	7,0
61	Slovakia	6,0	0,0	0,0	60	6,0	6,0	5,0	5,0
62	Pakistan	6,0	0,0	0,0	61	6,0	6,0	0,0	0,0
63	Faroe Islands	4,0	0,0	0,0	62	4,0	4,1	4,1	4,1
64	Cape Verde	2,8	0,0	0,0	63	2,8	2,8	2,8	2,8
65	Ecuador	2,5	0,0	0,0	64	2,5	4,0	3,1	0,0
66	Nigeria	2,2	0,0	0,0	66	2,2	2,2	2,2	2,2
67	Belarus	1,9	0,0	0,0	67	1,9	1,1	1,1	1,1
68	Antarctica	1,6	0,0	0,0	68	1,6	0,6	0,0	0,0
69	Jordan	1,5	0,0	0,0	69	1,5	1,5	1,5	1,5
70	Indonesia	1,4	0,0	0,0	70	1,4	1,2	1,0	0,8
71	Mongolia	1,3	0,0	0,0	65	1,3	2,4	0,0	0,0
72	Martinique	1,1	0,0	0,0	71	1,1	1,1	1,1	1,1
73	Falkland Islands	1,0	0,0	0,0	72	1,0	1,0	1,0	1,0
74	Eritrea	0,8	0,0	0,0	73	0,8	0,8	0,8	0,8
75	Peru	0,7	0,0	0,0	74	0,7	0,7	0,7	0,7
76	Kazakhstan	0,5	0,0	0,0	75	0,5	0,5	0,5	0,5
77	Syria	0,4	0,0	0,0	77	0,4	0,4	0,3	0,3
78	Namibia	0,2	0,0	0,0	76	0,5	0,5	0,5	0,3
79	Dominican Republic	0,2	0,0	0,0	78	0,2	0,2	0,0	0,0
80	Dominica	0,2	0,0	0,0	79	0,2	0,2	0,0	0,0
81	North Korea	0,2	0,0	0,0	80	0,2	0,2	0,0	0,0
82	Algeria	0,1	0,0	0,0	81	0,1	0,1	0,0	0,0

Tabla 1.2. Evolución de la explotación de energía eólica a nivel mundial (II).

Respecto a la disponibilidad de tecnologías, cada vez más fabricantes se están haciendo hueco en el sector eólico y ya no sólo los tres grandes (Vestas, GEEnergy y Gamesa) son los que cubren la demanda del mercado.

Respecto a la demanda por países cabe destacar que Estados Unidos ha superado recientemente a Alemania como el productor más grande del mundo en energía eólica, pues su capacidad se ha incrementado en un 50% en tan solo un año. Algunos gobiernos están intentando generar más energía a partir de fuentes renovables para cortar la dependencia en los importadores de energía tradicional y limitar las emisiones de dióxido de carbono.

La Unión Europea en particular busca incrementar la cuota de energía a través de fuentes renovables a un 20% en 2020. La capacidad de Alemania casi llegó a 24 GW a finales de 2008 y China superó el doble de su capacidad el último año al alcanzar los 12 GW. Las perspectivas de crecimiento a medio plazo son todas optimistas. En 2013, la capacidad de producción total será de 332 GW, frente a los 120 GW de finales de 2008. Las perspectivas de crecimiento anual en este periodo son del 22%, muy relevantes pero ya no tan elevadas como el 28% que han crecido en la última década.

1.3. Panorama eólico español

La creciente y excesiva dependencia energética exterior, alrededor del 80% en los últimos años, y la necesidad de preservar el medio ambiente, obligan a la implantación de fórmulas eficaces para un uso eficiente de la energía y la utilización de fuentes limpias. Por tanto, el crecimiento sustancial de las fuentes renovables, junto a una importante mejora de la eficiencia energética, responde a motivos de estrategia económica, social y medioambiental.

En España se realizó el (PER) Plan de Energías Renovables 2005-2010 que constituye la revisión del Plan de Fomento de las Energías Renovables en España 2000-2010 y que trata de mantener el compromiso de cubrir con fuentes renovables al menos el 12% del consumo total de energía en 2010, así como de incorporar otros objetivos como generación de energía eléctrica con fuentes renovables en un 29,4%.

La explotación de la energía eólica en España ha registrado durante los últimos años un crecimiento medio de la potencia instalada superior a los 1600 MW anuales, existiendo factores que propician un mayor impulso en la evolución de este sector:

Potencial eólico en territorio aun sin explotar

Normativa favorable para conseguir una mayor penetración del sector eólico

Sector industrial con capacidad para desarrollar equipos que exploten este recurso

Incorporación de mejores tecnologías.

Este plan eólico establece como objetivo la instalación en el conjunto del territorio español de una potencia eólica incremental de 12000 MW en el periodo de 2005-2010 contribuyendo por Comunidades Autónomas según el IDAE las cantidades que figuran en la tabla 1.3.

Modelización de un captador eólico de alta eficiencia

AREA EOLICA: OBJETIVOS 2010				
Comunidad Autónoma	Situación Año 2004 (MW)	Incremento 2005-2010 (MW)	Potencia al 2009 (MW)	Potencia al 2010 (MW)
Andalucía	350	1850	1794,99	2200
Aragón	1150	1246	1749,31	2400
Asturias	145	305	304,30	450
Baleares	3	47	3,65	50
Canarias	139	491	140	630
Cantabria	-	300	17,85	300
Castilla y León	1543	1157	3334,04	(2700)
Castilla La Mancha	1534	1066	3415,61	(2600)
Cataluña	94	906	420,44	1000
Extremadura	-	225	-	225
Galicia	1830	1570	3145,24	3400
Madrid	-	50	-	50
Murcia	49	351	152,31	400
Navarra	854	546	958,77	1400
La Rioja	356	144	446,62	500
Comunidad Valenciana	21	1579	710,34	1600
País Vasco	85	165	152,77	250
Total	8155 MW	12000 MW	16740,32 MW	20155 MW

Tabla 1.3. Plan eólico en España 2010.

Se prevé, por tanto, que las Comunidades Autónomas de Galicia, ambas Castillas, Navarra y Aragón mantengan la tendencia creciente de implantación de parques eólicos, liderando el desarrollo eólico regional.

En relación a las instalaciones eólicas marinas, actualmente existen diversos proyectos que se encuentran en fase inicial de diseño e ingeniería básica y una vez establecidas las zonas de explotación, comience la implantación de generadores en las mismas. En el siguiente mapa, figura 1.1 pueden apreciarse las zonas: aptas, con condicionantes ambientales y las de exclusión para la explotación eólica marina en nuestras costas.

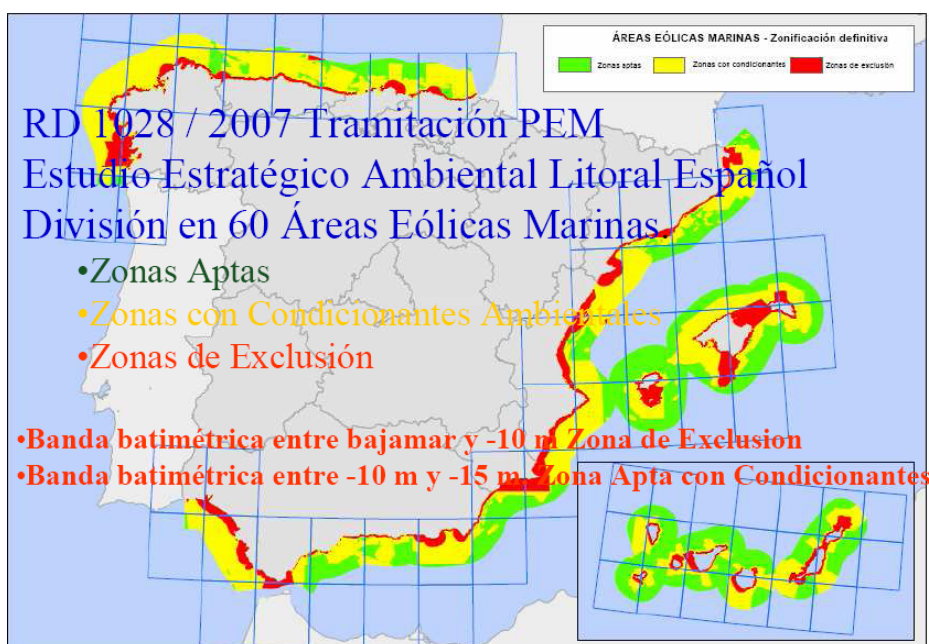


Figura 1.1. Mapa de zonificación marina: Aptas; Aptas con condicionantes; De exclusión.

Los últimos estudios realizados en este campo, establecen una futura implantación de parques eólicos marinos según el mapa Figura 1.2.



Figura 1.2. Futura implantación de parques marinos de acuerdo al estudio de viabilidad.

1.3.1. Potencial eólico en Galicia

De entre todas las regiones españolas, la Comunidad Gallega es quizás una de las que más expectativas despierta respecto al aprovechamiento de la energía del viento. A nivel global se obtienen datos meteorológicos con altas velocidades y altas humedades relativas así como bajas presiones y temperaturas. Existen por provincia las siguientes estaciones meteorológicas en funcionamiento desde el año 1995: A Coruña (19), Lugo (21), Orense (17) y Pontevedra (18).

A continuación se muestra en gráficas 1.3 y 1.4 los valores de las estaciones más representativas a nivel de cada Comunidad:

Provincia de A Coruña

• Estación meteorológica de Corrubedo (2005-2009)

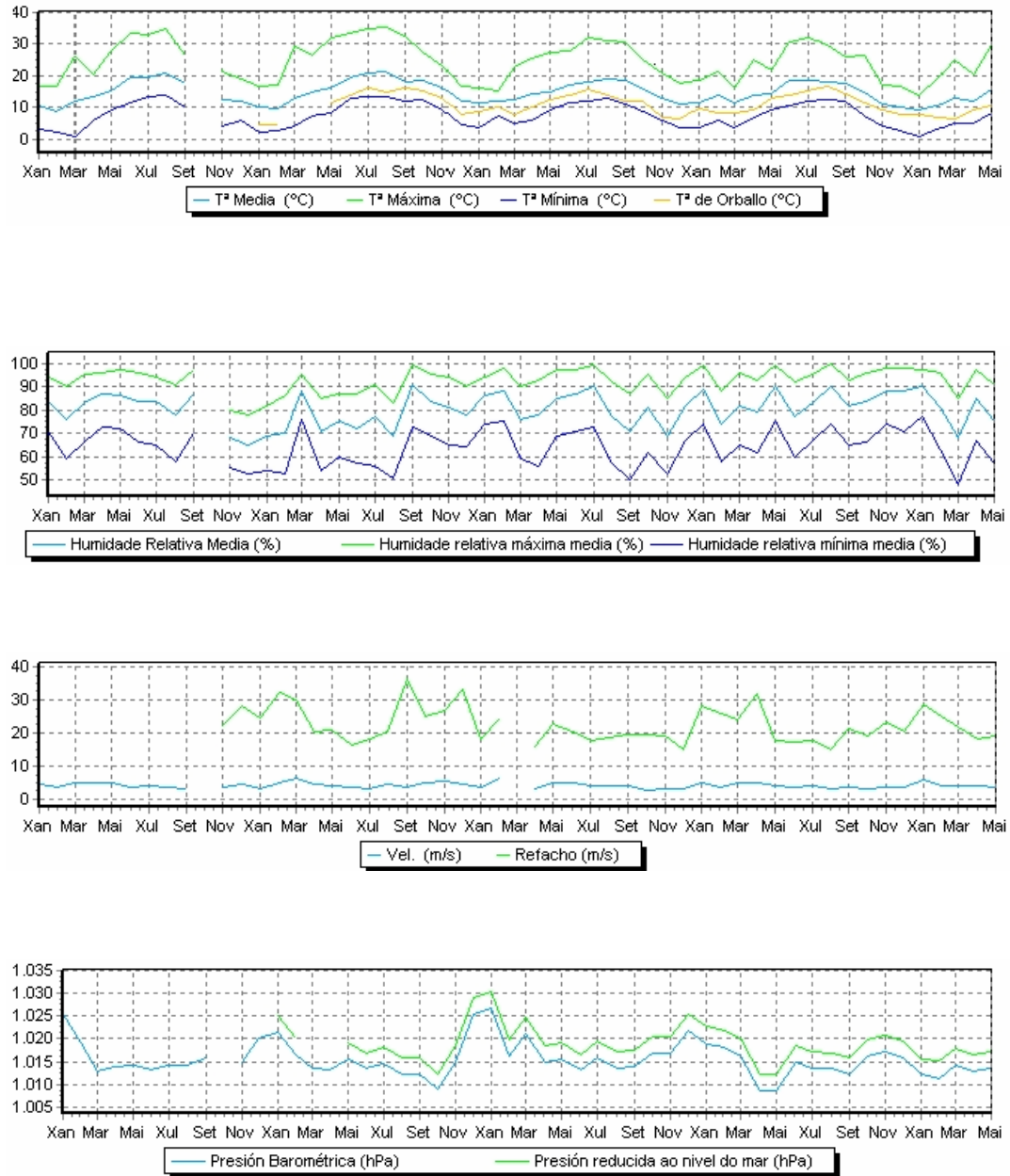


Figura 1.3. Estación meteorológica de Corrubedo (2005-2009).

Provincia de A Coruña

• Estación meteorológica de Punta Candeleira

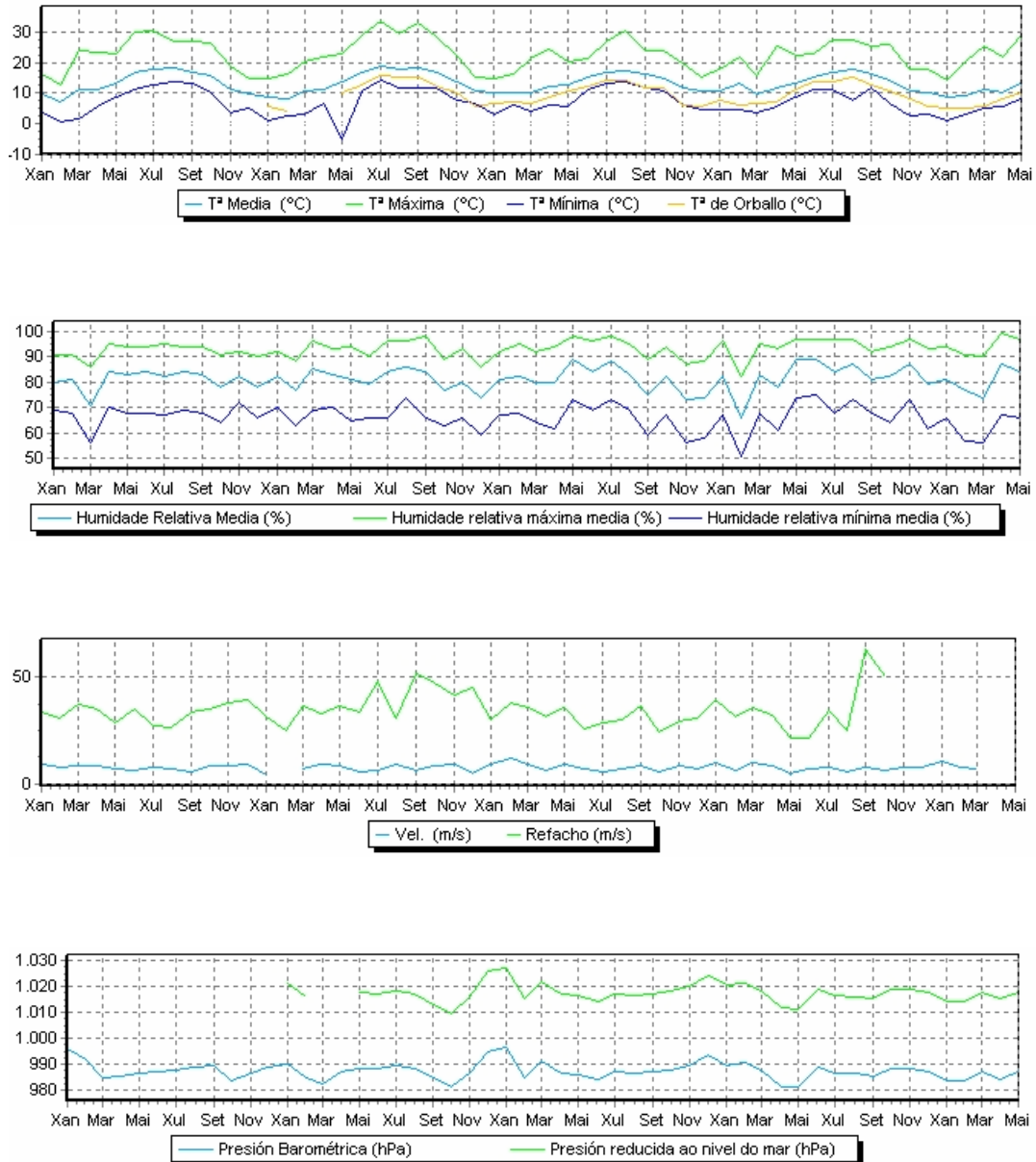


Figura 1.4. Estación meteorológica de Punta Candeleira.

A la vista de los datos registrados podemos estimar valores medios de los diferentes parámetros que intervienen como factores determinantes en la conversión de la energía eólica. Las temperaturas para el período registrado entrega una media de 15°C con máximas de 25°C y mínimas de 8°C en promedio mensual.

En cuanto a la velocidad del viento, se establece una media de 5 m/s obteniendo también velocidades pico de 20 m/s y aun mayores.

La humedad relativa mantiene valores medios del 80% y se dan valores frecuentes del 90% e incluso del 100% en situaciones puntuales.

A la vista de los datos obtenidos, la tesis se centrará en la obtención de un concentrador eólico que trabaja en régimen subsónico y con fluido incompresible.

1.4. Líneas investigación y desarrollo

Introducida la problemática que atañe a la explotación de la energía eólica, queda patente que el sector, aun en desarrollo, necesita mejoras cuantitativas y cualitativas en campos como: análisis e incidencia de las características del flujo en la conversión eólica; desarrollo de máquinas adaptativas a la variabilidad del viento en dirección e intensidad, sistemas de control para el acoplamiento de la energía eléctrica producida en un parque eólico a la red eléctrica, robustez en los equipos que permitan un mayor número de horas operacionales, diseño de nuevos concentradores eólicos capaces de operar en zonas de baja velocidad de viento para un mejor aprovechamiento de aquellas zonas con potencial eólico bajo, desarrollo de nuevos sistemas de seguridad que favorezcan la prevención de riesgos en el trabajo, aprovechamiento de la energía eólica como sustituta de energías convencionales en zonas de restricción por impacto ambiental u otros motivos técnicos.

De toda la problemática introducida y que repercute en el conjunto del diseño, funcionalidad, operación, seguridad y versatilidad de los equipos conversores de energía eólica; se pueden destacar líneas de actuación que indican la pauta a seguir en el desarrollo y aprovechamiento de esta energía.

1.4.1. Modelos de energía predecible

De todos los factores que depende la ubicación de un conversor eólico en un determinado emplazamiento, el mas importante es sin duda predecir cual será el potencial energético disponible. A parte de problemas técnicos y logísticos que afectan al transporte, emplazamiento y redes de distribución; una predicción precisa es fundamental para seleccionar el tipo de máquina adecuada al emplazamiento, sus horas operacionales y la rentabilidad. Esto conlleva realizar medidas exhaustivas en la zona objeto de explotación y el establecimiento de modelos matemáticos que predigan este potencial a corto y largo plazo [1-3].

1.4.2. Transporte de energía eléctrica

Los parques eólicos a diferencia de las centrales térmicas convencionales para producción de energía eléctrica, están sometidos a variabilidad en cuanto a potencial de la fuente energética primaria; esto da origen a problemas de acoplamiento de estas máquinas a la red eléctrica de distribución donde debe ajustarse el factor potencia y la frecuencia.

En este campo se han desarrollado trabajos como el análisis de comportamiento de aerogeneradores asíncronos produciendo energía en régimen permanente y transitorio para establecer métodos de cálculo que evalúen las modificaciones de tensión y frecuencia [4-5]. Afectación de la perturbación producida sobre la red de distribución cuando un parque eólico se acopla [6-7].

1.4.3. Prototipos adaptativos

La variabilidad del potencial presente en la energía primaria, obliga al estudio y diseño de nuevas máquinas capaces de adaptarse a las condiciones ambientales temporales para operar siempre en el punto de diseño.

Dado que el viento es variable en dirección e intensidad deben diseñarse máquinas orientables a las direcciones predominantes del flujo, máquinas con perfiles aerodinámicos variables y orientables que permitan la transformación energética en las mejores condiciones de eficiencia. En este sentido, se desarrollan máquinas de velocidad variable y paso variable [8-9].

1.4.4. Concentradores eólicos

La investigación y desarrollo de la conversión eólica se ha dirigido fundamentalmente al diseño de máquinas adaptables a zonas de alto potencial eólico. Esto ha contribuido a una rápida expansión de parques que ya explotan las zonas mayor velocidad de viento y, siendo las zonas de alto potencial eólico muy restrictivas en cuanto a superficie así como de difícil acceso, las líneas de mejora se orientan a la sustitución de las máquinas actuales por otras de mayor eficiencia.

Lejos de restringir la explotación de la energía eólica exclusivamente a zonas de alto potencial, existe mucha superficie de bajo potencial eólico que con dispositivos conversores adecuados pueden resultar atractivos y rentables económicamente. La idea básica común a este tipo de dispositivos es lograr un incremento de la velocidad del flujo que accede al rotor utilizando conductos que, con una determinada configuración geométrica guíen el fluido aguas arriba o abajo del convertidor. Según [10] es más eficaz para lograr una alta velocidad del flujo, la colocación de un difusor en la salida de la corriente del convertidor eólico que una tobera en el flujo incidente.

Las aplicaciones dentro de este campo se proponen por la mayoría de autores para el accionamiento de generadores de 2-50 MW, siendo los aerogeneradores de eje vertical (VAWT's) los más recomendables por captar el viento en todas las direcciones, fácil construcción y mayor rendimiento de acuerdo a la respuesta obtenida [11].

Agua arriba o agua abajo del elemento transformador de energía, puede ubicarse un conducto capaz de configurar el flujo entrante-saliente en el rotor. Existen experiencias realizadas en este campo, una de las más recientes corresponde a [12] que realiza un análisis experimental de un concentrador eólico consistente en dos superficies planas convergentes a través de las cuales hace circular el flujo.

1.5. Referencias

- [1] J. González Olalla. Desarrollo de un modelo de viento de diagnóstico conservativo para aplicaciones relacionadas con el aprovechamiento de la energía eólica. Universidad Complutense Madrid (1999).
- [2] O. Califa Khalil. Mapa eólico del norte de Mauritania, aplicación a la generación de energía eléctrica. Universidad Las Palmas de Gran Canaria (2000).
- [3] A. Mateus Ferreira. Modelos estadísticos en energía eólica. Universidad de Córdoba (2002).
- [4] J. F. Medina Padron. Análisis de sistemas eléctricos ante la integración de parques eólicos. Aplicación al caso de las Islas Canarias. Universidad Las Palmas de Gran Canaria (1996).
- [5] C. Villar Moreno. Fluctuaciones de tensión producidas por los aerogeneradores de velocidad fija. Universidad Carlos III Madrid (2002).
- [6] A. E. Feijoo Lorenzo. Influencia de los parques eólicos en la seguridad estacionaria y calidad de onda de redes eléctricas de gran dimensión. Universidad de Vigo (1997).
- [7] L. Fernández Ramírez. Modelos multimáquinas de aerogeneradores en parques eólicos. Universidad de Cádiz (2003).
- [8] J. L. Rodríguez Amenedo. Análisis dinámico y diseño del sistema de control de aeroturbinas de velocidad variable con generador asíncrono de doble alimentación. Universidad Carlos III Madrid (1999).
- [9] M. Chinchilla Sánchez. Control de un sistema de generación eólica de velocidad variable con generador síncrono multipolar de imanes permanentes acoplados a red. Universidad Carlos III Madrid (2000).
- [10] H. Erich. Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics. 2nd Edition. Springer 2005, pp.1-783.
- [11] S. Shikha, T.S. Batí, D. P. Kpithari, A new vertical axis wind rotor using convergent nozzles. Large Engineering Conference on Power Engineering, 2003. pp. 177-181.
- [12] S. Shikha, T.S. Bhatti., D.P. Kothari. Air concentrating nozzles: a promising option for wind turbines. Int. J. Ener. Tech. Pol. 3 (2005) 394-412.

Capítulo 2

Capítulo 2: Materiales y Métodos

2.1. Introducción

Planteado el objetivo de esta tesis, se recoge en este apartado todo lo relativo al método seguido en cuanto a su desarrollo y que comprende el análisis del modelo matemático utilizado en base a las propiedades termodinámicas del proceso, muestreo de datos ambientales en las zonas potencialmente utilizables y análisis de los mismos, establecimiento de los parámetros de partida que en base a las condiciones de contorno conllevan a la generación de un modelo físico a través de la mecánica de fluidos computacional, apto para ensayar en el túnel de viento dentro del rango de utilización; descripción del sistema de mecanizado para la obtención del modelo físico así como de la instrumentación utilizada en el túnel de viento para obtener los datos reales del proceso.

2.2. Materiales

En esta tesis se muestra el procedimiento seguido para la evaluación y análisis del concentrador eólico en un túnel de viento subsónico operando con aire húmedo. Este tipo de túnel de viento no se ha desarrollado anteriormente, y a pesar de ello, es de especial interés generar un diseño de adecuada fiabilidad para el comportamiento del aire húmedo en la conversión eólica. Este es el caso de las turbinas eólicas de eje vertical a baja velocidad que emplean diferentes tipos de rotores como por ejemplo Savonius y Darrieus.

En los últimos años una nueva aplicación de concentradores de viento permitió a la turbina eólica de eje vertical mejorar su rendimiento en base a nuevos conceptos como el cambio de fase del aire húmedo y que están siendo analizadas para mejorar la conversión de energía. Debido a estas razones, hay una gran expectativa para diseñar un túnel de viento adecuado que tenga en cuenta la humedad relativa del aire.

Dentro de los dos prototipos de túneles de viento: abiertos o con recirculación, los resultados obtenidos muestran un comportamiento mas adecuado en los del primer tipo controlando la humedad del aire mediante proceso de evaporación adiabática. No obstante la respuesta debe aún mejorarse mediante control de las variables a través de cálculos computacionales.

Durante los últimos años, muchos ingenieros han mostrado especial interés en los ensayos de construcciones civiles a través de pruebas en túneles de viento y sus efectos en el comportamiento de los mismos [1] y [2], utilizándose en la mayoría de los casos túneles sin recirculación [3].

A pesar de ello, en el análisis de ambientes climáticos, podemos observar que las diferentes regiones presentan diferentes condiciones climáticas. Por lo tanto, es interesante notar que no sólo es la velocidad del aire la que influye en la conversión de la energía eólica, sino que otros parámetros, como la humedad relativa del aire, debe considerarse en el proceso de diseño y operación para este

tipo de aplicaciones. Ejemplos de las condiciones del aire exterior en las regiones húmedas se pueden observar en Meteogalicia [4].

Para el diseño de diferentes artefactos, se ha venido utilizando el aire sin control específico de la humedad. Este es el caso de turbinas eólicas, automóviles, aviones y casi todos los dispositivos cuyo medio de trabajo es el aire húmedo y que corresponde a la aerodinámica.

Es bien sabido que Europa es el líder mundial en energía eólica y muchas regiones van a experimentar un claro aumento en la producción de este tipo de energía cercana a los 100 MW [5]. Para analizar el comportamiento de los diferentes aerogeneradores debemos emplear túneles de viento que operen en las condiciones próximas a las reales y realizar simulaciones en la dinámica de fluidos computacional (CFD). Algunos autores han analizado túneles de viento diseñados para obtener un flujo de aire concordante con las condiciones similares a las ambiente a fin de obtener resultados comparativos [6]. En este contexto, durante los últimos años fueron evaluados y desarrollados un gran número de túneles de viento, pero ninguno de ellos fue concebido con un sistema de control de aire húmedo. La humedad del aire debe ser evaluada en condiciones similares a las reales en el ambiente.

En general suele asociarse las turbinas de viento con los aerogeneradores de eje horizontal (HAWT). No obstante, existe gran cantidad de nuevos conceptos que deben desarrollarse y diseñarse en los parques eólicos del futuro. Los aerogeneradores de eje vertical (VAWT) presentan claras ventajas en comparación con las turbinas eólicas de eje horizontal ya que son capaces de trabajar en direcciones de viento cambiante, necesitan menos mantenimiento, y su producción comienza a ser efectiva a bajas velocidades de viento de 3 m/s. Recientemente la aplicación de concentradores eólicos permitió a los aerogeneradores de eje vertical mejorar su rendimiento y se están analizando nuevos conceptos, como el cambio de fase en el aire húmedo para mejorar la conversión de energía. Por todas estas razones es de interés a la hora de diseñar un túnel de viento que este se adecue y tenga en cuenta la humedad relativa del aire.

2.2.1. Componentes del Túnel de Viento

Como se mencionó anteriormente, el túnel de viento fue diseñado de acuerdo a los trabajos mencionados en [6] similar a los trabajos en las referencias [7] y [8]. Para llegar a las condiciones de prueba, se utilizó un sistema de control de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Las mediciones fueron almacenadas por los registradores de datos y un anemómetro digital. La velocidad del túnel de viento se fijó en 5 m/s, en concordancia con otros autores [5] y [9], que llevaron a cabo pruebas de en el rango de 6 a 11 m/s.

Las condiciones climáticas de la región se analizan con estaciones climatológicas ubicadas cerca del lugar de muestreo. Una vez seleccionadas las condiciones ambientales, de acuerdo con los resultados de las estaciones climatológicas, se ha procedido a la simulación en la sala de ensayos. A fin de alcanzar estas

condiciones, la humedad relativa del aire húmedo se logró con un humidificador adiabático, la velocidad del viento con un ventilador axial y por último, se dispuso de una cámara de remanso para obtener un flujo laminar unidireccional estable en toda la sección de pruebas, dotando al túnel de un panel enderezador del flujo que elimina la componente tangencial del aire impulsado por el ventilador.

De acuerdo con estudios de casos anteriores, se ha diseñado y construido un túnel de viento que proporciona una velocidad de aire ajustable entre 0 y 10 m/s [10]. La longitud total del túnel es de 8,3 m. La sección de prueba es de 1,2 m de ancho y 1,8 m de largo [11-12].

Como el concentrador de viento fue diseñado para trabajar con una velocidad del aire exterior de 5 a 10 m/s, estos son los valores empleados en las primeras simulaciones.

El accionamiento del ventilador se realiza mediante un motor eléctrico asíncrono y así, mediante un variador de frecuencia se modifica la velocidad de rotación del ventilador y con ello la velocidad del viento generado.

El nivel de demanda de humedad relativa para estos ensayos es alto y se ha seleccionado el rango del 80 al 100% por ser valores típicos en regiones con clima húmedo. Además, con esta humedad relativa el vapor de agua presente en el aire puede llegar con mayor facilidad al cambio de estado.

Como se mencionó anteriormente, para determinar la potencia de la turbina en diferentes condiciones de humedad relativa se actuó sobre ésta mediante un humidificador adiabático. Este humidificador adiabático pulveriza agua en el ambiente interior del túnel, produciéndose la vaporización de la misma por absorción del calor necesario procedente el aire circundante. Mediante este proceso, el aire húmedo va a experimentar un aumento en la humedad relativa y específica permaneciendo la temperatura constante. Finalmente, el control de la temperatura se realiza mediante calentadores eléctricos ubicados en el local de ensayo.

Para favorecer el control y mantenimiento de la humedad relativa del aire que opera en el túnel, se seleccionó una sala con la longitud y distancia de cerramientos laterales adecuada para evitar la interferencia del movimiento del aire con el concentrador eólico pero que confina el fluido para mantener sus propiedades constantes. Además, se procedió a la impermeabilización de los cerramientos para lograr un buen nivel de aislamiento a la humedad.

Para generar el movimiento de aire necesario en cada ensayo, se empleó un ventilador SODECA HPX-71-4T-3 de 2,2 kW 1400 rpm y un diámetro de 70 cm, figuras A.2.1 y A.2.2 Este ventilador nos ha permitido desarrollar un túnel de viento con velocidades de aire entre 0 y 10 m/s y un caudal máximo de 24.000 m³/h, que se regula por medio de la variación de frecuencia. Por otro lado, para obtener una velocidad de aire homogénea se situó un panel con estructura de nido de abeja teniendo como misión el enderezado del flujo de aire.

Finalmente, la velocidad del rotor se mide con un tacómetro digital de precisión 1 rpm, y el muestreo de la velocidad del viento en distintos puntos de la sección de prueba se determinó utilizando un manómetro diferencial con sonda Pitot.

La potencia que contiene el flujo de aire se transforma en una turbina eólica que se encuentra situada en la sección de prueba del concentrador eólico. La potencia transformada se puede determinar mediante el producto de la tensión y la intensidad de la corriente que ofrece un generador situado en el eje de la turbina eólica. Asimismo, para medir la intensidad se coloca una resistencia eléctrica de 8 ohmios.

Por último, se utilizó el software Engineering Equation Solver (EES) para el cálculo de los procesos termodinámicos del aire húmedo [13] y [14]. La información captada por los registradores se envía a la computadora a través del software LabVIEW 6.0 [15], a fin de lograr un muestreo en tiempo real. Esta opción permite enviar los valores instantáneos a una base de datos como Microsoft Excel o Access y, a partir de esta aplicación, desarrollar diferentes planes y estudios estadísticos.

2.2.2. Concentrador eólico

Con la finalidad de obtener datos reales que dejen patente los cambios experimentados en las propiedades del aire húmedo a su paso por el concentrador, se procedió al dimensionado y mecanizado del molde para obtener el modelo mediante laminado en fibra de vidrio y que constituirá el dispositivo para obtener datos reales.

Como primer paso se establecen las secciones transversales de paso eligiendo la sección circular por generar un flujo simétrico; así se computan un total de 15 secciones de diámetros decrecientes persiguiendo una caída de presión lineal a lo largo de todo el conducto. Dado que uno de los efectos a conseguir es el cambio de estado del vapor de agua contenido en el aire húmedo, se aprecia en la zona correspondiente del concentrador un cambio de curvatura ya que el caudal en régimen estacionario debe ser conservativo y en esa sección debido al cambio de estado se produce una variación de la densidad importante.

Por motivos de capacidad en el local de ensayos así como del túnel de viento, se construye el concentrador con un diámetro de entrada de 800 mm. y teniendo en cuenta la caída de presión lineal, velocidad incidente y cambio de estado del vapor de agua; se obtiene un diámetro de salida de 190 mm.

Dimensionadas las diferentes secciones de paso, queda por determinar la distancia entre las mismas o lo que es lo mismo, la longitud total del concentrador. Dado que se trata de un conducto convergente no se dispone de referencias respecto a los ángulos óptimos ya que las relaciones dimensionales en la bibliografía consultada se refieren únicamente a toberas calibradas para medida de flujos. Por este motivo, se trasladaron las secciones al software SolidWorks generando un cuerpo sólido de diferentes longitudes. Obtenidos estos sólidos, se ensayaron en el software EFD. Lab 8.0 para evaluar cual de

ellos ofrecía mejor comportamiento. De todos los diseños ensayados, se eligió el que corresponde a una longitud de 300 mm por ser el que mas afinidad presentaba entre los criterios propuestos y los resultados obtenidos teniendo en cuenta los parámetros de forma.

2.2.2.1. Obtención del molde

Como paso previo a la obtención del modelo de concentrador, se elaboró el molde en base de madera, procediendo a mecanizar las secciones de paso figura 2.1.



Figura 2.1. Fresado de las secciones de paso del molde.

Definidos previamente los valores a través del software EES y respetando la distancia entre secciones de diámetro conocido se colocaron suplementos que permitieran alcanzar la longitud total del conducto; así el conjunto de discos conformaron un cuerpo sólido mediante montaje en un eje roscado figura 2.2 para realizar el mecanizado y ajuste definitivo en un torno paralelo acotando las dimensiones en el sentido transversal y longitudinal figura 2.3. Así, la precisión transversal se obtuvo directamente del nonius integrado en el torno y establecido en décimas de milímetro. La precisión longitudinal se logró en centésimas de milímetro gracias al apoyo auxiliar de un reloj comparador.



Figura 2.2. Disposición de discos y separadores para la obtención del molde concentrador.



Figura 2.3. Proceso de mecanizado en el torno paralelo

Finalmente, se procedió mediante escofina a realizar el desbastado y, el alisado final de las formas se realizó por lijado, respetando los diámetros de referencia. A continuación se procedió al emplastecido de la superficie para lograr un acabado lo mas fino posible y así evitar rugosidades en el modelo que pudieran generar perturbaciones del flujo figuras 2.4 y 2.5.



Figura 2.4. Emplastecido de la superficie del molde.



Figura 2.5. Aspecto final del molde una vez lijado.

2.2.2.2. Obtención del modelo

Mecanizado el molde se procede a aplicar varias capas de cera sobre su superficie ya que esta condición es indispensable para evitar la adherencia del material que conformará el modelo laminado sobre el mismo.

El modelo se obtiene sobre el molde por laminado ya que este sistema facilita el proceso aportando una buena resistencia mecánica y conforma un conducto de gran ligereza que permite una construcción de bajo coste.

Los materiales a utilizar para su elaboración son gel-coat, resina, catalizador y fibra de vidrio en textura mat que favorece la obtención de una superficie lisa y robi que aporta resistencia mecánica al cuerpo.

En la figura 2.6 puede apreciarse la aplicación de la primera capa de material a base de gel-coat y que será la que constituya la terminación de la superficie.



Figura 2.6. Aplicación de gel-coat sobre la superficie del molde

En la figura 2.7 se presenta la pieza del concentrador desmoldeada colocada en el bastidor que servirá como soporte para los ensayos.



Figura 2.7. Concentrador finalizado para la realización de ensayos.

Dado que el concentrador eólico se estima para alcanzar en la sección de salida una presión inferior a la atmosférica, se hace necesario diseñar y construir un difusor que, partiendo de la sección de salida del concentrador recupere la presión hasta el valor de la atmosférica normal.

La elaboración del mismo se realiza siguiendo los mismos pasos que para la obtención del concentrador, respetando un ángulo de divergencia de 7 grados a fin de evitar el desprendimiento de la capa límite; en las figuras 2.8 a 2.10 pueden apreciarse los detalles de construcción de molde.



Figura 2.8. Disposición de discos y separadores para el mecanizado del difusor.



Figura 2.9. Marcado de los diámetros de referencia en el torno paralelo.



Figura 2.10. Molde del difusor terminado y encerado.

Concentrador y difusor se instalan solidariamente en el bastidor construido a tal fin y el conjunto queda preparado para recibir el resto de componentes correspondientes a la captación y medida de energía.

2.2.3. Convertidor de energía

El aire procedente del ventilador ubicado en el túnel de viento incide sobre la superficie frontal del concentrador eólico generando una sobrepresión debido al frenado del flujo. Así, en la línea central de esta sección la presión dinámica es cero, obteniendo el máximo de presión estática. A partir de este punto, el flujo se desarrolla transformando la presión estática en dinámica y por consiguiente aumentando la velocidad del aire.

En la sección mínima del concentrador, lugar donde bajo las condiciones de diseño debe cederse el calor latente de condensación del vapor de agua contenido en el aire, se sitúa un rotor acoplado elásticamente a un generador eléctrico por medio de un eje sustentado mediante arbotantes que permiten su libre giro, figura A.2.3.

El rotor transforma la energía cinética disponible en energía de rotación para transmitir a través del eje y acoplamiento elástico movimiento al generador con producción de energía eléctrica medible.

Para asegurar la validez del generador eléctrico utilizado se somete a un ensayo abarcando un campo de medida superior al utilizado en las pruebas reales. El

ensayo se realiza bajo los siguientes parámetros: humedad relativa 40%, temperatura 14 °C, y velocidad del aire variable para lograr un incremento en la presión dinámica de 6 a 25 Pa. El espectro de medida alcanzado es superior al que se utilizará en las pruebas finales con variación de la humedad obteniendo así la figura A.2.4.

Puede apreciarse que el aumento de velocidad en la corriente de aire provoca un aumento de presión dinámica en el conducto y el rotor cumple las expectativas de medida ya que incrementa la velocidad de rotación en dependencia prácticamente lineal con la presión dinámica.

Como la velocidad adquirida por el aire se logra en base a variar la velocidad de rotación del ventilador del túnel de viento, en la figura A.2.5 se obtiene la respuesta de esta velocidad frente a la frecuencia del variador.

Dado que uno de los objetivos de esta tesis es llegar a evaluar la energía recuperada de la corriente de aire mediante un generador eléctrico, se procede en el ensayo anterior a obtener los datos de producción de potencia eléctrica y según se evidencia en la figura A.2.6 también existe una linealidad entre la potencia entregada y el número de revoluciones donde se trabajará para los ensayos reales.

Para los diferentes ensayos realizados, el sistema conversor de energía entrega una señal de tensión e intensidad a través de una resistencia eléctrica de 330 Ω , con lo que es sencillo determinar la potencia entregada, ecuación 2.1.

$$P = V_e \cdot I \tag{2.1}$$

De igual forma, puede estimarse para el generador eléctrico la potencia perdida por efecto Joule ecuación 2.2 según se muestra en la figura A.2.7.

$$P = R \cdot I^2 \tag{2.2}$$

2.2.4. Dispositivos de control

De todas las variables que intervienen en el proceso de análisis son principalmente tres las que pueden ser manipuladas con el objeto de llevar el flujo de aire a las condiciones planteadas para su estudio y discusión.

La velocidad del aire puede ser manipulada mediante un variador que actúa sobre la frecuencia de la corriente eléctrica y de este modo sobre la velocidad de rotación del ventilador que impulsa el aire en el túnel de viento. Se trata de un variador de la firma comercial Siemens, modelo SINAMICS G 110 operando a 220 V y 2,2 kW con panel operador figura A.2.8.

El contenido de humedad en el aire se incrementa mediante un proceso de saturación adiabática. La aportación de humedad se realiza mediante unidad humidificadora de la firma comercial Spraying System Spain, S.L. modelo 45500 de tres boquillas figura A.2.9 que nebuliza partículas de agua en el entorno de las 10 micras. Las partículas de agua aportadas al aire, debido a su tamaño rápidamente roban el calor latente de vaporización pasando al estado gaseoso de tal modo que se incrementa la humedad específica y relativa del flujo.

El proceso de atomización se realiza en tres boquillas que trabajan según efecto venturi ayudado por la aportación de aire a presión. El dispositivo se complementa con un manómetro que indica la presión del aire aportado y una electroválvula de corte en el conducto del aire para activar/desactivar el proceso. Las cantidades de agua y aire aportadas se establecen de acuerdo a la tabla A.2.1, donde figuran los consumos por boquilla.

La temperatura del aire impulsado en el túnel de viento puede ser manipulada mediante resistencias eléctricas con potencia de 2000 W.

El aire a presión necesario para el proceso de humidificación se suministra mediante un compresor alternativo figura A.2.10 que aporta aire a una presión estable de 4 bar y está dotado de recipiente con capacidad suficiente para mantener la presión de suministro estable en el valor indicado.

La visualización del flujo para analizar las trayectorias se realiza mediante máquina de humo de la firma comercial HQ Power a 230 V y 700 W con una capacidad de 70 m³/min, figura A.2.11 utilizando líquido de alta densidad VDLSLH5.

2.2.5. Dispositivos de medida

Los datos correspondientes a los ensayos realizados se obtienen a través de diferentes dispositivos de medida, siendo las variables más importantes: presión, velocidad, humedad, temperatura y potencia eléctrica.

2.2.5.1. Presión

Como dato de referencia se sitúa en el túnel de viento una estación meteorológica de la firma comercial PCE Ibérica figura A.2.12 que suministra el valor de la presión ambiente (H_p), aportando también valores correspondientes a la temperatura y humedad relativa ambiente.

La presión reinante en los puntos específicos de medida: sección de entrada en el concentrador y en la sección mínima de paso se captan por medio de un manómetro digital de presión diferencial de la firma comercial KIMO, modelo MP 200 figura A.2.13, conectado a tubo pitot y con una precisión de 1 pascal. Los tubos pitot se sitúan en la línea central del conducto fijando como secciones de medida la entrada en el concentrador, la mínima aguas arriba del rotor y en la de salida del difusor según puede apreciarse en la figura A.2.14.

2.2.5.2. Velocidad

Para cada uno de los ensayos a realizar se fija la velocidad de rotación del ventilador situado en el túnel de viento mediante el variador de frecuencia y a partir de ahí, deben conocerse las velocidades del aire impulsado.

Las mediciones se realizan a partir del enderezador de flujo, constituido por un panel de tubos figura A.2.15, en material PVC cuya longitud por tubo es cinco veces su diámetro. Mediante este panel se logra eliminar la componente tangencial en el aire provocada por la rotación del ventilador.

La medida de velocidad del aire incidente antes del concentrador, se realiza con rotámetro figura A.2.16 a 0,6 m. de distancia del panel enderezador, sección en donde el flujo de aire se encuentra estabilizado. Los valores medidos se toman como punto de partida para realizar los diferentes ensayos ya que, a esta distancia el aire no está perturbado por la presencia del concentrador eólico.

La segunda toma de velocidad se realiza en la línea central de la sección de entrada del concentrador mediante tubo pitot conectado al manómetro de presión diferencial figura A.2.17, registrando las presiones estática, dinámica y total para cada ensayo realizado.

Finalmente, se realiza el mismo procedimiento con tubo pitot situado en la sección mínima del concentrador a fin de obtener las variaciones experimentadas por el fluido dentro del conducto. Una disposición esquemática del conjunto puede apreciarse en la figura A.2.18.

Dada la alta sensibilidad que posee el manómetro digital de presión diferencial utilizado es habitual que se produzcan pequeñas variaciones en la medida por tanto, para contrastar la veracidad de los muestreos se utilizó también un manómetro de columna inclinada figura A.2.19 de la firma comercial KIMO con rango de medición de 0 a 50 Pa que presenta mayor inercia a las variaciones de medida.

Con objeto de obtener resultados de potencia, velocidad y respuesta del rotor a los cambios de las condiciones de entrada de aire en el concentrador, se hace necesaria la toma de datos respecto al régimen de giro. Para ello, se utilizó un tacómetro digital de la firma comercial PCE Ibérica. En la figura A.2.20 puede observarse su disposición así como la rueda elaborada en teflón donde se sitúa la banda reflectante que actúa como señal que será captada por el tacómetro mediante infrarrojos.

