



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

Aceleración de corrientes eólicas  
de reducida velocidad para la  
generación eléctrica doméstica

Sergio Gómez Trillo



Tesis

**Doctorales**

[www.eltallerdigital.com](http://www.eltallerdigital.com)

UNIVERSIDAD de ALICANTE



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

Departamento de Tecnología Informática y Computación

# Aceleración de corrientes eólicas de reducida velocidad para la generación eléctrica doméstica

Dirigida por

Dr. Juan Manuel García Chamizo

Dr. Francisco Javier Ferrández Pastor

Universitat d'Alacant

Universidad de Alicante

Tesis presentada por

Sergio Gómez Trillo

para aspirar al grado de

DOCTOR POR LA

UNIVERSIDAD DE ALICANTE.

DOCTORADO EN EDIFICACIÓN.

TECNOLOGÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO.

Alicante, Enero 2016.





*A la memoria de  
Agustín Trillo Antelo.*

Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

II



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

---

# Agradecimientos

Frente a este folio en blanco, horas y horas recordando multitud de instantes, palabras y sentimientos vividos. Difícil enlazar palabras que puedan transmitir de manera fehaciente la admiración, respeto y cariño de aquellas personas que me transmitieron su energía en tantos y tantos momentos.

A Juanma y Javier, por hacerme partícipe de su sabiduría y guiarme por este trayecto con firmes valores docentes y vitales. Gracias por transmitirme la disciplina necesaria para avanzar día a día a través de un universo tan inmenso como extraordinario.

A Vicente y Carmen, por su esfuerzo durante más de cuarenta años y que ha servido de estímulo para que cada día, tanto mi hermana y yo, continuemos sin desfallecer en nuestros respectivos caminos. Gracias. Igualmente agradecer a Mamen su ayuda generosa, sin la cual difícilmente hubiera alcanzado la meta.

Me crié admirando a mi abuelo materno, viajes en épocas estivales y navideñas convertidos en una verdadera tradición. Compartí con él miles de momentos de la cotidianidad rural, del esfuerzo de sol a sol con la única recompensa posible del bienestar existencial. De él aprendí... de él aprendí a ser humano. Trabajo, esfuerzo, paciencia, dedicación y amor. En eso consiste.

Esa humanidad ha sido fundamental para tratar de rodearme de personas con similar esencia y desechar lo superfluo. Hoy, puedo afirmar con rotundidad que lo he conseguido. Las líneas que comprenden este trabajo es fruto de la energía que estas personas desprenden en sus luchas diarias, y que furtivamente he ido observando a través de pequeñas rendijas.

En este largo trayecto he admirado Maruja, Beatriz y Sandra, capaces de reforzar su ánimo y unión ante la crudeza de la vida. Capaces de ser valientes sin desfallecer, siendo conscientes en todo momento de la importancia del

---

“estar a tu lado”, aun cuando haya grandes distancias de por medio. Capaces de seguir remando contra corriente y ser protagonistas en su propia historia vital.

Noe, cuantas miradas eternas en la distancia, alimentándonos mutuamente para alcanzar cada uno la meta en sus proyectos particulares. Miradas eternas admirando tu perseverancia, y tu continuo caminar, sin que el desánimo te haga desistir. Miradas cómplices, recordando que fuimos náufragos en tiempos pasados, y nos acercamos a la orilla gracias a ser íntegros en cada hora, minuto y segundo de nuestras vidas.

María, en tiempos pasados convertimos la distancia que nos separa en nuestra autopista de sueños y sentimientos hechos palabra. Ahora, esa autopista en tu caso, se ha convertido en una dulce felicidad completamente inundada de cabellos rubios y sonrisas por doquier. Observo aquellas conversaciones iniciales como quien tiene delante de sí cientos y cientos de piezas de un puzzle maravilloso. Felizmente, esas conversaciones continúan, y me atrevería a decir que no cesarán. Tienes esa amplitud de miras tan rica y necesaria para vislumbrar el camino recto, el camino a seguir. Mientras, permíteme seguir admirando a aquella chica que partió dirección Tromsø junto a Enrique para convertirse en una verdadera aurora boreal.