2.2.5.3. Humedad y temperatura

Uno de los parámetros esenciales a medir y evaluar en este trabajo es la humedad relativa del flujo de aire que accede al concentrador. Mediante el saturador adiabático se incrementa la humedad específica en base a pulverizar agua que se vaporiza en el seno del aire y ello trae como consecuencia el aumento de la humedad relativa en un proceso que se verifica a entalpía constante. Dado que se pretende alcanzar humedades relativas próximas al 100% para evaluar la influencia del calor latente correspondiente al cambio de estado en la energía convertida, se sitúan en el ambiente, sección de entrada y mínima del concentrador, higrómetros digitales figura A.2.21 y A.2.22 capaces de registrar las humedades alcanzadas en cada ensayo con un margen de error reflejado en la tabla A.2.1.

Estos dispositivos además de captar y registrar la humedad relativa, también son capaces de leer los valores correspondientes a la temperatura.

2.2.5.4. Potencia eléctrica

Con el fin de captar la energía transformada en la sección mínima del concentrador eólico, se dispone de un rotor que mediante eje y acoplamiento elástico hace girar un generador de corriente continua de imanes permanentes. El circuito eléctrico se cierra mediante una resistencia de 330 Ω y se dispone un amperímetro y voltímetro en dicho circuito figura A.2.23 para medir la corriente producida y con ello la potencia generada.

2.2.6. Software

La fabricación del modelo que servirá para la realización de ensayos parte de las ecuaciones que rigen el comportamiento del aire húmedo ante variaciones de sus propiedades termodinámicas. Así, planteadas las condiciones iniciales de diseño consistentes en valores para la presión, temperatura, velocidad y humedad relativa; se desarrolla la geometría del concentrador para obtener una

caída de presión lineal y así, mediante métodos computacionales se obtiene las secciones transversales de paso que darán lugar al dimensionado del concentrador.

2.2.6.1. Engineering Equation Solver (E.E.S.)

Se emplea este software figuras 2.11 a 2.13 para dar solución numérica a las diferentes ecuaciones que habitualmente se presentan en los diseños de ingeniería y esto fundamentado en los siguientes hechos que convergen en el E.E.S.:

Capacidades:

Resolver ecuaciones diferenciales e integrales.

Hacer la optimización.

Proporcionar los análisis de incertidumbre y de regresión lineal y no lineal.

Generar gráficos con calidad de publicación.

Permite el tratamiento de las ecuaciones con variables desconocidas en cualquier orden, reordenándolas automáticamente para alcanzar una solución eficiente.

Proporciona muchas funciones integradas de propiedades matemáticas y termofísicas útiles para los cálculos de ingeniería. También están disponibles las propiedades de transporte de todas las sustancias.

EES puede utilizarse en problemas de diseño donde la solución depende de los efectos que produzcan la variación de varios parámetros. El análisis paramétrico se realiza en una hoja de cálculo integrada en la cual se identifican y manipulan las variables independientes y dependientes.

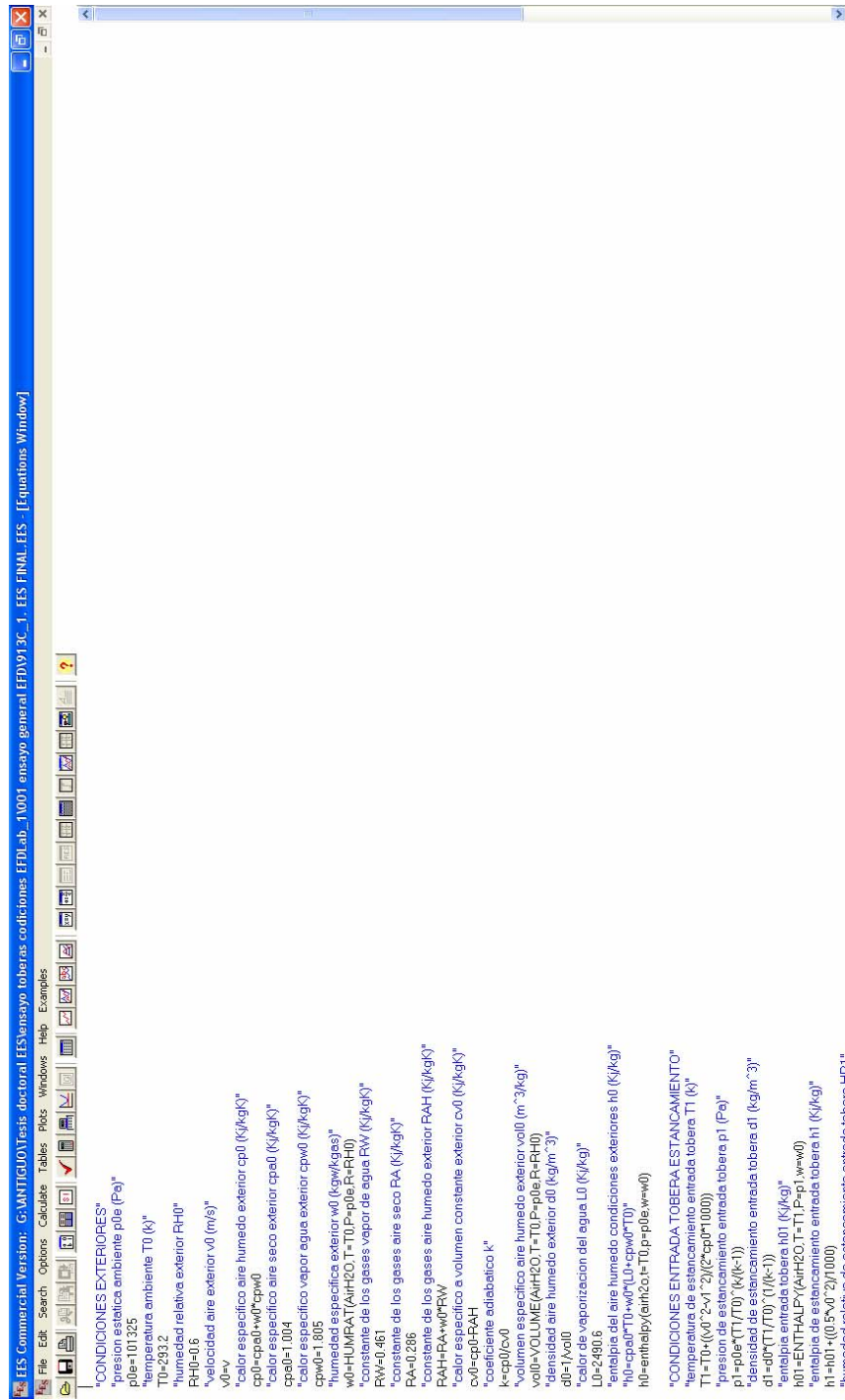


Figura 2.11. Pantalla editor de ecuaciones software EES.

Modelización de un captador eólico de alta eficiencia

EES Commercial Version: GAMANTIGUOVITESIS doctoral EES ensayo toberas condiciones EFDab_10001 ensayo general EFDV913C_1_EES FINAL_EES [Parametric Table]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples

Table 1 | Table 2

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	p1	p2	relp	p2	T1	d1	T0	h1	h2	RH1	w1	m1	T2	RH2	v1	v2	v2p	A1	A2	b
1.30	[Pa]	[Pa]	[p2/p1]	[Pa]	[K]	[kg/m3]	[K]	[KJ/kg]	[KJ/kg]	[h.relat]	[kg/m3]	[m3]	[K]	[h.relat]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m2]	[m2]	[m]
Run 1	101313	101300	0.7896	80000	288	1.213	288	30.92	11.85	0.5997	0.006311	1.213	269.3	1.809	2	195	195.3	0.5	0.006073	0.01215
Run 2	101316	101300	0.7896	80000	288	1.213	288	30.93	11.85	0.5996	0.006311	1.213	269.3	1.809	2	195	195.3	0.5	0.006073	0.01215
Run 3	101320	101300	0.7896	80000	288	1.213	288	30.93	11.85	0.5995	0.006311	1.213	269.3	1.809	2	195	195.4	0.5	0.006072	0.01214
Run 4	101324	101300	0.7895	80000	288	1.213	288	30.94	11.85	0.5994	0.006311	1.213	269.3	1.809	2	195	195.4	0.5	0.006072	0.01214
Run 5	101328	101300	0.7895	80000	288	1.213	288	30.95	11.85	0.5993	0.006311	1.213	269.3	1.809	2	195	195.4	0.5	0.006072	0.01214
Run 6	101333	101300	0.7895	80000	288	1.213	288	30.95	11.85	0.5992	0.006311	1.213	269.3	1.809	2	195.1	195.5	0.5	0.006071	0.01214
Run 7	101338	101300	0.7894	80000	288	1.213	288	30.96	11.85	0.5989	0.006311	1.213	269.3	1.809	2	195.1	195.5	0.5	0.006071	0.01214
Run 8	101343	101300	0.7894	80000	288	1.213	288	30.97	11.85	0.5988	0.006311	1.213	269.3	1.809	2	195.1	195.5	0.5	0.00607	0.01214
Run 9	101348	101300	0.7894	80000	288	1.214	288	30.98	11.85	0.5988	0.006311	1.214	269.3	1.809	2	195.1	195.6	0.5	0.00607	0.01214
Run 10	101354	101300	0.7893	80000	288	1.214	288	30.99	11.85	0.5986	0.006311	1.214	269.3	1.809	2	195.2	195.6	0.5	0.006069	0.01214
Run 11	101361	101300	0.7893	80000	288	1.214	288	31	11.85	0.5985	0.006311	1.214	269.3	1.809	2	195.2	195.7	0.5	0.006069	0.01214
Run 12	101367	101300	0.7892	80000	288.1	1.214	288	31.01	11.85	0.5983	0.006311	1.214	269.3	1.809	2	195.2	195.7	0.5	0.006068	0.01214
Run 13	101374	101300	0.7892	80000	288.1	1.214	288	31.02	11.85	0.5981	0.006311	1.214	269.3	1.809	2	195.2	195.8	0.5	0.006067	0.01213
Run 14	101381	101300	0.7891	80000	288.1	1.214	288	31.03	11.85	0.5979	0.006311	1.214	269.3	1.809	2	195.2	195.8	0.5	0.006067	0.01213
Run 15	101389	101300	0.789	80000	288.1	1.214	288	31.05	11.85	0.5978	0.006311	1.214	269.3	1.809	2	195.3	195.9	0.5	0.006066	0.01213
Run 16	101397	101300	0.789	80000	288.1	1.214	288	31.06	11.85	0.5976	0.006311	1.214	269.3	1.809	2	195.3	196	0.5	0.006065	0.01213
Run 17	101405	101300	0.7889	80000	288.1	1.214	288	31.07	11.85	0.5973	0.006311	1.214	269.3	1.809	2	195.4	196.1	0.5	0.006065	0.01213
Run 18	101413	101300	0.7889	80000	288.1	1.214	288	31.09	11.85	0.5971	0.006311	1.214	269.3	1.809	2	195.4	196.1	0.5	0.006064	0.01213
Run 19	101422	101300	0.7888	80000	288.1	1.214	288	31.1	11.85	0.5969	0.006311	1.214	269.3	1.809	2	195.4	196.2	0.5	0.006063	0.01213
Run 20	101431	101300	0.7887	80000	288.1	1.214	288	31.12	11.85	0.5967	0.006311	1.214	269.3	1.809	2	195.5	196.3	0.5	0.006062	0.01212
Run 21	101441	101300	0.7886	80000	288.1	1.214	288	31.13	11.85	0.5964	0.006311	1.214	269.3	1.809	2	195.5	196.3	0.5	0.006062	0.01212
Run 22	101451	101300	0.7886	80000	288.1	1.214	288	31.15	11.85	0.5962	0.006311	1.214	269.3	1.809	2	195.6	196.5	0.5	0.006061	0.01212
Run 23	101461	101300	0.7885	80000	288.1	1.214	288	31.16	11.85	0.5959	0.006311	1.214	269.3	1.809	2	195.6	196.5	0.5	0.00606	0.01212
Run 24	101471	101300	0.7884	80000	288.1	1.215	288	31.18	11.85	0.5957	0.006311	1.215	269.3	1.809	2	195.6	196.6	0.5	0.006059	0.01212
Run 25	101482	101300	0.7883	80000	288.1	1.215	288	31.2	11.85	0.5954	0.006311	1.215	269.3	1.809	2	195.7	196.7	0.5	0.006058	0.01212
Run 26	101493	101300	0.7882	80000	288.2	1.215	288	31.22	11.85	0.5951	0.006311	1.215	269.3	1.809	2	195.7	196.8	0.5	0.006057	0.01211
Run 27	101505	101300	0.7881	80000	288.2	1.215	288	31.24	11.85	0.5948	0.006311	1.215	269.3	1.809	2	195.8	196.9	0.5	0.006056	0.01211
Run 28	101517	101300	0.788	80000	288.2	1.215	288	31.26	11.85	0.5946	0.006311	1.215	269.3	1.809	2	195.8	197	0.5	0.006055	0.01211
Run 29	101529	101300	0.788	80000	288.2	1.215	288	31.28	11.85	0.5942	0.006311	1.215	269.3	1.809	2	195.9	197.1	0.5	0.006054	0.01211
Run 30	101541	101300	0.7879	80000	288.2	1.215	288	31.3	11.85	0.5939	0.006311	1.215	269.3	1.809	2	195.9	197.2	0.5	0.006053	0.01211

Figura 2.12. Pantalla tabla de variables software EES.

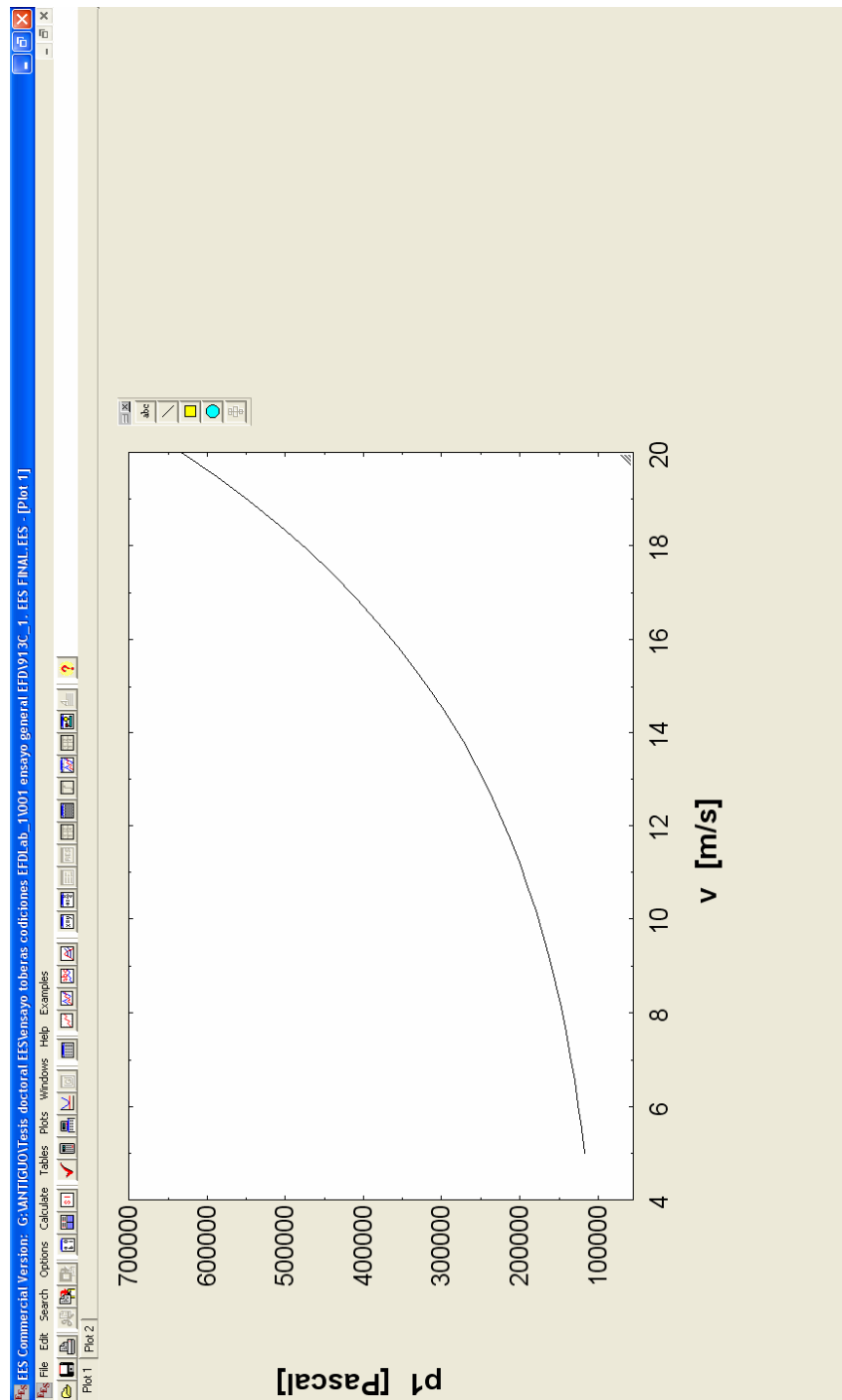


Figura 2.13. Pantalla para generación de gráficas representativas de variables.

2.2.6.2. EFD. Lab v 8.0

El tratamiento de las ecuaciones que definen el modelo matemático seguido para la resolución de la geometría del concentrador mediante software EES, no es suficiente para obtener resultados acordes con el comportamiento real ya que, además de la evolución experimentada por el fluido en cuanto a las propiedades termodinámicas, deben tenerse en cuenta los efectos debidos a la rugosidad y parámetros de forma del conducto que afectan a las trayectorias del flujo y por tanto pueden alterar el comportamiento del flujo.

Con el fin de tener en cuenta estos efectos, una vez obtenido el modelo a través del software EES, se recurre a la mecánica de fluidos computacional para lo cual se hace uso del software Engineering Fluids Dynamics (EFD.Lab v8). Este software presenta la ventaja de evaluar el equilibrio del vapor de agua condensada en el flujo de aire corrigiendo los cambios correspondientes que se producen respecto a la temperatura, densidad, entalpía, calor específico y velocidad sónica. Los resultados obtenidos para el aire húmedo tienen validez cuando la fracción de agua condensada no excede el 5% en volumen y la temperatura se encuentra en el rango de 283 a 610K.

Este software genera la geometría mediante software SolidWorks figura 2.14 definiendo un cuerpo sólido que constituirá el modelo a ensayar.

Generado el modelo, este se lleva al CFD EFD.Lab v8 con el fin de proceder a su ensayo. En las figura 2.15 a 2.17 pueden apreciarse diferentes fases del proceso de ensayo.

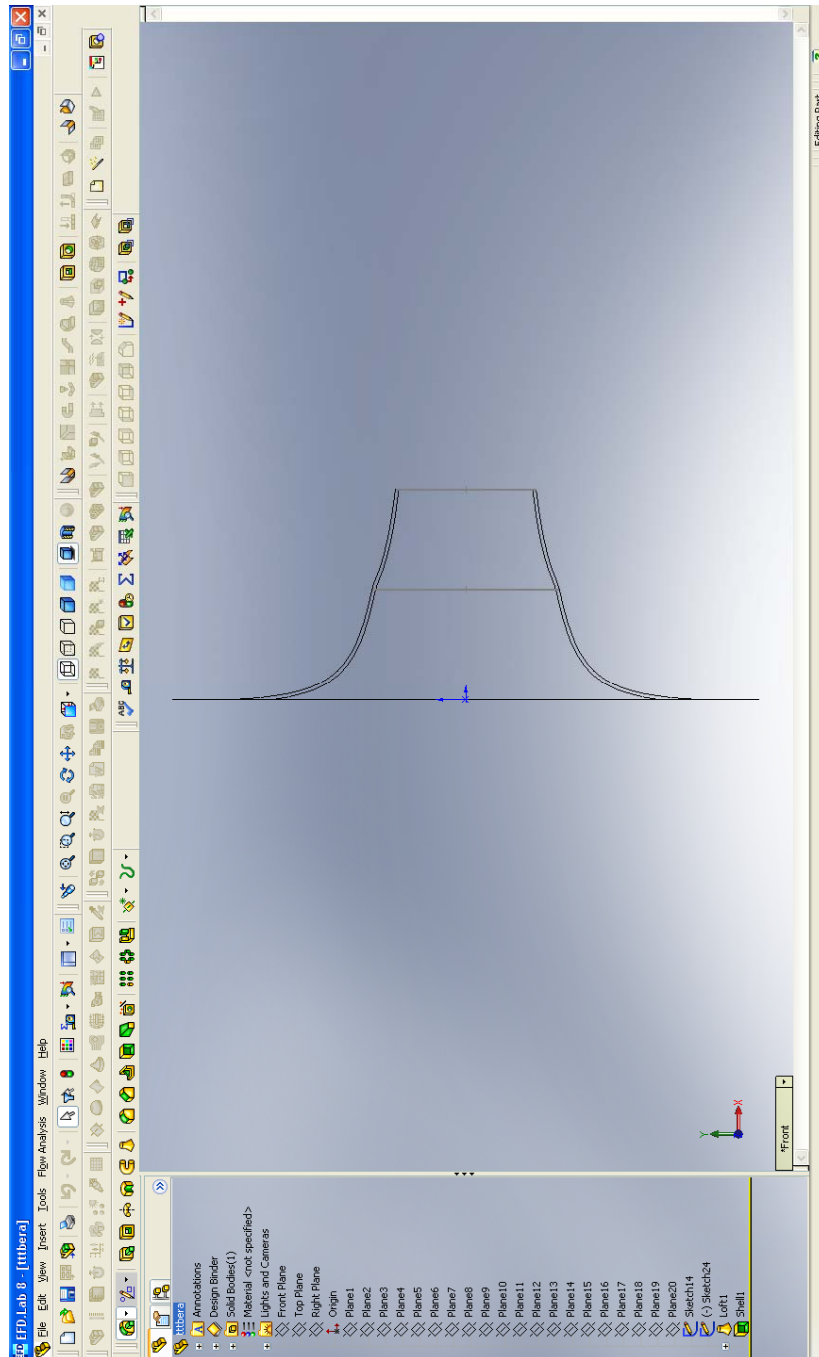


Figura 2.14. Pantalla principal SolidWorks generando la geometría del concentrador.

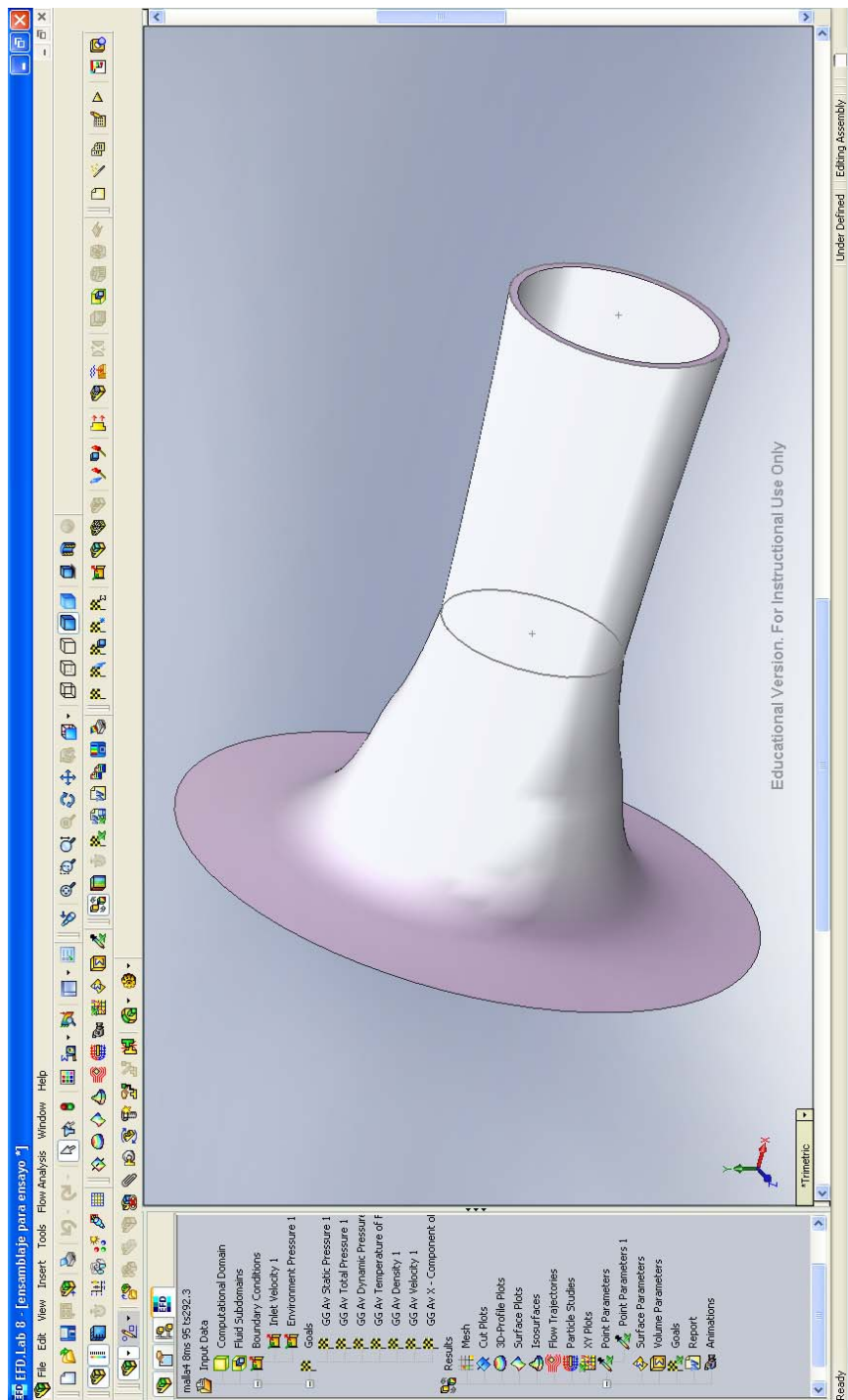


Figura 2.15. EFD.Lab v8 Modelo concentrador – difusor ensamblados.

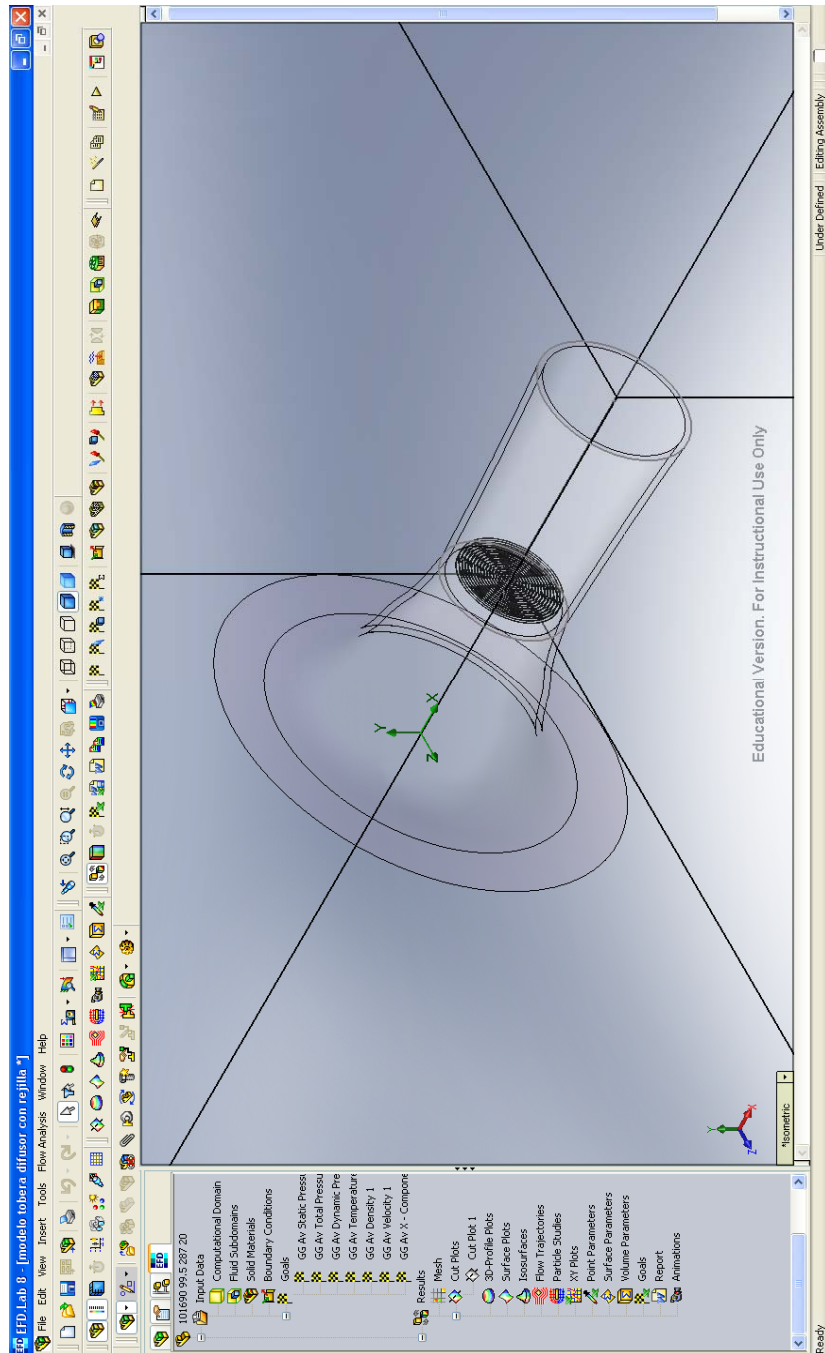


Figura 2.16. Disposición de rejilla en la sección mínima para favorecer condensación.

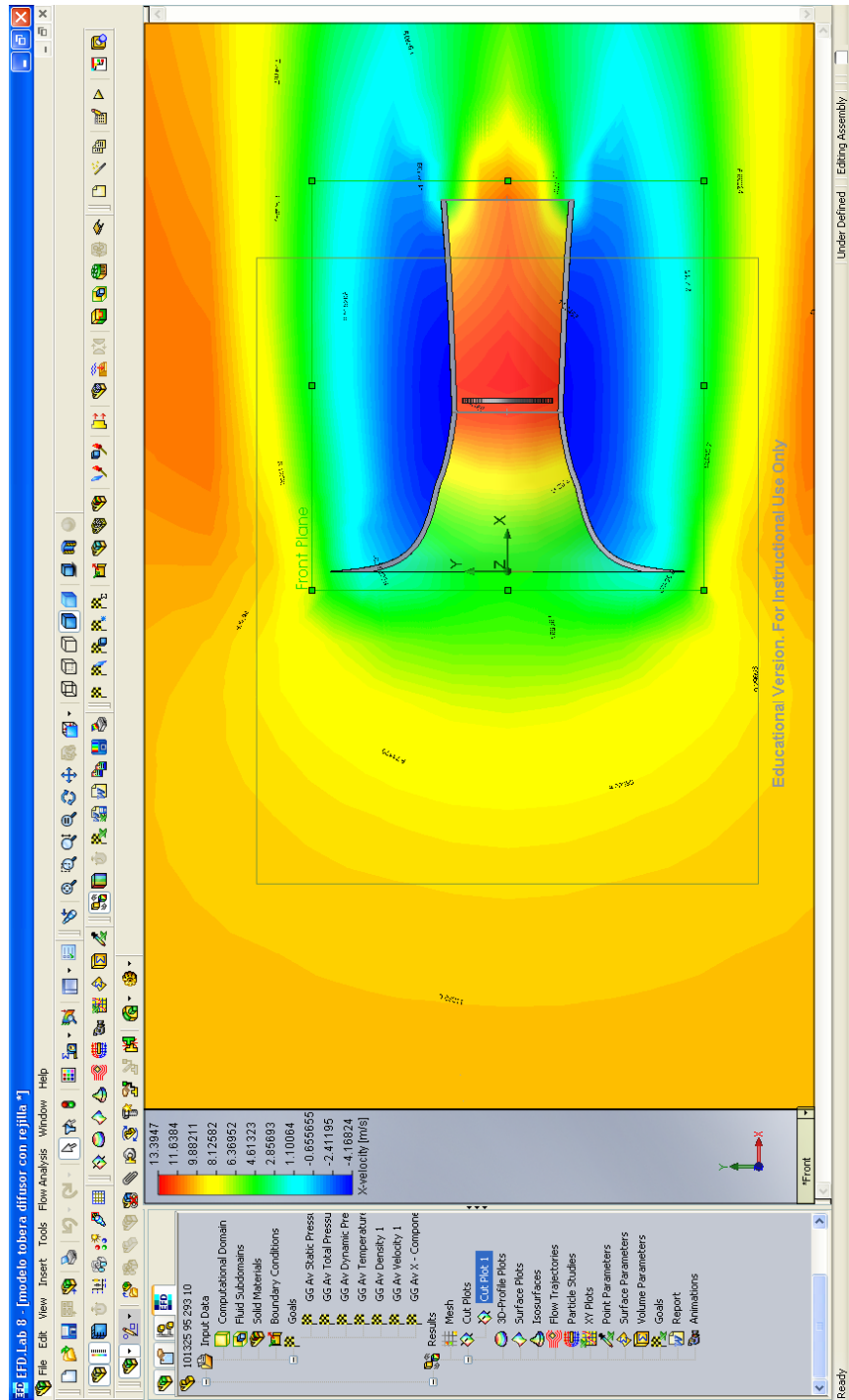


Figura 2.17. Presentación de resultados con isóneas de velocidad.

El procesado paramétrico de las variables a determinar se recalcula hasta alcanzar el criterio de convergencia donde se produce el ajuste de las condiciones de entrada para alcanzar las de salida propuestas.

2.3. Métodos

De todas las variables termodinámicas que afectan a la psicometría del aire, un número determinado de ellas son manipulables mientras que el resto se ajustarán a los valores de las primeras dando como resultado un punto de equilibrio que en este estudio prefija las condiciones de entrada al proceso. Dado que los concentradores eólicos tienen su campo de actuación en ambientes exteriores, la presión ambiente no es manipulable y debe tomarse como valor para la misma un promedio evaluable a través de los históricos obtenidos anualmente en los centros de observación meteorológica [16]. Este planteamiento es también válido para la temperatura seca del aire y por tanto, ambos parámetros deben ser tomados como datos de entrada sin posibilidad de manipulación.

Según los datos climáticos analizados, así como ensayos de laboratorio realizados, estos manifiestan que a una presión ambiente constante, puede variarse la humedad del aire en un amplio rango y el estado energético de la mezcla depende del vapor de agua presente. Se procederá por tanto en este trabajo a manipular la humedad mediante la adición de agua nebulizada en la vena fluida tratada a fin de evaluar los cambios energéticos experimentados en el tránsito de la misma a través del concentrador eólico considerando los calores sensibles y latentes intercambiados y que afectan a la entalpía de la masa de aire.

2.3.1. Modelo termodinámico del aire húmedo

El objeto de esta tesis se centra en obtener un concentrador eólico adaptado a las condiciones de aire húmedo y por tanto, el modelo matemático debe formularse en base a las ecuaciones que rigen el comportamiento de este fluido, siendo de relevancia tener en cuenta factores como: presión, temperatura, humedad y velocidad. El análisis de estos parámetros indicará cuáles son las mejores condiciones para la transformación energética.

Teniendo en cuenta la potencia eólica, ecuación (0.1), claramente dependiente de la densidad y de la tercera potencia de la velocidad, asumiendo como constante para el modelo la sección transversal de paso, no cabe duda que cualquier actuación sobre la densidad o la velocidad puede alterar la energía contenida en la vena fluida de aire húmedo. Presión, temperatura y humedad son las tres variables fundamentales que definen el estado energético del aire húmedo requiriendo su estudio un análisis tridimensional aspecto que es abordado en esta tesis. Otras variables como entalpía, densidad y velocidad son dimanantes de ellas y deben establecerse las dependencias a través del estudio de los parámetros fundamentales del aire húmedo.

2.3.1.1. Ecuaciones de estado de los gases atmosféricos

En base a los estudios que se realizan en esta tesis puede considerarse la atmósfera constituida por una masa de aire seco y vapor de agua. Así de

acuerdo a la ecuación de los gases perfectos se establece la ecuación de estado 2.3 del aire seco

$$p_a \cdot V = m_a \cdot R_a \cdot T \quad (2.3)$$

p_a presión parcial del aire seco

m_a masa de aire seco

R_a (287,5 J/kg/K) constante específica del aire seco

La ecuación de estado para el vapor de agua viene dada por 2.4.

$$p_v \cdot V = m_v \cdot R_v \cdot T \quad (2.4)$$

p_v presión parcial del vapor de agua

m_v masa del vapor de agua

R_v constante específica del vapor de agua

Teniendo en cuenta la ley de Dalton, se obtiene la ecuación de estado 2.5 para el aire húmedo a través de la cual podremos obtener la constante específica del aire húmedo ecuación 2.6 o las presiones parciales de cada componente ecuaciones 2.7, 2.8 y 2.9.

$$p \cdot V = (m_a \cdot R_a + m_v \cdot R_v) \cdot T = m \cdot R_h \cdot T \quad (2.5)$$

$$R_h = \frac{1}{m} (m_a \cdot R_a + m_v \cdot R_v) \quad (2.6)$$

$$p_a = \rho_a \cdot R_a \cdot T \quad (2.7)$$

$$p_v = \rho_v \cdot R_v \cdot T \quad (2.8)$$

$$p = \rho_h \cdot R_h \cdot T \quad (2.9)$$

2.3.1.2. Funciones de estado de los gases atmosféricos

En el modelo matemático se han considerado las funciones de estado que nos definen el estado energético en el que se encuentra el aire húmedo así energía interna ecuación 2.10, entropía ecuación 2.11 y entalpía ecuación 2.12 permiten definir el estado energético del fluido, ecuaciones 2.13 y 2.14.

$$U - U_0 = m \cdot c_v \cdot (T - T_0) \quad (2.10)$$

$$S - S_0 = m \cdot c_p \cdot \log \frac{T}{T_0} - m \cdot R \cdot \log \frac{P}{P_0} \quad (2.11)$$

$$H - H_0 = m \cdot c_p \cdot (T - T_0) \quad (2.12)$$

$$H = m_a \cdot h_a \cdot T_0 + m_a \cdot c_{pa} \cdot (T - T_0) + m_v h_v \cdot T_0 + m_v \cdot c_{pv} \cdot (T - T_0) \quad (2.13)$$

$$S - S_0 = m_a \cdot c_{pa} \cdot \log \frac{T}{T_0} + m_a \cdot c_{pv} \cdot \log \frac{T}{T_0} - m_a \cdot R_a \cdot \log \frac{P_a}{P_{a0}} - m_v \cdot R_v \cdot \log \frac{P_v}{P_{v0}} \quad (2.14)$$

2.3.1.1. Índices de humedad

Para cuantificar la cantidad de vapor de agua presente en el aire atmosférico se consideran en el modelo matemático los índices de humedad ya que el vapor de agua tiene vital importancia en los intercambios energéticos producidos.

2.3.1.1.1. Humedad absoluta.

Establece la relación de la masa de agua m_w contenida en la masa de aire seco m_a . Dicha agua puede encontrarse en estado de vapor o líquido en suspensión e indica la capacidad de dilución del agua en el aire, y dependiendo de la cantidad presente el aire puede estar no saturado, saturado ecuación 2.15 y sobresaturado ecuación 2.16.

$$W = \frac{m_w}{m_a} \quad (2.15)$$

$$W = \frac{m_w + m_l}{m_a} \quad (2.16)$$

m_w masa de vapor de agua

m_a masa de aire seco

m_l masa de agua en estado líquido

2.3.1.1.2. Humedad específica

Viene establecida por la proporción másica de vapor de agua en el aire húmedo ecuación 2.17.

$$q_v = \frac{m_v}{m_a + m_v} \quad (2.17)$$

2.3.1.1.3. Humedad relativa

El vapor de agua presente en el aire húmedo ejerce una presión parcial p_w , presión que si el aire estuviera saturado de humedad a la misma temperatura ejercería otra presión p_{ws} . El cociente entre ambas presiones constituye lo que denominamos humedad relativa ecuación 2.18.

$$\varphi = \frac{p_w}{p_{ws}} \quad (2.18)$$

p_w presión parcial del vapor de agua

p_{ws} presión parcial del vapor de agua en saturación

En cuanto a esta propiedad, además de gases existe también en la atmósfera gran cantidad de partículas que constituyen los aerosoles y que están presentes a lo largo de ella desde los lugares más contaminados a los lugares más remotos. Como la fuente principal de las partículas es la superficie terrestre, la mayor concentración se da en las cercanías del suelo disminuyendo esta concentración según se asciende a capas elevadas.

Cuando nos encontramos en atmósfera libre, el proceso de condensación no se produce al llegar al 100% de humedad relativa; esto se debe a que, a partir del vapor, se deben formar gotas de agua muy pequeñas, con radios del orden de centésimas de micra. En estas condiciones los efectos de la tensión superficial se oponen a la formación de estas gotas por lo que se necesitan humedades de hasta el 400% para que se formen. Así, atendiendo a la ley de Newton, ecuación 2.19 que nos da la presión de vapor en equilibrio sobre una gota de agua pura con radio r

$$p_{ws}(r) = p_{ws}(\infty) \exp\left(\frac{2\sigma}{\rho_L R_v T_r}\right) \quad (2.19)$$

Siendo $p_{ws}(\infty)$ la presión de vapor saturante sobre una superficie plana e infinita de agua; σ la tensión superficial del agua; R_v la constante específica del vapor; T la temperatura y r el radio de la gota de agua.

Se establece que, cuando el radio de la gota tiende a cero la tensión de vapor de equilibrio se hace muy grande. Dado que en la atmósfera no se dan humedades relativas tan grandes, el proceso de formación de gotas atiende fenómenos higroscópicos. Así, en una disolución de una sal en agua, la presión de vapor saturante de equilibrio respecto de esta disolución es menor que la presión de vapor saturante si tuviésemos el agua pura, esto es la humedad relativa del equilibrio respecto de la disolución es menor del 100%, según la ley de Raoult ecuación 2.20.

$$p_{ws}(dis) = p_{ws}(pura) \cdot N_w \quad (2.20)$$

siendo N_w la fracción molar de agua en la disolución, para una gota de densidad ρ' que contiene m gramos de sal disuelta que se disocia en υ iones, el número de moles de agua viene dado por la ecuación 2.21.

$$\frac{\frac{4}{3}\pi.\rho'.r^3 - m}{M_w} \quad (2.21)$$

y el número de moles de soluto, teniendo en cuenta que normalmente se encuentra ionizado

$$\frac{vm}{M_s} \quad (2.22)$$

por tanto

$$N_w = \frac{\left(\frac{4}{3}\pi.\rho'.r^3\right)/M}{\left(\frac{4}{3}\pi.\rho'.r^3 - m\right)/M + vm/M_s} = \left[1 + \frac{vm.M_w}{M_s\left(\frac{4}{3}\pi.\rho'.r^3 - m\right)}\right]^{-1} \quad (2.23)$$

Combinando los efectos de tensión superficial e higroscopicidad obtenemos la ecuación 2.24 formulada por Köhler [17].

$$p_{ws}(dis, r) = p_{vsw}(pura, \infty) \exp\left(\frac{2\sigma'}{\rho'.R_v.T_r}\right) \left[1 + \frac{vm.M_w}{M_s\left(\frac{4}{3}\pi.\rho'.r^3 - m\right)}\right]^{-1} \quad (2.24)$$

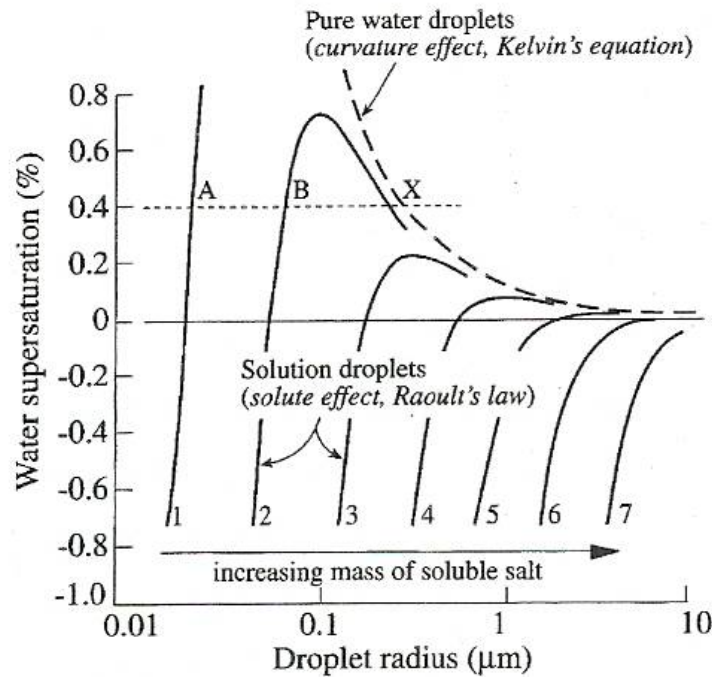


Figura 2.18. Presión de vapor de equilibrio, expresada como sobresaturación en % como función del radio de la gota para diferentes cantidades de sal disuelta.

Dado que en el estudio del concentrador eólico se estima que el fluido experimente una disminución de presión, cabe en este punto referirse al enfriamiento adiabático por disminución de presión. Este proceso tiene lugar sin intercambio de calor con el exterior y suele ocurrir cuando una masa de aire asciende desde un nivel inferior a otro superior por la disminución de presión. Cuando esto ocurre, el aire se expande en su interior y puesto que el aire es mal transmisor del calor, la energía necesaria para la expansión la extrae de su propia energía interna, disminuyendo por tanto su temperatura. Esta disminución de temperatura puede expresarse mediante la ecuación 2.25.

$$\frac{dT}{dz} = \frac{-g}{c_p} \quad (2.25)$$

Entendiendo que durante esa elevación (descenso de presión), el aire no pierde humedad, esto es, la fracción molar del vapor se mantiene constante, atendiendo a la humedad relativa obtenemos la ecuación 2.26.

$$\varphi = 100 \frac{P_v}{P_{ws}} \approx 100 \frac{q_v \cdot P}{\varepsilon \cdot P_{ws}(T)} \quad (2.26)$$

al expansionarse el gas disminuye el valor del numerador así como también lo hace el denominador debido a la temperatura. Ahora bien, la velocidad a la que disminuye el denominador es mayor que la velocidad a la que disminuye la presión, de tal forma que la humedad relativa aumenta hasta alcanzar la saturación en la que se produce la condensación y por tanto la formación de nube; nivel CCL (cloud condensation level). Una vez formada ésta, si el aire sigue ascendiendo (o disminuyendo de presión) continuará enfriándose, pero ahora el ritmo es menor pues al producirse la condensación se libera calor latente.

Los procesos de expansión que provocan el enfriamiento adiabático pueden tener un carácter local, por ejemplo, cuando una masa de aire tiene que ascender a lo largo de una montaña o cuando por alguna razón una masa de aire cercana al suelo se calienta respecto de su entorno y asciende dando lugar a pequeñas nubes, los cúmulos humilis de buen tiempo.

Un ejemplo típico de la influencia orografía sobre la nubosidad se tiene en el caso del llamado viento Foehn. Este viento es frecuente y fuerte sobre las laderas norte de los Alpes, de donde procede su nombre. Así cuando una masa de aire se ve forzada a ascender una cadena montañosa, el aire se enfría siguiendo una adiabática seca (10 K/km). Si la montaña es lo suficientemente alta (disminuye la presión) y el aire lleva la suficiente humedad se pueden formar nubes, en cuyo interior el gradiente térmico es menor. Si se produce la precipitación antes de rebasar la cumbre, una vez superada ésta, el aire ahora ya desprovisto de humedad, se comprime y por tanto se calienta al descender. Así pues, al otro lado de la montaña tenemos un aire más cálido y seco que antes de atravesar el sistema montañoso.

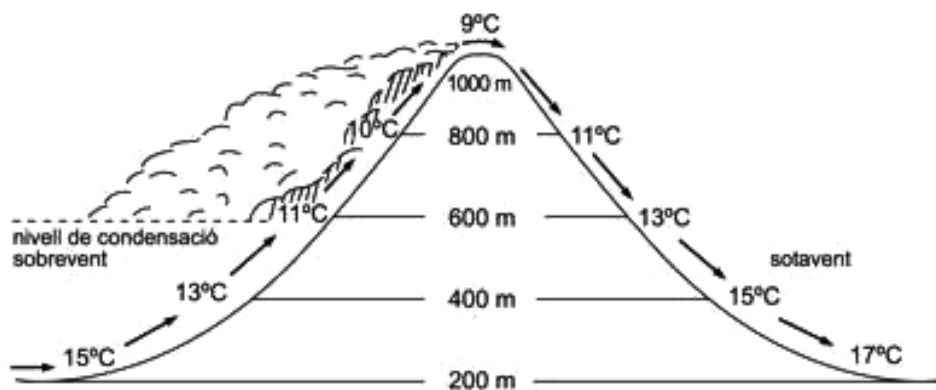


Figura 2.19. Efecto Foehn.

Debe estimarse la disminución de presión y densidad que se producirá con la altura atendiendo a la ley barométrica que se expresa según la ecuación 2.27 válida cuando la temperatura permanece constante.

$$p = p_0 \cdot e^{\frac{-M \cdot g \cdot (z - z_0)}{R \cdot T}} \quad (2.27)$$

M es la masa molecular del aire húmedo

z - z₀ es la diferencia de alturas consideradas

p es la presión correspondiente a la altura **h**

p₀ es la presión de referencia a la altura **h₀**

R es la constante de los gases

T es la temperatura absoluta media entre los dos niveles

La ecuación 2.27 puede modificarse teniendo en cuenta el incremento de altura “altura a la que debe elevarse el aire para que la presión atmosférica disminuya a la mitad”. En este caso $P = P_0/2$, resultando un incremento de altura según la ecuación 2.28.

$$\Delta z = \frac{R \cdot T}{M \cdot g} \ln 2 \quad (2.28)$$

Por último, considerando la escala de alturas definida como “la que debe elevarse una masa de aire para que la presión disminuya en un factor $e = 2,718182$ tomando un valor $1 - 1/e = 0,632$ ”, obtenemos la escala de alturas según la ecuación 2.29.

$$z = \frac{R \cdot T}{M \cdot g} \quad (2.29)$$

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se obtiene la variación de presión y densidad en función de la altura a la que se eleva la masa de aire húmedo según las ecuaciones 2.30 y 2.31.

$$p = p_0 \cdot e^{\frac{(z - z_0)}{z}} \quad (2.30)$$

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{-\frac{(z-z_0)}{z}} \quad (2.31)$$

2.3.1.1.4. Volumen específico aire húmedo

En los procesos de tratamiento de aire húmedo, la masa de aire seco es lo único que permanece invariable a través de todas las operaciones. Es también la base del volumen específico, que se entiende como volumen por unidad de masa de aire seco según la ecuación 2.32.

$$p \cdot V = N \cdot R' T = (N_v + N_a) R' T = R' T \left(\frac{m_w}{p \cdot M_w} + \frac{m_a}{p \cdot M_a} \right) \quad (2.32)$$

Ahora bien, entendiendo que se pretende variar la húmeda w , obtenemos la ecuación 2.33.

$$v_h = \frac{R' T}{p} \left(\frac{w}{p \cdot M_w} + \frac{1}{p \cdot M_a} \right) \quad (2.33)$$

se pone de manifiesto que el volumen específico aumenta con la humedad y por tanto, el aire húmedo tiene una densidad menor que el aire seco.

Dado que la potencia eólica es directamente proporcional a la densidad del aire, se tratará de actuar sobre esta con el fin de evaluar su incidencia sobre la conversión energética.

2.3.1.1.5. Densidad del aire húmedo

Impuestas las condiciones iniciales función de la climatología del lugar, podemos asegurar que el flujo siempre se mantendrá en condición subsónica, a números de Mach inferiores a 0,3 y por tanto el flujo será incompresible, aunque su densidad puede variar debido a la coexistencia del vapor de agua con el aire seco, según la ecuación 2.34.

$$\rho = \frac{m}{v_{total}} = \frac{m_a + m_w}{m_a \cdot v_h} = \frac{1 + \omega}{v_h} \quad (2.34)$$

También puede establecerse en función de las presiones parciales y sus constantes específicas como en la ecuación 2.35.

$$\rho = \frac{P_a}{R_a \cdot T} + \frac{P_w}{R_w \cdot T} \quad (2.35)$$

2.3.1.1.6. Entalpía específica del aire húmedo

Tratándose de aire húmedo, la regla de Gibbs establece que la entalpía de la mezcla es la suma de la entalpía de cada uno de los componentes individuales ecuación 2.36.

$$H_{\text{airehúmedo}} = H_{\text{aireseco}} + H_{\text{vaporagua}} \quad (2.36)$$

Dado que uno de los objetivos de esta tesis es el diseño de un concentrador que incremente la velocidad del fluido y esta es dependiente del contenido energético que la masa de aire húmedo posee, debe evaluarse la entalpía correspondiente al vapor de agua presente según las ecuaciones 2.37 a 2.39 dependiendo del estado en el que se encuentre.

$$h_a = h_{a,ref} + c_{pa}(T - T_{ref}) \quad \text{Aire seco} \quad (2.37)$$

$$h_w = h_{g,ref} + c_{pw}(T - T_{ref}) \quad \text{Vapor de agua} \quad (2.38)$$

$$h_f = h_{f,ref} + c_{p,liq}(T - T_{ref}) \quad \text{Agua líquida} \quad (2.39)$$

En el tratamiento del modelo matemático, se considerarán los tres factores anteriores ya que, el vapor de agua puede encontrarse en condiciones de condensación cediendo el calor latente.

2.3.1.1.7. Calor específico aire húmedo

El calor específico del aire húmedo se tomará considerando la mezcla de aire seco y vapor de agua según la ecuación 2.40.

$$c_h = c_{pa} + \omega \cdot c_{pw} \quad (2.40)$$

2.3.1.1.8. Temperatura de rocío

La saturación del vapor puede lograrse bien aumentando la presión de vapor mediante la vaporización de agua o bien disminuyendo la temperatura. Así, manteniendo la presión total constante y procediendo a un enfriamiento del aire húmedo llegamos a producir la condensación a una temperatura que se conoce como punto de rocío T_r .

2.3.1.1.9. Proceso pseudoadiabático

El fenómeno analizado en esta tesis está relacionado directamente con el aire húmedo especialmente cuando se encuentra saturado y en esta situación la condensación del vapor de agua libera una cantidad de calor, de tal forma que la disminución de la temperatura en el caso de producirse una expansión es menor que en el caso de que no hubiese condensación. En el caso de que el vapor condense y precipite en forma líquida nos encontramos ante el proceso de Von Bezold o proceso pseudoadiabático.

Cuando el vapor de agua condensa, el calor generado es $-\lambda_0 dm_v$ siendo dm_v la cantidad de vapor condensado y disminuyendo la temperatura debido a una expansión adiabática según la expresión 2.41, debemos tener en cuenta la cantidad correspondiente al vapor de agua condensada ecuación 2.42.

$$m_a \cdot c_{pa} \cdot dT = \frac{m_a \cdot R_a \cdot T}{p} dp \quad (2.41)$$

$$m_a \cdot c_{pa} \cdot dT = \frac{m_a \cdot R_a \cdot T}{p} dp - \lambda_0 \cdot dm_v \quad (2.42)$$

La ecuación 2.42 puede reordenarse y considerando que $r_v = m_v/m_a$ toma la forma de la ecuación 2.43.

$$c_{pa} \frac{dT}{T} = \frac{R_a}{p} dp - \frac{\lambda_0}{T} dr_v \quad (2.43)$$

Finalmente, considerando la ecuación de Clausius-Clapeyron 2.44 que pone de manifiesto la dependencia en las variaciones de la presión de vapor y la temperatura, obtenemos la ecuación de la pseudoadiabática 2.45 que valora la disminución de la temperatura en el aire cuando el vapor de agua condensa.

$$\frac{dp_{vw}}{p_{vw}} = \frac{\lambda_0}{R_v \cdot T^2} dT \quad (2.44)$$

$$\left(c_{pa} + \frac{\lambda_0^2 \cdot p_{ws}}{R_a \cdot p \cdot T^2} \right) \frac{dT}{T} - \left(R_a + \frac{\lambda_0 \cdot p_{ws}}{p \cdot T} \right) \frac{dp}{p} = 0 \quad (2.45)$$

2.3.2. Modelo fluido-dinámico del aire húmedo en el proceso

El modelo de concentrador eólico analizado en esta tesis está conformado por un rotor y dos conductos tobera – difusor que constituyen el volumen de control analizado. Además del estudio correspondiente a la variación de las propiedades termodinámicas del aire húmedo como consecuencia de los cambios en presión, velocidad y humedad se hace necesaria la valoración de la condición de flujo atendiendo al tipo de régimen de circulación a través del volumen de control, así como las ecuaciones de conservación.

El fluido real que atraviesa el concentrador está compuesto por moléculas con espacios vacíos entre ellas y en constante movimiento. En esta tesis interesan los efectos macroscópicos que son los que realmente percibimos y medimos. Así, al establecer los modelos matemáticos se trata al fluido como una sustancia indivisible, es decir, un medio continuo sin entrar en el comportamiento individual de las moléculas. Como consecuencia de ello, se considera que cada propiedad del fluido tiene un valor definido en cada punto del espacio y así densidad, temperatura, velocidad, cantidad de movimiento, etc., se consideran funciones continuas de la posición y del tiempo.

Atendiendo al medio continuo, la identificación del movimiento del flujo se realiza en coordenadas espaciales, sin tener en cuenta el movimiento particular de cada partícula empleado en los sistemas discretos. Se realiza así un estudio mediante campo.

$$v_x = f(x, y, z, t) \quad (2.46)$$

$$v_y = g(x, y, z, t) \quad (2.47)$$

$$v_z = h(x, y, z, t) \quad (2.48)$$

Para el caso analizado en esta tesis, las propiedades y características del flujo, en cada punto del espacio, permanecen invariantes en el tiempo dando lugar a un flujo permanente o estacionario independiente del tiempo y el campo de velocidades viene dado por las ecuaciones 2.49 a 2.51.

$$v_x = f(x, y, z) \quad (2.49)$$

$$v_y = g(x, y, z) \quad (2.50)$$

$$v_z = h(x, y, z) \quad (2.51)$$

El concentrador analizado en esta tesis se configura con una disminución de sección a lo largo de su longitud siendo necesario conocer la aceleración del campo de velocidades. Sabiendo que las coordenadas espaciales $x(t)$, $y(t)$ y $z(t)$ son funciones del tiempo, podemos establecer el campo de aceleración mediante la técnica de derivación de funciones compuestas, ecuaciones 2.52 y 2.53.

$$\vec{a} = \frac{D}{Dt} \vec{v}(x, y, z, t) \quad (2.52)$$

$$\vec{a} = \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} \frac{dz}{dt} \right) + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \quad (2.53)$$

x, y, z son las coordenadas de la partícula y por tanto sus derivadas respecto al tiempo son las componentes de la velocidad V , por tanto, la ecuación 2.53 se puede reescribir como la ecuación 2.54.

$$\bar{a} = \frac{D\bar{v}}{Dt} = \left(v_x \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + v_y \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + v_z \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) + \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \quad (2.54)$$

La ecuación 2.54 es la derivada sustancial de una partícula. Esta partícula que se mueve en un campo del flujo puede cambiar de velocidad debido, solamente, al cambio de posición, es decir cuando se mueve de una región donde la velocidad es mayor o menor en función de la posición, lo que provoca que la velocidad de la partícula sufra variaciones en los diversos puntos del campo. Así, en el concentrador se establece un flujo estacionario y al haber una reducción en sección, las partículas del fluido cambian de posición experimentando una aceleración de transporte (convectiva) expresada por el primer término del segundo miembro de la ecuación 2.54. En el segundo término del segundo miembro de esta ecuación se refleja la aceleración local debido al cambio del campo de velocidad en función del tiempo y no de la posición, por tanto sería de aplicación para el caso de producirse en flujo transitorio que no corresponde al concentrador analizado.

2.3.2.1 Ecuación de transporte de Reynolds

Por el interior del concentrador eólico estudiado en esta tesis circula aire húmedo con capacidad de distorsión y deformación, de tal modo que es muy difícil hacer un seguimiento de la misma masa de fluido todo el tiempo. Por este motivo, es preferible establecer un volumen de control que un sistema ya que, la superficie de este volumen queda definida perfectamente por la geometría del concentrador y esta no cambiará aunque si puede hacerlo la materia que contiene tanto en cantidad como en identidad. Se hace por tanto necesario convertir el análisis de un sistema en el análisis de un volumen de control usando las técnicas matemáticas para poder aplicar las leyes fundamentales a las regiones específicas en lugar de a masas concretas y por tanto es de aplicación el teorema de transporte de Reynolds.

La relación de cambio de cualquier propiedad del sistema N_{sistema} viene dado por la ecuación 2.55.

$$\left. \frac{DN}{Dt} \right|_{\text{sistema}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N_{\text{sis}}|_{t+\Delta t} - N_{\text{sis}}|_t}{\Delta t} \quad (2.55)$$

La transición de cualquier propiedad de un sistema puede identificarse por dos superficies solapadas que proporcionan el contenido de dicha propiedad en dos instantes diferentes figura 2.20. Así, para el instante t la propiedad N será el

contenido de la región I y II mientras que para el instante $t+\Delta t$ el contenido será el correspondiente a la región II y III.

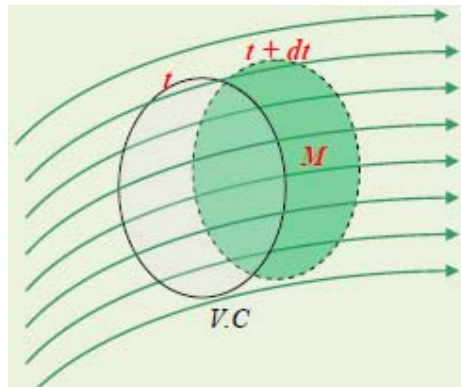


Figura 2.20. Transición de una propiedad en una superficie de control.

Bajo este criterio, la ecuación 2.55 puede reescribirse como la ecuación 2.56.

$$\left. \frac{DN}{Dt} \right|_{\text{sistema}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N_{II}|_{t+\Delta t} + N_{III}|_{t+\Delta t} - (N_I|_t + N_{II}|_t)}{\Delta t} \quad (2.56)$$

Reordenando términos obtenemos la ecuación 2.57.

$$\left. \frac{DN}{Dt} \right|_{\text{sistema}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N_{II}|_{t+\Delta t} - N_{II}|_t}{\Delta t} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N_{III}|_{t+\Delta t} - N_I|_t}{\Delta t} \quad (2.57)$$

Donde el primer término del segundo miembro representa la variación de N en la región II que en el límite representa la variación de N en el volumen de control y el segundo término del segundo miembro representa la velocidad neta de flujo de N a través de la superficie de control.

Atendiendo a la ecuación 2.57, se establece la ecuación 2.58 de transporte de Reynolds.

$$\left. \frac{DN}{Dt} \right|_{\text{sistema}} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C.} \eta \cdot \rho \cdot d\vartheta + \iint_{S.C.} \eta \cdot \rho \cdot V \cdot dA \quad (2.58)$$

Representando el primer término del segundo miembro la velocidad de variación temporal de N en el interior del volumen de control, que tiene la forma del sistema en el instante t. El segundo término del segundo miembro

representa el flujo de N por unidad de tiempo a través de la superficie de control en el instante t.

2.3.2.1. Caracterización del flujo

Todas las sustancias reales son compresibles en mayor o menor medida cuando se ejerce una presión sobre ellas y su densidad cambia. Este fenómeno tiene alta incidencia en los gases, menor en los líquidos y casi nula en los sólidos. La medida en que una sustancia puede ser compresible viene establecida por su factor de compresibilidad τ , ecuación 2.59.

$$\tau = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dp} \quad (2.59)$$

En la estimación del factor de compresibilidad debe tenerse en cuenta la evolución termodinámica experimentada por el fluido que en procesos isotérmicos viene dado por el factor de compresibilidad isotérmica ecuación 2.60 y en procesos sin fricción ni transferencia de calor al medio por el factor de compresibilidad isoentrópico ecuación 2.61.

$$\tau_T = -\frac{1}{v} \left(\frac{dv}{dp} \right)_T \quad (2.60)$$

$$\tau_s = -\frac{1}{v} \left(\frac{dv}{dp} \right)_s \quad (2.61)$$

La estimación del factor de compresibilidad es importante para determinar las propiedades del fluido en movimiento ya que afecta a la densidad según las ecuaciones 2.62 y 2.63.

$$\tau = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (2.62)$$

$$d\rho = \rho \cdot \tau \cdot dp \quad (2.63)$$

Generalmente, los gases en movimiento por conductos están sometidos a cambios de presión y por tanto de densidad. No obstante, una excepción a esta regla se establece para el flujo a baja velocidad donde los incrementos de presión son lo suficientemente pequeños como para que se asuma la condición de densidad constante. El límite de esta consideración se establece a través del

número de Mach como relación entre la velocidad del fluido y la velocidad del sonido en el medio (concentrador) ecuación 2.64.

$$v = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}} \quad (2.64)$$

γ coeficiente de dilatación a diabática

R constante universal de los gases $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{mol}\cdot\text{K}\cdot\text{s}^2$

T temperatura absoluta K

M masa molecular el aire kg/mol

El campo de actuación del concentrador eólico con velocidades de viento de 10 m/s y teniendo en cuenta que la velocidad de propagación del sonido en el aire a una temperatura de 20°C es de 343 m/s, se mantiene dentro del régimen subsónico y en valores inferiores a 0,3 Mach por lo que se puede considerar un flujo incompresible, sin cambios de densidad debido a la circulación a través del conducto. No obstante, la densidad del fluido sí debe ser considerada bajo el análisis termodinámico ya que esta cambiará debido a las variaciones de humedad.

2.3.2.2. Principios de conservación

Bajo unas determinadas condiciones de flujo incidente, el régimen de circulación puede considerarse permanente ya que no existen fuentes ni sumideros de energía; el flujo es también unidimensional ya que las características del flujo: velocidad, presión, etc son constantes en cualquier sección recta en un instante t ; y se ha elaborado para ensayos un conducto de sección circular variable con lo que la configuración corresponde a una disposición axi-simétrica.

El tratamiento matemático de las variables que afectan al comportamiento del aire húmedo evalúan el estado en el que este se encuentra para cada situación considerada y, dado que este fluido evoluciona dentro de un conducto de sección variable (concentrador), deben también considerarse en el desarrollo del flujo, los modelos matemáticos correspondientes a la conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía del fluido que lo atraviesa.

2.3.2.2.1. Conservación de la masa

La conservación de la masa aplicada a un elemento infinitesimal, conduce a la ecuación diferencial de continuidad y relaciona los campos de densidad y velocidad. La conservación de la masa establece que ésta permanece constante en el sistema. En términos de régimen se establece la ecuación 2.65.

$$\left. \frac{DM}{Dt} \right|_{sistema} = 0 \quad (2.65)$$

Y siendo $dM = \rho \cdot dv$

Obtenemos la masa del sistema que ocupa el volumen de control en el instante t , ecuación 2.66.

$$M = \iiint_{V_{sistema}} \rho \cdot d\mathcal{V} \quad (2.66)$$

Aplicaremos la ecuación de transporte al sistema para evaluar el flujo de masa M , ecuaciones 2.67 y 2.68.

$$\left. \frac{DM}{Dt} \right|_{sistema} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C.} \rho \cdot d\mathcal{V} + \iint_{S.C.} \rho \cdot V \cdot dA \quad (2.67)$$

$$\iint_{S.C.} \rho \cdot v \cdot dA = - \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C.} \rho \cdot dv \quad (2.68)$$

Donde el primer miembro representa la velocidad neta de flujo de masa a través de la superficie de control y el segundo miembro la velocidad de decrecimiento de la masa dentro del volumen de control.

Para nuestro caso se establece el flujo permanente dentro de un volumen de control de forma invariante y dada la velocidad del flujo, éste es incompresible por lo que se aplican las siguientes restricciones:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \Rightarrow \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C.} \rho \cdot dv = 0 \quad (2.69)$$

$$\iint_{S.C.} \rho \cdot v \cdot dA = 0 \quad (2.70)$$

$$\iint_{S.C.} v \cdot dA = 0 \quad (2.71)$$

Bajo esta premisa, obtenemos la ecuación de continuidad para nuestro sistema en régimen permanente ecuación 2.72. Que establece la igualdad entre los flujos máxicos de entrada y salida al sistema.

$$\sum_{i=1}^n \rho_i \cdot V_i \cdot A_i = \sum_{j=1}^m \rho_j \cdot V_j \cdot A_j \quad (2.72)$$

2.3.2.2.2. Conservación de la cantidad de movimiento

Para un sistema que se mueve con relación a un marco referencial inercial, la segunda ley de Newton indica que la suma de todas las fuerzas externas que actúan sobre el sistema, es igual a la relación de cambio en el tiempo de la cantidad de movimiento del sistema.

$$F_{neta} = \left. \frac{DP}{Dt} \right|_{sistema} \quad (2.73)$$

La cantidad de movimiento del sistema P viene dado por la expresión 2.74.

$$DP = V \cdot dm = V \cdot \rho \cdot d\mathcal{G} \quad (2.74)$$

$$P = \iiint_{Vsistema} V \cdot \rho \cdot d\mathcal{G} \quad (2.75)$$

Llevando estas relaciones a la ecuación del transporte se obtiene la ecuación 2.76 que representa la integral de la cantidad de movimiento en nuestro concentrador.

$$F_{neta} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{v.c.} V \cdot \rho \cdot d\mathcal{G} + \oint_{s.c.} V \cdot \rho \cdot V \cdot dA \quad (2.76)$$

Donde la fuerza total sobre el sistema contenido dentro del volumen de control es la suma de la velocidad de variación de la cantidad de movimiento más la velocidad neta de flujo de cantidad de movimiento a través de la superficie de control.

Para el caso aquí analizado, el flujo es permanente y por tanto se cumple que no existe variación de la velocidad de la cantidad de movimiento y la fuerza neta queda reducida a la ecuación 2.77.

$$F_{neta} = \oint_{S.C.} V \cdot \rho \cdot v \cdot dA \quad (2.77)$$

2.3.2.2.3. Conservación de la energía

La ecuación de conservación de la energía en función del tiempo puede establecerse según la ecuación 2.78.

$$\frac{\delta Q}{\delta t} - \frac{\delta \xi}{\delta t} = \frac{DE}{Dt} \Big|_{sistema} \quad (2.78)$$

Donde la energía total del sistema viene dado por la ecuación 2.79.

$$dE = e \cdot dm = e \cdot \rho \cdot d\vartheta \quad (2.79)$$

$$E = \iiint_{Vsistema} e \cdot \rho \cdot d\vartheta \quad (2.80)$$

Llevando estas relaciones a la ecuación del transporte obtenemos la ecuación 2.81.

$$\frac{DE}{Dt} \Big|_{sistema} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C.} e \cdot \rho \cdot d\vartheta + \oint_{S.C.} e \cdot \rho \cdot V \cdot dA \quad (2.81)$$

$$\frac{\delta Q}{\delta t} - \frac{\delta \xi_{eje}}{\delta t} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C.} e \cdot \rho \cdot d\vartheta + \oint_{S.C.} e \cdot \rho \cdot V \cdot dA \quad (2.82)$$

$$\frac{\delta Q}{\delta t} - \frac{\delta \xi_{eje}}{\delta t} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{V.C.} e \cdot \rho \cdot d\vartheta + \oint_{S.C.} \left(e + \frac{p}{\rho} \right) \cdot \rho \cdot V \cdot dA \quad (2.83)$$

La ecuación 2.83 establece que la velocidad del flujo de calor agregado al sistema menos el trabajo hecho por el mismo es igual a la velocidad de cambio de la energía almacenada en el volumen de control más la velocidad neta de flujo de energía almacenada y trabajo de flujo exterior al volumen de control.

En nuestro caso, el flujo es estacionario y sigue un proceso adiabático con lo que la ecuación anterior se reduce a la ecuación siguiente 2.84.

$$-\frac{\delta \xi_{eje}}{\delta t} = \iint_{s.c.} \left(e + \frac{p}{\rho} \right) \cdot \rho \cdot V \cdot dA \quad (2.84)$$

Teniendo en cuenta que en el concentrador eólico se establece un flujo permanente unidimensional y considerando la ecuación de continuidad para este caso, se puede obtener la ecuación de la energía referida a la unidad de masa por unidad de tiempo, ecuación 2.85.

$$\frac{\delta Q}{\delta t} - \frac{\delta \xi_{eje}}{\delta t} = \left[\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + (u_2 - u_1) + \frac{p_2}{\rho_2} - \frac{p_1}{\rho_1} + g(z_2 - z_1) \right] \frac{dm}{dt} \quad (2.85)$$

La ecuación anterior, se reduce a la ecuación 2.86. Cuando, como en el caso analizado se produce un flujo sin fricción y fluido incompresible.

$$0 = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + \frac{p_2 - p_1}{\rho} + g(z_2 - z_1) \quad (2.86)$$

2.3.3. Dimensionado físico del modelo

Las dimensiones necesarias para construir el modelo, se establecen teniendo en cuenta las condiciones iniciales del proceso y las ecuaciones termodinámicas que rigen el comportamiento de fluidos a través de conductos de sección variable en régimen permanente. Así, el procesado de estas ecuaciones seleccionando los datos iniciales del ambiente e imponiendo una disminución de presión lineal a lo largo del conducto, darán las dimensiones físicas necesarias y el estado termodinámico del fluido en cada sección transversal de paso.

Como condiciones iniciales del proceso se establecen según la tabla 2.1.

Presión ambiente	101325	Pascal
Temperatura ambiente	293	K
Humedad relativa	80	%
Velocidad aire	5	m/s
Sección inicial de paso	0,5	m ²

Tabla 2.1. Condiciones iniciales del diseño.

2.3.3.1. Variables termodinámicas del modelo

En la figura 2.21 se aprecia un esquema del tipo de conducto seleccionado para el estudio y donde se establecen dos secciones internas arbitrarias que servirán de referencia para evaluar los cambios experimentados por el fluido al evolucionar en su interior.

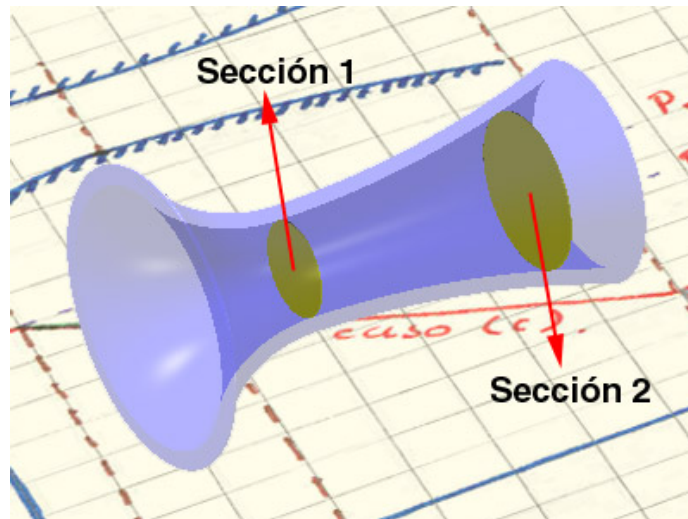


Figura 2.21. Disposición de un conducto convergente – divergente.

En este tipo de conductos con flujo permanente y estable, donde el trabajo mecánico es cero, debe evaluarse la ecuación de la energía para sistemas abiertos 2.87 teniendo en cuenta las posibles transformaciones que puede experimentar el fluido

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2} = Q + h_2 + \frac{v_2^2}{2} \quad (2.87)$$

Los ensayos realizados en el laboratorio muestran invariabilidad de temperatura en la superficie del modelo lo que indica un proceso adiabático sin transferencia de calor entre el fluido y las paredes del conducto, por tanto se puede plantear la ecuación 2.88.

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2} = h_2 + \frac{v_2^2}{2} \quad (2.88)$$

Modelización de un captador eólico de alta eficiencia

Establecida la velocidad de entrada en el conducto, mediante la ecuación 2.89, puede obtenerse la velocidad media en cualquier sección del conducto según:

$$v_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2) + v_1^2} \quad (2.89)$$

La expresión 2.89 indica claramente que la velocidad es dependiente de la entalpía del fluido y para el caso que nos ocupa, aire húmedo, esta debe valorarse para obtener resultados afines al fluido real estudiado.

La entalpía del aire húmedo podemos establecerla como la suma de la correspondiente al aire seco mas la del vapor de agua presente ecuación 2.90.

$$H = H_a + H_w = m_a \cdot h_a + m_w \cdot h_w \quad (2.90)$$

2.4. Referencias

- [1] A.J. Bowen. Modeling of strong wind flows over complex terrain at small geographic scales. *J. Wind Eng Aerod.* 91, 12-15, (2003) 1871-71.
- [2] J. E. Cermak. Wind tunnel development and trends in applications to civil engineering. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* 91 (2003) 355-370.
- [3] P. Moonen, B. Blocken, J. Carmeliet. Indicators for the evaluation of wind tunnel test section flow quality and application to a numerical closed-circuit wind tunnel. *J. Wind Eng Ind. Aerod.* 95 (2007) 1289-1314.
- [4] MeteoGalicia. Galicia Climatic Data 2007. Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia. 2007, pp.1-124.
- [5] G.M.J. Herbert, S. Iniyar, E. Sreevalsan, S. Rajapandian. A review of wind energy technologies. *Renewable and Sustainable Energ. Revi.* 11 (2007) 1117-1145.
- [6] A. R. Wittwer, S. V. Möller. Characteristics of the low-speed wind tunnel of the UNNE. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* 84 (2000) 307-320.
- [7] S. Shikha, T.S. Batí and D. P. Kpithari, A new vertical axis wind rotor using convergent nozzles. Large Engineering Conference on Power Engineering, 2003. pp. 177-181.
- [8] S. Shikha, T.S. Bhatti, D.P. Kothari. Air concentrating nozzles: a promising option for wind turbines. *Int. J. Ener. Tech. Pol.* 3 (2005) 394-412.
- [9] U. K. Saha, Rajkumar. On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades. *Renew. Energ.* 31 (2006) 1776-1788.
- [10] R. Gupta, A. Biswas, K.K. Sharma. Comparative study of a three-bucket Savonius rotor with a combined three-bucket Savonius–three-bladed Darrieus rotor. *Renew. Energ.* 33, 9 (2008) 1974-1981.
- [11] C. Chia-Ren, Y. Wen Wang. The loss factors of building openings for wind-drive ventilation. *Build. Environ.* 45 (2010) 2273-2279.
- [12] A. Nishi, H. Kikugawa, Y. Matsuda, D. Tashiro. Turbulence control in multiple-fan wind tunnels. *J. Wind Eng Ind. Aerod.* 67-68 (1997) 861-872.
- [13] J. A. Orosa, E. J. García-Bustelo. Low speed wind concentrator for wind farm power generation improvement. *Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE.* DOI: 10.1109/IECON.2009.5415152. (2009) 3605 – 3608.
- [14] J.A. Orosa, A. C. Oliveria. Applied thermodynamics with EES. Lambert Academic Publishing Saarbrücken, Germany. (2011)

[15] G. Faraco, L. Gabriele. Using LabVIEW for applying mathematical models in representing phenomena, Computers & Education. 49, (2007) 856–872.

[16] MeteoGalicia. Galicia Climatic Data 2007. Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia. Galicia (Spain), 2007.

[17] R.B. Stull. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic Publisher (1994).

Capítulo 3

Capítulo 3: Discusión de resultados

3.1. Diseño de un túnel de viento de aire húmedo

3.1.1. Introducción

En el pasado reciente diversos trabajos de investigación han puesto especial interés en aplicaciones de ingeniería tales como las pruebas en túnel de viento para construcciones civiles y sus efectos sobre diferentes estructuras [1, 2]. En particular, la mayoría de estos túneles de viento eran del tipo lazo cerrado [3].

Sin embargo, en el análisis de los entornos climáticos sobre diferentes regiones ambientales han revelado diferentes condiciones climáticas. Así, curiosamente, se señaló que no sólo la velocidad del viento influye en la conversión de energía eólica, y que otros parámetros, incluyendo la humedad relativa del aire húmedo, deben ser considerados en el diseño y el funcionamiento de dichas aplicaciones.

3.1.1.1. Datos climáticos

La presente investigación se ha realizado con objeto de profundizar en el estudio del efecto de la humedad sobre la conversión energética de las turbinas eólicas. Para ello, se ha realizado un estudio de las diferentes condiciones de humedad relativa del aire exterior en una región climática especialmente húmeda como es el noroeste de la Península Ibérica, tal y como se muestra en las figuras 3.1 a 3.4.

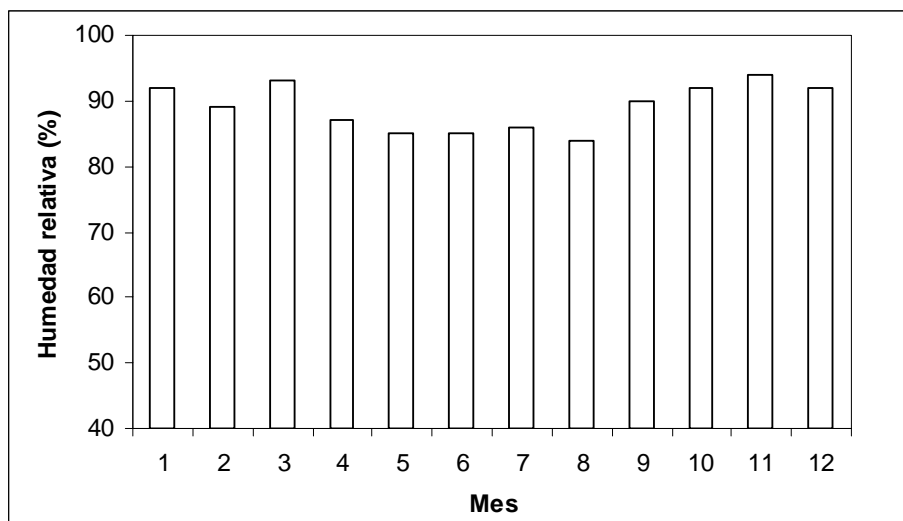


Figura 3.1. Humedad relativa del aire exterior.

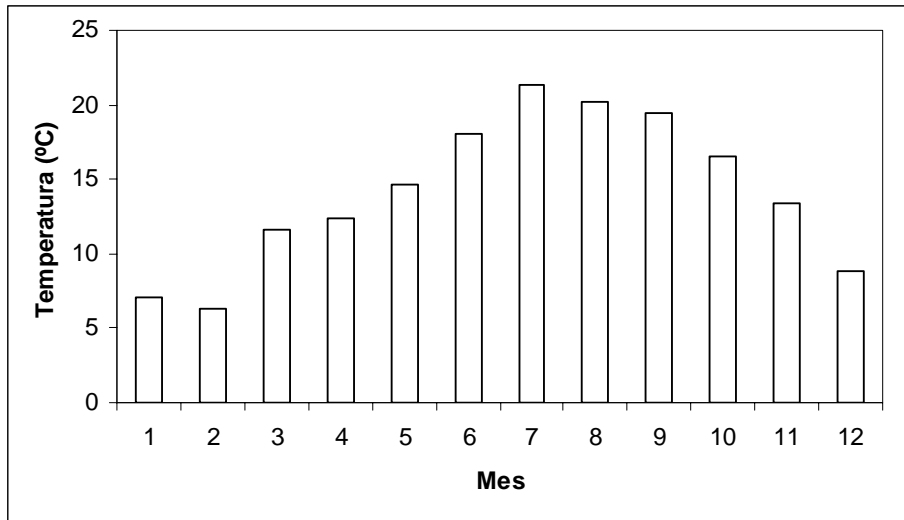


Figura 3.2. Temperatura del aire exterior.

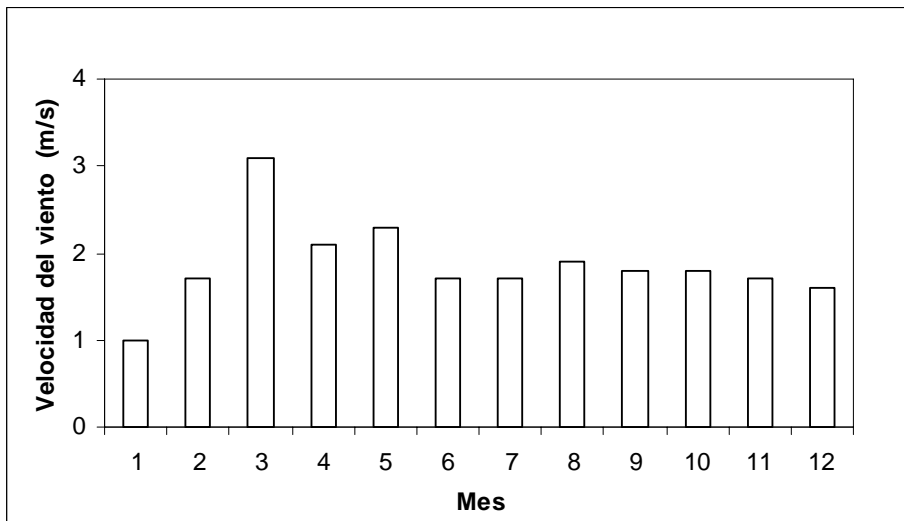


Figura 3.3. La velocidad del aire exterior.

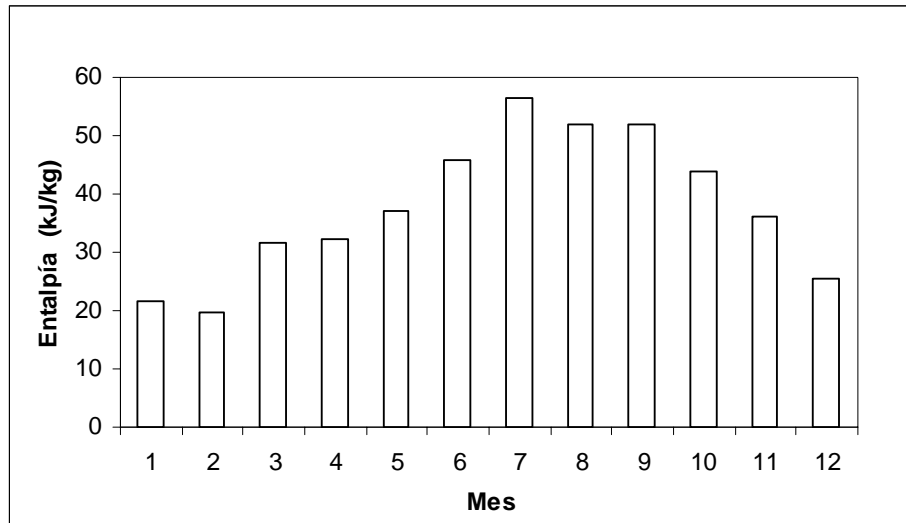


Figura 3.4. Entalpía del aire exterior.

Una vez analizado el espectro de las principales variables termodinámicas del aire exterior se ha concluido que la humedad relativa influye claramente en el flujo de aire húmedo. En particular, afectando a la densidad y la entalpía del mismo, tal y como se muestra en la figura 3.5.

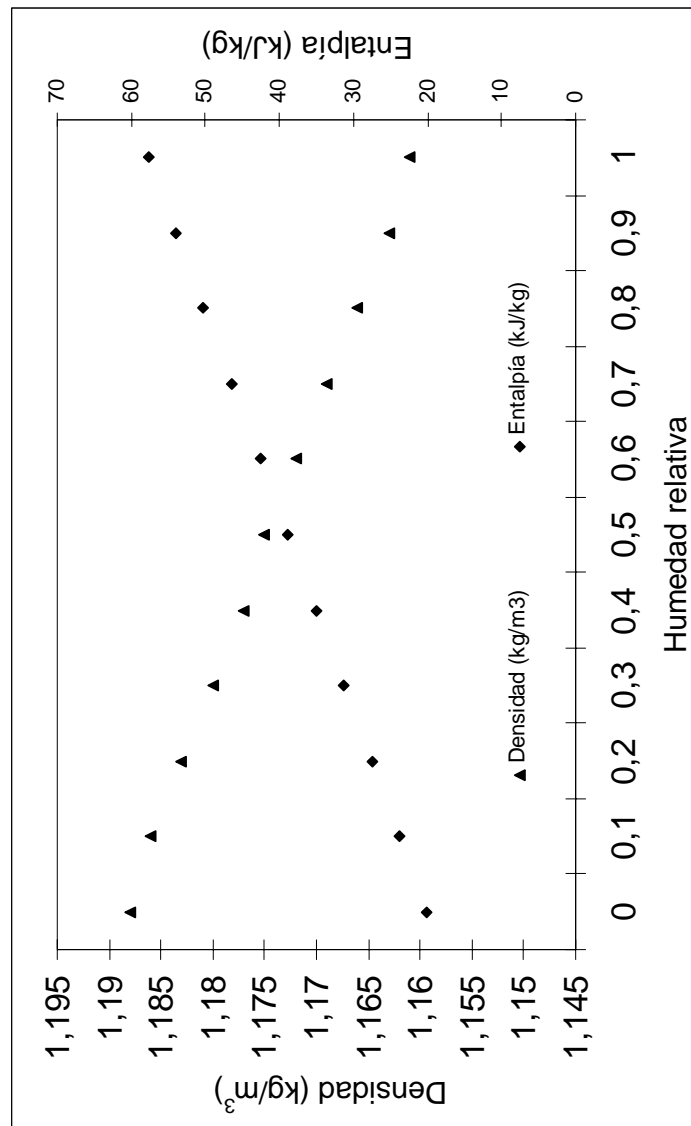


Figura 3.5. Relación entre la humedad relativa, entalpía y la densidad del aire húmedo.

De la misma manera, debemos recordar que en diferentes aplicaciones de la industria se han realizado diseños bajo la consideración de que el aire ambiente es aire seco. El aire seco se utiliza para el estudio de turbinas eólicas, automóviles, aviones y casi todos los dispositivos relacionados con el aire húmedo, es decir, la aerodinámica.

Europa está considerada como el líder mundial en energía eólica y otras nuevas regiones experimentarán un claro aumento en la instalación de la misma en cuanto alcancen la barrera de 100 MW [5].

Para el análisis del comportamiento de las diferentes turbinas eólicas existe un procedimiento habitual centrado en tres apartados fundamentales;

- a) Análisis del comportamiento bajo un túnel de viento.
- b) Simulación por medio de la mecánica de fluidos computacional (CFD simulaciones dinámicas)
- c) Ensayos prácticos con datos reales del componente, una vez ubicado en el lugar de trabajo.

Los túneles de viento se han utilizado comúnmente como equipos de diseño para obtener las condiciones de flujo de aire y poder desarrollar en el laboratorio un estudio comparativo con el comportamiento real del dispositivo [6]. En este contexto, se desarrollaron y evaluaron varios túneles de viento en el pasado, pero ninguno de ellos, hasta ahora, ha presentado algún sistema de control de la humedad del aire.

Por otra parte, las turbinas eólicas se asocian comúnmente con turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT). Sin embargo, es necesario desarrollar nuevos conceptos y considerar que los parques eólicos deben de ser diseñados pensando en el futuro. En este sentido, los aerogeneradores de eje Vertical (VAWT) son claramente más ventajosos en comparación con las turbinas eólicas de eje horizontal, que son omni-direccionales, lo que significa que puede trabajar bajo diferentes dirección del viento, requieren menos mantenimiento y comienzan a trabajar con bajas velocidades de viento de 3 m/s.

En los últimos años ha surgido interés sobre una nueva aplicación de la energía eólica, mediante el concentrador eólico. Dicho componente mejora el coeficiente de rendimiento de los aerogeneradores de eje vertical. Ahora, conceptos como el cambio de fase en la humedad del aire, están siendo analizados en la presente tesis para mejorar la conversión de energía. Por todo ello, el diseño adecuado de un túnel de viento que tenga en cuenta la humedad relativa del aire se ha vuelto de especial interés.

Del mismo modo, la humedad relativa del aire llega a ser significativa puesto que diferentes densidades implican diferentes conversiones de energías. Por ejemplo, para proporcionar una referencia de la potencia en las turbinas eólicas, se compara esta con la potencia de la corriente de aire libre que fluye a

través de la misma área de sección transversal (A), de acuerdo con la ecuación 0.1.

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^3 \cdot A \quad (0.1)$$

Donde;

ρ es la densidad del aire húmedo (kg/m^3),

v_1 es la velocidad del viento (m/s)

A es el área en sección transversal (m^2).

De esta ecuación se observa que la conversión de energía en la turbina eólica depende principalmente del área de sección transversal, la densidad del aire húmedo y la velocidad del viento. Por lo tanto, las propiedades del aire húmedo influirán en esta conversión de energía. Sin embargo, tal y como se ha comentado anteriormente, este parámetro casi nunca se ha tenido en cuenta en estos procesos.

3.1.1.2. Conversión energética anual del aire húmedo

Por todo lo mostrado anteriormente será necesario considerar, además de la velocidad del viento, otros parámetros de las condiciones climáticas como son las propiedades de aire húmedo.

De esta manera, si se analiza la energía total del viento de forma mensual, se obtienen la figura. 3.6 donde se muestra la temperatura exterior del aire húmedo, la humedad relativa y su entalpía correspondiente. De esta representación gráfica, se puede concluir que el aire húmedo presente en el ambiente contiene una entalpía máxima durante los meses comprendidos entre abril y septiembre como una clara función de la temperatura del aire exterior durante las temporadas de primavera y verano.