Urbán, el único y verdadero maestro de cientos y cientos aparejadores y arquitectos técnicos. He tenido el privilegio de conocerte en numerosas facetas, desde sufrir tu disciplina con esa sonrisa bondadosa, experiencias empresariales, numerosos cafés y cantuesos hablando de lo divino y de lo humano, incluso, ser continuamente derrotado por ti jugando al dominó. Entrar en tu despacho y contemplarlo como quien entra en la Sagrada Familia, inacabado...aún existe algún pequeño hueco donde albergar libros o documentos. Pascual, no hay vidas suficientes para devolverte todo lo que me has aportado. En momentos aciagos, te he buscado en mi mente tratando de imaginarme que harías tú para encontrar el camino adecuado. Admiración infinita por ti, maestro.

Soy un privilegiado por conocerte, Víctor. Absoluto privilegiado de ver tu Victoria diaria. Cada momento contigo anima a brindar por lo divino y por lo terrenal. Gracias por tu comprensión y generosidad. Eres de esas almas universales capaces de estar en cada momento, con la palabra justa y el gesto necesario. Desde aquellos años universitarios, encontré un espejo donde mirarme. Con el paso del tiempo, ese espejo lo he sustituido por la vida misma, ya no quiero mirarme en ti, simplemente quiero disfrutar

observando tu vida y hazañas en pantalla gigante. Y Ana, que decir...acudo a tus abrazos como quien acude al paraíso. Pura complicidad.

Y por último, me gustaría dejar constancia de una de tantas cosas que he aprendido de un hombre al que considero hermano. Durante estos últimos años he visto como la vida le ponía a prueba en multitud de vicisitudes. Y siempre, siempre, salir adelante desde la integridad que a uno le proporciona el no ser esclavo de sus actos y sí, dueño de sus decisiones.

Han sido cientos y cientos de veces que te he tenido en mi mente, observaba esa foto... y recordaba la ambición de tiempos pasados, y el tremendo esfuerzo y sacrificio que depositas cada día para garantizar el presente y futuro de los tuyos, sin dejar de alimentar ambiciones futuras. José Luis, estas palabras son solo el sentimiento desprendido en uno de esos abrazos eternos bajo las estrellas.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante



Gracias.





Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

---

# Resumen

En los últimos años, los sistemas que utilizan como fuente recursos renovables se han posicionado como una interesante alternativa para la producción de energía. Entre las fuentes disponibles, la energía eólica viene configurándose como una de las fuentes de energía renovable con mayor crecimiento en los últimos años.

En este trabajo se propone el aprovechamiento de las corrientes eólicas circulantes sobre la superficie terrestre para la producción de electricidad con el fin de abastecer buena parte de la demanda en viviendas aisladas, pequeñas instalaciones agropecuarias, equipamiento de servicio ubicado en lugares remotos, etc. Por lo general estas brisas tienen una baja densidad energética, por ello proponemos una interfaz mecánica que concentre las masas de aire, acelerando su circulación y alcanzando importantes incrementos en la velocidad de impulsión.

La primera parte se centra en la elaboración de un procedimiento de caracterización a partir de la metodología científica con el cual modelar una estructura concentradora de flujo eólico válida para un aerogenerador de eje vertical. Este método trata el diseño de un elemento acelerador capaz de optimizar el aprovechamiento de estas brisas con independencia de la dirección de éstas. Su diseño viene dado por la resolución de un conjunto de objetivos fundamentales, dotando al sistema de unas prestaciones particulares en relación a su arquitectura y operatividad. Estos objetivos son los siguientes:

- Operatividad ante cualquier dirección eólica adoptada
  - Incremento del rendimiento potencial de la turbina de eje vertical
  - Minimizar el desarrollo de efectos turbulentos alrededor del sistema integrado
-

- Capacidad resolutive ante la presencia de fuertes vientos
- Estabilidad estructural
- Compatibilidad ante instalaciones propias del volumen arquitectónico
- Control global del rendimiento del sistema

La segunda parte aborda el modelado del prototipo y el análisis de su comportamiento mediante simulaciones en el ámbito de la fluidodinámica computacional. El resultado es un prototipo caracterizado por una arquitectura capaz de sectorizar la entrada de viento en diferentes tramos inyectando el flujo eólico estratégicamente. La incorporación de la interfaz sobre el rotor aumenta la superficie de captación eólica, facilitando su entrada a través de las diferentes aberturas y llevando a cabo su concentración según avanza por los tramos de circulación. Una vez finalizado dicho avance, el flujo es inyectado en un rango angular definido por la elevada fuerza de sustentación capaz de generarse gracias a la incidencia del flujo eólico, aprovechando las particularidades que ofrece la rotación de este tipo de rotores. El resultado de la inyección sectorizada es el desarrollo de una circulación interior vorticial que incide permanentemente en el rango de sustentación característico del perfil aerodinámico que define la geometría de la pala de rotación. Ello provoca que se alcance un funcionamiento nominal a velocidades reducidas.