Por otra parte, la figura. 3.7, muestra la velocidad del aire exterior, la densidad y la energía cinética correspondiente. Esta energía cinética, como se puede observar, depende de la velocidad del aire exterior, ya que presenta un valor de potencia al cubo con respecto a la densidad del aire húmedo, figura 3.6. Por lo tanto, dichas figuras muestran que la energía cinética máxima se obtiene entre los meses de febrero a mayo.

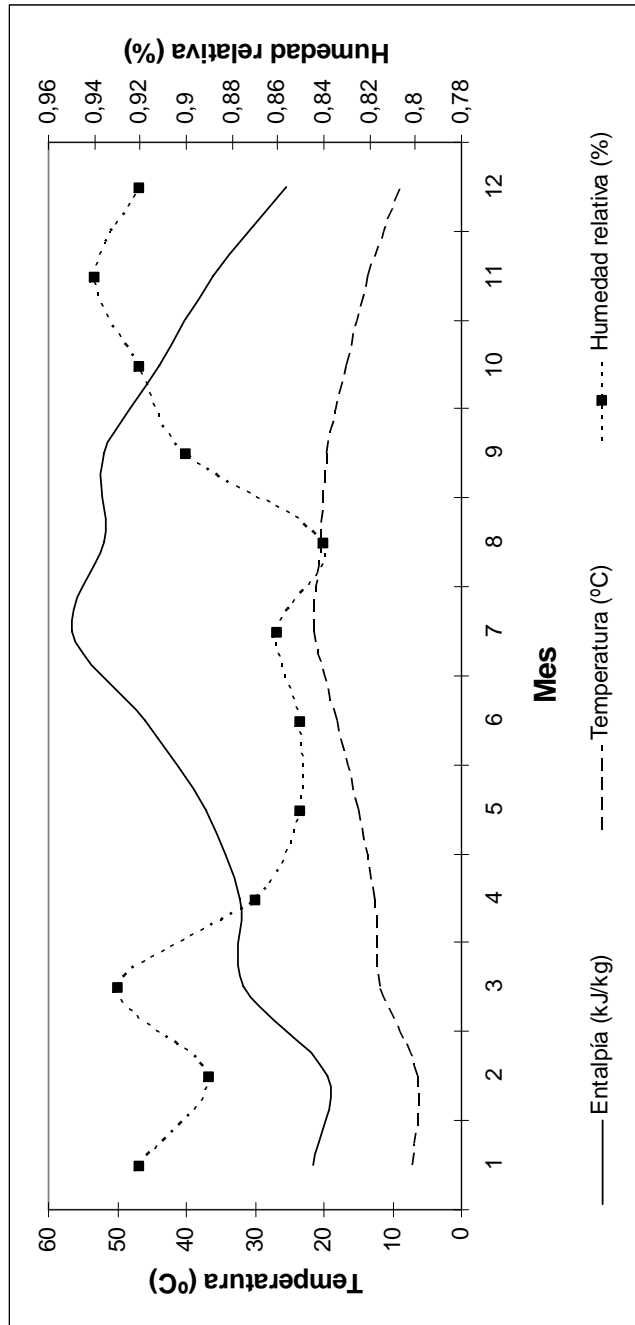


Figura 3.6. Temperatura, humedad relativa y la entalpía del aire exterior.

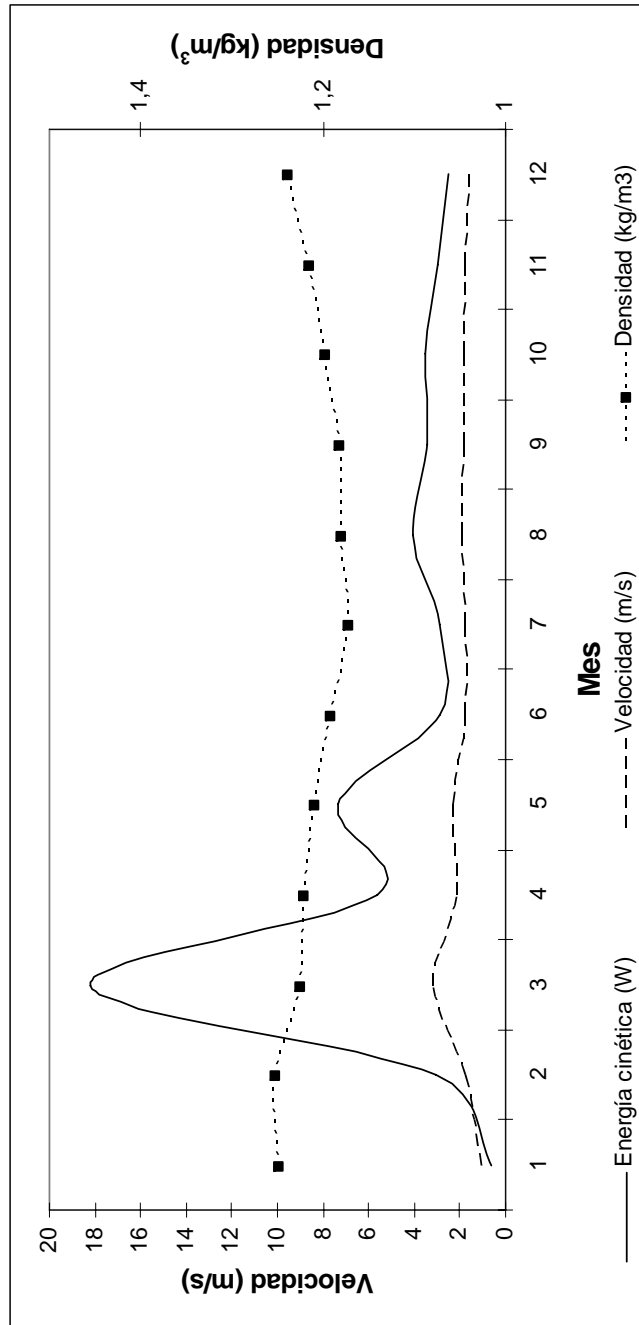


Figura 3.7. La densidad, velocidad y energía cinética del aire al aire libre.

Estas figuras muestran que la energía del aire húmedo no sólo depende de la velocidad del viento, parámetro típicamente utilizado en turbinas eólicas, sino también de la entalpía del fluido. Por todo ello el diseño y operación de los parques eólicos necesita ser reconsiderado hacia un análisis de la energía total del aire húmedo.

A partir de estas figuras se puede deducir que la entalpía del aire exterior depende, principalmente, de la temperatura del aire húmedo. Además, la humedad relativa ejerce una influencia menor, mientras no se produce un cambio de fase.

Por todo lo mostrado anteriormente, se puede deducir que la energía cinética se transforma bajo diferentes valores de la humedad del aire. Como consecuencia de ello, se ha obtenido una conversión energética irregular cada mes con respecto al poder máximo del parque eólico, como se muestra en la figura 3.8.

La figura 3.8 corresponde a la región, cuyas condiciones meteorológicas se han mostrado anteriormente. En ella se hace evidente que la energía eólica toma un valor máximo durante el período comprendido entre enero y marzo.

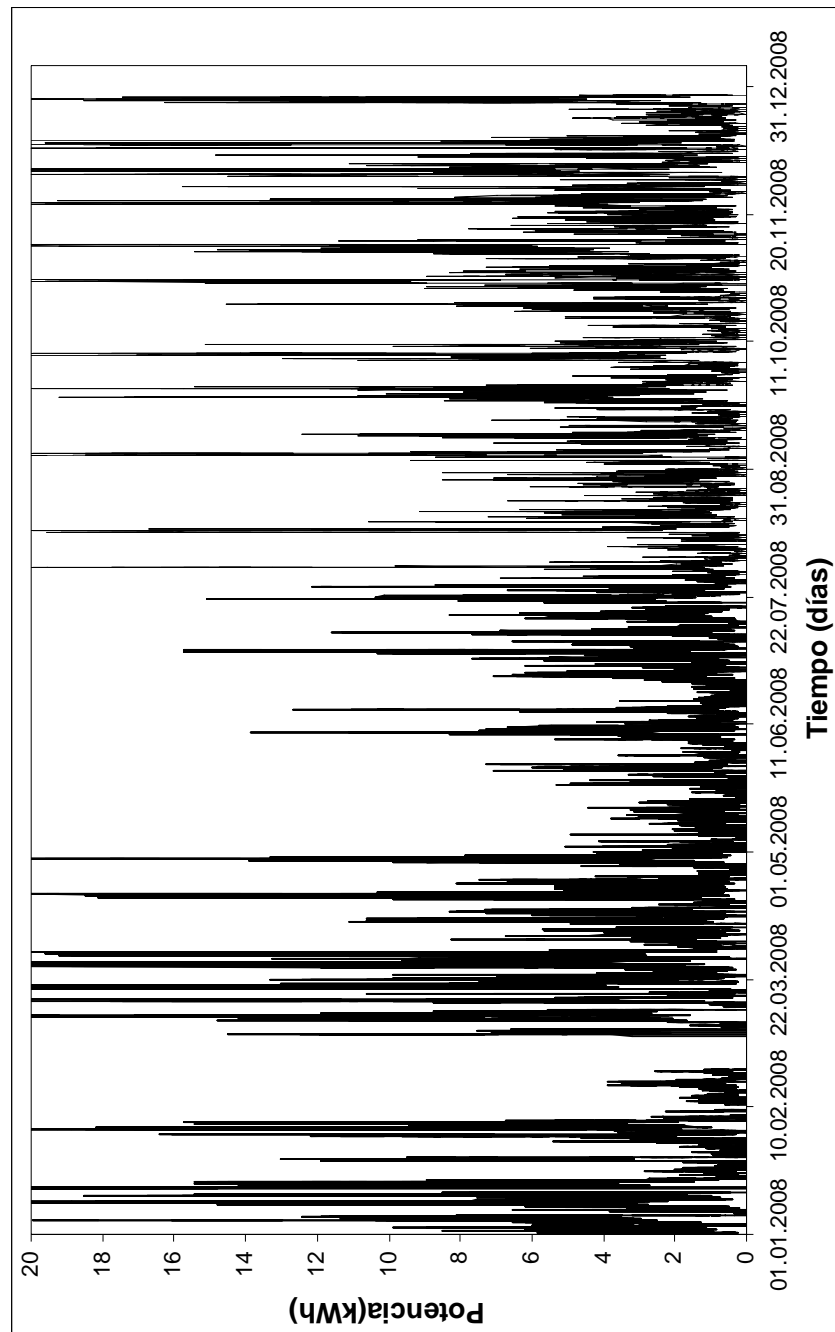


Figura 3.8. Efecto del clima sobre la conversión energética en un parque eólico.

Para realizar el estudio de las condiciones climáticas y la conversión de energía eólica en los últimos años, se hizo interesante analizar dicha relación con los datos obtenidos de parques eólicos reales. A partir de estos datos reales se ha realizado un ajuste de curvas tridimensional relacionando la conversión de energía eólica y las condiciones climáticas de temperatura, humedad relativa y la velocidad.

Para simplificar el modelado matemático, las dos primeras variables, temperatura y humedad relativa, se han expresado como función de la densidad del mismo, tal y como podemos apreciar en la ecuación 3.1.

Los resultados mostraron un modelo adecuado como una función de cubo de la velocidad del viento para un factor de correlación de 0,99.

$$E = -249492.18 + 217222.74 \cdot \rho + 1128.9655 \cdot v^3 \quad (3.1)$$

Donde;

E es la producción de energía eólica (kWh)

ρ es la densidad del aire húmedo (kg/m^3)

v es la velocidad del viento (m/s)

De esta ecuación, y como se ha mostrado anteriormente, se puede concluir que es posible obtener una potencia de salida constante durante todo el año.

Para resumir, a partir de los gráficos anteriores se ha deducido que casi todo el año, la energía del aire húmedo se puede transformar en una potencia de salida constante en un convertidor de energía eólica adecuado que tenga en cuenta las propiedades del mismo.

Esta salida constante de la energía mecánica es de especial interés para los diseñadores dado que mediante esta optimización puede emplearse un generador eléctrico de bajo costo.

Además, debemos recordar que dichos conversores eólicos deben emplear un generador eléctrico asíncrono si la potencia de salida no es constante y, por lo tanto, obtener la corriente alterna con una frecuencia variable. Como consecuencia de esto, la corriente continua debe ser convertida de nuevo en alterna antes de ser enviada a la red eléctrica.

Todas estas conversiones implican una inversión económica superior si se compara con el caso de la producción constante de energía mecánica, en donde se puede emplear un generador eléctrico síncrono que puede ser fácilmente conectado a la red eléctrica.

Este convertidor de la energía eólica tiene que ser diseñado teniendo en cuenta la energía total del aire húmedo, por lo que nuevos diseños y nuevas herramientas de trabajo deben ser investigados en el futuro.

3.1.2. Materiales y métodos

Como se mencionó anteriormente, el túnel de viento fue diseñado de acuerdo con el estudio mencionado en [6], similar a las obras en la [7-8]. Para alcanzar las condiciones necesarias en el túnel de viento para cada prueba, se ha empleado un sistema de control de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.

Las mediciones han sido tomadas por data loggers y un anemómetro digital.

La velocidad de diseño del túnel de viento se fijó en 5 m/s, de acuerdo con trabajos realizados anteriormente [5, 9] donde se llevaron a cabo unas pruebas de túnel de viento en el rango de 6 a 11 m/s.

3.1.3. Discusión

Para iniciar el estudio se han muestreado las condiciones climáticas de la región a implantar dicho conversor eólico por medio de estaciones climáticas. Una vez que las condiciones climáticas externas fueron muestreadas éstas se simularon en el túnel de viento.

Así, la humedad relativa del aire se alcanzó utilizando un humidificador adiabático; la velocidad del viento mediante un ventilador de flujo axial y, finalmente, se utilizó una cámara de remanso para obtener un flujo laminar estable en toda la superficie, tal como se muestra en la figura 3.9.

De acuerdo con investigaciones anteriores se ha diseñado un túnel de viento que proporciona una velocidad de aire ajustable entre 0 y 10 m/s [10]. El túnel de viento es de 8,3 m de largo. La sección de prueba es de 1,2 m de ancho y 1,8 m de largo.

El diagrama esquemático del proceso de diseño se muestra en la figura 3.9 [11].

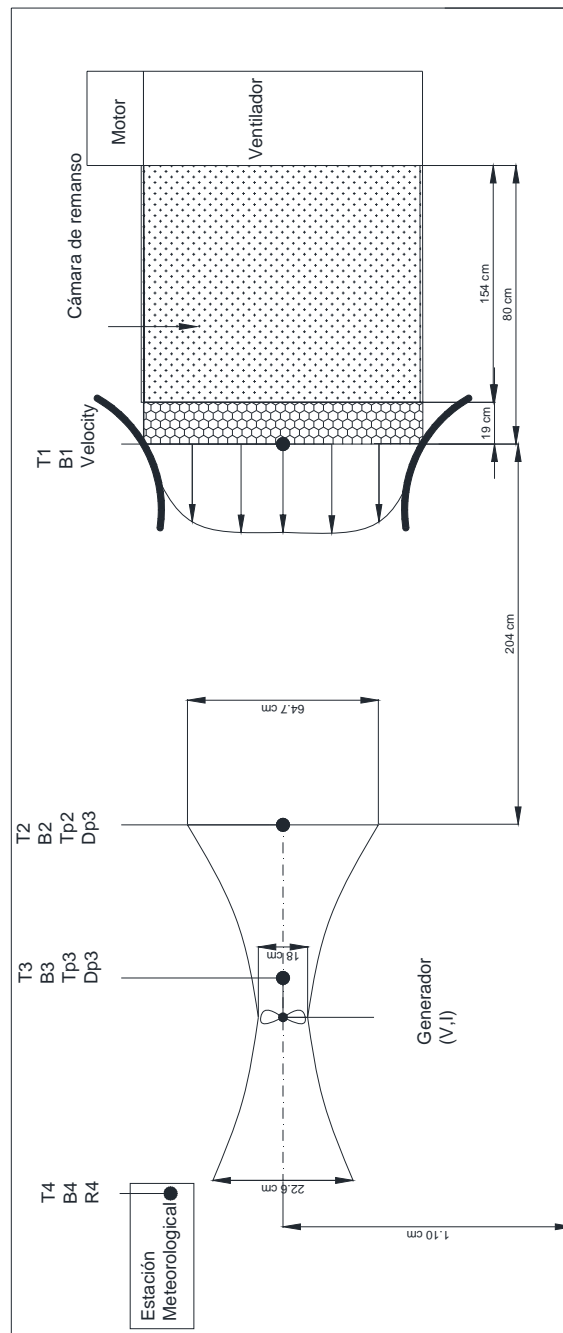


Figura 3.9. Diagrama del montaje experimental.

Tal y como se ha indicado anteriormente, los ensayos del concentrador eólico se establecen para condiciones de trabajo con velocidad del aire exterior entre 5 y 10 m/s. Por este motivo se parte de estos valores para el diseño y fabricación del túnel de viento.

Por otra parte, dado que el ventilador es accionado por un motor eléctrico asíncrono se hace necesario, para definir las diferentes velocidades de viento, actuar sobre la frecuencia de la corriente.

Las pruebas a realizar en el túnel de viento requiere altos niveles de humedad relativa. Por ello, se ha seleccionado una humedad relativa en un rango entre el 80 y el 100%, valor típico para regiones climáticas húmedas. Además, con esta humedad relativa del aire exterior el cambio de fase del vapor de agua presente en el aire húmedo puede lograrse más fácilmente.

Como se ha mencionado anteriormente, para definir la potencia de la turbina eólica bajo diferentes condiciones de humedad relativa se ha empleado un humidificador adiabático de agua nebulizada.

El humidificador aporta humedad al aire interior en un proceso adiabático tomando la energía necesaria para el cambio de fase de agua desde el aire circundante, tal como se muestra en la figura 3.10. Por lo tanto, el aire húmedo mostrará un aumento de humedad relativa, mientras la temperatura del mismo será constante.



Figura 3.10. Humidificador adiabático con boquillas atomizadoras.

Para controlar y mantener la humedad relativa del aire húmedo se utilizó una sala de pruebas aislada eliminando así el efecto de la humedad relativa del aire exterior. Además, en dicha sala se han ubicado diferentes calentadores eléctricos para controlar la temperatura global del local.

La longitud de la sala de prueba fue elegida para no restringir el movimiento del aire, manteniendo un espacio suficiente entre las paredes del local y el concentrador eólico. Además, como se hace necesario un alto nivel de humedad

relativa, los cerramientos del local han sido pintados con materiales impermeables.

Para el control de la turbulencia de la masa de aire húmedo cuando éste procede de varios ventiladores, se suele emplear [12], alabes oscilantes que podrían ser controlados por ordenador. En nuestro caso, se ha empleado un único ventilador con una cámara de remanso que permite obtener fácilmente un flujo laminar. En particular, para generar el movimiento de aire necesario en cada prueba, se ha escogido un ventilador SODECA HPX-71-4T-3 con 2,2 kW 1400 rpm y un diámetro de 70 cm.

Este ventilador nos ha permitido desarrollar un túnel de viento con velocidades de aire entre 0 y 10 m/s con un caudal máximo de 24.000 m³/h definido por variación de frecuencia, como se muestra en la figura 3.11.

Para obtener un flujo unidireccional se ha empleado panel enderezador, tal y como se muestra en la figura 3.12. Finalmente, la velocidad del rotor se midió utilizando un tacómetro digital que tiene, un margen de error de 1 rpm, y se ha muestreado la velocidad del viento por medio de un tubo de Pitot para definir la presión estática [10], tal y como se muestra en la figura 3.13.



Figura 3.11. Ventilador y sistema de control de velocidad.



Figura 3.12. Enderezadores de flujo de aire (Panal).



Figura 3.13. Manómetro de columna inclinada (0 – 50 Pa).

Para medir la potencia de salida, se ha ubicado una turbina eólica en la sección de prueba del concentrador, tal y como se muestra en la figura 3.14. De esta forma, la potencia capturada por el rotor [10] se transmite hasta el generador eléctrico donde se toman las señales de tensión e intensidad de la corriente producida. En particular, para medir la intensidad se empleó una resistencia eléctrica de 330 ohmios.

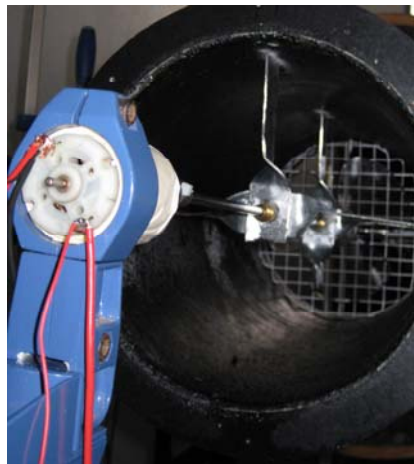


Figura 3.14. Generador eléctrico dispuesto en el eje de acoplamiento con el rotor.

Por último, se ha empleado un software de resolución de ecuaciones de ingeniería (EES) [13, 14] para el desarrollo de diferentes diseños de los procesos de aire húmedo.

De manera similar, para enviar información desde los registradores de datos al ordenador y, por consiguiente, para desarrollar un proceso de muestreo en tiempo real, se ha empleado el software LabView 6.0 [15]. Esta opción permite que los valores instantáneos sean enviados a una base de datos como Microsoft Excel o Access y, desde esta aplicación, realizar el desarrollo de diferentes gráficos y estudios estadísticos.

El desarrollo de este túnel de viento de aire húmedo, que será aplicado en los próximos apartados para el ensayo de los concentradores eólicos a baja velocidad ante diferentes niveles de humedad ambiental, es el primer resultado de esta tesis doctoral.

3.1.4. Referencias

- [1] A.J. Bowen. Modeling of strong wind flows over complex terrain at small geographic scales. *J. Wind. Eng. Ind. Aerod.* 91, 12-15, (2003) 1871-71.
- [2] J. E. Cermak. Wind tunnel development and trends in applications to civil engineering. *J. Wind. Eng. Ind. Aerod.* 91 (2003) 355-370.
- [3] P. Moonen, B. Blocken, J. Carmeliet. Indicators for the evaluation of wind tunnel test section flow quality and application to a numerical closed-circuit wind tunnel. *J. Wind. Eng. Ind. Aerod.* 95 (2007) 1289-1314.
- [4] MeteoGalicia. Galicia Climatic Data 2007. Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia. Galicia (Spain), 2007.
- [5] G.M.J. Herbert, S. Iniyar, E. Sreevalsan, S. Rajapandian. A review of wind energy technologies. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 11 (2007) 1117-1145.
- [6] A. R. Wittwer, S. V. Möller. Characteristics of the low-speed wind tunnel of the UNNE. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* 84 (2000) 307-320.
- [7] S. Shikha, T.S. Batí and D. P. Kpithari, A new vertical axis wind rotor using convergent nozzles. Large Engineering Conference on Power Engineering, 2003. Québec (Canada), pp. 177-181.
- [8] S. Shikha, T.S. Bhatti, D.P. Kothari. Air concentrating nozzles: a promising option for wind turbines. *Int. J. Energ. Techn. Policy.* 3 (2005) 394-412.
- [9] U. K. Saha, Rajkumar. On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades. *Renew. Energ.* 31 (2006) 1776-1788.
- [10] R. Gupta, A. Biswas, K.K. Sharma. Comparative study of a three-bucket Savonius rotor with a combined three-bucket Savonius–three-bladed Darrieus rotor. *Renew. Energ.* 33, 9 (2008) 1974-1981.
- [11] C. Chia-Ren, Y. Wen Wang. The loss factors of building openings for wind-drive ventilation. *Build. Environ.* 45 (2010) 2273-2279.
- [12] A. Nishi, H. Kikugawa, Y. Matsuda, D. Tashiro. Turbulence control in multiple-fan wind tunnels. *J. Wind. Eng. Ind. Aerod.* 67-68 (1997) 861-872.
- [13] J. A. Orosa, E. J. García-Bustelo. Low speed wind concentrator for wind farm power generation improvement. *Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE. Porto, (Portugal).* DOI: 10.1109/IECON.2009.5415152. (2009) 3605 – 3608.
- [14] J.A. Orosa, A. C. Oliveria. *Engineering thermodynamics with EES.* Lambert Academic Publishing Saarbrücken, Germany, 2011.

[15] G. Faraco, L. Gabriele.. Using LabVIEW for applying mathematical models in representing phenomena, *Comput.Educ.* 49 (2007) 856–872.

3.2. *Diseño del concentrador eólico*

3.2.1. Introducción

Estudios recientes han constatado el impacto de las condiciones climáticas sobre el potencial de conversión de energía en los parques eólicos. Los resultados obtenidos sugieren que la velocidad del viento puede disminuir durante el verano en áreas como el noroeste de los Estados Unidos y que hoy en día no hay un convertidor adecuado de energía eólica para sistemas de baja velocidad en el orden de 2-5 m/s. Como consecuencia de ello, estudios estadísticos en un 40% la reducción del potencial de energía eólica para los sistemas actuales de turbinas de eje horizontal ante dichas condiciones de trabajo [1].

Los concentradores eólicos representan una posible solución a este problema mejorando el rendimiento respecto al área barrida. Básicamente, se puede lograr una aceleración del flujo en el rotor [2], siendo también de gran importancia la colocación de un difusor aguas abajo del mismo.

Por otro lado, para las zonas de baja velocidad del viento, algunos investigadores han propuesto concentradores aplicables a potencias de 20 a 50 MW. En este caso, los resultados mostraron que los aerogeneradores de eje vertical (VAWT's) ofrecen una gran ventaja para captar todas las direcciones del viento, facilidad en construcción y respuesta a cambios de velocidad y dirección, presentando un mayor rendimiento neto en la conversión a energía eléctrica.

Debe tenerse en cuenta que, la palas en el sistema VAWTs y sus accesorios presentan costes mas bajos, son resistentes en la operación y los trabajos de mantenimiento pueden hacerse a nivel del suelo [3, 4], lo que implica un menor riesgo laboral para los operarios.

Las investigaciones más recientes han tenido un gran éxito en la aplicación de toberas convergentes al sistema VAWT en vez del típico rotor Savonius aislado [5]. Esto aumenta la velocidad del viento incidente en el rotor y evita pares negativos, impidiendo que el aire actúe sobre la parte cóncava de la pala.

Se desarrollaron experiencias similares [6] para mejorar el rendimiento del rotor Savonius. En el análisis de estas experiencias, no se tuvieron en cuenta las propiedades y efectos del aire húmedo y, por lo tanto, es una buena oportunidad de considerarlos y evaluarlos en nuevos diseños.

Nuestra implementación se basa en el efecto Foehn. Se trata de un efecto climatológico que sucede en las zonas montañosas cuando una masa de aire templado y húmedo se ve obligado a superar una montaña con suficiente altitud y se produce la condensación del aire húmedo. Alcanzada la cima, el aire desciende rápidamente caliente y seco produciéndose una elevación en la presión atmosférica debido a la compresión adiabática. Tomando este efecto como referencia, en esta tesis se muestra el procedimiento para mejorar la

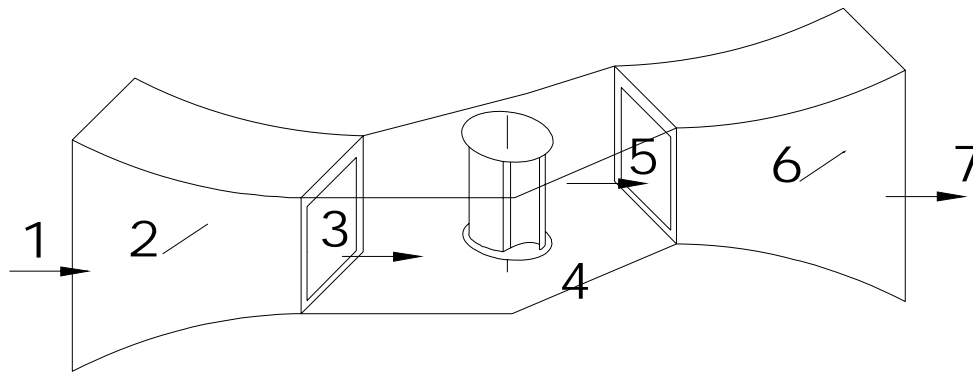
conversión de energía cinética a mecánica en los aerogeneradores. Nuestro sistema consiste en una tobera, un rotor y un difusor diseñados para obtener la máxima transformación de energía en un flujo de aire libre [7]. Esta conversión se basa en el diseño de un nuevo concentrador siguiendo la ley de Betz y los campos de actuación indicadas por [3, 4]. Por último, se sugieren otras aplicaciones de este sistema como el control de la velocidad del viento de la turbina actuando sobre la humedad relativa del aire.

3.2.2. Materiales y métodos

El objetivo de esta investigación es obtener un cociente de velocidad óptima del aire entre la entrada y la salida de la turbina eólica siguiendo la ley de Betz. Para alcanzar este objetivo, se ha diseñado una tobera subsónica con caída de presión constante y teniendo en cuenta que el fluido operativo es aire húmedo. Esta tobera convergente cumple dos funciones: aumenta la velocidad del aire y evitar el par negativo actuando como una barrera para que el aire no incida en la parte cóncava de la pala del rotor en concordancia con los resultados [8-11]. Como se ha demostrado [3], mediante una tobera convergente y rotor puede incrementarse la velocidad de forma significativa y, por tanto, también lo hace el coeficiente de potencia.

Se espera que el efecto de la tobera puede ser similar al obtenido en [6] donde, para el mismo tipo de rotor, el coeficiente de potencia se ha incrementado hasta un 38%. En nuestra tobera, este efecto se verá reforzada por la saturación de la humedad del aire debido a la caída de presión y, por lo tanto, el intercambio de energía que se produce en la turbina eólica al separarse la humedad, quedando aire seco.

Esta tobera se ha diseñado para ser utilizada con un rotor de eje vertical. Se ha seleccionado el rotor Savonius porque, a pesar de presentar una lenta velocidad de rotación y una producción baja de energía, éste podría ser un requisito útil en la transformación de energía a pequeña escala. Este rotor está constituido por dos medios cilindros en rotación alrededor de un eje vertical, solidarios o separados entre ellos tal y como se muestra en la figura. 3.15.



- | | |
|---------------------------|--------------------------------|
| 1. Masa de aire ambiente. | 4. Rotor. |
| 2. Tobera. | 5. Entrada en difusor. |
| 3. Aire seco saliente. | 6. Difusor. |
| | 7. Salida de aire del difusor. |

Figura 3.15. Diseño de un concentrador eólico.

3.2.2.1. Datos climáticos de La Coruña

Se recopilaron los datos climáticos entregados por varias estaciones meteorológicas situadas cerca de la ciudad de La Coruña. La Coruña es una ciudad típica de la costa en el Atlántico Europeo que tiene un clima templado y húmedo debido a los vientos procedentes del mar [12].

Estas estaciones meteorológicas registran variables tales como temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, entre otros. Este muestreo se realiza a una frecuencia de cinco a diez minutos.

El motivo por el cual se han escogido estas estaciones para la investigación radica en la ausencia de edificios y cualquier otro obstáculo orográfico que pueda interferir con los datos del muestreo [13].

3.2.2.2. Coeficiente de potencia

El componente principal del convertidor es la turbina eólica, que transforma la energía cinética del aire en energía mecánica. Esta energía cinética se cuantifica en la ecuación 3.2.

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^3 \cdot A \quad (3.2)$$

La teoría de Betz establece la máxima energía que se puede extraer de una corriente de aire en un convertidor. Si definimos v_1 como la velocidad del aire antes de llegar al convertidor y v_2 la velocidad del flujo tras el mismo, la energía mecánica extraída, se corresponde con la ecuación 3.3.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_1 \cdot v_1^3 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_2 \cdot v_2^3 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (A_1 \cdot v_1^3 - A_2 \cdot v_2^3) \quad (3.3)$$

La relación entre la potencia mecánica extraída por el convertidor y la potencia eólica disponible en la corriente de aire se denomina coeficiente de potencia (cp), tal y como se expresa en la ecuación 3.4.

Este coeficiente de potencia sólo depende de la relación entre las velocidades de aire antes y después del convertidor. Además, su valor ideal máximo es de 0.593. Este valor se obtiene cuando v_2 es aproximadamente 1/3 la velocidad v_1 .

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right) \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \quad (3.4)$$

En conclusión, Betz descubrió que la extracción óptima de la energía sólo podría llevarse a cabo en una cierta proporción entre la velocidad del flujo de aire incidente en el convertidor de energía y la velocidad del flujo aguas abajo del convertidor, tal como se muestra en el índice del cp. Este índice será uno de los principales parámetros utilizados a lo largo del proceso de diseño de esta tesis.

3.2.2.3. Modelo de aire húmedo

El aire húmedo se considera como una mezcla de dos gases ideales; aire seco y vapor de agua, por lo que el calor específico depende únicamente de su temperatura en cada punto. Este calor específico podría ser expresado en función de la humedad específica en cada punto, como se muestra en la ecuación 3.5.

$$c_{ph} = c_{pa} + c_{pw} \cdot W_1 \quad (3.5)$$

Donde;

$c_{pa}=0,286$ es el calor específico del aire seco.
 $c_{pw}=0,461$ es el calor específico del agua.

Además, en el proceso de diseño el aire húmedo se consideró como un fluido compresible en régimen subsónico. Por esta razón, cuando la humedad relativa del aire húmedo alcanza el 100% se producirá la condensación y, como resultado de ello, la humedad específica comenzará a descender.

3.2.2.4. Proceso politrópico

Teniendo esto en mente, debemos recordar que el objetivo de esta investigación es obtener una relación óptima entre la velocidad de entrada y salida de la turbina eólica de acuerdo a la ley de Betz. Para alcanzar esto, se analizó la evolución del aire húmedo en régimen subsónico dentro de la tobera.

En este análisis se consideraron las leyes de conservación de la masa y la energía. La conservación de la masa en la tobera puede aproximarse a un flujo interno y a las condiciones de régimen estacionario como se muestra en la ecuación 3.6.

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2 \quad (3.6)$$

La conservación de la energía en una tobera puede definirse por la Ley de Bernoulli. Esta ley establece que la suma de todas las formas de energía mecánica en un fluido a lo largo de una línea de corriente es una constante del flujo en todos los puntos, por lo tanto, esto requiere que la suma de la energía cinética y energía potencial permanezca constante.

La forma simple de principio de Bernoulli es válida tanto para flujos compresibles e incompresibles en movimiento a bajo número de Mach.

Por otra parte, si tenemos en cuenta que el calor y el trabajo intercambiado en el volumen de control definido por la tobera es nulo y que la energía potencial es insignificante, el balance de energía resulta como se muestra en la ecuación 3.7, donde 1 y 2 son las condiciones de entrada salida de la turbina eólica.

$$h_2 + \frac{v_2^2}{2} = h_1 + \frac{v_1^2}{2} \quad (3.7)$$

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot (T_1 - T_2) \cdot c_{ph} + v_1^2} \quad (3.8)$$

$$c_{ph} = \frac{kR}{(k-1)} \quad (3.9)$$

Si introducimos la ecuación 3.8 en la ecuación 3.7 obtenemos la relación entre la temperatura y la presión en dos puntos de la tobera, como se puede ver en la ecuación 3.10. Esta ecuación muestra el proceso empleado el diseño de la tobera por el método de caída de presión o entalpía constante [14].

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (3.10)$$

Al mismo tiempo, y como consecuencia de esta caída de presión, la humedad contenida en el aire llegará a saturarse debido a las condiciones de la presión parcial de vapor, por ello el vapor de agua se condensa.

Cuando esto ocurre de forma adiabática en la tobera, el calor latente se intercambia con el aire que queda seco y, como consecuencia, su energía cinética alcanzará un valor más alto.

3.2.2.5. Condiciones de diseño

El rendimiento de la tobera depende principalmente de dos parámetros, relación de área entrada/salida y la longitud de la tobera. Para encontrar las dimensiones óptimas se ensayan cinco modelos de tobera de tres longitudes: 80, 55 y 25 cm por Shikha [3].

El mejor resultado se logró con longitud de 55 cm y se obtuvieron resultados poco deseables con longitudes de 80 cm y 25 cm. En nuestra investigación, la longitud de la tobera dependerá del porcentaje de humedad que contenga el aire incidente (humedad relativa del 100%) y la adaptación de la sección de salida para la colocación del rotor Savonius.

Para realizar el análisis en las diferentes zonas de la tobera debe tenerse en cuenta que, suele considerarse la sección circular ya que en este caso se producen líneas simétricas de flujo.

De esta manera, se ensayaron relaciones de área de 0,15 a 0,55 siendo la relación ($A_2/A_1=0,15$) la que ofreció los mejores resultados produciendo un aumento de velocidad de 2,0 a 3,7, dependiendo de la longitud de la tobera.

Para una relación de 0,25, la velocidad del viento aumenta 1,5 a 2,5 y en una relación de 0,35, lo hace 1,1 a 1,7. Estos valores serán la longitud máxima y mínima y también los límites de nuestra relación entre áreas en el diseño de la tobera.

Por último, a pesar de que el principal objetivo de esta tesis es el diseño de una tobera adecuada, también se propone un difusor [7].

El principal objetivo del difusor es restablecer la presión del aire hasta condición ambiente en la salida de la turbina y, al mismo tiempo, obtener la mayor eficiencia garantizando una relación de velocidad de 1/3 entre la entrada y salida del aire en el rotor. Esta última investigación mostró que en las condiciones de diseño, un DAWT (turbina de viento aumentada en un difusor) el rendimiento aumenta y es proporcional al flujo de masa que es acorde con la relación geométrica de áreas entre la entrada y salida del difusor.

Como resultado de estas experiencias, debe considerarse el ángulo de divergencia y el grado de humedad del aire en la entrada para reducir la longitud de la tobera y el control de la velocidad en la turbina eólica.

Usando las ecuaciones mencionadas anteriormente, se establece una caída de presión constante para la obtención de las diferentes secciones de la tobera y, en consecuencia, también las propiedades que el aire húmedo puede alcanzar en cada sección.

3.2.2.6. Software

Durante el proceso de diseño, se empleo el software EES© [15, 16] para automatizar el proceso con la ventaja de obtener las propiedades del aire húmedo en función de la caída de presión. Como punto de partida para el ensayo, las propiedades del aire húmedo se obtuvieron de estaciones meteorológicas y, tratados estos datos, se definen las secciones adecuadas de la tobera hasta alcanzar una humedad relativa del 100% y asegurar así la condensación de la masa de aire húmedo.

Dichas secciones se introdujeron en el software CFD © considerando el aire húmedo como fluido en referencia a las condiciones climáticas consideradas. Después de establecer las condiciones de malla, este software ha mostrado las propiedades del aire húmedo para cada línea de flujo.

Para comparar los resultados del EES y del CFD, se simuló y analizó la presión del flujo en la línea central y se introdujo como parámetro de entrada en el modelo EES, tal y como ha realizado en investigaciones anteriores [7].

3.2.2.7. Fabricación de la tobera

Una vez obtenidas estas ecuaciones, el proceso de diseño se inicia con respecto a parámetros tales como la velocidad del aire ambiente, la presión, la temperatura y la humedad relativa de acuerdo con los datos climáticos de Galicia.

Estos datos climáticos, tal y como se han indicado anteriormente, se han obtenido de las estaciones meteorológicas cercanas y de los parámetros de diseño seleccionados:

Modelización de un captador eólico de alta eficiencia

Velocidad del viento entre 3 a 5 m/s

Presión ambiente de 101325 Pa

Temperatura de 293 K

Humedad relativa del 70%.

Una vez indicadas estas propiedades ambientales, se han indicado las condiciones de entrada en una sección de tobera inicial definida en $0,5 \text{ m}^2$.

Después de este proceso de diseño, se realiza la fabricación siguiendo estos pasos:

1. Molde: cada sección de la tobera se determina a 15 mm. de longitud
2. Las secciones se mecanizan madera, se ensamblan y se procede al pulido y encerado.
3. Aplicación sobre el molde de dos capas de gel-coat con catalizador para el fraguado.
4. Aplicación de fibra MAT: capa de fibra saturada con resina de poliéster con su catalizador para el fraguado.
5. Pulido interior.



Figure 3.16. Fabricación del concentrador eólico.

3.2.3. Discusión

En base a los resultados anteriores, comenzamos el proceso de diseño teniendo en cuenta los datos climáticos obtenidos de las estaciones meteorológicas cercanas a La Coruña, como se muestra en las figuras 3.17 y 3.18 La Coruña presenta un clima suave y de alta humedad todo el año como consecuencia de los vientos del Atlántico.

En particular, los valores medios corresponden a una temperatura de 15°C y humedad relativa de un 80% en relación a las muestras tomadas durante todo el año. Por otro lado, los vientos presentan un valor promedio de 5 m/s con picos de 20 m/s, como podemos ver en la figura 3.19.

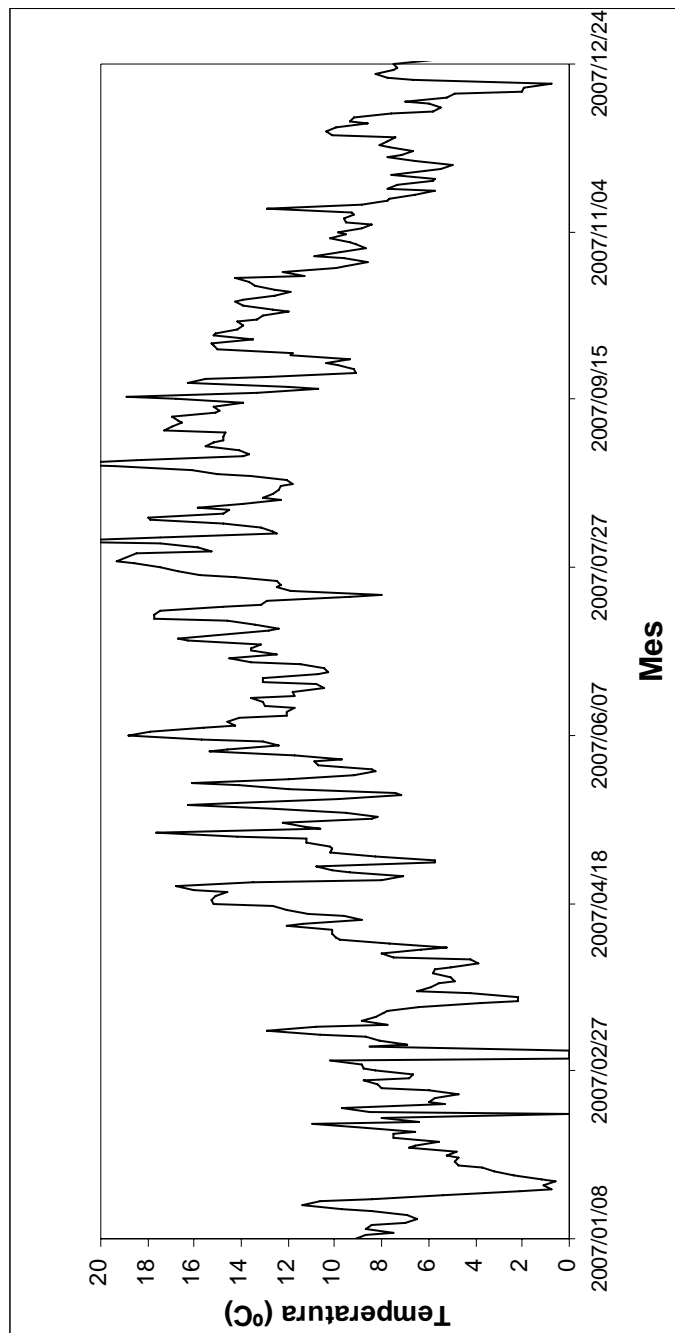


Figura 3.17. Temperatura del aire exterior.

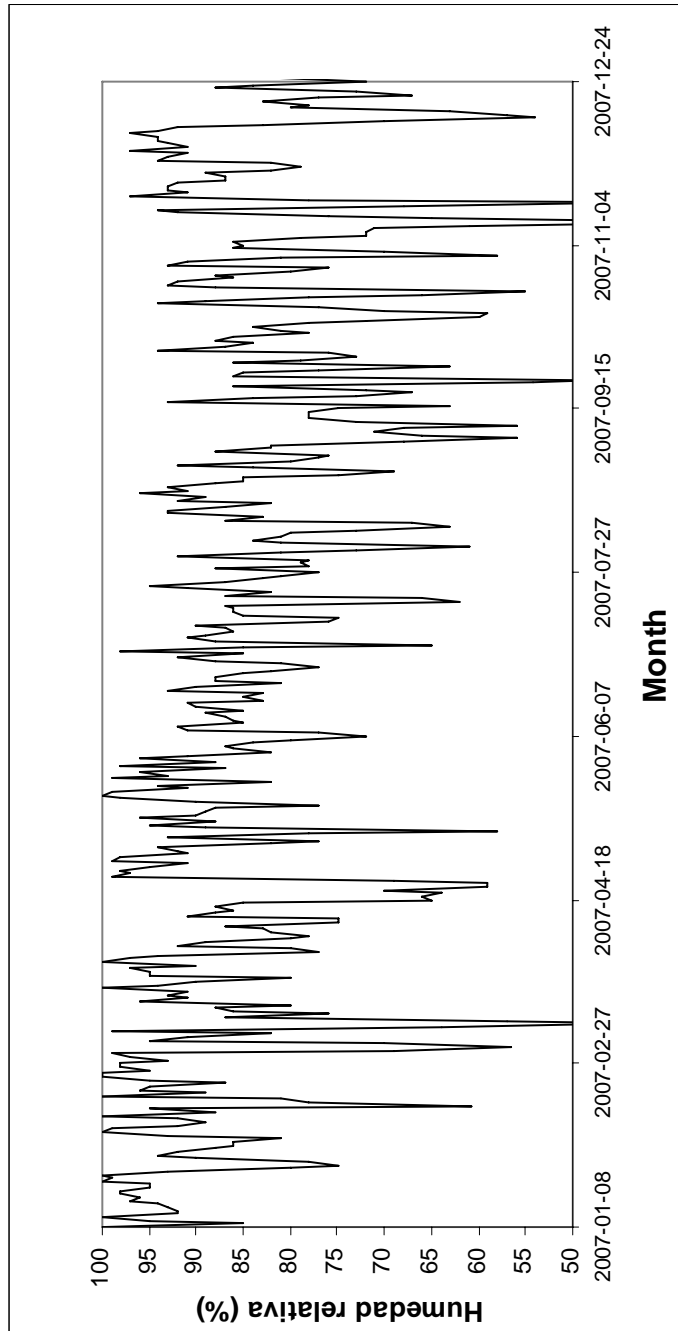


Figura 3.18. Humedad relativa ambiente.

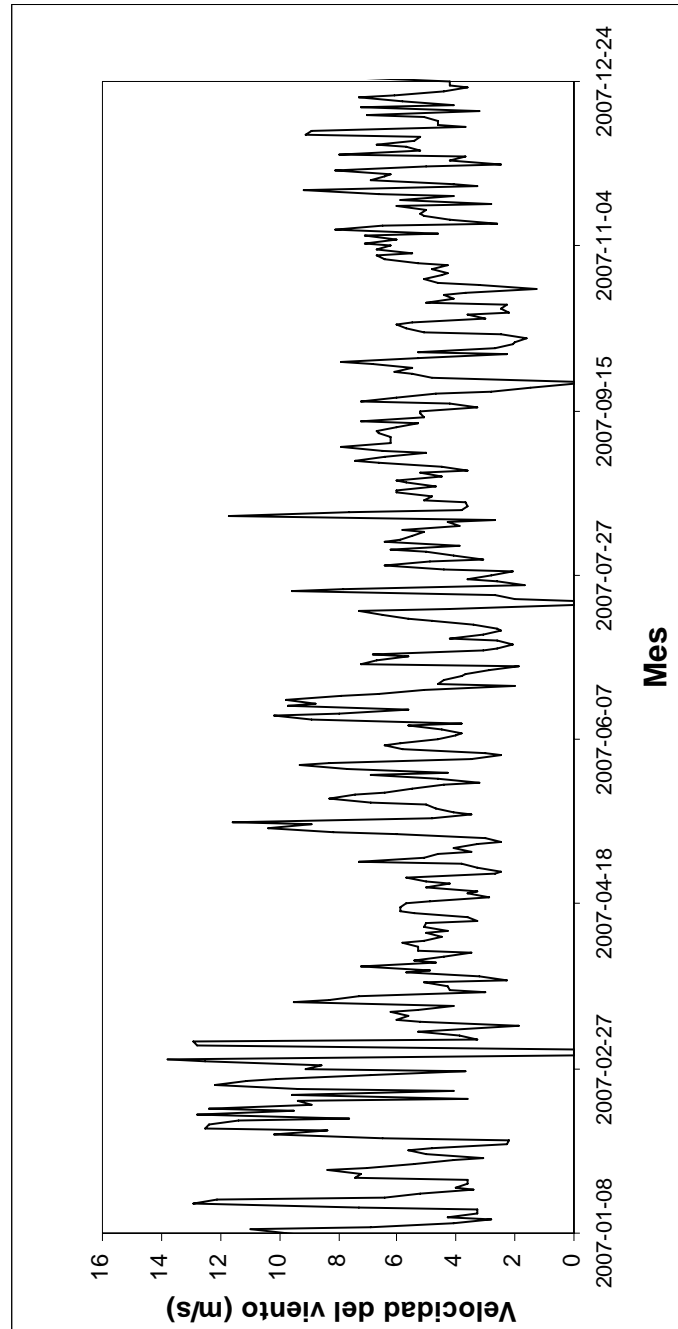


Figura 3.19. Velocidad promedio del viento.

De la distribución de velocidades se puede llegar a la conclusión que la velocidad media del viento es muy baja la mayor parte del tiempo, cerca de tres metros por segundo.

Esta velocidad media es casi la mínima de entrada en funcionamiento de las turbinas eólicas tradicionales y por tanto se espera un comportamiento inadecuado de las mismas para estas condiciones atmosféricas.

Desde el histograma de la humedad relativa se deduce que su valor promedio es del 80% y pueden darse valores entre el 90 y el 100%.

Después de la prueba anterior, se realizó el diseño de la tobera teniendo en cuenta la longitud y la relación de áreas entre los límites establecidos anteriormente y en base a los datos meteorológicos locales.

Además, en esta nueva tobera se asegurará que la condensación del aire húmedo ocurra en su interior por lo que el calor de cambio de estado se transferirá al aire seco restante. Este proceso y una caída de presión constante, nos permitirá definir la tobera como se muestra en la figura 3.20.

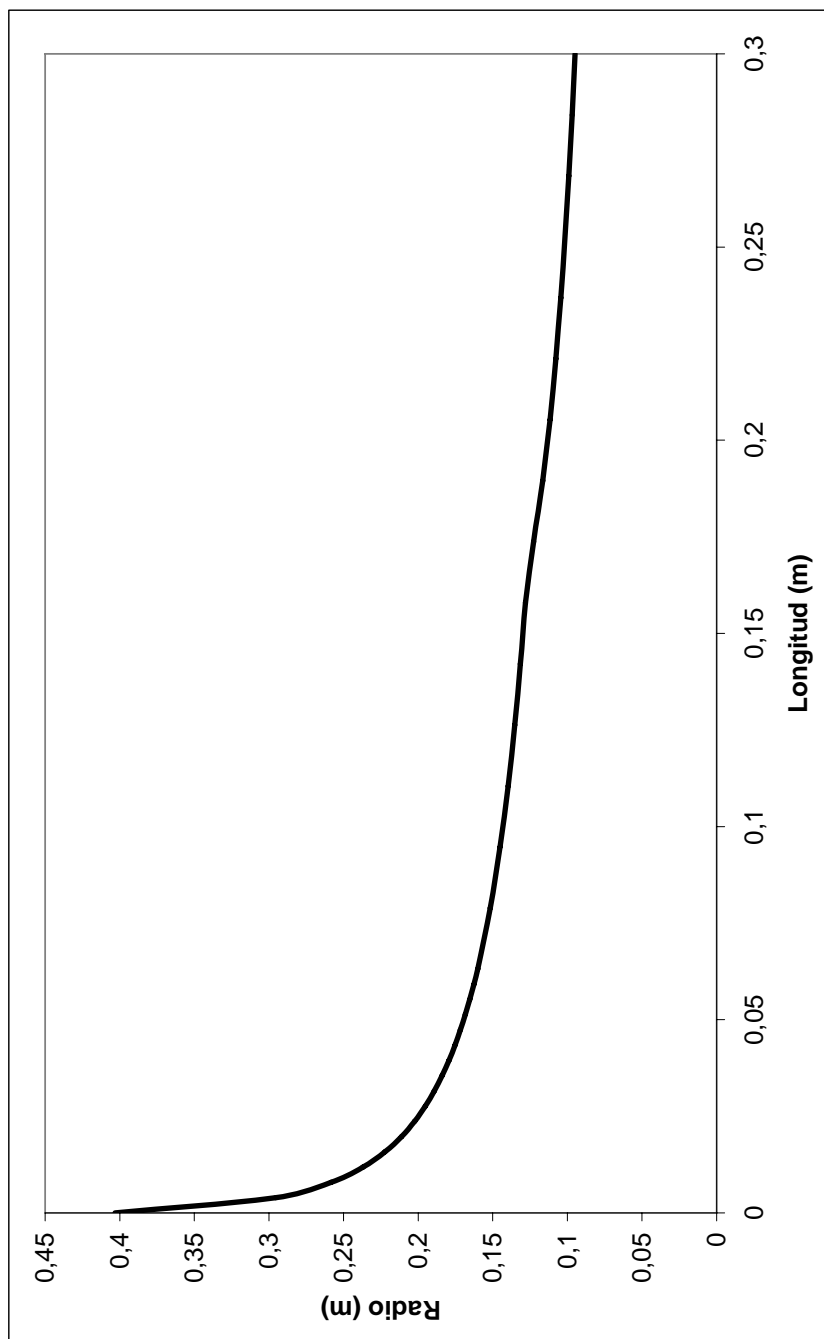


Figura 3.20. Superficie de tobera.

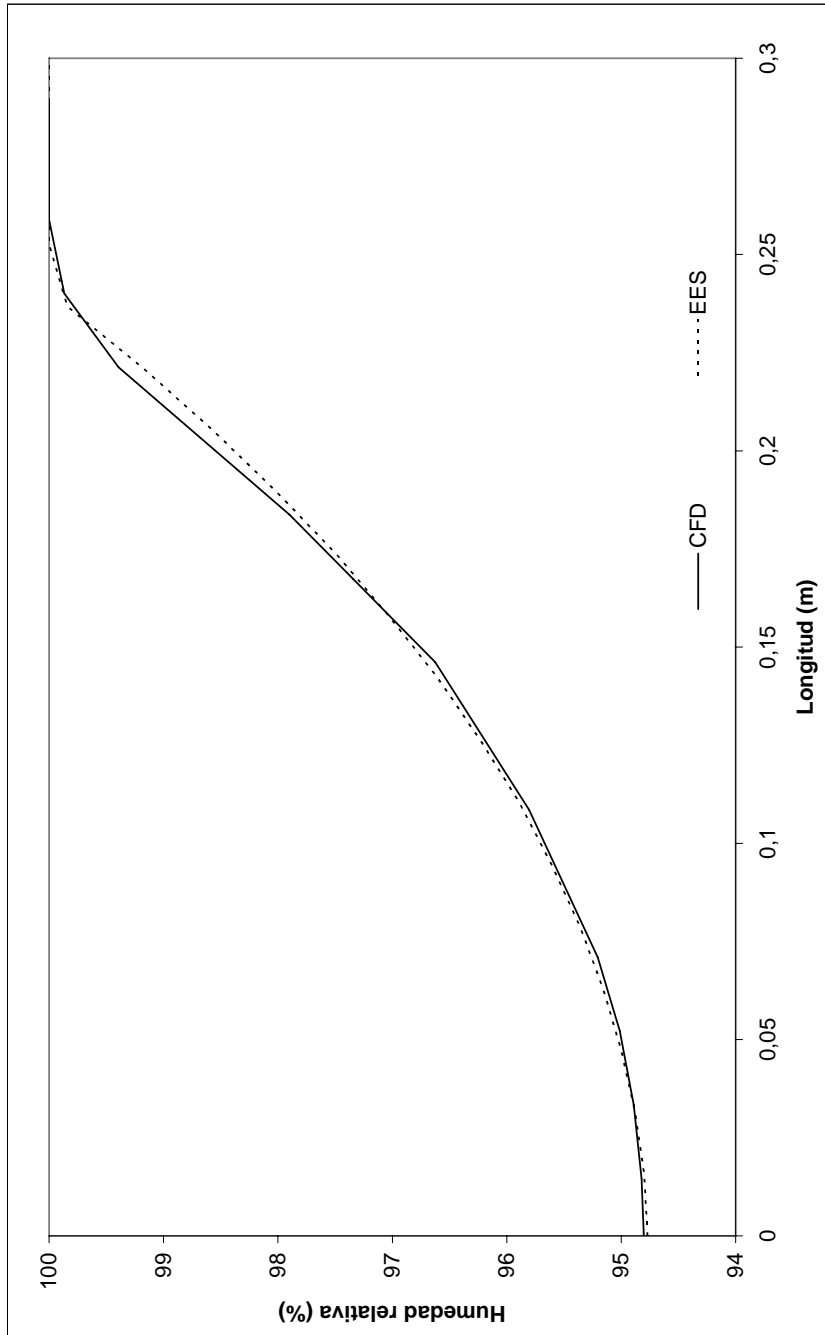


Figura 3.21. Simulación de la humedad relativa con CFD y EES.

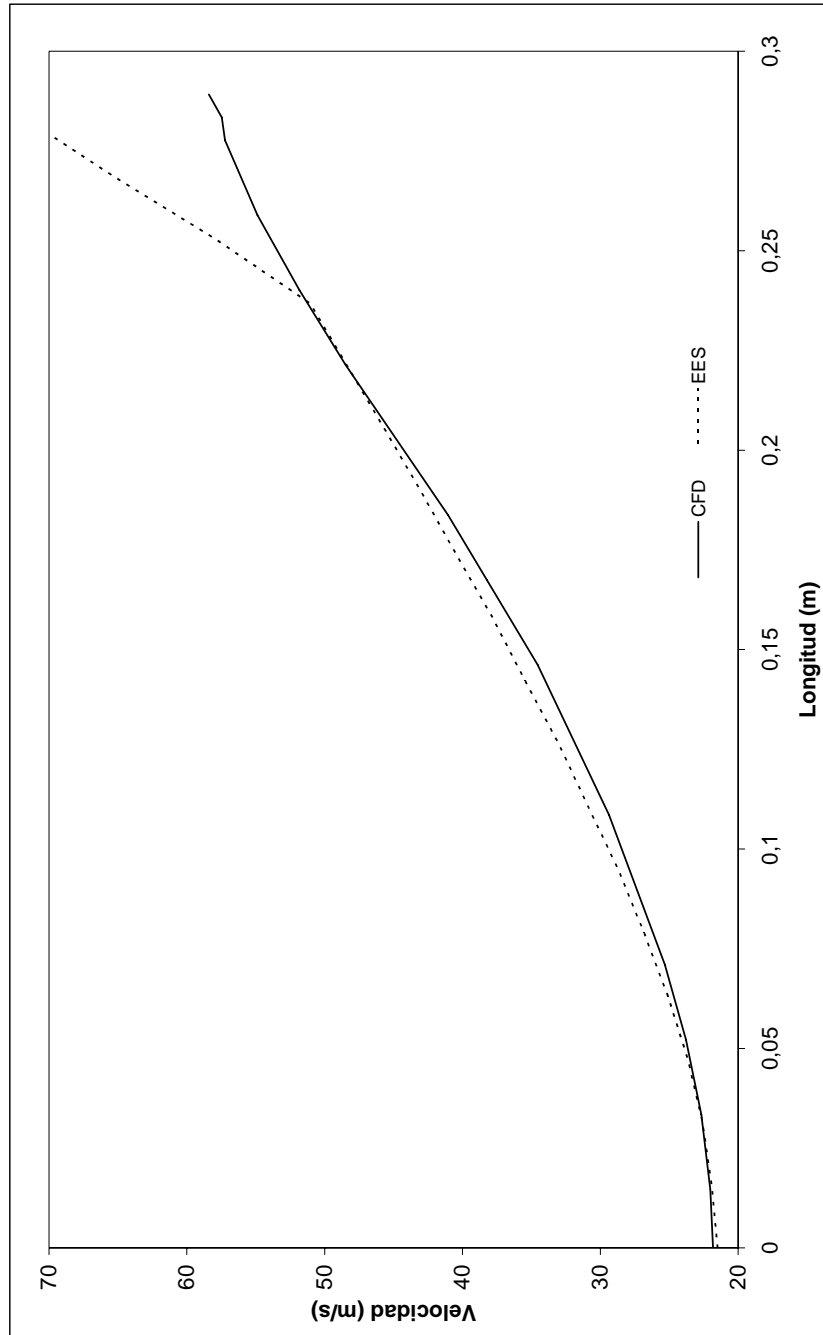


Figura 3.22. Simulación de la velocidad del aire húmedo con CFD y EES.

Esta tobera se dimensiona con una longitud de 30 cm y tiene una relación de áreas de 0,05.

A pesar del hecho de que esta relación del área no fue ensayada por [3], en nuestra investigación debe esperarse un incremento alto de la velocidad del aire.

Una vez que se definieron las áreas de la tobera, se simularon con el software de CFD para obtener las líneas de flujo y se concluyó que la condensación del aire húmedo ocurriría a 0,25 cm de la entrada de en la tobera. Es por eso que la humedad relativa será del 100% a partir de este punto.

Realizada la simulación CFD se seleccionó la línea central de flujo para comparar los resultados con el software EES, tal y como puede apreciarse en las figuras 3.21 y 3.22. Estas simulaciones muestran una clara similitud en la evolución de la temperatura del aire húmedo así como en la presión con un descenso de 1°C y 2,2 kPa entre las condiciones de entrada y salida.

En consecuencia, podemos afirmar que el proceso de saturación es coincidente en las dos simulaciones y ocurre a 0,25 cm pese a que se produce una clara divergencia en los resultados respecto a la velocidad y potencia del viento.

En la experimentación realizada, figura 3.22 existe un incremento de la velocidad en el punto de saturación, incremento diferente entre el EES y el CFD como consecuencia del la transferencia de calor por condensación de la humedad del aire.

El resultado es que la velocidad del aire se incrementa en 2,36 veces el valor de entrada, similar a la extrapolación de [3] para la relación de áreas seleccionadas, y a un valor de 3,18 según simulaciones realizadas con el EES. Por otro lado, las simulaciones CFD no tienen en cuenta el calor transferido y en este caso, el incremento de velocidad se considera de 2,63.

Este efecto puede compararse en las curvas de energía eólica, donde se observa un claro cambio entre los 110 kW obtenidos aplicando la simulación CFD y los 250 kW aplicando el software EES.

En resumen, podemos decir que, después de un análisis profundo, existen algunos parámetros como las propiedades del aire húmedo que no son consideradas en el diseño de turbinas de viento convencionales, y que deben tenerse en cuenta para mejorar el proceso de la conversión de energía.

Por último, para evaluar el efecto de la humedad relativa en el diseño de la tobera se realizaron ensayos cambiando la humedad relativa en valores del 90, 95 y 98%.

Los resultados muestran un ligero incremento en la velocidad del aire cuando la humedad relativa se incrementa en un 3%.

Modelización de un captador eólico de alta eficiencia

En consecuencia, además de considerar el intercambio de calor, deben considerarse otras propiedades del aire húmedo, como la densidad que experimenta un cambio claro en la tobera y afecta a la conversión energética.

Todos estos estudios de laboratorio se analizarán en profundidad en la siguiente sección partiendo de la tobera obtenida. Podemos concluir que dicha tobera es otro de los resultados novedosos de esta investigación.

3.2.6. Ensayo de laboratorio y simulación

Como se ha mencionado anteriormente, en este apartado se va a evaluar si la densidad del aire húmedo es un parámetro importante a considerar en el diseño de los concentradores de viento y su funcionamiento a partir de datos reales obtenidos en el laboratorio.

Para ello, se ha realizado una caracterización de las condiciones climáticas reales de Galicia. En particular, durante el verano en 50 estaciones meteorológicas localizadas en los principales puntos de interés muestreados en tiempo real.

A partir de estas cifras podemos concluir que Galicia presenta un clima templado, con una humedad relativa alta durante todo el año, como consecuencia de los vientos del Atlántico. Esto lo hace idóneo para la aplicación del conversor energético desarrollado en esta tesis.

En particular, en el verano nos encontramos con una temperatura media y una humedad relativa de aproximadamente 20°C y un 70%, mientras que en la temporada de invierno de unos 5°C y un 70%, respectivamente.

Por otro lado, los vientos muestran un valor medio de 2,2 m/s con picos de 20 m/s [17-18].

El estudio estadístico de la distribución de velocidades del viento ha demostrado que su velocidad media es muy baja la mayor parte del tiempo, de aproximadamente 3 m/s. Dicha velocidad media es casi la misma velocidad del viento a partir de la cual la turbina inicia su conversión energética. Por todo ello, se espera un comportamiento inadecuado da la misma. En el invierno y el verano los vientos de temporada muestran una velocidad media del viento de 2 m/s, y existe un aumento a 3,4 m/s durante la temporada de primavera.

Después de afirmar la necesidad de aerogeneradores de baja velocidad en esta región, es interesante considerar el efecto real de la densidad del aire húmedo en la conversión de energía eólica de la turbina. Este efecto se ha mostrado en el funcionamiento real de turbinas eólicas [19]. Este estudio de referencia [19] mostró un incremento de alrededor del 18% siempre que los cambios en la densidad del aire húmedo sean de 1,012 a 1,225 kg/m³.

Este cambio de densidad se relaciona con la ubicación de aerogeneradores. Por ejemplo, al nivel del mar la densidad del aire húmedo era 1,198, como consecuencia de una humedad relativa media y una temperatura de 89% y 13,9°C, respectivamente. Por otra parte, a 962 m de altura bajo la misma temperatura y una humedad relativa del 84%, el aire húmedo ha mostrado un cambio de densidad hasta alcanzar el valor de 1,094 kg/m³. Este concepto presenta un interés especial en virtud de un posible futuro cambio climático [20].

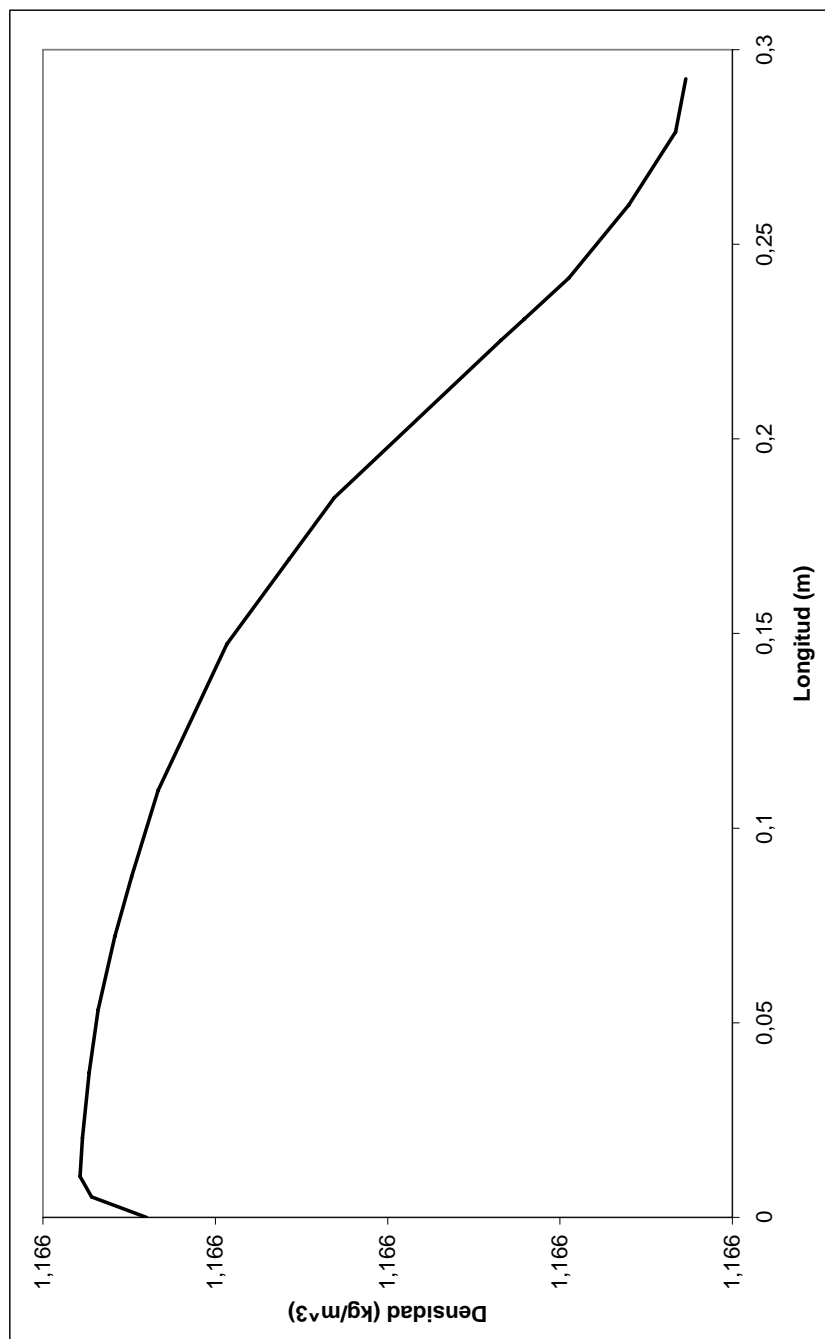


Figura 3.23. Simulación de la densidad del aire húmedo en la tobera..

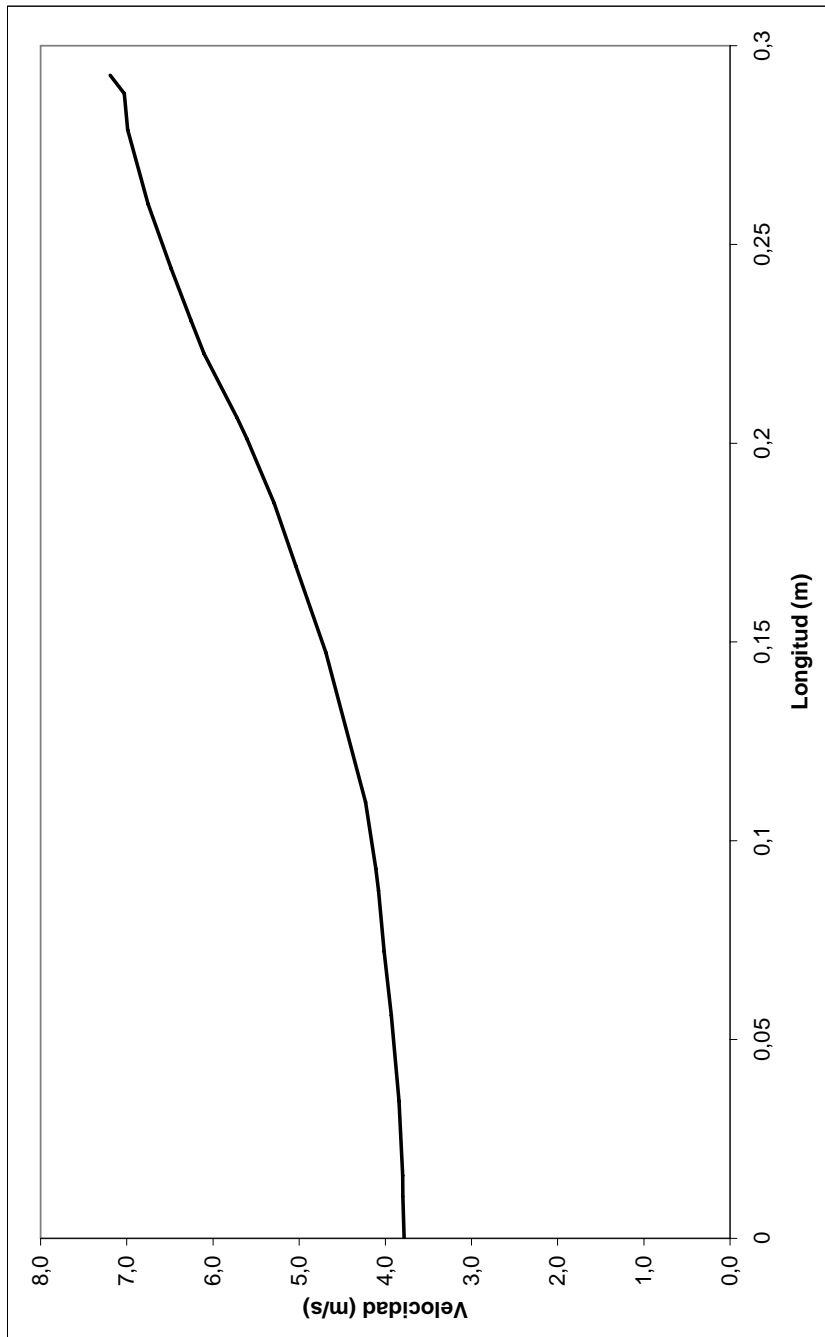


Figura 3.24. Simulación de la velocidad del aire húmedo en la tobera.

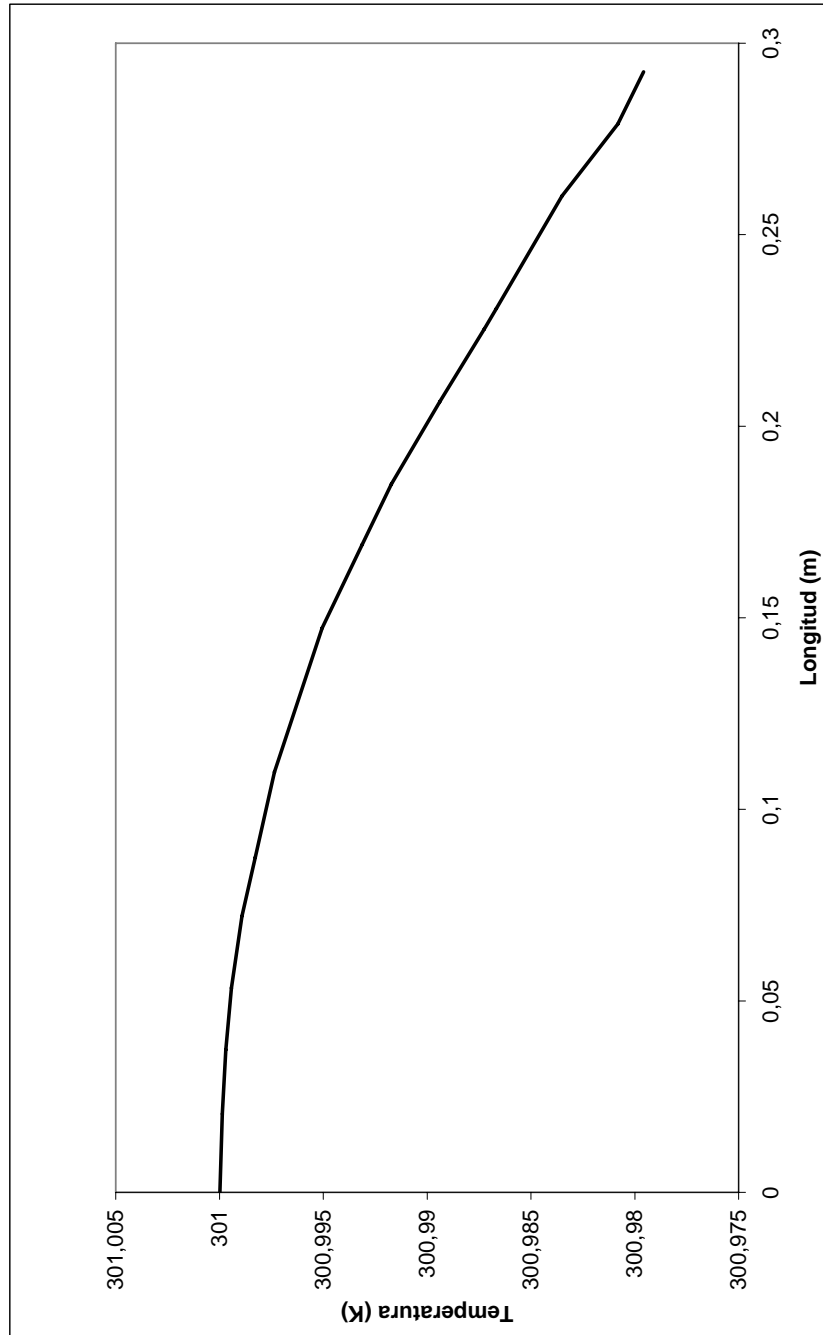


Figura 3.25. Simulación de la temperatura del aire húmedo en la tobera.

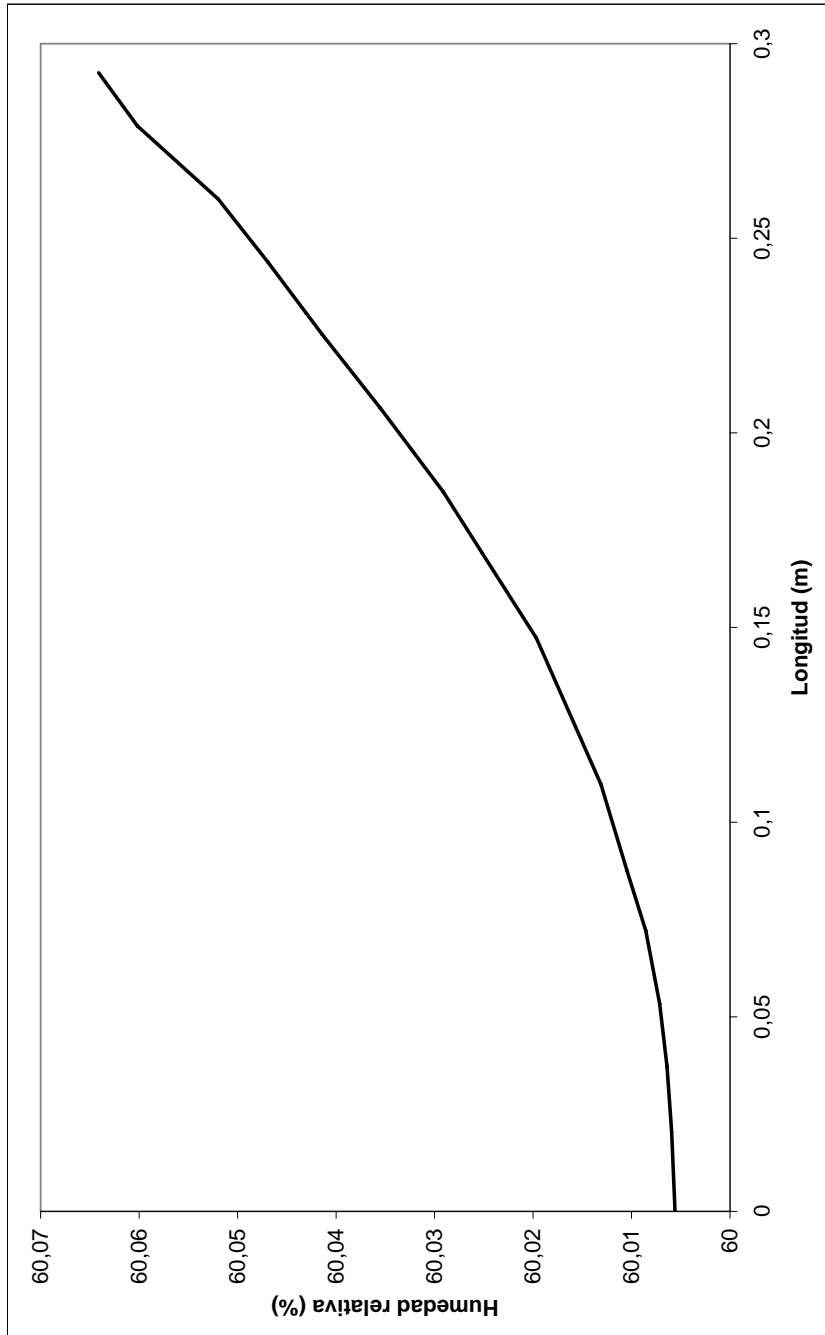


Figura 3.26. Simulación de la humedad relativa del aire húmedo en la tobera.

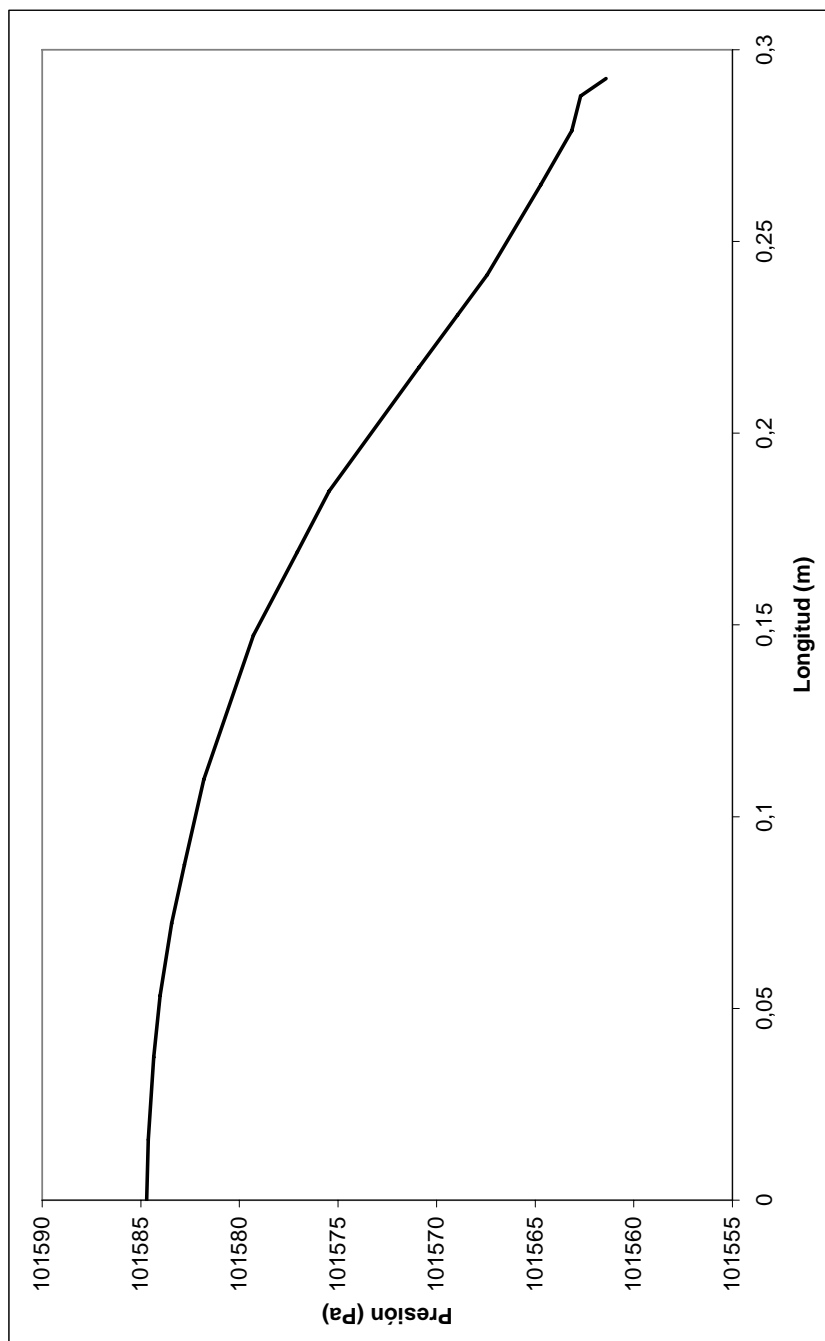


Figura 3.27. Simulación de la presión del aire húmedo en la tobera.

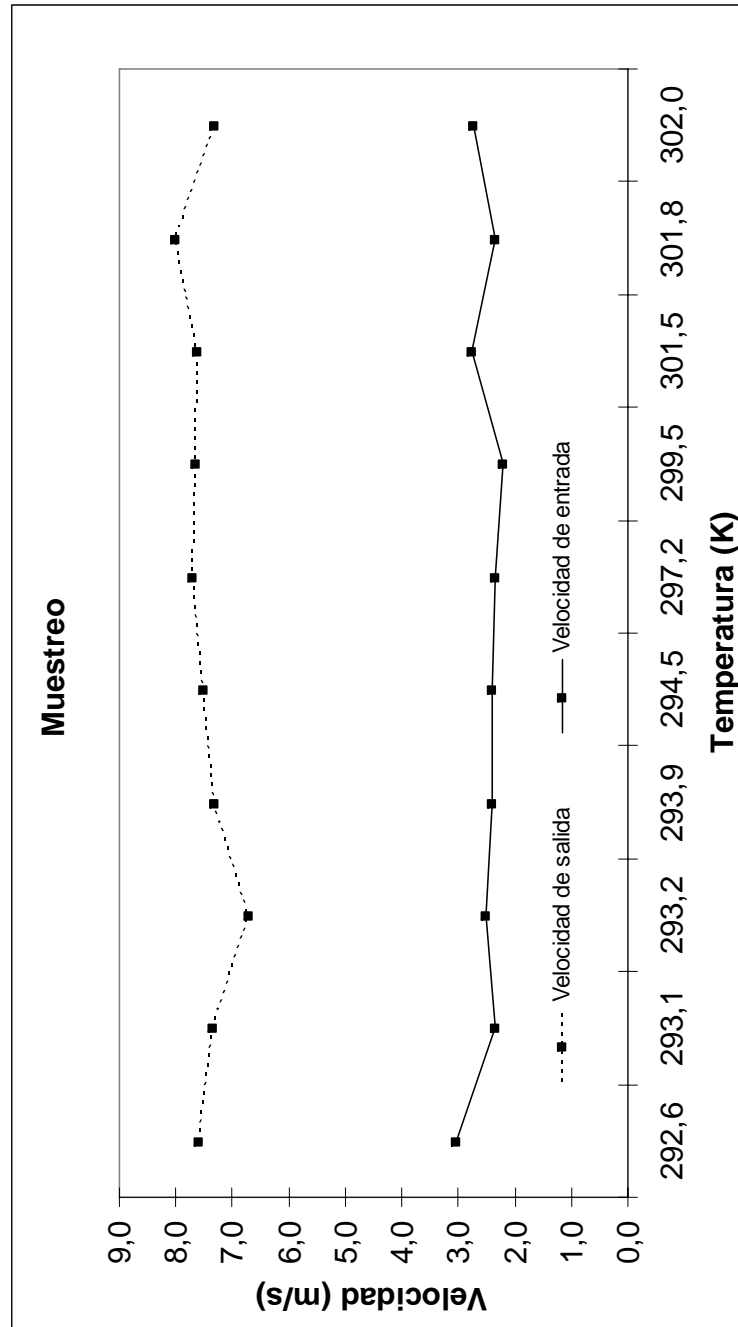


Figura 3.28. Muestreo de la relación de velocidades a diferentes temperaturas.

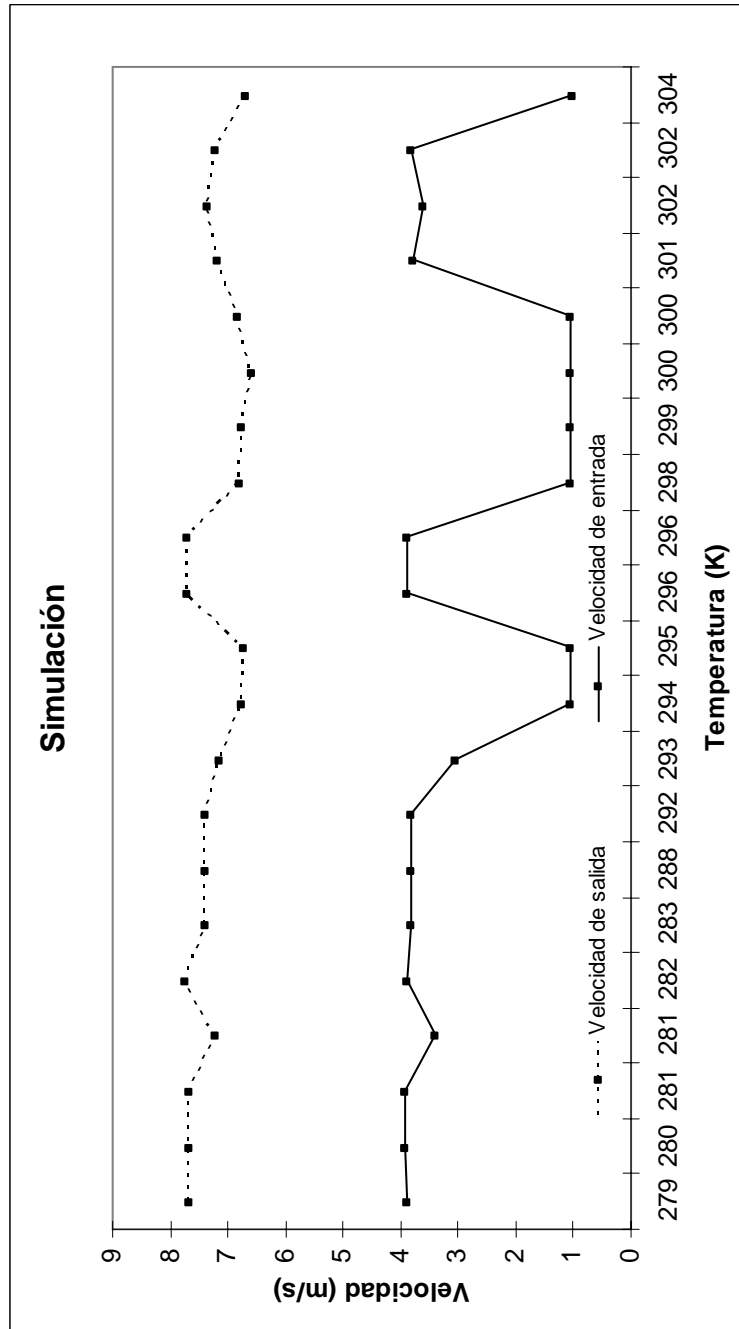


Figura 3.29. Simulación de la velocidad del aire húmedo.

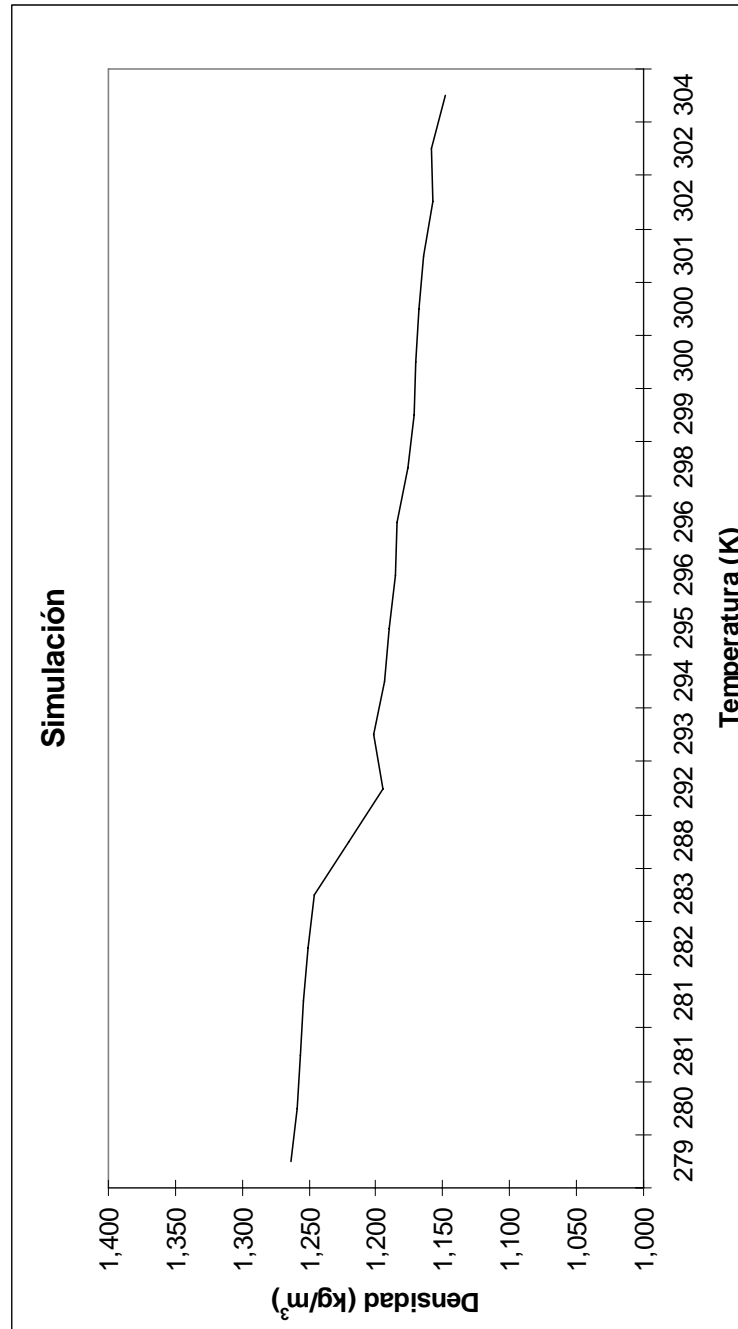


Figura 3.30. Simulación de la densidad del aire húmedo.