En este proceso se incluyen las acciones necesarias para dar una respuesta eficiente a cualquier tipo de sollicitación eólica. En presencia de velocidades de relativa importancia, la interfaz concentradora adapta su arquitectura con el fin de regular la entrada de flujo, retrasando la activación de los dispositivos reguladores propios de la turbina eólica. En presencia de vientos importantes, la interfaz dispone de los mecanismos necesarios para proceder al cierre de las aberturas procediendo a la parada del rotor.

La validación de los prototipos elaborados se ha llevado a cabo mediante simulación computacional CFD. Los resultados confirman la consecución de un funcionamiento nominal a velocidades más reducidas, una mayor superficie de captación y periodo de tiempo de funcionamiento efectivo en comparación a las turbinas convencionales. Para el caso práctico modelado los resultados mejoran en más de 2.5 veces la potencia generada y multiplican por cuatro la fuerza ejercida sobre las palas de la turbina.

La elaboración de un método preciso para el diseño de este tipo de estructuras concentradoras posibilita que se pueda alcanzar un diseño en función a las necesidades del usuario, o las condiciones eólicas de un emplazamiento dado. A ello hay que unir su compatibilidad de uso y montaje con sistemas de captación solar, conformando un sistema híbrido capaz de aprovechar tanto la energía solar como eólica para la abastecimiento autónomo. Esta característica incrementa el ratio de zonas geográficas donde se puede llevar a cabo su implantación.

Las últimas páginas están reservadas a esbozar las líneas futuras de desarrollo y evolución, tanto en términos de eficiencia productiva como en su incorporación a nuevos volúmenes arquitectónicos y estructuras civiles en general.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

---

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>III</b>
<b>Resumen</b>	<b>VII</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>XIII</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XVII</b>
<b>1. Motivación y objetivos</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Objeto de la investigación . . . . .	7
1.3. Estudio del estado del conocimiento . . . . .	12
1.4. Objetivos . . . . .	22
Bibliografía . . . . .	29
<b>2. Especificación estructural de la solución</b>	<b>35</b>
2.1. Requerimientos relativos a la arquitectura del sistema . . . . .	36
2.2. Requerimientos relativos a la estructura del sistema . . . . .	48
2.2.1. Relativos al sistema mecánico . . . . .	48
2.2.2. Relativos a la estructura concentradora de flujo eólico . . . . .	51
2.2.3. Relativos a la constitución del sistema e integración en el volumen arquitectónico . . . . .	56
2.3. Requerimientos relativos a la tecnología del sistema . . . . .	59
2.4. Conclusiones . . . . .	61
Bibliografía . . . . .	64
<b>3. Diseño del prototipo</b>	<b>67</b>
3.1. Modelado de la arquitectura interior de la estructura concentradora . . . . .	70
3.2. Simulación numérica mediante software CFD . . . . .	77
3.3. Dinámica eólica en la interfaz concentradora . . . . .	79
3.3.1. Circulación interior alrededor de la rotación . . . . .	79
3.3.2. Comportamiento de la interfaz en relación al radio de la turbina . . . . .	82