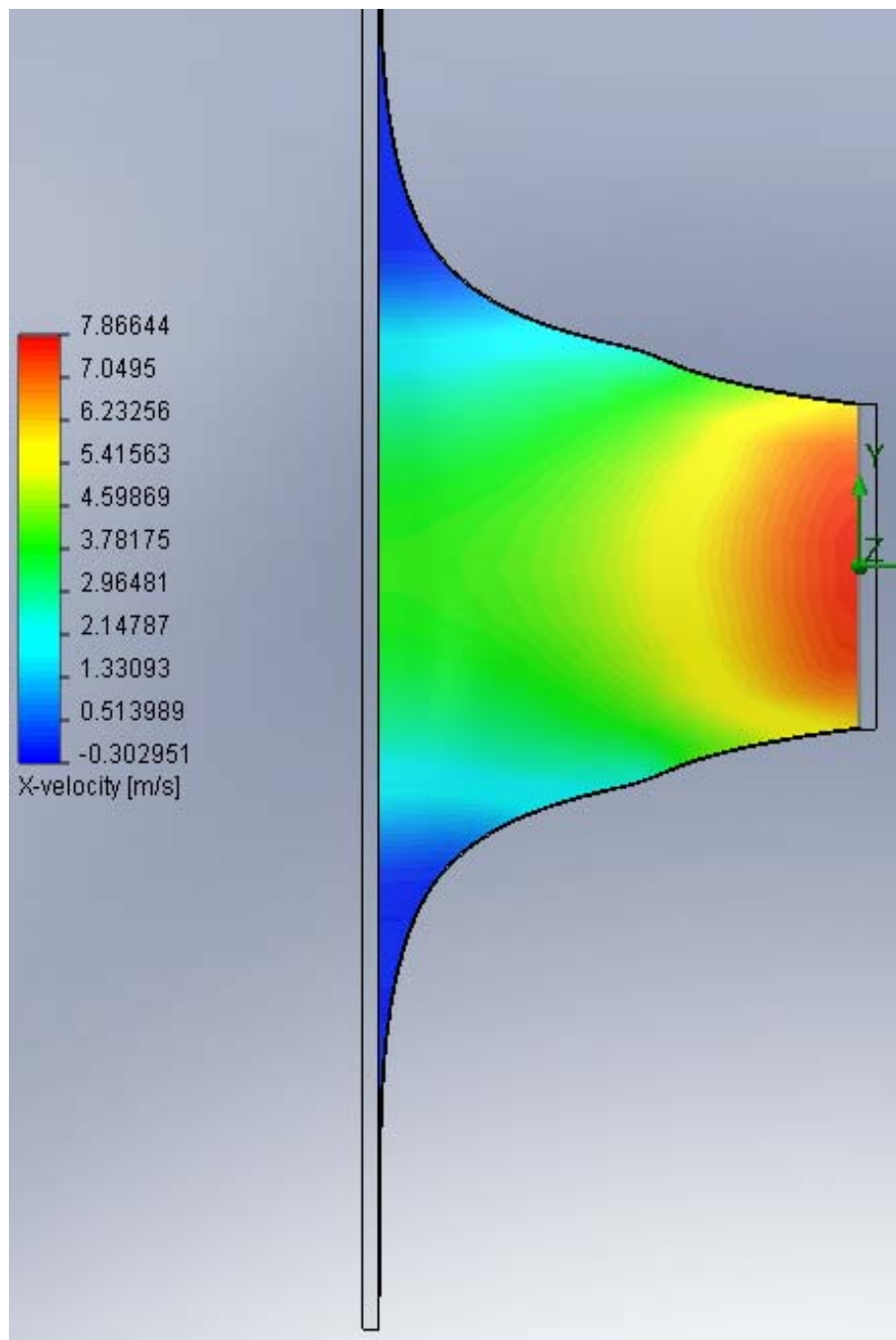


Figura 3.31. Simulación de la velocidad del aire de alta densidad en la tobera.

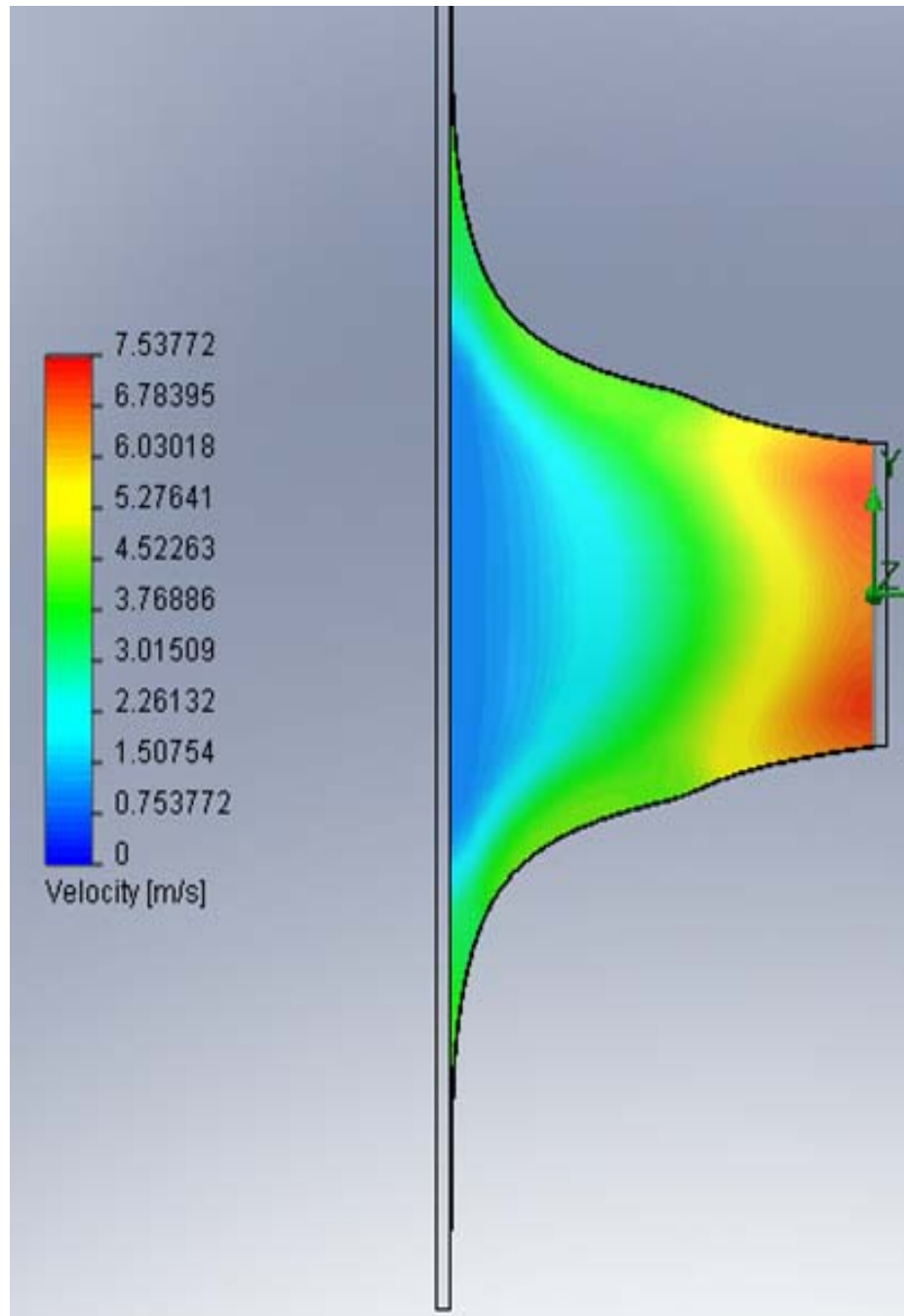


Figura 3.32. Simulación de la velocidad del aire de baja densidad en la tobera.

Una vez que se ha analizado la necesidad de turbinas eólicas de baja velocidad, el concentrador de viento y el efecto de la densidad del aire húmedo en la conversión de energía, vamos a concentrarnos en el efecto climático sobre las condiciones de funcionamiento del concentrador eólico.

Para empezar, el proceso de diseño del concentrador eólico fue explicado anteriormente obteniendo las secciones mostradas en la figura 3.20.

Tras realizar el proceso de fabricación, dicho concentrador eólico fue probado bajo diferentes densidades de aire húmedo, manteniendo la velocidad de entrada en 3 m/s. Los resultados obtenidos de la simulación se reflejan en las figuras 3.23 a 3.27. Dichas figuras muestran una ligera disminución en la temperatura del aire húmedo, presión y densidad junto con un aumento de la humedad relativa y la velocidad del viento, tal y como se esperaba.

Al igual que en trabajos de investigación anteriores, la velocidad y las medidas de intensidad de la turbulencia en el túnel cuando éste se encuentra vacío han mostrado una distribución uniforme y con una baja intensidad de turbulencias.

Las mediciones se han realizado en un proceso de muestreo con respecto a la línea central de la corriente de aire procedente de la cámara de remanso. Estas mediciones se desarrollaron cada 10 cm con respecto al punto central en los ejes diagonales, horizontales y verticales.

Una vez desarrollado el concentrador eólico, éste ha sido probado bajo diferentes condiciones de temperatura y humedad relativa en el túnel de viento desarrollado para este estudio. En particular, se seleccionaron valores de temperatura de 19°C y valores de humedad relativa de 55%, 75%, 90% y 95% tal y como se muestra en las figuras 3.28 a 3.30. Para analizar el tipo de flujo obtenido, se ha simulado el concentrador eólico ante diferentes densidades del aire incidente, tal y como se muestra en las figuras 3.31 y 3.32. En dichas figuras se observan iso-superficies de velocidad del aire en la tobera para baja y alta densidad, respectivamente. Estas iso-superficies muestran que, ante bajas densidades del aire, hay un cierto estancamiento del aire húmedo que reduce el área de entrada de la tobera y, por consiguiente, hay un aumento en la velocidad de la línea central para mantener constante el flujo de másico.

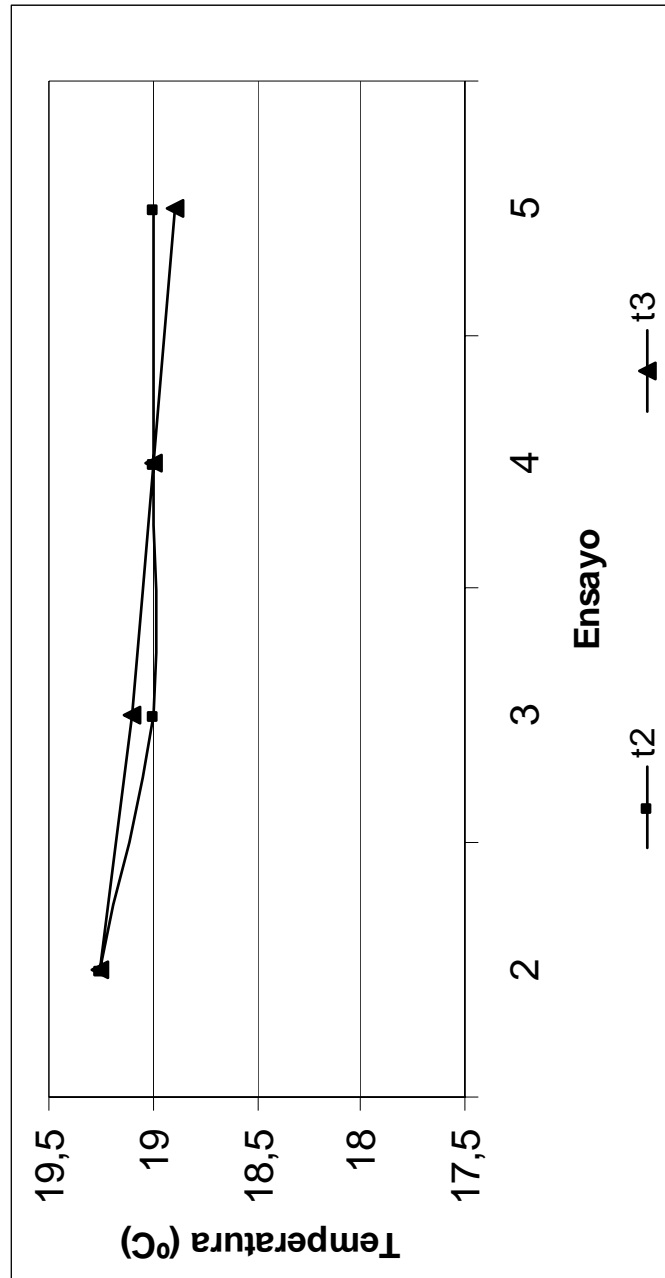


Figura 3.33. Temperatura muestreada en el concentrado eólico (°C).

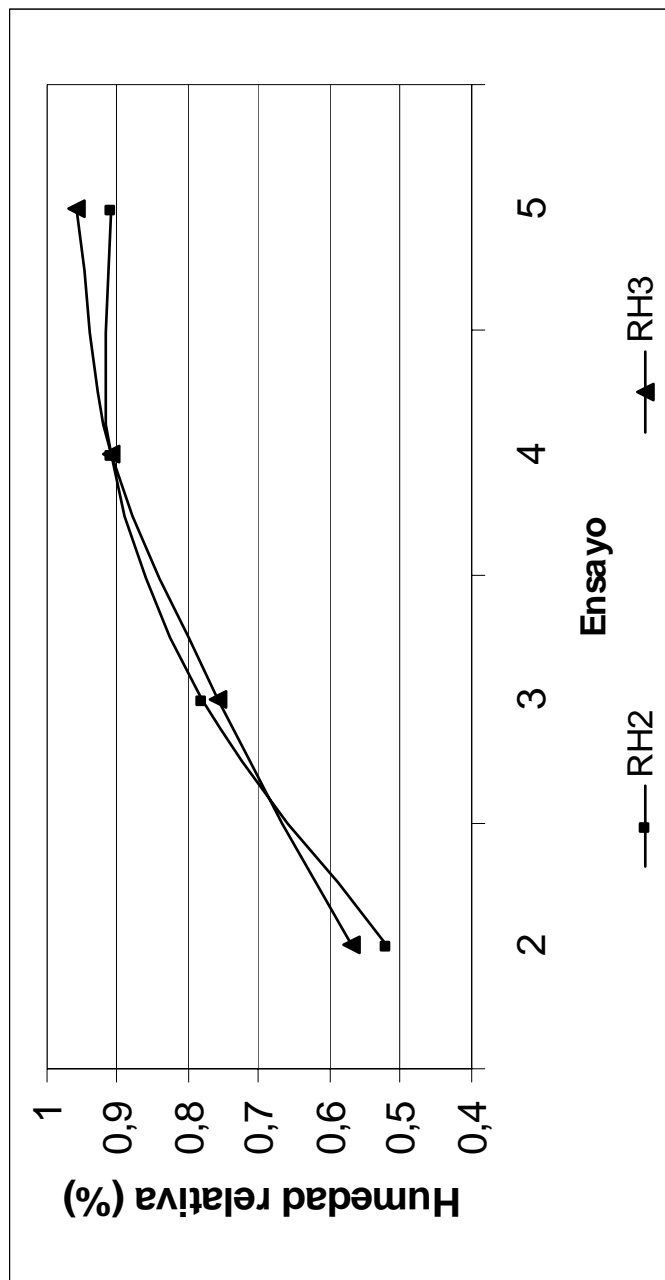


Figura 3.34. Humedad relativa muestreada en el concentrado eólico (%).

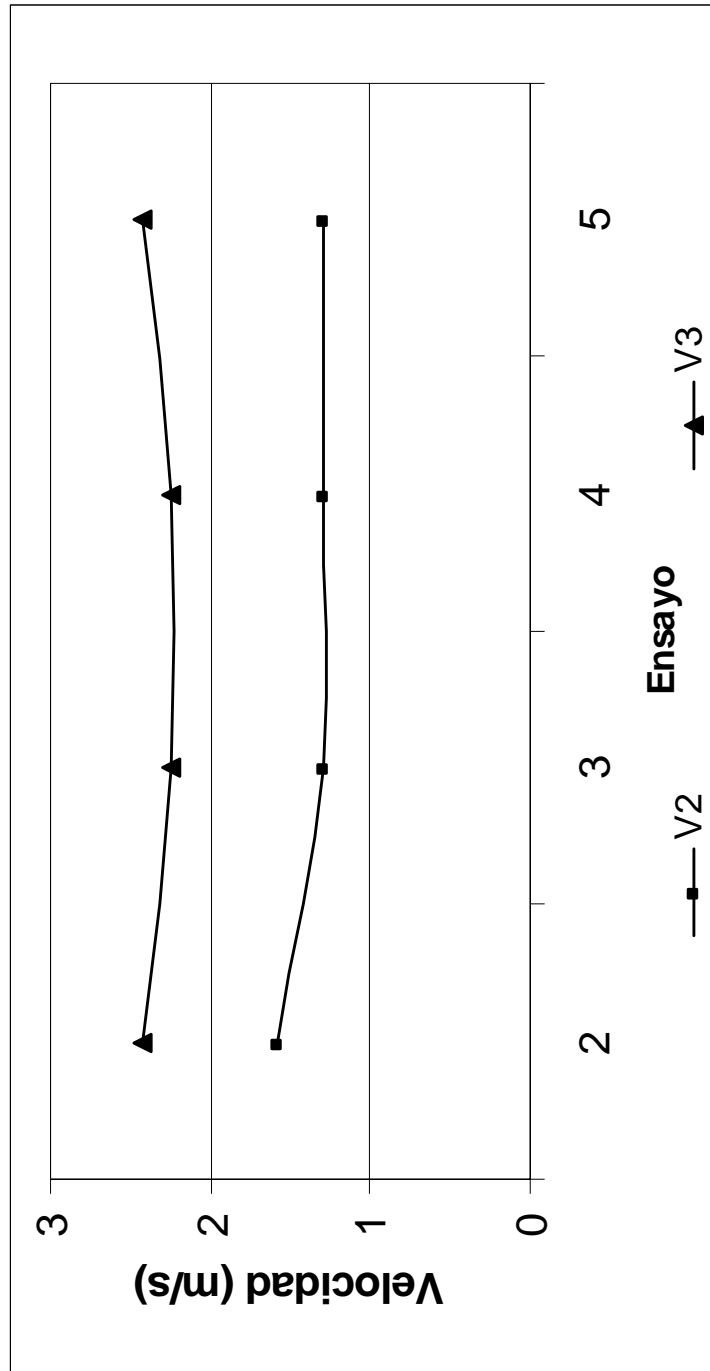


Figura 3.35. Velocidad muestreada en el concentrado eólico (m/s).

Los valores reflejados en estas gráficas han mostrado una disminución de la temperatura de $0,3^{\circ}\text{C}$ entre la temperatura de entrada de la tobera (punto 2) y las condiciones de salida de la misma (punto 3), como se ve en la figura 3.33.

De manera similar, se ha apreciado una disminución de la presión de 5 Pa, lo que implicaba un aumento de 5% de humedad relativa del aire húmedo, tal y como se muestra en la figura 3.34.

Por otra parte, se ha observado que cuanto mayor es la humedad relativa menor será la velocidad del aire húmedo en el punto 3. A pesar de que este resultado indica que el efecto de la humedad puede ser contraproducente, debemos tener en cuenta que, dado que no se ha alcanzado el 100% de humedad relativa tampoco existe cambio de fase de la masa de aire húmedo y, por lo tanto no existe la transferencia de energía deseada, tal y como se muestra en la figura 3.35.

En resumen, este estudio pormenorizado muestra valores superiores de velocidad que los obtenidos por Shikha en la misma proporción de áreas de 0,25 debido al hecho de que, en estas experiencias se ha utilizado aire con bajo nivel de humedad.

Otra conclusión que podemos extraer de este resultado es que este concentrador eólico presentará su mayor eficacia durante el tiempo de verano, cuando la velocidad del viento ambiente y la densidad del aire húmedo, son más bajos.

Es interesante señalar que la velocidad de salida permanece casi constante con el valor de la velocidad de la línea central como consecuencia de la distribución del flujo líneas, es decir, del tipo de flujo desarrollado.

La tercera fase del estudio de este proceso consiste en las simulaciones CFD por medio del software EFD-Lab de 8,0. El motivo del uso de este software, explicado anteriormente, radica en que es uno de los pocos recursos de software que simulan las condiciones de humedad del aire. Estas simulaciones se han validado con muestras de datos reales en estudio y dimensionado del recinto que alberga el túnel de viento. En particular, en el análisis de la influencia de los cerramiento en el flujo de aire dentro del laboratorio.

Para la simulación CFD, se ha desarrollado un modelo 3D del concentrador eólico, tal y como se muestra en la figura 3.36.

A partir de esta pieza, se han desarrollado simulaciones bajo las mismas condiciones climáticas que las obtenidas en el caso real, es decir el 95% de humedad relativa. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 3.37 a 3.40.

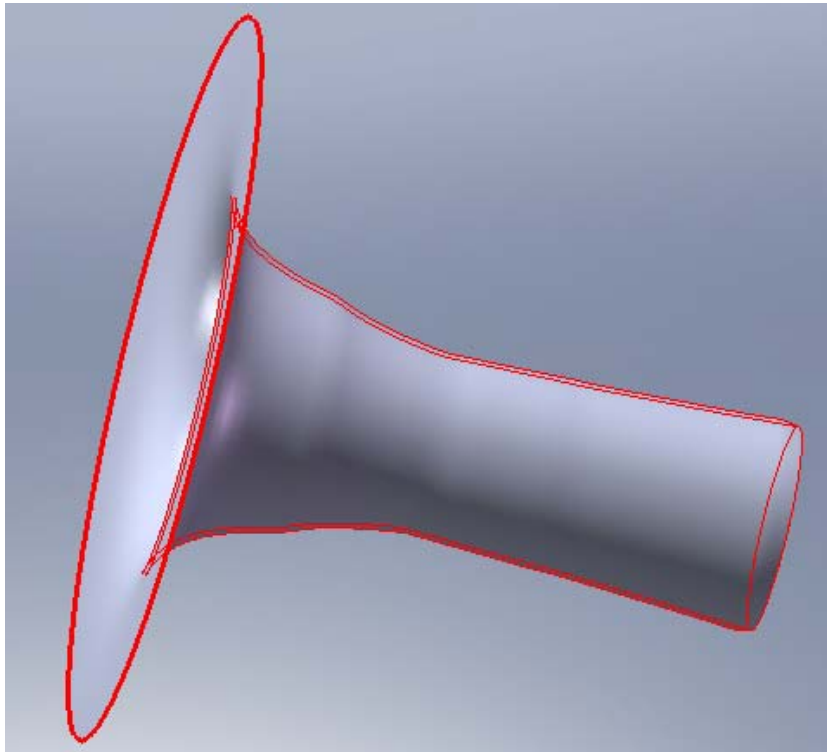


Figura 3.36. Concentrador eólico en el CFD

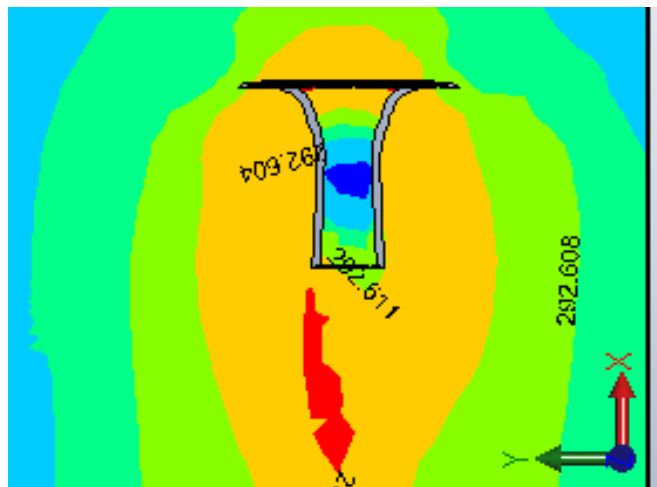


Figura 3.37. Temperatura del aire húmedo (K)(HR=95%, P=101328 Pa, v=5 m/s).

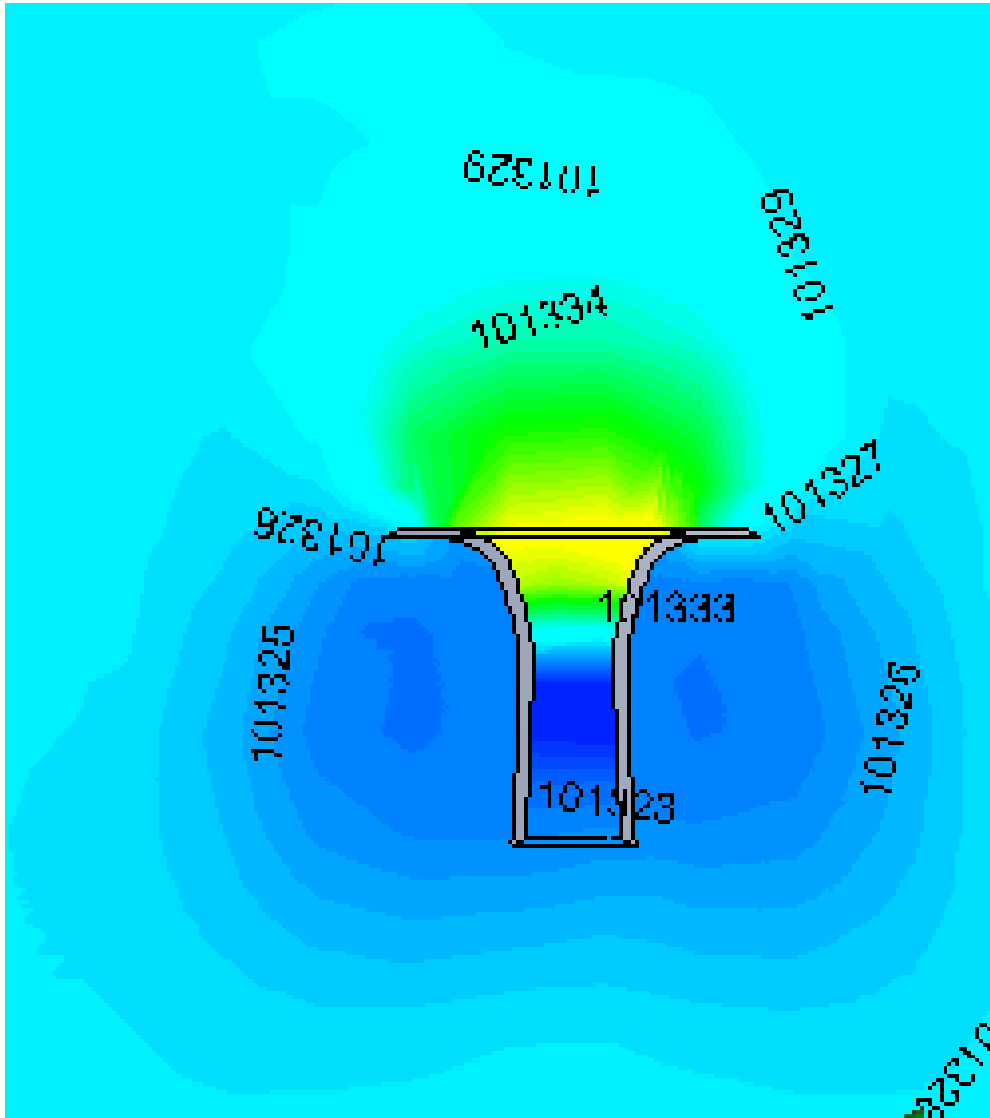


Figura 3.38. Presión del aire húmedo (Pa)(HR=95%, P=101328 Pa, T=292.8 K, v=5 m/s).

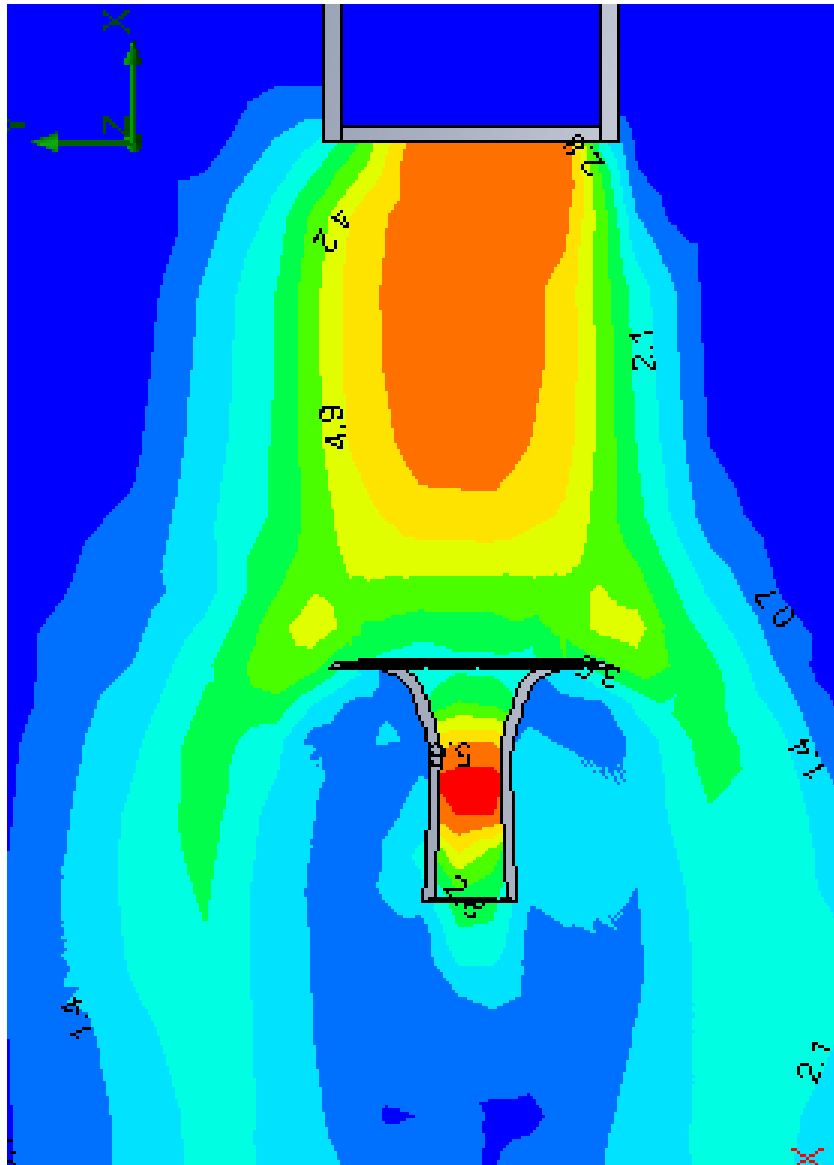


Figura 3.39. Velocidad del aire húmedo (HR=95%, P=101328 Pa, T=292.8 K, v=5 m/s).

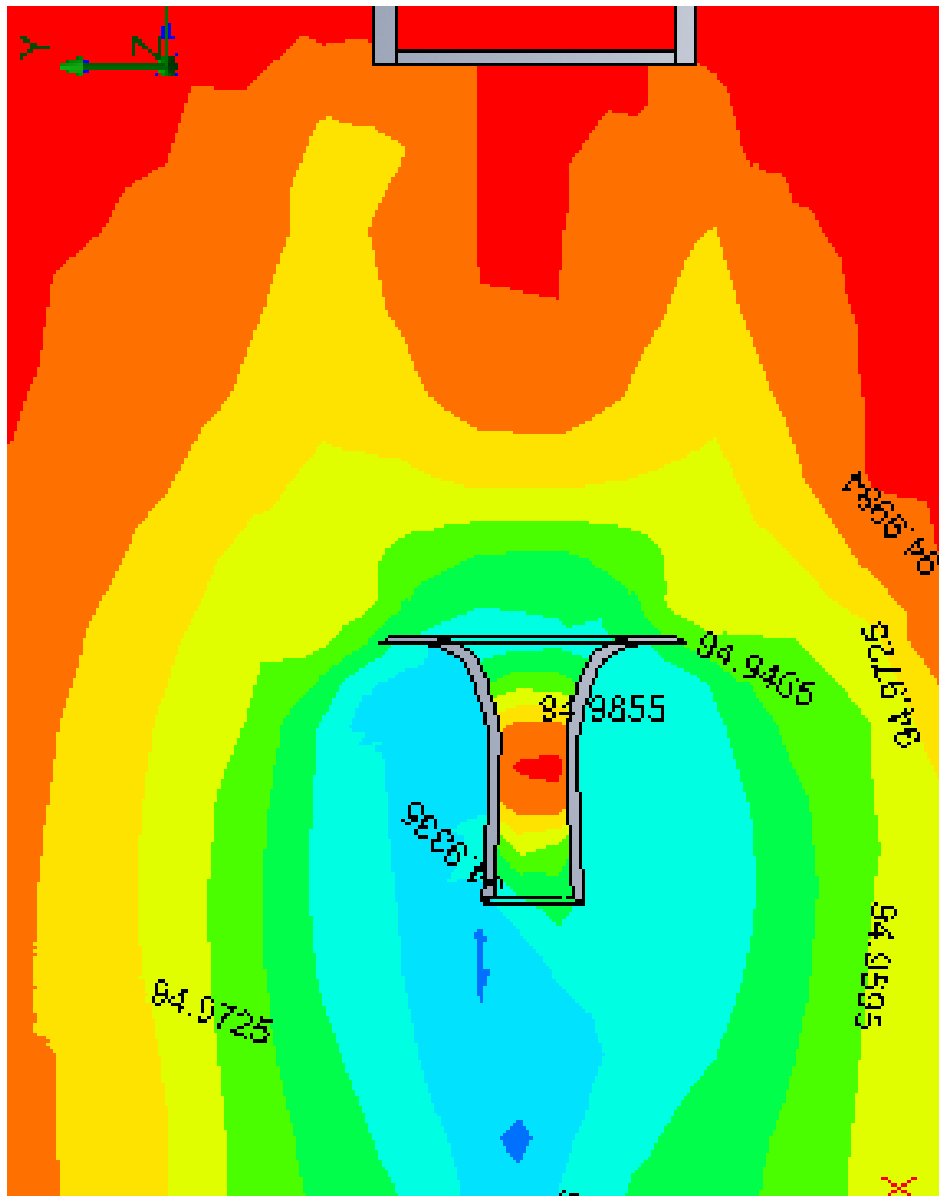


Figura 3.40. Humedad relativa del aire húmedo (%) ($P=101328$ Pa, $T=292.8$ K, $v=5$ m/s).

Dado que los valores de humedad relativa alcanzados en nuestro túnel de viento no han podido superar los valores del 98 % de humedad, ha sido necesario validar las situaciones CFD con datos reales ante valores de humedad relativa más reducidos y, posteriormente, proceder a una extrapolación CFD de la velocidad esperada ante una humedad relativa del 100 %. El resulta se ha reflejado en la figura 3.41.

En la figura 3.41 se hace evidente que este modelo, de acuerdo con su diseño original, presenta un claro aumento de la velocidad del aire húmedo en su sección mínima cuando la velocidad del aire exterior es de 5 m/s. También revela un valor constante de proporcionalidad con respecto al aire exterior entre 5 y 14 m/s. A partir de este último valor, se ha observado un aumento realmente significativo a 24 m/s.

A pesar de ello, esta conversión de la energía no es la máxima que puede obtenerse a partir de este concentrador. Ello es debido a que el software de CFD puede simular únicamente hasta un 5% de la condensación correspondiente al vapor de agua presente en el aire. En efecto, se espera un nivel de condensación claramente superior y, en consecuencia, una mayor conversión de energía.

De este estudio se ha concluido que, para llegar a los mismos valores que en las simulaciones, se debe alcanzar una humedad relativa del aire del 95% o superior y asegurar así el proceso de condensación en la tobera. Se trata de un aspecto técnico pendiente de lograr para esta aplicación.

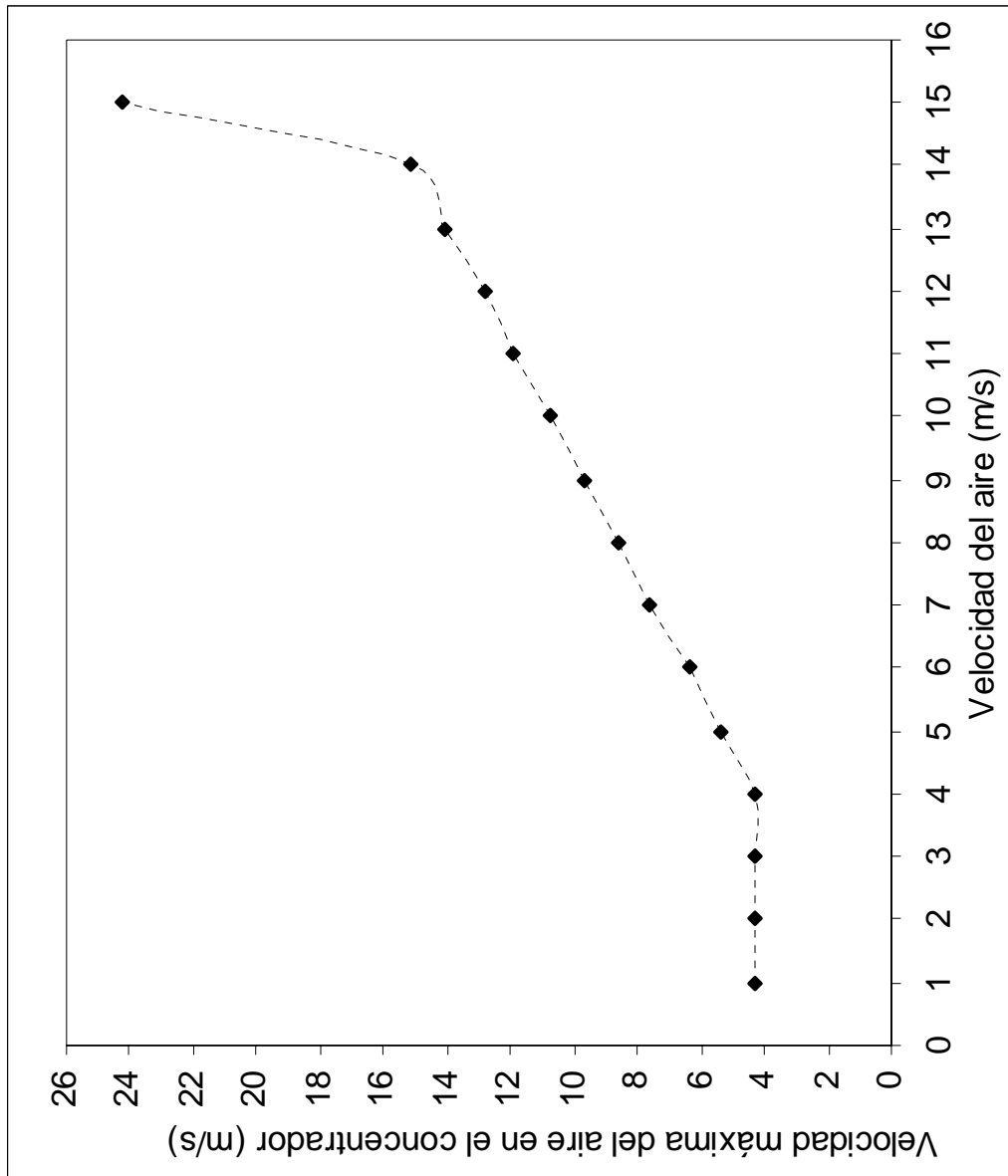


Figura 3.41. Simulación de la velocidad en el concentrador eólico (punto 3)

a100% HR.

3.2.7. Discusión

En el presente trabajo se ha sometido un prototipo de concentrador eólico a tres niveles de análisis; un estudio de diseño bidimensional, un estudio de campo y un estudio tridimensional del mismo proceso.

Tanto las curvas de simulación como experimentales de la velocidad entrada muestran la misma tendencia; cuando la densidad del aire húmedo supera un valor determinado, la velocidad del aire de entrada se reduce de 1 m/s hasta 3 m/s para una misma velocidad de salida.

Este efecto se traducirá en una relación de velocidad diferente que va desde valores de 2 a 6,5. Debemos tener en cuenta que, en condiciones de aire seco, esta relación de la velocidad muestra un valor constante de 3 y, por lo tanto, el cambio en la densidad del aire húmedo se convierte en un factor a considerar cuando se trata del diseño de un concentrador de viento función de la región climática donde va a ser utilizado.

Los resultados obtenidos han mostrado que, a pesar de existir un aumento superior al reflejado por estudios anteriores, éste no ha sido tan alto como se esperaba. Ello es debido a que la energía liberada de aire húmedo depende de su cambio de fase y que éste sólo puede alcanzarse cuando la humedad relativa es del 100% en esta sección.

El problema radica en que la humedad relativa del aire exterior al 98% es un valor demasiado alto para este túnel de viento, pero puede obtenerse en condiciones exteriores para zonas húmedas y durante ciertos períodos de tiempo. Para comprender este proceso, y una vez validadas las simulaciones CFD, se ha simulado la velocidad del aire exterior ante una humedad ambiente del 100%.

Debemos recordar que es el primer prototipo desarrollado y que problemas de índole técnico no permiten alcanzar el 100% de humedad relativa. Por ejemplo, la velocidad de condensación del aire húmedo es más alta que el aire húmedo generado bajo altos valores de humedad relativa. Todo ello también está relacionado con la temperatura del túnel donde se circula el aire húmedo. Esto se puede resolver sólo con una alta inversión en los humidificadores y agua destilada o con algunos cambios en el diseño inicial. Por ejemplo, un cambio de bucle abierto para un túnel de viento cerca de bucle se propone debido a que podría asegurar 100% de humedad relativa antes de ser empleados.

Además, EFD-lab. es uno de los pocos programas de CFD que simulan la condensación de aire húmedo. Este es otro punto que debe mejorar en el futuro.

Los resultados obtenidos han mostrado el comportamiento de los concentradores eólicos ante condiciones climáticas diversas. Además, ha surgido la idea del desarrollo de un concentrador bajo nuevo sistema de control por medio de la manipulación de la humedad al aire de entrada la turbina eólica y,

Modelización de un captador eólico de alta eficiencia

por lo tanto, en la conversión de energía. Por otra parte, se ha hecho evidente la necesidad de implementación de los controles de túneles de viento.

Finalmente, más estudios acerca de la implementación de aerogeneradores de baja velocidad se deben de realizar en un futuro próximo [21].

3.2.8. Referencias

- [1] D. J. Sailor, M. Smith, M. Hart. Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States. *Ren. Energy* 2008; pp. 2393-2406.
- [2] H. Erich. *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. 2nd Edition. Springer 2005, pp.1-783.
- [3] S. Shikha, T.S. Batí and D. P. Kpthari, A new vertical axis wind rotor using convergent nozzles. *Large Engineering Conference on Power Engineering*, 2003. pp. 177-181.
- [4] S. Shikha, T. S. Bhatti, D.P. Kothari. Air concentrating nozzles: a promising option for wind turbines. *Int. J. Ener. Tech. Pol.* Vol. 3, 2005, pp. 394-412.
- [5] A. Sabzevan. Performance characteristics of concentrator augmented Savonius wind rotors. *Wind Eng.* (1), 1977, pp. 198-206.
- [6] B. D. Altan, M. Atilgan, A.Özdamar, An experimental study on improvement of Savonius rotor performance with curtaining. *J. Exp. Therm Flu Sci*, 2008, pp. 1673-1678.
- [7] G. J. W. van Bussel, The science of making more torque from wind: Diffuse experiments and theory revisited. *J. Phys: Conference Series*. 2007. doi:10.1088/1742-6596/75/1/012010.
- [8] U. K. Saha, Rajkumar. On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades. *Ren. Energy* 2006; 31: 1776-1788.
- [9] U. K. Saha, S. Thola, D. Maity. Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. *J. Wind Eng. and Ind. Aero.* Vol. 96, 2008, pp.1359-1375.
- [10] M. A. Kamoji, S. B. Kedare, S. V. Prabhu, Performance test on helical Savonius rotors. *Renewable Energy*. 2008. doi:10.1016/j.renene.2008.06.002
- [11] K. Irabu, J. N. Roy Characteristics of wind power on Savonius rotor using a guide-box tunnel. *J. Exp Therm. Flu. Sci.* 2007. Vol. 32, pp. 580-586.
- [12] Siam. Environmental Information system of Galicia, 2008, <http://www.meteogalicia.es>.
- [13] ASHRAE Handbook Fundamentals. ASHRAE. Atlanta. 2005.
- [14] C. Mataix, Turbomáquinas térmicas turbinas de vapor, turbinas de gas, turbocompresores. Madrid: Dossat. 1999. pp.1-500.
- [15] FChart. EES Engineering Equation Solver software, 2007, <http://www.fchart.com/ees/goodies.shtml>

[16] J. A. Orosa, J. A. Pérez. Termodinámica Aplicada con EES. Santiago de Compostela (Spain): Tórculo. 2008. ISBN: 978-84-8408-477-8.

[17] A. R. Wittwer, S. V. Möller. Characteristics of the low-speed wind tunnel of the UNNE. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Vol. 85, 2000, pp. 307-320.

[18] J.A. Carta, D. Mentado. A continuous bivariate model for wind power density and wind turbine energy output estimations. Energ Convers Manage. 48 (2007) 420-432.

[19] R. Jacobson, E. Meadors, H. Link August. Power Performance Test Report for the AOC 15/50 wind turbine, Test B in Golden, Colorado. Conducted for United States Department of Energy by National Wind Technology Centre (National Renewable Energy Laboratory). 2003.

[20] D.J. Sailor, M. Smith, M. Hart. Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States. Renew Energ. 33 (2008) 2393-2406.

[21] J. A. Orosa, García-Bustelo EJ, Oliveira AC. Realistic solutions for wind power production with climate change. Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects. In press February 2010.

[22] U. K. Saha, S. Thola, D. Maity. Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. J. Wind. Eng. Ind. Aerod. 96 (2008)1359-1375.

3.3. Implementación de parques eólicos con concentradores

3.3.1. Introducción

Después de la energía hidroeléctrica, térmica y de biomasa, la producción basada en la energía eólica es actualmente una de las tecnologías más rentables para producir electricidad apoyándose en fuentes de energía renovables. Por lo tanto, en los últimos años se ha experimentado un crecimiento significativo de instalaciones de energía eólica en Alemania, España y Dinamarca. La introducción de turbinas de eólicas a gran escala, influirá en la producción de corriente eléctrica y en el futuro desarrollo de las centrales de producción de este tipo así como los sistemas de las líneas de transporte [1].

Uno de los problemas relacionados con la producción de electricidad es que la tensión y la frecuencia se debe mantener lo más estable posible, y por lo tanto, parámetros eléctricos como la auto-excitación, la variación de voltaje y mecánicos como las fluctuaciones de par de turbinas eólicas deben ser estudiados a fondo. Para entender el efecto de la variación del viento en la producción de electricidad, debe recordarse que los aerogeneradores tradicionales están equipados con generadores de inducción.

Los generadores de inducción son la principal opción, ya que son más económicos, resistentes y que también requieren de muy bajo mantenimiento. Desafortunadamente, se requiere la potencia reactiva de la red para operar, y dado que la potencia reactiva varía según a la potencia de salida, deben ajustarse compensaciones en la energía entregada [2].

La Auto-excitación no se produce durante el funcionamiento normal de operación conectado a red, y pueden aparecer durante la operación fuera de la red. Una desventaja de esta auto-excitación se relaciona con el aspecto de la seguridad. Debido al hecho de que el generador sigue generando tensión, se corre el riesgo de la seguridad del personal de inspección o reparación de la línea en ese momento.

Otra desventaja de esta auto-excitación es que la tensión de servicio del generador y su frecuencia están determinados por el equilibrio entre el sistema de potencia activa y reactiva. Por lo tanto, si el equipo conectado al generador es sensible durante el auto-excitación, los equipos pueden estar expuestos a una mayor/menor frecuencia de operación [2].

La compensación de energía reactiva, la transferencia estática en interruptores, el almacenamiento de energía, y la generación a velocidad variable se encuentran comúnmente en las modernas plantas de energía eólica, resultando ser las posibles soluciones a este problema.

En resumen, todas estas soluciones señalan hacia una turbina eólica de baja velocidad como los aerogeneradores de eje vertical (VAWTs), que ofrecen una gran serie de ventajas cuando la velocidad del viento es baja. Además, presenta

una construcción mucho más simple que podría responder más rápidamente a los cambios en la dirección del viento o de la velocidad. Por otra parte, sus componentes tienen un menor costo y son más resistentes en funcionamiento [3]. En particular, para escalas de potencia pequeñas; los rotores Savonius son muy útiles [4] y puede implementarse claramente con la adición de cortinas [5, 6 y 7], actuando como un concentrador permitiendo que el convertidor llegue a un aumento de coeficiente de potencia de 38,5%, relacionado con el área barrida por el rotor [3]. Su objetivo principal es lograr una reducción drástica del tamaño del rotor, mientras que es necesaria la construcción adicional de un pre-concentrador de viento que no encarece la energía obtenida.

En esta sección se pretende analizar el comportamiento de veinticuatro generadores de un parque eólico durante un año típico, bajo las diferentes condiciones climáticas. A partir de este estudio se pretenderá obtener un modelo matemático de parque eólico para evaluar la producción de energía y su distribución según las condiciones meteorológicas.

Por otra parte, se pretende diseñar, fabricar y modelar matemáticamente un concentrador eólico de baja velocidad, con el fin de predecir su producción de energía bajo las mismas condiciones climáticas que el resto de componentes del parque.

3.3.2. Metodología

3.3.2.1. Datos climáticos

Los datos climáticos fueron recogidos de las estaciones meteorológicas ubicadas en los principales puntos de interés del parque eólico [8]. Estas estaciones meteorológicas miden variables como la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire, entre otros, con una frecuencia de muestreo que van desde los cinco hasta los diez minutos.

Las estaciones han sido elegidas para este estudio por el hecho de encontrarse en zonas desabrigadas, alejadas de obstáculos que podrían interferir con los datos de la muestra, de acuerdo con [9]. La temperatura, humedad relativa y velocidad del viento asumen los siguientes márgenes de error: 0,1 ° C, 0,2% y 0,1 m/s, respectivamente.

3.3.2.2. Parque eólico de Sotavento

Sotavento quiere convertirse en un parque eólico tecnológico experimental, es decir, las diversas tecnologías en cuanto a turbinas de viento ensayadas en Galicia se han establecido allí. En particular, este parque tiene veinticuatro aerogeneradores operando con cinco tecnologías diferentes existentes en Galicia, con una potencia nominal total de 17,56 MW anuales y una producción de 38.500 MWh.

Todos los aerogeneradores tienen el rotor de eje horizontal y la producción de energía comienza a partir de los 3 m/s. Estas máquinas se desconectan de la red cuando los vientos alcanzan valores superiores a 25 m/s.

Los vientos predominantes son del Noroeste y todos los datos de la producción de energía se almacenan en el centro de Sotavento con una frecuencia de diez minutos.

3.3.2.3. Mecánica de fluidos diseño

El funcionamiento de la tobera para el sistema VAWT depende esencialmente de dos parámetros principales: la relación de área entre la entrada y la salida así como la longitud de la tobera. Tal y como se ha indicado anteriormente, para encontrar las dimensiones óptimas de la tobera [10 y 11] se han ensayado cinco modelos con tres toberas de longitudes diferentes. Analizados estos modelos, se optó por una relación de área de 0,25 y una longitud de 0,3 m. El rotor Savonius seleccionado, con 0,5 m de diámetro y 0,2 m de altura muestra un coeficiente de potencia (potencia en el eje de trabajo) de 0,3, correspondientes a dos palas, el cual se espera que ofrezca un óptimo rendimiento.

3.3.2.4. Curva de ajuste

Una vez realizadas las mediciones anuales de conversión de energía eólica, los datos obtenidos, se relacionaron con las condiciones climáticas durante el mismo año, utilizando el software estadístico SPSS. Además, el laboratorio de pruebas de turbinas permitió obtener el modelo concentrador de viento correspondiente y su modelo de producción de energía en las mismas condiciones climáticas.

3.3.3. Discusión de resultados

En este trabajo se evaluaron la temperatura, humedad relativa, la velocidad del viento y la conversión de la energía eólica. Los resultados han mostrado que las condiciones climáticas de esta región son moderadas. Existe un promedio alto de humedad relativa entorno al 80% durante todo el año, tal y como se ha mostrado anteriormente.

Por otra parte, en el propio parque eólico se han registrado las condiciones del viento, así como los parámetros reales de potencia de salida, tal y como se refleja en la figura 3.42.

De esta figura podemos llegar a la conclusión de que se producen períodos en los que, en virtud de la baja velocidad de viento, la producción de energía eólica se reduce y, en algunos casos, es nula.

Como era de esperar, esta reducción de potencia se produce principalmente durante el temporada de verano. Después de estudiar las condiciones climáticas y la conversión de energía eólica, se realizó el ajuste de la curva teniendo en cuenta múltiples variables en relación a la producción de energía con las

condiciones climáticas: relacionando la densidad de aire húmedo con la temperatura y la humedad del aire así como la velocidad del viento.

La correlación viene expresada por la ecuación 3.11, mostrando un coeficiente de correlación muy adecuado (0,99) para el modelo lineal definido como una función de la densidad del aire y el cubo de la velocidad del viento.

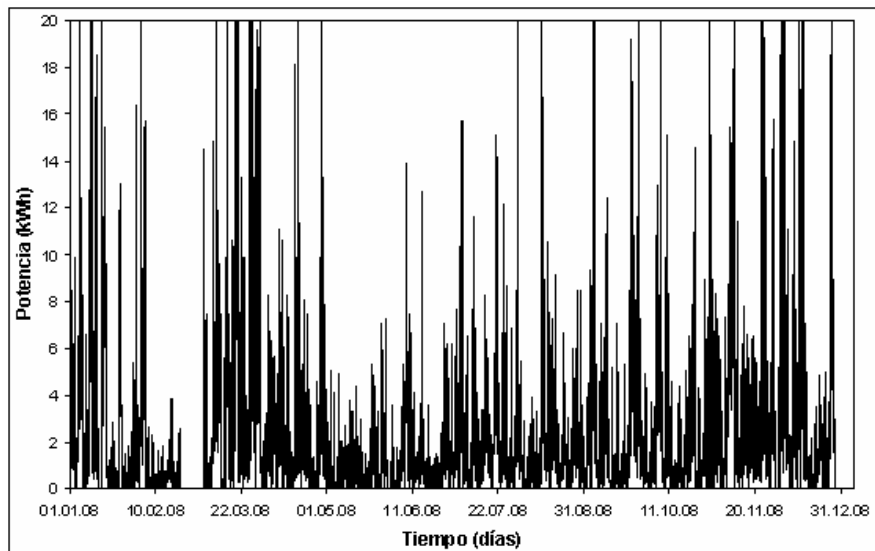


Figura 3.42. Típica producción de potencia en un parque eólico.

$$E_{HAWT} = -249492.18 + 217222.74 \cdot \rho + 1128.9655 \cdot v^3 \quad (3.11)$$

Donde;

E_{HAWT} Producción de potencia en la turbina tradicional (kWh)

ρ Densidad del aire húmedo (kg/m^3)

v Velocidad del aire (m/s)

Posteriormente, tal y como se ha indicado anteriormente, se ha diseñado y construido un concentrador de eólico que satisface la condición de una caída de presión constante, tal y como se refleja en la figura 3.43 y 3.44.



Figura 3.43. Fotografía del concentrador eólico.

En nuestro caso, para aplicar la VAWT con un típico Rotor Savonius, se utilizó una tobera convergente en lugar de uno de placas, tal y como se sugieren investigaciones anteriores [12, 13 y 14].

Esta tobera incrementará la velocidad del aire y evitará la existencia de un par motor negativo y favorece el llegar a una velocidad óptima entre la entrada y la salida del mismo.

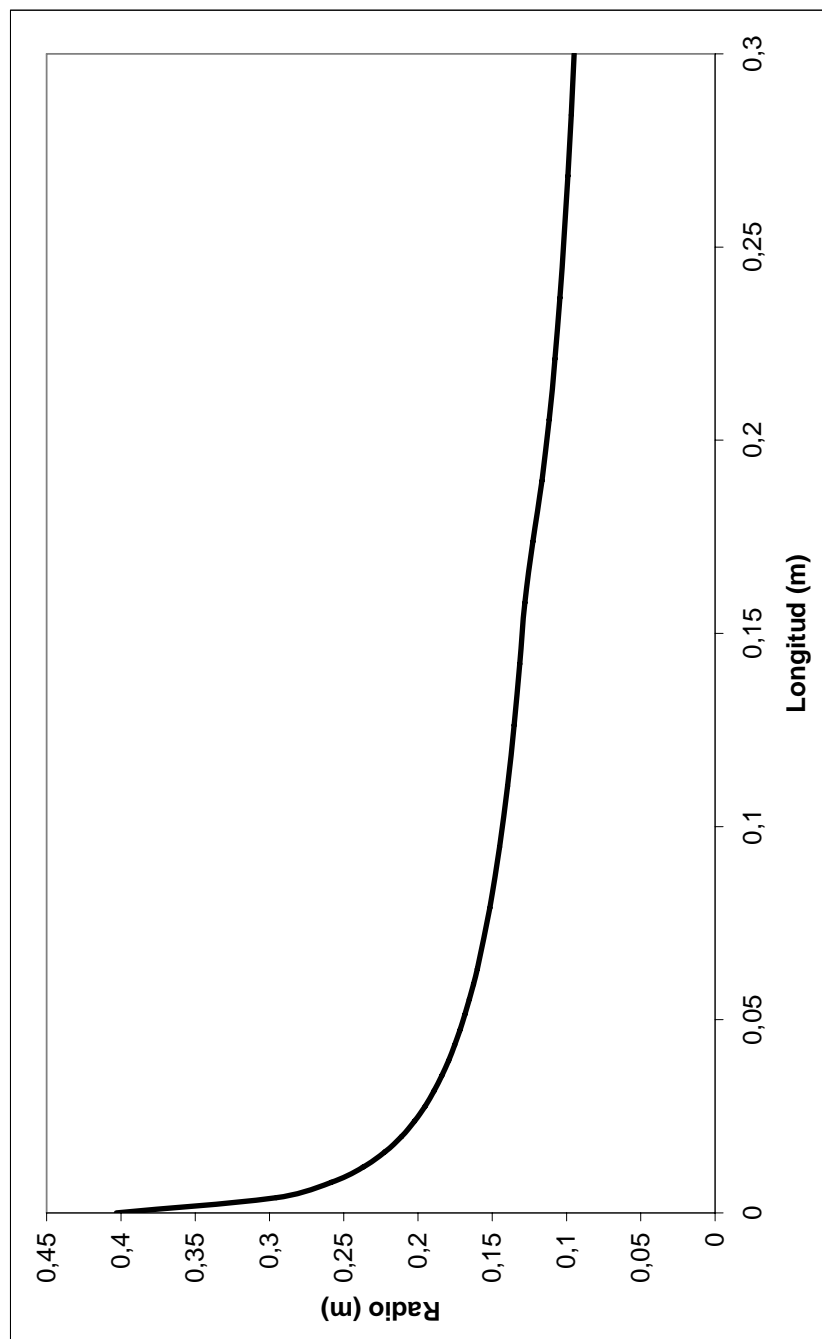


Figura 3.44. Dimensionado del concentrador eólico.

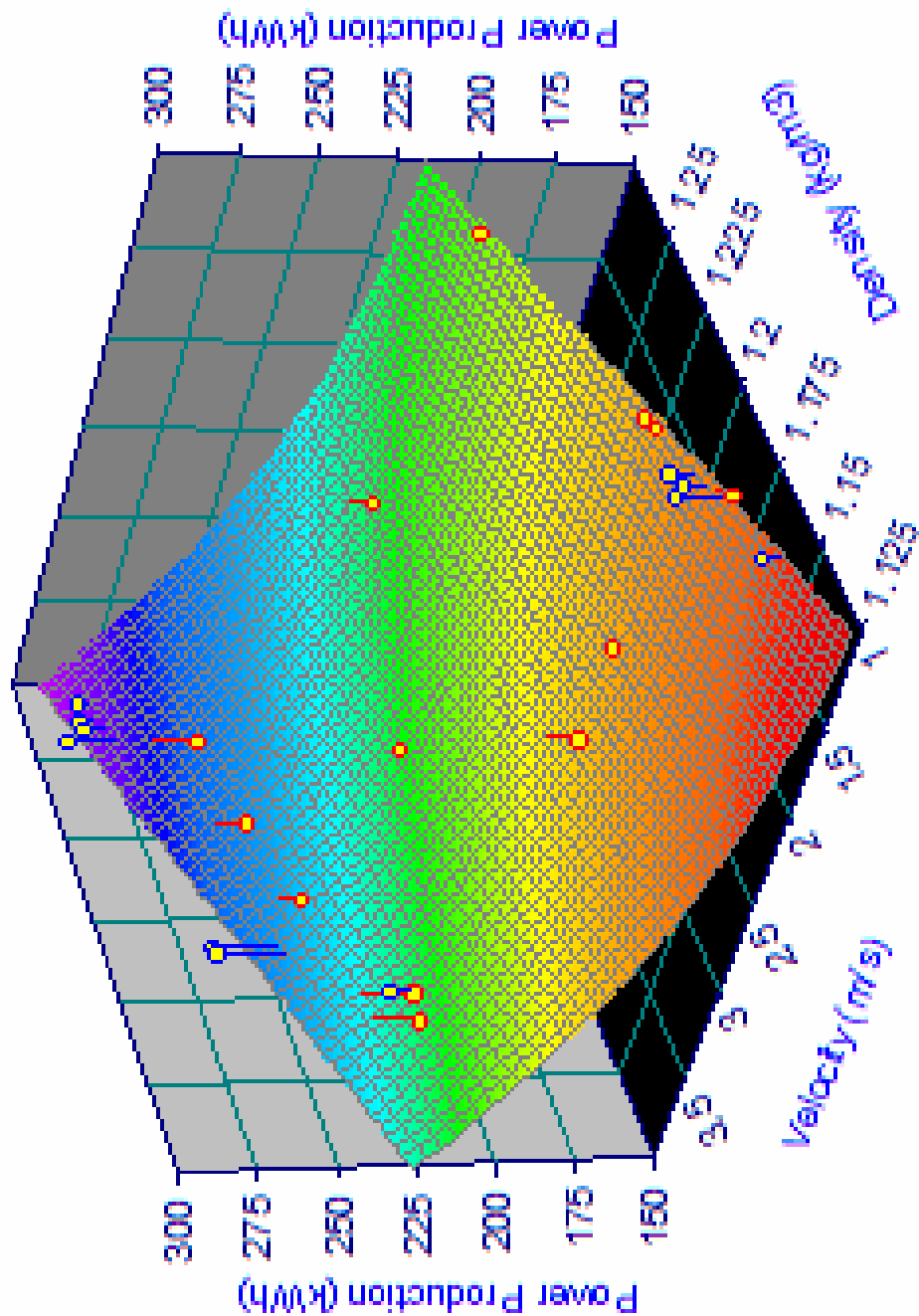


Figura 3.45. Modelo de concentrador eólico.

Una vez diseñado el prototipo, este fue probado en el túnel de viento bajo diferentes valores de densidad de aire húmedo y velocidad de viento. Después de la prueba, se llevo a cabo un ajuste de curvas en función de las mismas variables

que en el modelo anterior, es decir, densidad y velocidad. El resultado se ha reflejado en la ecuación 3.12 y la figura 3.45 bajo un factor de correlación superior a 0,9.

$$E_{VAWT} = -327.306 + 425.792 \cdot \rho + 1.174 \cdot v^3 \quad (3.12)$$

donde:

E_{VAWT} Producción de potencia con el nuevo dispositivo (kWh)

ρ Densidad del aire húmedo (kg/m^3)

v Velocidad del viento (m/s)

Como consecuencia, HAWT va a trabajar en nuestro parque eólico la mayor parte del tiempo bajo su potencia nominal, como se puede ver en la figura 3.46.

Para llevar a cabo este proceso de simulación se ha comparado la distribución de frecuencias de la conversión energética del parque eólico (con HAWT) y en la que se obtendría con el nuevo sistema concentrador-captador utilizando un rotor Savonius con dos rotores de dos palas y 2 m^2 de superficie. Además, el captador eólico está trabajando la mayor parte del tiempo en su valor más bajo en el mes de febrero y durante casi toda la temporada estival, por lo que se ha detenido su conversión energética. En este caso es interesante utilizar el VAWT con un concentrador para suministrar la energía complementaria durante esos períodos, como puede verse en la figura 3.46.

A partir de estos resultados podemos concluir que la capacidad de conversión energética de la turbina se reduce en comparación con los vientos existentes de forma habitual en la zona, debido a su baja eficiencia, mientras que su estabilidad es mayor. La mayor parte del tiempo opera al 40% de potencia nominal.

Por otra parte, si tenemos en cuenta que la HAWT no ha trabajado unas 1.600 horas y que la velocidad del viento ha sido nula para 1.000 horas, podemos concluir que el VAWT podría aportar una producción de energía durante unas 600 horas, lo que representa más de 4% del tiempo de producción bajo una velocidad media del aire de 7 m/s.

En conclusión, la presente sección ha demostrado el interés técnico del empleo de un VAWTs a pesar de que no puede producir tanta energía en un momento dado como un HAWT con la misma altura. En consecuencia, se propone la factibilidad técnica de la existencia de un futuro parque eólico que podría complementar la producción de energía HAWT con el uso de VAWTs con concentradores de viento.

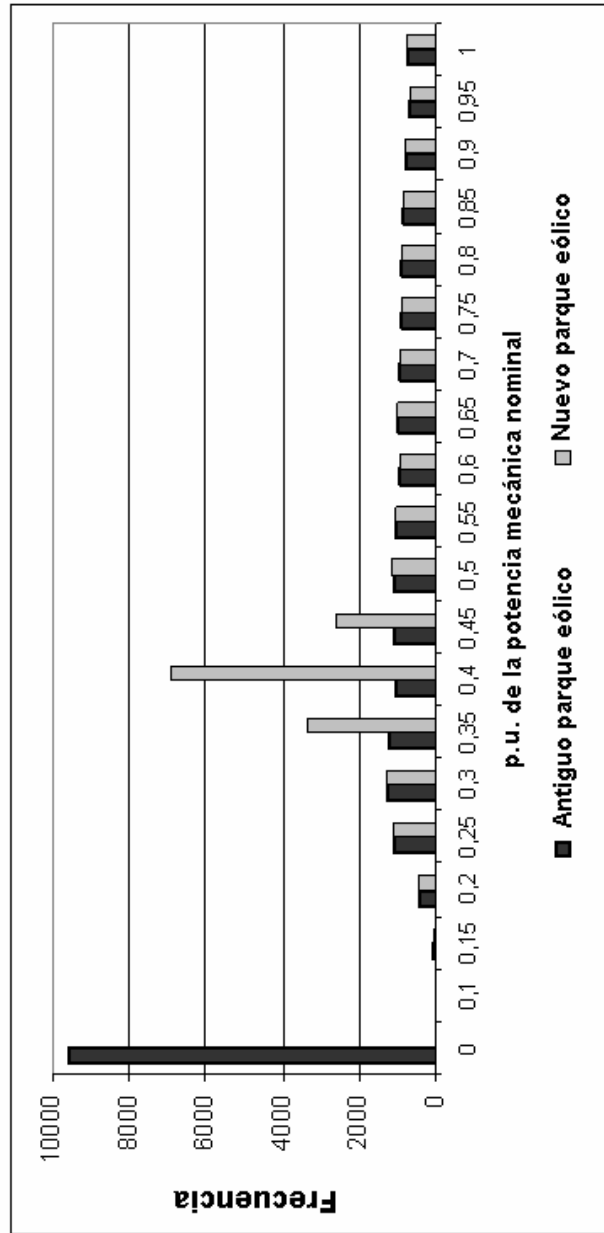


Figura 3.46. Potencia unitaria de parques eólicos antiguo y propuesto.

3.3.3.4. Referencias

- [1] P. Meibom, C. weber, R. Barth and H. Brand. Operational costs induced by fluctuating wind power production in Germany and Scandinavia. IET Renew. Power Gener. 2009, Vol.3, No.1, pp.75-83.
- [2] E. Muljadi, C.P. Butterfield, J. Chacon, H. Romanowitz. Power quality aspects in a wind power plant. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal Quebec Canada 2006.
- [3] E. Hau. Wind turbines. Fundamentals, Technologies, Application. 2nd Edition. Springer 2006, pp. 1-783.
- [4] Saha et. al. Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96.2008. 1359-1375.
- [5] M. A. Kamoji, S.B. Kedare, S. V. Prabhu. Performance test on helical Savonius rotors. Renewable Energy 2008. doi:10.1016/j.renene.2008.06.002.
- [6] K. Irabu, J. N. Roy. Characteristics of wind power on Savonius rotor using a guide-box tunnel. Exp Thermal and Fluid Sci, Vol. 32, 2007. 580-586.
- [7] B.D. Altan, M. Atilgan, A. Özdamar. An experimental study on improvement of Savonius rotor performance with curtaining. Exp. Thermal and Fluid Sci. Vol. 32, 2008, pp. 1673-1678.
- [8] MeteoGalicia. Galicia Climatic Data 2007. Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia. 2007, pp.1-124.
- [9] ASHRAE 1988 Handbook. HVAC Fundamentals. Atlanta.
- [10] S. Shikha, T. S. Bhatti, D. P. Kpithari. A new vertical axis wind rotor using convergent nozzles, 2003. Large Eng. Conference on Power Engineering 2003, pp.177-181.
- [11] S. Shikha, T.S. Bhatti, D. P. Kothari. Air concentrating nozzles: a promising option for wind turbines. Int. Jour. of Energy Technology and Policy 2005. Vol 3, pp. 394-412.
- [12] A. Sabzevan, "Performance characteristics of concentrator augmented Savonius wind rotors". Wind Engineering 1977, pp.198-206.
- [13] J. A.Orosa, E. J. Garcia-Bustelo, J. A. Perez. Wind turbine concentrator design based on moist air phase change. Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2009. POWERENG '09.pp.490-494.

[14]J. A. Orosa.,E. J. Garcia-Bustelo, J. A. Perez. Climate effects in low speed wind turbine's concentrators. Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2009. POWERENG '09. pp.174–179.

3.4. Efecto del cambio climático en parques eólicos

3.4.1. Introducción

Como resultado de sus condiciones climáticas, regiones atlánticas como Jylland en Dinamarca y Galicia, en España están liderando el desarrollo mundial de la energía eólica y la integración en la red.

En un futuro próximo, se espera que la energía eólica contribuya a reducir drásticamente los riesgos relacionados con los combustibles fósiles y nucleares. No sólo la energía eólica no implican ningún riesgo geopolítico, sino que también reduce la dependencia energética exterior y la necesidad de las importaciones de energía, junto con la eliminación de los costes de combustible, y por lo tanto no hay riesgo de fluctuaciones de carácter económico en la materia prima, tampoco limitación de recursos, emisiones de CO₂ o el efecto dañino de los residuos radiactivos [1].

Por otro lado, estudios recientes [2-5] han mostrado que el cambio climático podría alterar esta situación. Hay que tener en cuenta que el clima es el promedio entre las variables climatológicas durante un período de tiempo de casi treinta años y también varía debido al cambio en la órbita de la Tierra.

Aparte de este cambio natural del clima también hay que considerar el efecto invernadero debido a los gases liberados a causa de la actividad humana, que podrían aumentar en el futuro cercano.

El efecto de estos gases liberados puede producir un aumento de la temperatura global del planeta entre 1,4 y 5,8 °C y también se asocian con las condiciones climáticas extremas, tales como un aumento en el nivel del mar entre 9 y 88 cm.

Por último, este cambio climático puede influir en la Oscilación del Atlántico Norte (OAN) [1] y por lo tanto una fuerte influencia en el clima de Europa y parte de Asia, sobre todo en invierno [3].

Este patrón de oscilación consiste en variaciones opuestas de la presión barométrica cerca de Islandia y cerca de las Azores. Las áreas de baja presión de Islandia y de alta presión de las Azores han favorecido la formación de ciclones con la combinación de sus sistemas frontales hacia Europa. Sin embargo, la diferencia de presión entre Islandia y las Azores fluctúa entre las escalas de tiempo de días a décadas y, a veces, se puede revertir.

Una vez que han sido explicadas las razones más probables por las que el clima mundial podría cambiar y sus consecuencias, podemos estimar sus efectos en la conversión de energía en el futuro de aerogeneradores y corregir su diseño.

Para predecir el efecto del clima en la futura conversión de la energía eólica, debemos entender, en primer lugar, el hecho de que la energía mecánica que se extrae de la circulación de aire por un convertidor en forma de disco que

coincide con la diferencia de potencia de la corriente de aire antes y después del convertidor.

A fin de obtener un valor de referencia para esta conversión energética, se ha decidido comparar con la potencia de la corriente de aire libre, que fluye a través de la misma área de sección transversal (A) sin extraer de ella potencia mecánica, tal y como podemos ver en la ecuación 3.13.

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^3 \cdot A \quad (3.13)$$

Donde;

ρ Densidad del aire húmedo (kg/m^3)

v_1 Velocidad del viento (m/s)

A Área de la sección transversal (m^2)

De esta ecuación, Betz llegó a la conclusión de que la energía mecánica obtenida a partir de una corriente de aire que pasa a través de una determinada sección transversal se limita a una cierta proporción fija de la energía contenida en la corriente de aire.

Estas consideraciones fueron hechas para un flujo ideal, sin fricción, por lo tanto los resultados obtenidos no han considerado las particularidades del convertidor de energía eólica.

De esta ecuación podemos confirmar que la conversión de energía eólica en turbinas depende principalmente de la densidad del aire húmedo y la velocidad del viento. Si estos parámetros cambiarán en el futuro como consecuencia de la predicción del cambio climático, la conversión de la energía eólica también cambiará.

Por ejemplo, los parques eólicos se seleccionan hoy en día de acuerdo a la frecuencia y la dirección de los vientos [6], pero teniendo en cuenta la corriente de aire libre, podemos concluir que la densidad del aire puede afectar este proceso y también lo hará el cambio climático.

Como consecuencia de lo mencionado anteriormente, el efecto del cambio climático puede implicar un comportamiento incorrecto de la turbina eólica una vez que se ha escogido de forma errónea sin tener en cuenta las futuras condiciones de trabajo.

Estos efectos son muy significativos si tenemos en cuenta el hecho de que, para el año 2030, se espera una contribución de la energía eólica para el consumo europeo de electricidad de alrededor de 22,6% (965 TWh) [7] y el tamaño medio de una turbina de eólica será de 2 MW terrestre y marina de 10 MW. Entonces sólo serían necesarias 90.000 turbinas en tierra (75.000 y en el mar 15.000) para cumplir con el objetivo de GW 300 [1].

Por otra parte, si consideramos que la vida media de una turbina eólica es de veinte años en tierra y veinticinco años en alta mar [1], podemos concluir que es el momento adecuado para considerar el desarrollo de generadores eólicos bajo nuevos parámetros como la menor densidad del aire húmedo y la baja velocidad de las turbinas de viento, tal y como se espera para un futuro próximo.

A partir de los informes de campo anteriores [8], y teniendo en cuenta los resultados del estudio anterior de esta misma tesis, se ha analizado el comportamiento de veinticuatro aerogeneradores en un año típico para conseguir un modelo que relacione el clima con la conversión de energía.

Una vez que se ha logrado el modelo, se procederá a una estimación del efecto del cambio climático sobre las turbinas eólicas en la región climática de Galicia.

3.4.2. Materiales y métodos

En la presente sección, se ha analizado un parque eólico con veinticuatro turbinas durante un año típico bajo diferentes condiciones climáticas. Una vez logrado un modelo matemático que defina el comportamiento del mismo se ha procedido a evaluar los efectos del cambio climático sobre la producción de potencia.

3.4.2.1. Datos Climáticos

Los datos climáticos, como en los apartados anteriores, han sido obtenidos a partir de las estaciones meteorológicas ubicadas en los principales puntos de interés en Galicia, una típica región de la Costa atlántica europea, afectada por los vientos del Atlántico [9].

Estas estaciones meteorológicas han adquirido variables tales como temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, entre otras, con una frecuencia de muestreo de entre cinco y diez minutos.

Estas estaciones meteorológicas han sido elegidas para este estudio debido al hecho de que no se encuentran bajo la influencia de los edificios y otros parámetros que podrían interferir en el proceso de muestreo [10]. El margen de error de sus mediciones de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento ha sido de 0,1 °C, 0,2% y 0,1 m/s, respectivamente.

3.4.2.2. Parque eólico de Sotavento turbinas del parque

En los últimos años, la Xunta de Galicia ha promovido la implantación de energías renovables y, especialmente, la energía eólica, dentro de su Plan de desarrollo Eólico de Galicia. Dentro de este marco, la Consejería de Innovación, Industria y Comercio ha patrocinado la idea de crear un parque eólico rentable, con dos objetivos originales; uno formativos y otro informativo.

Sotavento Galicia, Plc, fue fundado en 1997 como resultado de este proyecto. Se compone de tres empresas públicas que conforman el 51% de su capital

compartido, el Instituto Energético de Galicia-INEGA, Sodiga Galicia SRC Plc., Instituto para la diversificación y el ahorro energético (IDAE), y cuatro empresas privadas representan el sector eléctrico de Galicia (Endesa Cogeneración y Renovables, Enel Unión Fenosa Energías-Especiales, Iberdrola Energías Renovables y de Energía de Galicia Engasa Plc.).

Sotavento quiere lograr los siguientes objetivos, junto con la explotación comercial de acuerdo a la idea original:

- Ser el "escaparate" de las diferentes tecnologías eólicas ya en Galicia
- Ser un marco para la realización de actividades de I + D
- Convertirse en un entrenamiento y un centro de debate
- Ser un modelo de centro para la difusión de las energías renovables.
- Ser un parque eólico de exhibición

Sotavento quiere convertirse en un parque eólico "escaparate", por lo que las diferentes tecnologías de aerogeneradores establecidos en Galicia se encontrarán dentro del mismo.

En particular, este parque eólico formado por veinticuatro generadores de entre las cinco tecnologías distintas que existen en Galicia con una potencia nominal total de 17,56 MW y una producción anual de 38.500 MWh. Todas las turbinas eólicas presentan un rotor de eje horizontal y la conversión de la energía eólica se iniciará a las 3 m/s. Además, se desconecta de la red eléctrica cuando los vientos alcanzan valores superiores a 25 m/s, con vientos predominantes del sudoeste y el noroeste. Todos los datos de producción de energía se almacenan en el centro Sotavento con una frecuencia de tiempo de diez minutos.

3.4.2.3. Predicciones sobre el cambio climáticos

Los modelos de cambio climáticos se han obtenido a partir de referencia [2] después de un ajuste de la curva para cada estación, de acuerdo con las ecuaciones 3.14 a 3.17. Cada ecuación muestra el aumento de la temperatura media en Galicia durante los últimos treinta años con respecto al valor promedio de 13,63°C en 1987.

$$\Delta T_{winter} = 0.05 \cdot t \tag{3.14}$$

$$\Delta T_{spring} = 0.07 \cdot t \tag{3.15}$$

$$\Delta T_{Summer} = 0.05 \cdot t \quad (3.16)$$

$$\Delta T_{Autumn} = 0.03 \cdot t \quad (3.17)$$

Donde;

ΔT es el incremento promedio de temperatura por estación (°C)

t es el tiempo (años)

Otros trabajos de investigación [2] han mostrado una relación entre el cambio climático y una ligera reducción en las frecuencias de los vientos del norte de Galicia en verano.

Una vez que se han obtenido estos modelos, pueden utilizarse para predecir el efecto del cambio climático en Galicia para los próximos veinte años.

Se ha escogido el año 2030 debido a la expectativa del alto nivel de contribución de la energía eólica producida por los aerogeneradores a la red eléctrica europea, y también porque las turbinas eólicas tienen una duración media de vida de veinte años.

3.4.3. Discusión

A partir de las mediciones tomadas en las turbinas del parque eólico, así como la energía eólica real, en la sección anterior, se han relacionado los parámetros de temperatura, la humedad relativa, la velocidad del viento y conversión de la energía. A partir de esta relación se ha obtenido el modelo matemático reflejado en la ecuación 3.11.

Es interesante resaltar que el modelo obtenido presenta unas constantes que tienen en cuenta los factores como el ambiente y las características de la turbina eólica. Una vez definido el modelo, éste se podría emplear para predecir los cambios de conversión de energía respecto a las condiciones climáticas. Para ello, es necesario analizar la temperatura y la velocidad del viento promediada de los últimos diez años, tal y como se representan en las figuras 3.47 y 3.48. Por otra parte, la potencia obtenida en los últimos años se refleja en la figura 3.49.

Ahora ya es posible definir la conversión de potencia de acuerdo con el modelo definido, tal y como se muestra en la figura 3.50 y 3.51 para cada estación.

Como se ha comentado anteriormente, la temperatura media en verano muestra su valor más alto de 16°C, mientras que en invierno es de 7°C. Las estaciones en otoño y primavera presentan valores intermedios de 13 y 11°C, respectivamente.

Por otro lado, la velocidad promedio del viento en el parque muestra en los meses de verano una velocidad media de 3,5 m/s que es el valor más bajo en comparación con 5,5 m/s en las otras estaciones del año. Esta velocidad media es una consecuencia del efecto producido por el anticiclón de las Azores, tal como se ha explicado anteriormente.

En la figura 3.49 se puede observar un valor medio de potencia generada similar a la nominal obtenida durante la primavera y el otoño. Esta producción se eleva a un valor de 20 MWh durante el invierno. Por último, durante el verano esta producción de energía eólica experimenta un claro descenso con respecto a las otras estaciones del año con un valor medio de 10 MWh.

A partir de estas curvas podemos deducir que, a pesar del hecho de que la velocidad media del viento es casi la misma en primavera como en otoño, es la temperatura media el factor que controla la conversión de la energía eólica.

Este efecto estará presente cuando tratamos de predecir el efecto climático sobre el parque eólico. Es decir, el efecto del aumento de la temperatura ambiente sobre la conversión de la energía eólica.

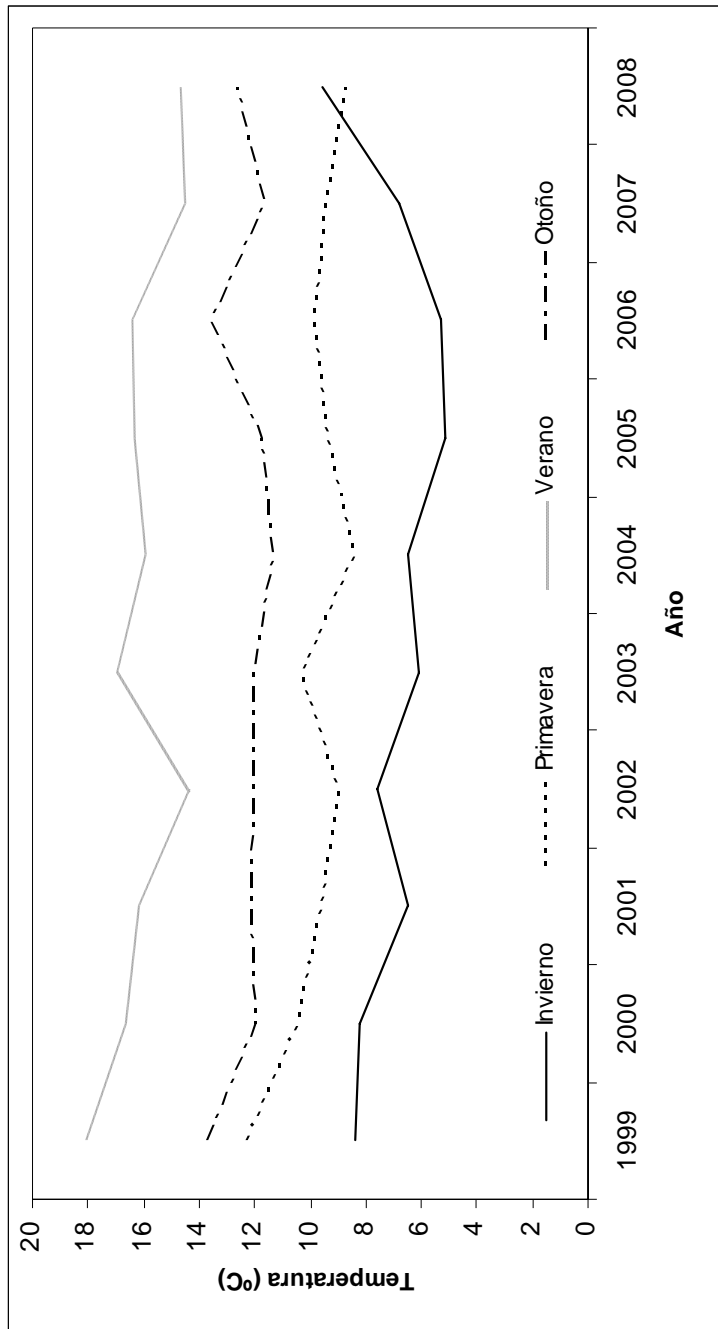


Figura 3.47. Temperatura estacional promedio de los últimos 10 años.

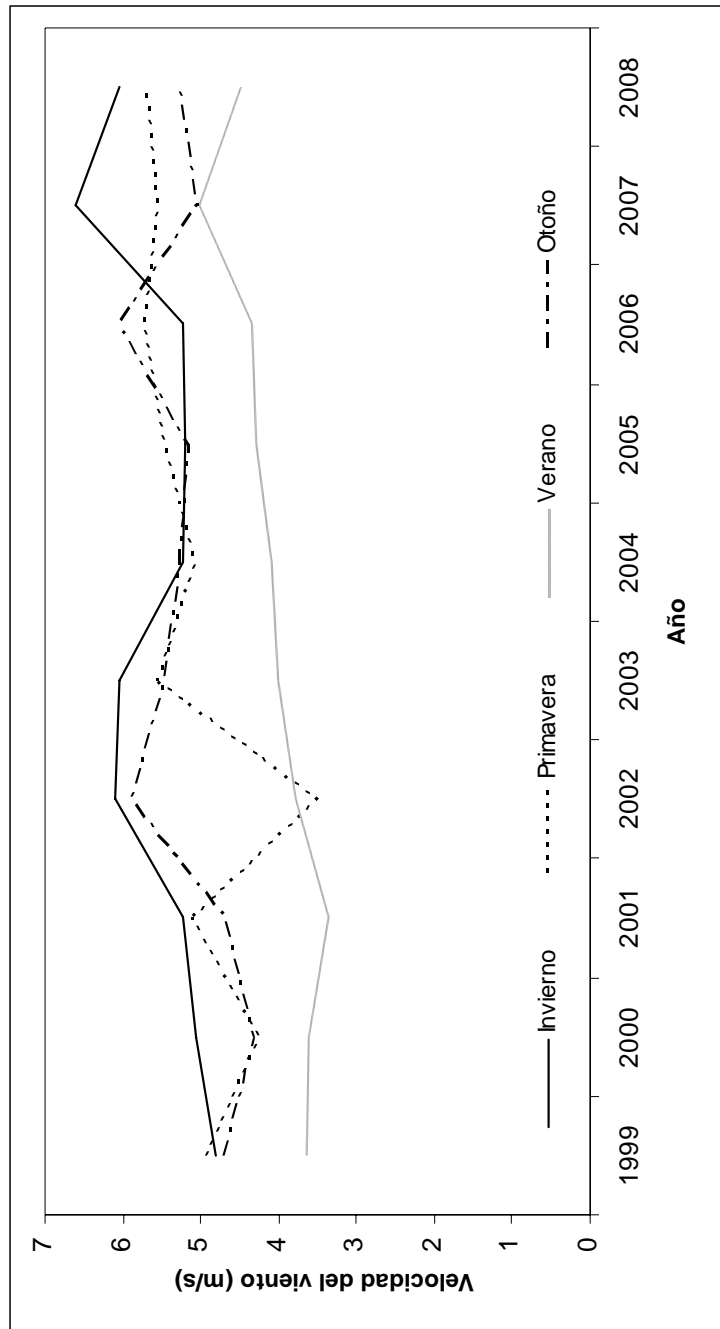


Figura 3.48. Velocidad del viento estacional promedio de los últimos 10 años.

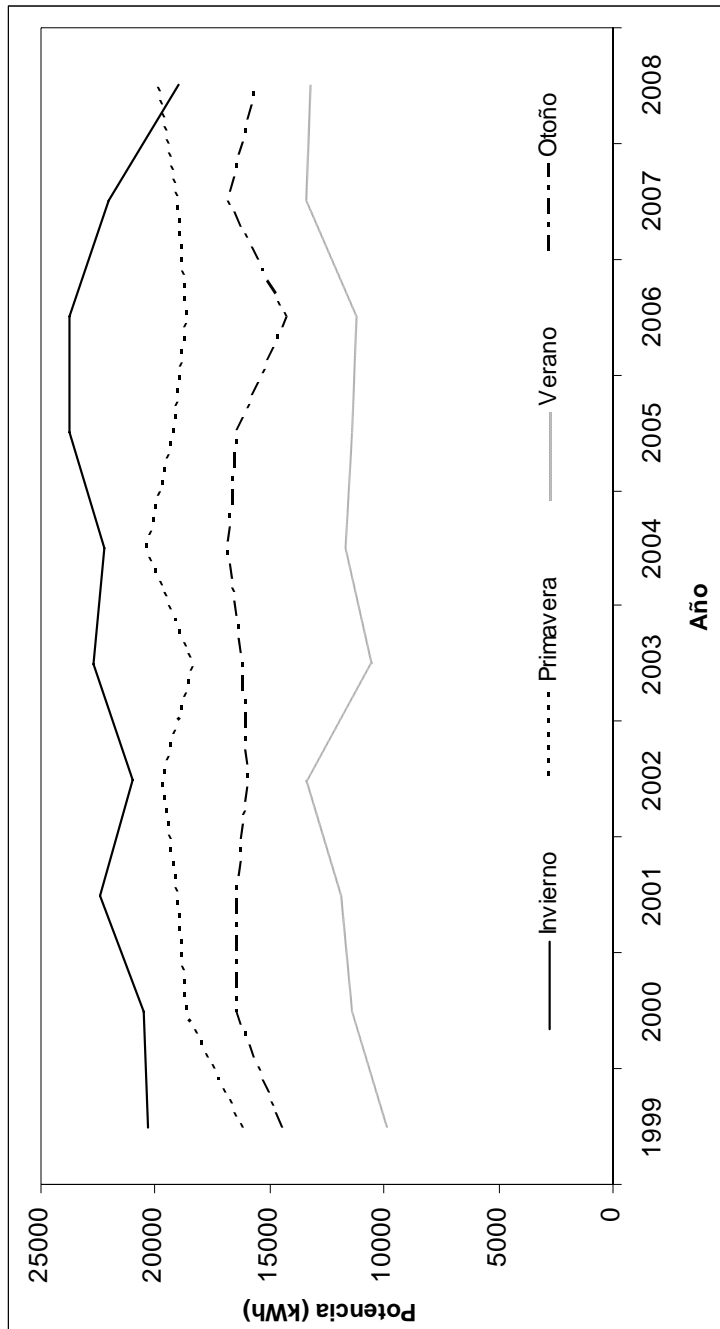


Figura 3.49. Producción de potencia de los últimos 10 años.

De esta manera, se ha realizado la simulación del efecto del cambio climático sobre la temperatura ambiente, tal y como se refleja en la figura 3.50. De esta manera, las referencias bibliográficas han mostrado cuatro ajustes lineales del aumento de la temperatura promedio durante los últimos años.

De esta figura, es interesante señalar que en invierno y en temporada de verano se muestra la misma evolución anual de incremento de temperatura, aunque el mayor incremento se produce en la primavera. Este aumento de las temperaturas supondrá un valor para el año 2030 de 3, 2,1 y 1,3°C en las temporadas de primavera, invierno y otoño, respectivamente.

Estos valores de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento se han introducido en el modelo de producción de potencia del parque eólico mostrando que la reducción más elevada será del 9% en el año 2030 durante la primavera. Durante el verano será aproximadamente el 7%, tal y como se muestra en figura 3.51. En invierno y otoño la reducción de potencia será de aproximadamente el 6% con respecto a la energía eólica actual.