---

3.3.3.	Origen y tratamiento de vórtices en determinados tramos de circulación . . . . .	83
3.3.4.	Análisis de la terminación interior del álabe . . . . .	87
3.3.5.	Calibración del ángulo de ataque . . . . .	88
3.3.6.	Régimen de actuación operativo . . . . .	90
3.4.	Simulación dinámica de la turbina implementada con la interfaz . . . . .	95
3.5.	Conclusiones . . . . .	98
	Bibliografía . . . . .	100
<b>4.</b>	<b>Vías de futura investigación</b>	<b>101</b>
4.1.	Futuras evoluciones . . . . .	102
4.1.1.	Implementación en elementos viarios . . . . .	102
4.1.2.	Desarrollo de un envoltura de cierre solar . . . . .	104
4.1.3.	Adaptación de la arquitectura a patrones eólicos definidos . . . . .	104
4.1.4.	Inclusión de sistemas de control de potencia aplicados a la turbina	105
4.1.5.	Parasoles integrados en el disco inferior . . . . .	105
<b>A.</b>	<b>Anexo</b>	<b>103</b>
A.1.	Listado de planos . . . . .	103

---

## Índice de figuras

1.1. Evolución de la inversión en energías renovables, 2004-2014. . . . .	4
1.2. Inversión destinada en relación al país de procedencia. El grupo de países desarrollados lo componen el conjunto de estados miembros de la OECD, excluyendo Mexico, Turquía y Chile. . . . .	5
1.3. Número de turbinas eólicas de baja potencia instaladas en función del país. . . . .	6
1.4. Funcionamiento esquemático de la chimenea solar. . . . .	9
1.5. Contorno de velocidad de la simulación CFD practicada a un prototipo de conversión ciclónica. . . . .	10
1.6. Diseño y características del perfil AF300 desarrollado por R.K. Singh. . . . .	11
1.7. Perspectiva del prototipo de K. Foreman y R. Oman. . . . .	12
1.8. Secciones de prototipos de concentración eólica para turbinas de eje horizontal. . . . .	13
1.9. Simulación del prototipo inicial y el modelo Cii de concentración eólica diseñados por Y. Ohya et al. . . . .	13
1.10. Potencia eléctrica generada en relación la velocidad del viento. . . . .	13
1.11. Vista general del prototipo Vortec 7. . . . .	14
1.12. Detalle de la fragmentación de tramos en la mitad superior del Vortec 7. . . . .	14
1.13. Perspectiva del molino persa vista desde la abertura de mayor dimensión. . . . .	16
1.14. Vista general de un aerogenerador Darrieus, Savonius y Giromill. . . . .	17
1.15. Prototipo de concentración eólica para aerogenerador de eje vertical proyectado por R. Nobile et al. . . . .	18
1.16. Simulación numérica CFD del prototipo inicial diseñado por R. Nobile et al. . . . .	18
1.17. Coeficiente de potencia en relación al TSR de la interfaz integrada en el rotor en comparación al rendimiento específico de la turbina. . . . .	19

---



1.18. Solución <i>Crossflex</i> incorporada a las aristas verticales y crestas de los edificios. . . . .	20
1.19. Sección y perspectiva del prototipo de concentración eólica para turbina de eje vertical diseñado por W.T. Chong et al. . . . .	20
1.20. Varias secciones de la arquitectura interior del prototipo diseñado por W.T. Chong et al. . . . .	21
2.1. Árbol estructural, detalle del nivel 0 completado. . . . .	36
2.2. Posicionamiento de la góndola de un aerogenerador de eje horizontal en función a la dirección del viento. . . . .	38
2.3. Posibles configuraciones de la estructura concentradora en función del rango de actuación eólico. . . . .	39
2.4. Análisis dinámico del perfil aerodinámico NACA 2412. Posiciones en base al ángulo de ataque en orden correlativo: 0°, 6°, 12°, 15°, 20°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90°. Fuente: Elaboración propia. . . . .	40
2.5. Árbol estructural, detalle del nivel 1 completado. . . . .	47
2.6. Árbol estructural, detalle del nivel 2 relativo al sistema mecánico. . . . .	52
2.7. Árbol estructural, detalle del nivel 2 completado relativo a la estructura de concentración . . . . .	55
2.8. Árbol estructural, detalle nivel 2 relativo a la constitución e integración en el volumen arquitectónico. . . . .	60
2.9. Método de caracterización de estructuras de concentración en rotores de eje vertical. . . . .	63
3.1. Perfil de velocidades y sentido de circulación en el emplazamiento dado. . . . .	69
3.2. Procedimiento para la determinación del rango de sustentación en función al perfil aerodinámico. . . . .	70
3.3. Geometría de la sección tipo. Determinación de la base de inyección . . . . .	71
3.4. Geometría de la sección tipo. Determinación de la base de captación. . . . .	73
3.5. Procedimiento para la determinación de la superficie de captación de la interfaz. . . . .	74
3.6. Modelado de las caras interiores de los tramos y constitución de los álabes de la interfaz. . . . .	75
3.7. Posibilidades de configuración de las toberas. . . . .	76
3.8. Detalle del mallado utilizado para los distintos prototipos . . . . .	77
3.9. Zona de remanso originada en las proximidades a la interfaz concentradora. . . . .	81