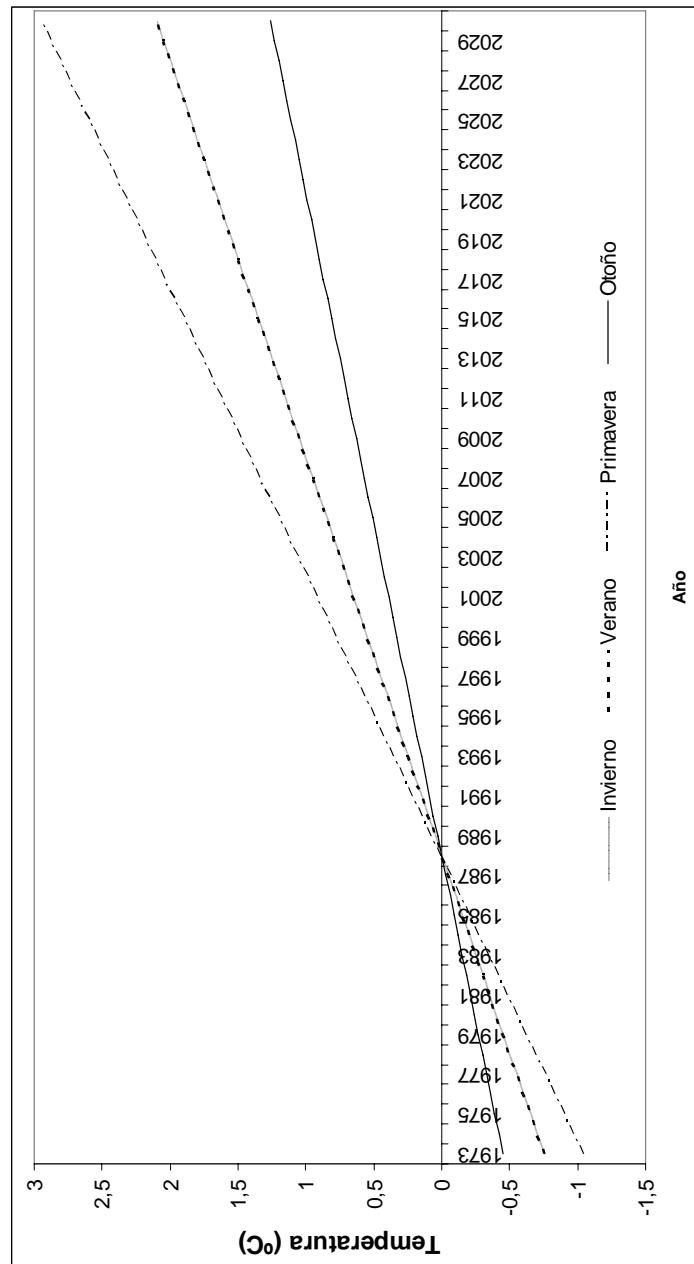


Figura 3.50. Evolución de la $t^{\text{ª}}$ media ambiente en Galicia durante los últimos años.

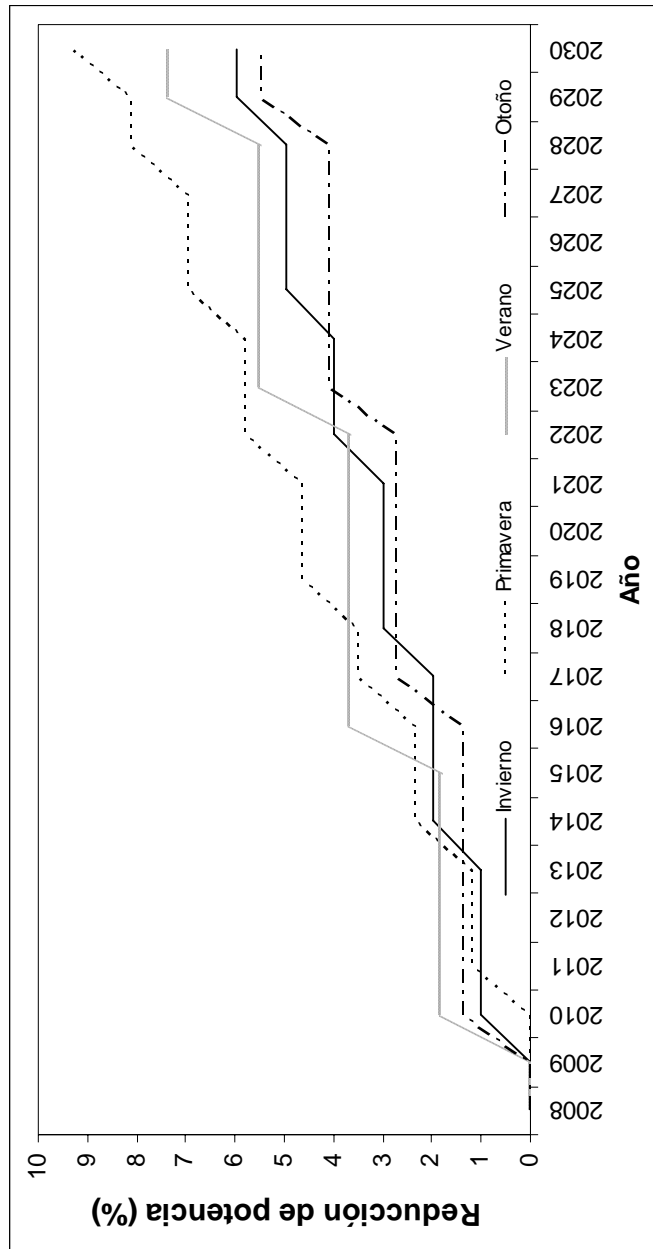


Figura 3.51. Estimación de la reducción de la producción de potencia en los próximos años.

Si tenemos en cuenta que la vida útil técnica de una turbina es de veinte años en tierra y veinte y cinco años en alta mar [1], ahora mismo es el momento más

adecuado para considerar nuevas vías de desarrollo que podrían implicar grandes incrementos del rendimiento de la tecnología de transformación de energía eólica.

Buena prueba de esto puede ser el sector de la energía eólica de baja potencia y la diversidad de tipos de turbinas y materiales a utilizar [11-15].

En particular, de la presente sección se puede concluir el efecto futuro de una menor densidad del aire húmedo y una mayor frecuencia de las velocidades extremas, y la falibilidad técnica de las turbinas eólicas de baja velocidad con diferentes rotores como posible solución ante dicho problemática [16-19].

3.4.4. Referencias

[1] E. Wesker. Climate Change; a summary of some present knowledge and theories. http://www.euronet.nl/users/e_wesker/climate.html

[2] L. Naranjo, E. Vicente. A variabilidade natural do clima en Galicia. Meteogalicia. Xunta de Galicia e fundación Caixa Galicia. Ed. Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible. 2006. pp. 1- 292.

[3] Climate Change 2001: Working Group I. The Scientific Basis. http://www.grida.no/publications/other/ipcc%5Ftar/?src=/CLIMATE/IPCC_TAR/WG1/042.htm

[4] J. J. McCarthy, O.F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken and K. S. Editors IPCC Technical Summary. A Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 2001, pp.1-1000.

[5] D. J. Sailor, M. Smith, M. Hart. Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States. *Ren. Energy* 2008; pp. 2393-2406.

[6] J. A. Carta, D. Mentado. A continuous bivariate model for wind power density and wind turbine energy output estimations. *Ener. Conv.* 2007, pp. 4420-432.

[7] European Wind Energy Technology Platform. Wind Energy: A Vision for Europe in 2030. September 2006. pp. 1- 24.

http://www.windplatform.eu/fileadmin/ewetp_docs/Structure/061003Vision_final.pdf

[8] R. Jacobson, E. Meadors, H. Link. Power Performance Test Report for the AOC 15/50 wind turbine, Test B in Golden, Colorado. United States Department of Energy by National Wind Technology Centre. National Renewable Energy Laboratory. 2003, pp. 1-150.

[9] Meteogalicia. Galicia Climatic Data 2007. Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia. 2007, pp.1-124.

[10] ASHRAE 1988 Handbook. HVAC Fundamentals Editorial Index. Atlanta.

[11] J. A. Orosa, J. A. Pérez. *Termodinámica Aplicada con EES*. Santiago de Compostela (Spain): Tórculo. 2008. ISBN: 978-84-8408-477-8.

[12] S. Shikha, T. S. Bhattí, D. P. Kpithari. A new vertical axis wind rotor using convergent nozzles, 2003. *Large Eng. Conference on Power Engineering* 2003, pp.177-181.

- [13] S. Shikha, T. S. Bhatti, D. P. Kothari. **Air concentrating nozzles: a promising option for wind turbines. Int. Jour. of Energy Technology and Policy 2005. Vol 3, pp. 394-412.**
- [14] S. Shikha, T. S. Bhatti, D. P. Kothari. **The evolution of wind Power Technology-a review. IE(I) Journal-ID. Vol. 84. pp. 4-9.**
- [15] B. D. Altan, M. Atilgan, A.Özdamar, **An experimental study on improvement of Savonius rotor performance with curtaining. J. Exp. Therm Flu Sci, 2008, pp. 1673-1678.**
- [16] A. Sabzevan, **Performance characteristics of concentrator augmented Savonius wind rotors. Wind Engineering 1977, pp. 1:198-206.**
- [17] A. R. Wittwer, S. V Möller. **Characteristics of the low-speed wind tunnel of the UNNE. J. Wind Eng. and Ind. Aero. Vol. 85. 2000, pp. 307-320.**
- [18] U. K. Saha, S. Thola, D. Maity. **Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. J. Wind Eng. and Ind. Aero., Vol. 96, 2008, pp.1359-1375.**
- [19] U. K. Saha, Rajkumar. **On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades. Ren. Energy 2006; 31: 1776-1788.**

Capítulo 4

Capítulo 4: Conclusiones

4.1. Túnel de viento

En el presente trabajo, se ha desarrollado un prototipo de túnel de viento de aire húmedo para constatar el comportamiento real del cambio de fase húmeda del aire ambiente por medio de un concentrador de eólico sometido a bajas velocidades de viento. Los resultados experimentales muestran que esta conversión de la energía no es la máxima que puede obtenerse a partir de este convertidor de energía. Ello es debido a que no se alcanza la condensación del aire húmedo.

Por todo esto es necesaria una mejora en el proceso de humidificación de aire en el propio túnel de viento y el desarrollo y empleo de recursos de software para este fluido. Por ejemplo, en la actualidad los recursos de software CFD sólo pueden simular un 5% de la condensación de humedad.

4.2. Concentrador eólico

Las experiencias recientes han demostrado de manera concluyente que los aerogeneradores de eje vertical son sensiblemente más eficientes que los HAWT. Un diseño adecuado para mejorar la eficiencia necesita aprovechar el proceso de condensación del aire húmedo. Pese a que el proceso de saturación del aire húmedo no está bien definido por el software de simulación CFD

Los recursos de software no suelen tener en cuenta el intercambio de calor entre el vapor de agua y el aire seco. Esta transmisión de calor hacia el aire seco implica un aumento de la entalpía y, por lo tanto, de la velocidad de aire seco.

En el presente trabajo se ha construido una tobera en base a estas variaciones y se han realizado las pruebas para mejorar los sistemas de conversión tipo VAWT.

Otra de las conclusiones extraída de esta prueba es que, aunque los experimentos se llevaron a cabo utilizando una sola tobera, es posible construir más toberas para cubrir todo el campo direccional del viento.

4.3. Parque eólico

En el presente trabajo se ha realizado el seguimiento durante un año de la conversión de energía en un parque eólico real y se ha obtenido un modelo matemático que relaciona las condiciones climáticas con la conversión de energía. Como consecuencia, la conversión de energía eólica muestra un valor promedio máximo durante la temporada de invierno y un mínimo durante el verano, como consecuencia de la velocidad media del viento.

Por todo ello se ha diseñado y modelado matemáticamente el comportamiento de un VAWT con concentrador eólico como una posible solución para resolver este problema en el marco de las mismas condiciones climáticas.

Los resultados han mostrado que, a baja velocidad del viento, este tipo de turbinas trabajan 600 horas más que HAWT, lo que representa más del 4% del tiempo de producción, y que el concentrador opera en una velocidad media de 7 m/s. Por lo tanto, podemos concluir que sería adecuado un parque eólico que complementara la producción de energía mediante HAWT con el uso de VAWT que operen con concentradores de viento.

4.4. Cambio climático

En este trabajo, se han tomado muestras durante un año en un parque eólico real junto con las condiciones climáticas existentes en ese mismo momento. Como consecuencia de estos valores, la conversión de energía eólica muestra un valor máximo promedio durante la temporada de invierno y un mínimo durante el verano como consecuencia de la velocidad media del viento.

Además, se ha obtenido un modelo 3D y probado bajo condiciones de temperatura estimadas para los próximos años bajo la perspectiva de un cambio climático. Los resultados predicen que la reducción de potencia más alto llegará a un valor de 9% en 2030 en la temporada de primavera y que va a ser alrededor del 7% en el verano. En invierno y otoño, la reducción de la energía eólica será de alrededor del 6% la potencia eólica actual.

De manera complementaria, hay que recordar que la energía eólica puede aportar una contribución sustancial a los objetivos comunitarios de reducción de emisiones bajo el Protocolo de Kyoto. Por lo tanto, si tenemos en cuenta que ninguno de los aerogeneradores actuales han sido diseñados considerando las condiciones climáticas del año 2030, y debido al hecho de que la vida útil técnica de una turbina es de veinte años en tierra y veinticinco años en alta mar, es el momento adecuado para considerar nuevas vías de desarrollo de turbinas de baja velocidad del viento que podrían generar rendimientos mayores.

5. Figuras, tablas y simbología

Figuras y tablas	
Figura 0.1. Coeficiente de potencia en las diferentes máquinas eólicas.	10
Tabla 1.1. Evolución de la explotación de energía eólica a nivel mundial (I).	18
Tabla 1.2. Evolución de la explotación de energía eólica a nivel mundial (II).	19
Tabla 1.3. Plan eólico en España 2010.	22
Figura 1.1. Mapa de zonificación marina: Aptas; Aptas con condicionantes; De exclusión.	23
Figura 1.2. Futura implantación de parques marinos de acuerdo al estudio de viabilidad.	24
Figura 1.3. Estación meteorológica de Corrubedo (2005-2009).	25
Figura 1.4. Estación meteorológica de Punta Candeleira.	26
Figura 2.1. Fresado de las secciones de paso del molde.	39
Figura 2.2. Disposición de discos y separadores para la obtención del molde concentrador.	40
Figura 2.3. Proceso de mecanizado en el torno paralelo	40
Figura 2.4. Emplastecido de la superficie del molde.	41
Figura 2.5. Aspecto final del molde una vez lijado.	41
Figura 2.6. Aplicación de gel-coat sobre la superficie del molde	42
Figura 2.7. Concentrador finalizado para la realización de ensayos.	43
Figura 2.8. Disposición de discos y separadores para el mecanizado del difusor.	44
Figura 2.9. Marcado de los diámetros de referencia en el torno paralelo.	44
Figura 2.10. Molde del difusor terminado y encerado.	45
Figura 2.11. Pantalla editor de ecuaciones software EES.	51
Figura 2.12. Pantalla tabla de variables software EES.	52
Figura 2.13. Pantalla para generación de gráficas representativas de variables.	53
Figura 2.14. Pantalla principal SolidWorks generando la geometría del concentrador.	55
Figura 2.15. EFD.Lab v8 Modelo concentrador – difusor ensamblados.	56
Figura 2.16. Disposición de rejilla en la sección mínima para favorecer condensación.	57
Figura 2.17. Presentación de resultados con isolíneas de velocidad.	58
Figura 2.19. Efecto Foehn.	68
Figura 2.20. Transición de una propiedad en una superficie de control.	76
Tabla 2.1. Condiciones iniciales del diseño.	82
Figura 2.21. Disposición de un conducto convergente – divergente.	83
Figura 3.1. Humedad relativa del aire exterior.	89
Figura 3.2. Temperatura del aire exterior.	90
Figura 3.3. La velocidad del aire exterior.	90
Figura 3.4. Entalpía del aire exterior.	91
Figura 3.5. Relación entre la humedad relativa, entalpía y la densidad del aire húmedo.	92
Figura 3.6. Temperatura, humedad relativa y la entalpía del aire exterior.	95
Figura 3.7. La densidad, velocidad y energía cinética del aire al aire libre.	96
Figura 3.9. Diagrama del montaje experimental.	101
Figura 3.10. Humidificador adiabático con boquillas atomizadoras.	102
Figura 3.11. Ventilador y sistema de control de velocidad.	103
Figura 3.12. Enderezadores de flujo de aire (Panal).	103
Figura 3.13. Manómetro de columna inclinada (0 – 50 Pa).	104
Figura 3.14. Generador eléctrico dispuesto en el eje de acoplamiento con el rotor.	104
Figura 3.15. Diseño de un concentrador eólico.	111
Figura 3.16. Fabricación del concentrador eólico.	116
Figura 3.17. Temperatura del aire exterior.	118
Figura 3.18. Humedad relativa ambiente.	119
Figura 3.19. Velocidad promedio del viento.	120
Figura 3.20. Superficie de tobera.	122
Figura 3.21. Simulación de la humedad relativa con CFD y EES.	123
Figura 3.22. Simulación de la velocidad del aire húmedo con CFD y EES.	124
Figura 3.23. Simulación de la densidad del aire húmedo en la tobera..	128
Figura 3.24. Simulación de la velocidad del aire húmedo en la tobera.	129
Figura 3.25. Simulación de la temperatura del aire húmedo en la tobera.	130
Figura 3.26. Simulación de la humedad relativa del aire húmedo en la tobera.	131
Figura 3.27. Simulación de la presión del aire húmedo en la tobera.	132
Figura 3.28. Muestreo de la relación de velocidades a diferentes temperaturas.	133
Figura 3.29. Simulación de la velocidad del aire húmedo.	134

Figura 3.30. Simulación de la densidad del aire húmedo.	135
Figura 3.31. Simulación de la velocidad del aire de alta densidad en la tobera.	136
Figura 3.32. Simulación de la velocidad del aire de baja densidad en la tobera.	137
Figura 3.33. Temperatura muestreada en el concentrado eólico (°C).	139
Figura 3.34. Humedad relativa muestreada en el concentrado eólico (%).	140
Figura 3.35. Velocidad muestreada en el concentrado eólico (m/s).	141
Figura 3.36. Concentrador eólico en el CFD	143
Figura 3.37. Temperatura del aire húmedo (K)(HR=95%, P=101328 Pa, v=5 m/s).	143
Figura 3.38. Presión del aire húmedo (Pa)(HR=95%, P=101328 Pa, T=292.8 K, v=5 m/s).	144
Figura 3.39. Velocidad del aire húmedo (HR=95%, P=101328 Pa, T=292.8 K, v=5 m/s).	145
Figura 3.40. Humedad relativa del aire húmedo (%) (P=101328 Pa, T=292.8 K, v=5 m/s).	146
Figura 3.41. Simulación de la velocidad en el concentrador eólico (punto 3) a 100% HR.	148
Figura 3.42. Típica producción de potencia en un parque eólico.	156
Figura 3.43. Fotografía del concentrador eólico.	157
Figura 3.44. Dimensionado del concentrador eólico.	158
Figura 3.45. Modelo de concentrador eólico.	159
Figura 3.46. Potencia unitaria de parques eólicos antiguo y propuesto.	161
Figura 3.47. Temperatura estacional promedio de los últimos 10 años.	170
Figura 3.48. Velocidad del viento estacional promedio de los últimos 10 años.	171
Figura 3.49. Producción de potencia de los últimos 10 años.	172
Figura 3.50. Evolución de la t° media ambiente en Galicia durante los últimos años.	174
Figura 3.51. Estimación de la reducción de la producción de potencia en los próximos años.	175
Figura A.2.1. Disposición constructiva ventilador SODECA HPX-71-4T-3.	191
Figura A.2.2. Curva presión – caudal ventilador SODECA HPX-71-4T-3.	191
Figura A.2.3. Detalle del rotor dispuesto en el concentrador y sustentado por arbotantes.	192
Figura A.2.4. Evolución de la presión dinámica en la sección mínima del convertidor.	192
Figura A.2.5. Respuesta de la velocidad frente a la frecuencia del variador.	193
Figura A.2.6. Potencia eléctrica obtenida del generador eléctrico de imanes permanentes.	193
Figura A.2.7. Potencia eléctrica disipada por efecto Joule.	194
Figura A.2.8. Variador de frecuencia SINAMICS G 110.	195
Figura A.2.9. Humidificador adiabático Mod. 45500.	195
Figura A.2.11. Compresor alternativo Ferrua SistemBlock Modelo Silent 30.	196
Figura A.2.12. Máquina de humo HQ Power 700W.	196
Figura A.2.13. Estación meteorológica PCE Ibérica	197
Figura A.2.14. Manómetro digital de presión diferencial KIMO, modelo MP200.	197
Figura A.2.15. Disposición de los tubos pitot en el concentrador.	197
Figura A.2.16. Panel enderezador 0,8 x 0,8 m.	198
Figura A.2.17. Rotámetro de rueda debimo.	198
Figura A.2.18. Tubo pitot conectado al manómetro de presión diferencial.	198
Figura A.2.19. Esquema de disposición de componentes en el laboratorio de ensayos.	199
Figura A.2.20. Manómetro de columna inclinada KIMO escala 0 – 50 Pa.	200
Figura A.2.21. Disposición del tacómetro digital PCE Ibérica Modelo DT62.	200
Figura A.2.22. Data Logger PCE Ibérica Modelo HT71.	201
Figura A.2.23. Data Logger MSR Modelo 145.	201
Tabla A.2.24. Características Data Logger MSR Modelo 145.	201
Figura A.2.25. Disposición de voltímetro, amperímetro, resistencia eléctrica y generador en el banco de pruebas.	202

Simbología

Símbolo	Definición
A	Sección recta
a	Aceleración
C_pmax	Coficiente potencia máximo
c_h	Calor específico aire húmedo
c_{pa}	Calor específico aire seco
c_{pv}	Calor específico vapor agua
E	Energía
F	Fuerza
g	Aceleración de la gravedad
H	Entalpía, altura
h	Entalpía específica
I	Intensidad de corriente eléctrica
M	Masa molecular aire húmedo
m_a	Masa aire seco
m_l	Masa de agua en estado líquido
m_v	Masa vapor de agua
N_w	Fracción molar de agua
P	Potencia
p_a	Presión parcial aire seco
p_v	Presión parcial vapor de agua
p_{ws}	Presión parcial vapor de agua saturación
q_v	Humedad específica
Q	Calor
R	Resistencia eléctrica
R_a	Constante específica aire seco
R_v	Constante específica vapor de agua
R_h	Constante aire húmedo
S	Entropía
t	Tiempo
T	Temperatura de mezcla
U	Energía interna
v	Velocidad del fluido,
V	Volumen de mezcla
V_e	Tensión eléctrica
W	Humedad absoluta, trabajo
z	Altura
λ₀	Calor latente condensación
ρ	Densidad
σ	Tensión superficial del agua
ξ	Trabajo
τ	Factor compresibilidad
v_h	Volumen específico aire húmedo
φ	Humedad relativa

6. Anexos

6.1. Aparatos

6.2. Patente

6.1. Aparatos

A Convertidor de energía



Figura A.2.1. Disposición constructiva ventilador SODECA HPX-71-4T-3.

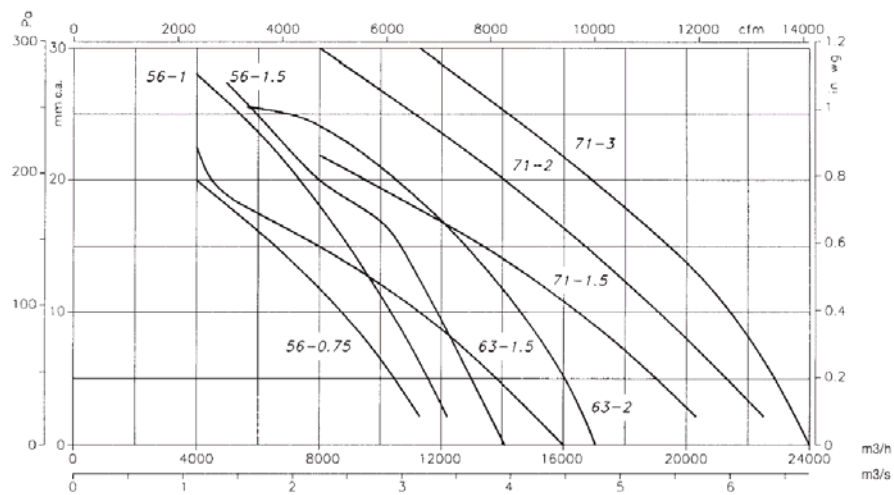


Figura A.2.2. Curva presión – caudal ventilador SODECA HPX-71-4T-3.

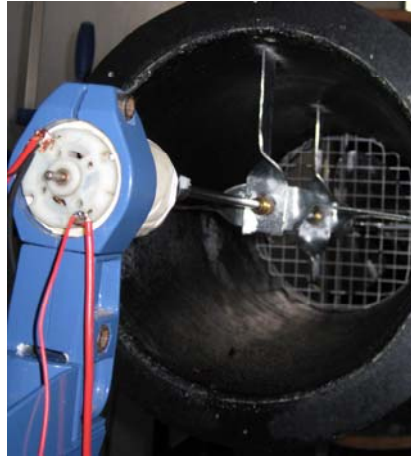


Figura A.2.3. Detalle del rotor dispuesto en el concentrador y sustentado por arbotantes.

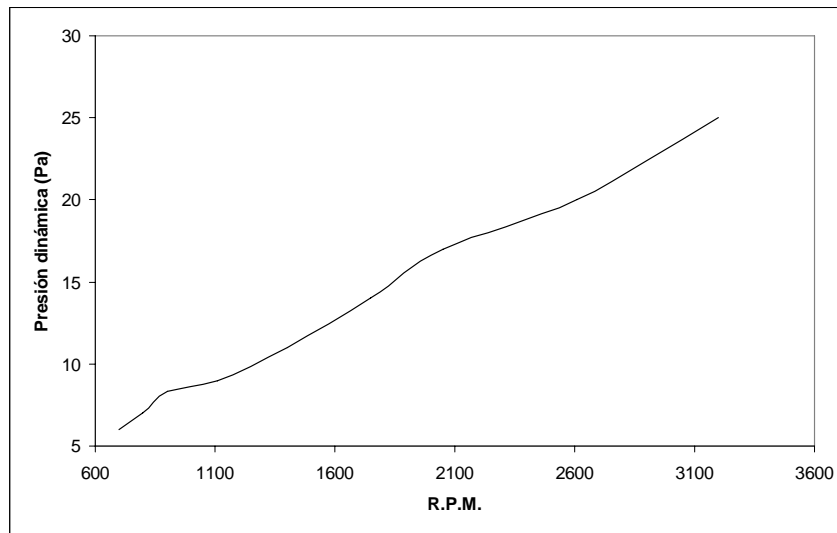


Figura A.2.4. Evolución de la presión dinámica en la sección mínima del convertidor.

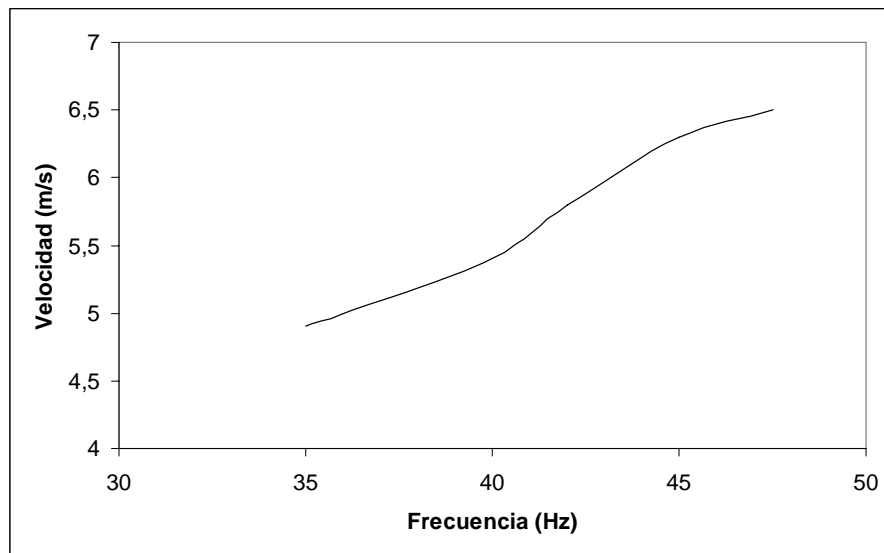


Figura A.2.5. Respuesta de la velocidad frente a la frecuencia del variador.

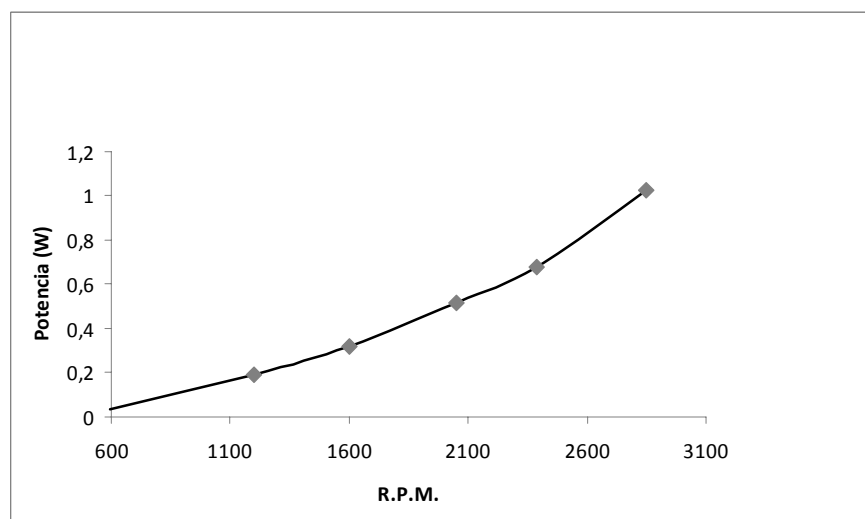


Figura A.2.6. Potencia eléctrica obtenida del generador eléctrico de imanes permanentes.

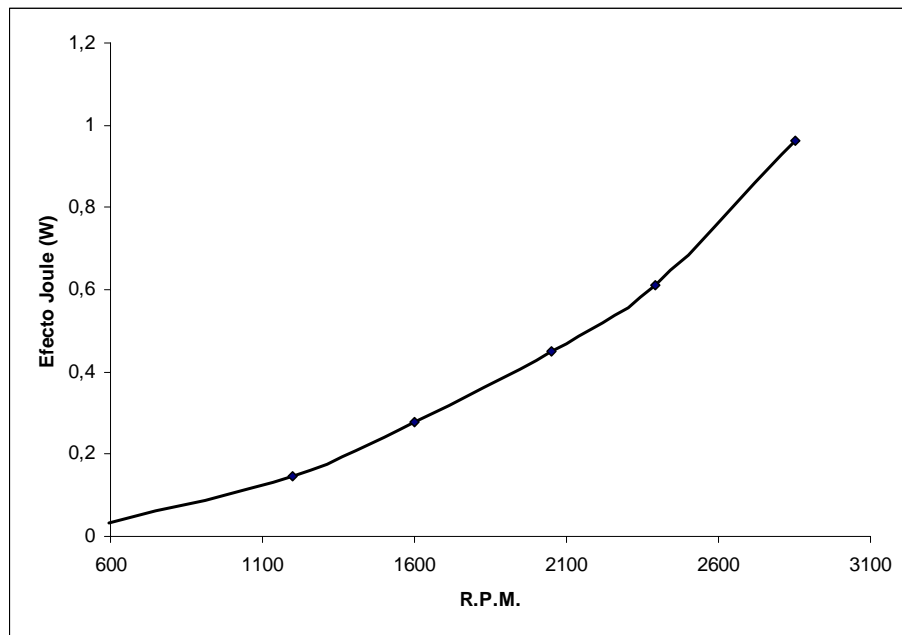


Figura A.2.7. Potencia eléctrica disipada por efecto Joule.

A. Dispositivos de control



Figura A.2.8. Variador de frecuencia SINAMICS G 110.



Figura A.2.9. Humidificador adiabático Mod. 45500.

Modelización de un captador eólico de alta eficiencia

Presión de Aire bar	Consumo de aire litros/hora	Caudal agua por boquilla litros/hora
0,7	11	1,2
1,4	16	1,6
2,1	21	2,0
2,5	26	2,3
3,4	31	2,7
4,1	37	3,0

Tabla A.2.10. Características de funcionamiento unidad humidificadora 45400.



Figura A.2.11. Compresor alternativo Ferrua SistemBlock Modelo Silent 30.



Figura A.2.12. Máquina de humo HQ Power 700W.

A. Dispositivos de medida

A. Presión



Figura A.2.13. Estación meteorológica PCE Ibérica



Figura A.2.14. Manómetro digital de presión diferencial KIMO, modelo MP200.



Figura A.2.15. Disposición de los tubos pitot en el concentrador.

A. Velocidad



Figura A.2.16. Panel enderezador 0,8 x 0,8 m.



Figura A.2. 17. Rotámetro de rueda debimo.



Figura A.2.18. Tubo pitot conectado al manómetro de presión diferencial.

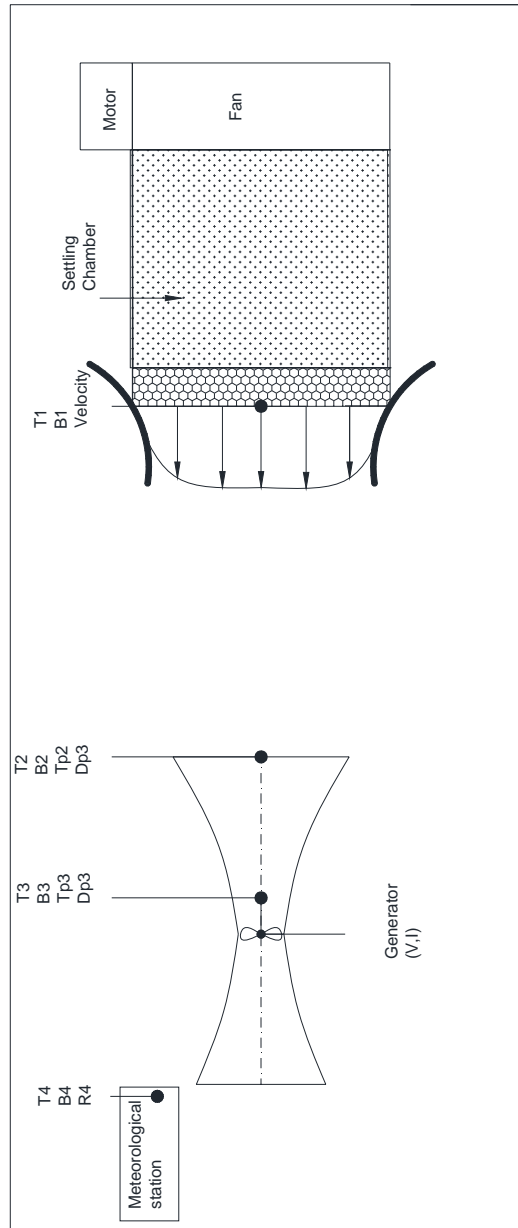


Figura A.2.19. Esquema de disposición de componentes en el laboratorio de ensayos.



Figura A.2.20. Manómetro de columna inclinada KIMO escala 0 – 50 Pa.



Figura A.2.21. Disposición del tacómetro digital PCE Ibérica Modelo DT62.

A. Humedad y temperatura



Figura A.2.22. Data Logger PCE Ibérica Modelo HT71.

Rango de medición:	
Temperatura	-35 °C hasta +80 °C
Humedad	0 - 100% H.R.
Precisión:	
Temperatura	±0,1 °C
Humedad	±3.5% Hr (20 hasta 80% Hr) ±5% H.r. (0 hasta 100% Hr)



Figura A.2.23. Data Logger MSR Modelo 145.

Rango de medición:	
Temperatura	-10 °C hasta +65 °C
Humedad	0 - 100% H.R., -20 °C hasta +65 °C
Presión	0 - 2500 mbar absoluto
Precisión:	
Temperatura	±0,1 °C (5 °C hasta 45 °C)
Humedad	±2% H.r. (10-90% H.r., 0 °C hasta 40 °C)
Presión	±0,5 °C (0 °C hasta 40 °C) ±2,5 mbar (750-1100 mbar absoluto)

Tabla A.2.24. Características Data Logger MSR Modelo 145.

A.2.2.5.4. Potencia eléctrica



Figura A.2.25. Disposición de voltímetro, amperímetro, resistencia eléctrica y generador en el banco de pruebas.

6.2. Patente

PROCEDIMIENTO Y DISPOSITIVO CONCENTRADOR PARA TURBINAS EÓLICAS

DESCRIPCIÓN

OBJETO DE LA INVENCION

El objeto de la invención es la transformación de energía eólica en energía mecánica de rotación mediante la circulación de aire húmedo (1) a través de un sistema formado por tobera (2) –rotor (4)-difusor (6). Este sistema aprovecha el calor latente de cambio de estado del fluido y produce, por lo tanto, el mayor desequilibrio energético que se puede alcanzar entre las condiciones de entrada (1) y salida del sistema (7).

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

El principio de funcionamiento de los generadores eólicos obedece a la Ley de Betz. Dicha ley establece que la potencia eólica máxima extraíble a una masa de aire en movimiento se produce cuando la velocidad de salida del elemento transformador es 1/3 la velocidad de entrada.

Los generadores eólicos de mayor implantación en el mercado son de eje horizontal y están constituidos por un número finito de palas que, por frenado, aprovechan sólo una parte de la energía cinética que contienen las masas de aire en movimiento. En todas ellas se mantienen relaciones de velocidades muy alejadas del valor estimado por la Ley de Betz, véanse las patentes ES2107324A1, ES2154595A1, ES2247948A1, ES2109173A1, ES2113266A1, ES2140358A1 y ES2191982A1.

Tratándose de convertidores energéticos que utilizan como fuente de energía el aire atmosférico en movimiento, debe analizarse el contenido en agua tanto en lo que se refiere a humedad específica como a humedad relativa.

eLa energía que captura un convertidor eólico depende fundamentalmente de: área barrida por las palas en el movimiento de rotación, velocidad incidente del fluido sobre el captador y densidad del fluido. Las máquinas implantadas en el mercado incrementan, a medida que se mejoran las propiedades mecánicas de los materiales, la superficie de captación. Esto trae consigo un aumento considerable en el volumen del transformador implicando mayor complejidad constructiva e inestabilidad de funcionamiento.

No se actúa sobre el flujo incidente, siendo por lo tanto la velocidad del aire un parámetro que queda supeditado exclusivamente a las condiciones ambientales. De igual forma, la densidad del fluido viene impuesta por las condiciones ambientales locales sin que se realice una actuación sobre la misma.

Modelización de un captador eólico de alta eficiencia

En el estado actual de la técnica no se tiene constancia de transformación de energía eólica mediante un sistema que actúe sobre los parámetros termodinámicos de entrada y salida del elemento transformador persiguiendo una optimización máxima que se aproxime al coeficiente de potencia óptimo establecido por la Ley de Betz.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

Se propone un concentrador-generador eólico que transforme la energía cinética de las masas de aire húmedo en movimiento existentes en la atmósfera (1) en energía mecánica de rotación por medio de rotores de palas.

El principio de funcionamiento obedece a la Ley de Betz que establece el grado de eficiencia de una máquina eólica en función de la relación de velocidades del fluido entre la condición de entrada (1) y la de salida (7).

La relación óptima de velocidades en la máquina transformadora se logra actuando sobre la vena fluida aguas arriba y abajo de la misma. Para ello, se diseñará una tobera (2) que tenga un comportamiento termodinámico adecuado para el campo de velocidades donde va a trabajar.

El diseño de la tobera está caracterizado por las siguientes etapas:

1° Definición de las características ambientales de la región climática a captar la masa de aire. De entre las cuales se destaca la velocidad media del aire, humedad relativa, temperatura y presión atmosférica. Dichos parámetros nos permitirán definir la energía potencial, cinética e interna de acuerdo con el primer principio de la termodinámica.

2° Definición de la masa de aire a captar en función de la energía incidente y de las dimensiones de la instalación.

3° Cálculo de las principales secciones que definen la tobera. Para ello se definirá un procedimiento de caída de presión constante donde las secciones calculadas sean equidistantes. Se definirá también un proceso que origine la condensación de una parte del vapor de agua presente en el aire y, con este calor, potencie la energía cinética del aire seco restante. La última sección tendrá unas dimensiones que permitan alcanzar una humedad relativa del 100% y dimensiones aprovechables por el rotor.

4° Ajuste de una superficie que encierre las secciones anteriormente calculadas y permita el paso del fluido siguiendo el proceso anteriormente mencionado.

Además, se analizará la conveniencia de incrementar la humedad relativa en el interior de la tobera para alcanzar el estado de saturación y hacer intervenir de este modo el calor latente del cambio de estado. Bajo esta situación, la energía que posee la vena fluida que accede a los rotores (4) será máxima en referencia a las condiciones ambientales.

Aguas abajo de los rotores (5) se implementa en el sistema un difusor (6) cuya misión es provocar un incremento de presión, con la consiguiente disminución de velocidad, para que en los rotores se alcance, a cualquier condición de trabajo, el coeficiente de potencia máximo establecido por Betz definido por una relación de velocidades de 1/3.

DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

Con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características del invento se acompaña la figura en la que, con carácter ilustrativo y no limitativo, se representa lo siguiente:

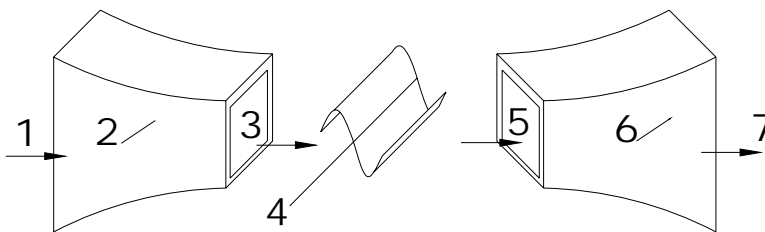


Figura 1. Concentrador eólico.

- 1. Masa de aire ambiente entrante en tobera.**
- 2. Tobera.**
- 3. Masa de aire húmedo y agua saliente de tobera.**
- 4. Rotor.**
- 5. Masa de aire húmedo entrante en difusor.**
- 6. Difusor.**
- 7. Masa de aire húmedo saliente del difusor.**

DESCRIPCIÓN DE UNA REALIZACIÓN PREFERENTE

Partiendo de los datos de potencial energético de una zona terrestre determinada, puede estimarse el campo de aplicación de la máquina eólica para el rango máximo-mínimo de energía disponible.

Atendiendo a las características de velocidad, presión y humedad del aire atmosférico se configura una tobera subsónica que provocará la disminución de presión con el consiguiente aumento de velocidad y humedad relativa, llevada esta última hasta el estado de saturación. Para el cálculo de las secciones que definen la tobera se definirá un procedimiento de caída de presión constante donde las secciones sean equidistantes.

Además, la última sección de esta tobera tendrá unas dimensiones que permitan alcanzar una humedad relativa del 100% y sean compatibles con las dimensiones del rotor.

Este efecto provoca la liberación del calor latente de cambio de estado y, por lo tanto, un mayor desequilibrio energético en el fluido de trabajo. Dado que la humedad relativa es uno de los factores que más puede oscilar se adicionará agua pulverizada cuando sea necesario para alcanzar la saturación.

El aire saturado procedente de la tobera, que actúa como concentrador, se envía a los rotores que transforman la entalpía del fluido en energía de rotación para mover un generador eléctrico. Impuesta la velocidad del fluido incidente en el rotor, la velocidad de salida debe mantenerse en un tercio de la misma. Esta condición se debe cumplir en los rotores para que el coeficiente de potencia sea máximo.

Aguas abajo de los rotores se dispone un difusor. El difusor es un transformador de velocidad en presión cuya finalidad es adaptar la velocidad de salida del aire de los rotores para lograr el coeficiente de potencia máximo para que se cumpla una relación de velocidades de 1/3, así como restablecer las condiciones ambiente externa para impedir la recirculación del fluido.

REIVINDICACIONES

1ª. **DISPOSITIVO CONCENTRADOR PARA TURBINAS EÓLICAS** que transforma la energía eólica en energía mecánica de rotación mediante la circulación de aire húmedo, caracterizado por un sistema formado por tobera (2)-rotor (4)-difusor (6) que aprovecha el calor latente de cambio de estado del fluido, produciendo el mayor desequilibrio energético que se puede alcanzar entre las condiciones de entrada (1) y salida del sistema (7).

2ª. **PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE UN CONCENTRADOR EÓLICO**, basado en el análisis del contenido energético del fluido existente en una región determinada de la atmósfera terrestre.

Las etapas de la presente reivindicación son cuatro:

Modelización de un captador eólico de alta eficiencia

- A) A partir de la velocidad media del aire, humedad relativa, temperatura y presión atmosférica se definirá la energía potencial, cinética e interna de un estado de aire húmedo, de acuerdo con el primer principio de la termodinámica.**
- B) Definición de la masa de aire a captar en función de la energía incidente y de las dimensiones de la instalación.**
- C) Se realizará el diseño de las secciones de la tobera por medio de un proceso de caída de presión constante de secciones equidistantes que asegure alcanzar una humedad relativa del 100 % y unas dimensiones aprovechables por el rotor.**
- D) Ajuste de una superficie que encierre las secciones anteriormente calculadas y permita el paso del fluido siguiendo el proceso anteriormente mencionado.**

7. Producción de la tesis

1. PUBLICACIONES EN REVISTAS

PUBLICACIONES JCR

- **Realistic Solutions for Wind Power Production with Climate Change.** J. A. Orosa, E. J. García-Bustelo & A. C. Oliveira. **Journal: Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects** Volume 34, Issue 10, March 2012, pages 912-918. Available online: 26 Mar 2012
- **An Experimental Test of Low Speed Wind Turbine Concentrators.** J. A. Orosa, E. J. García-Bustelo & A. C. Oliveira. **Journal: Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects** Volume 34, Issue 13, April 2012, pages 1222-1230

OTRAS PUBLICACIONES

- **World Quests for Future Energy Production.** José A. Orosa | Enrique J. García-Bustelo Teresa Grueiro. **International Journal of Energy Science** ISSN 2218-6026. Volume: 1; Issue: 2; Start page: 67; Date: 2011;

2. CONGRESOS INTERNACIONALES Y BASE DE DATOS IEEE

- **Wind turbine concentrator design based on moist air phase change.** Orosa, J.A., Garcia-Bustelo, E.J., Perez, J.A. 2009. **POWERENG 2009 - 2nd International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives Proceedings** , art. no. 4915154 , pp. 490-494
- **Galician climatic change effect on wind power production.** Orosa, J.A., Garcia-Bustelo, E.J., Perez, J.A. 2009. **POWERENG 2009 - 2nd International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives Proceedings** , art. no. 4915156 , pp. 180-184
- **Climate effects in low speed wind turbine's concentrators.** Orosa, J.A., Garcia-Bustelo, E.J., Perez, J.A. 2009. **POWERENG 2009 - 2nd International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives Proceedings** , art. no. 4915155 , pp. 174-179
- **Low speed wind concentrator to improve wind farm power generation.** Orosa, J.A., García-Bustelo, E.J., Oliveira, A.C. 2009. **IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)** , art. no. 5415152 , pp. 3605-3608

3. PATENTE ACEPTADA

- **Procedimiento y dispositivo concentrador para turbinas eólicas.** Concesión De la solicitud de Patente Nacional 200802888.

8. Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento al Instituto Enerxético de Galicia (INEGA), Parque Eólico Experimental de Sotavento y a MeteoGalicia por el apoyo técnico recibido durante la realización de este trabajo.