3.10. Gráfica de la función que relaciona la velocidad promedio interior con el radio del aerogenerador . . . . .	82
3.11. Gráfica de la función que relaciona el radio de la interfaz y del aerogenerador. . . . .	83
3.12. Desarrollo de un vórtice ocupando la totalidad de la tobera 1 del prototipo B01. . . . .	84
3.13. Detalle de la circulación en la tobera 1 del prototipo B02. . . .	86
3.14. Estela generada en las proximidades de la terminación interior de los álabes del prototipo B02. . . . .	87
3.15. Coeficiente de sustentación en relación al ángulo de ataque, modelos NACA2410, GOE480, RAF19il. . . . .	89
3.16. Flujograma de activación del mecanismo de control de potencia.	91
3.17. Descomposición de fuerzas actuantes en la sección aerodinámica de la pala de rotación . . . . .	96
3.18. Macro UDF para generar la rotación de la turbina . . . . .	97
4.1. Modelo holístico de implantación del sistema de microgeneración EOLIA en volúmenes arquitectónicos . . . . .	103



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

---

## Índice de tablas

1.1. Evolución de la inversión en función al tipo de fuente renovable y de la región geográfica, 2004-2014. . . . .	4
1.2. Criterios de distintos países para la definición de los sistemas de microgeneración energética. . . . .	6
1.3. Parámetros geométricos de los prototipos diseñados por Y. Ohya et al. . . . .	13
1.4. Objetivos a satisfacer en el modelado del prototipo. . . . .	27
2.1. Análisis dinámico par distintos perfiles aerodinámicos. Valores $\beta_0$ , $\beta_{max}$ y coeficientes $C_L$ y $C_D$ para $Re=100.000$ . . . . .	41
2.2. Objetivos a satisfacer en el modelado del prototipo. . . . .	46
2.3. Objetivos relativos al eje de rotación. . . . .	48
2.4. Objetivos y requerimientos relativos al eje de rotación. . . . .	49
2.5. Objetivos relativos a la estructura de sujeción. . . . .	50
2.6. Objetivos y requerimientos relativos a la estructura de sujeción. . . . .	51
2.7. Objetivos relativos a la constitución del sistema e integración en el volumen arquitectónico. . . . .	56
2.8. Objetivos y requerimientos relativos a la constitución del sistema e integración en el volumen arquitectónico. . . . .	58
3.1. Longitud de rugosidad en relación al tipo de terreno según el Eurocódigo EN 1991-1-4. . . . .	68
3.2. Longitud de rugosidad en relación a distintas tipologías de terreno. . . . .	68
3.3. Características generales de la malla a utilizar en las simulaciones mediante software ANSYS 14.5. . . . .	77
3.4. Criterios para la ejecución de las simulaciones mediante software ANSYS 14.5. . . . .	78
3.5. Simulación en los prototipos A, B y C. Vector característico de la velocidad de inyección con respecto a su posición acimutal. . . . .	80

---



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

---

*Cuando escuchamos que es necesario  
elegir alguna forma de estabilidad planificada,  
cuando hacemos frente a la necesidad  
del diseño de un estado sostenible,  
nos sentimos empujados al desaliento  
aun cuando nos demos plena cuenta de ello.  
Cuando somos enfrentados a nuestros recursos de esta forma  
sentimos, intuimos, un cierto tipo de soledad cósmica  
que no podíamos haber previsto.  
Nos convertimos en huérfanos.  
Ya no nos seguimos viendo como criaturas de un orden cósmico  
beneficiarios de un proceso histórico.  
Los límites al crecimiento niegan todo eso.  
Nos dicen, quizá por primera vez en nuestra experiencia,  
que el único plan debe ser el nuestro.*

D.H. Meadows, D.L. Meadows & J. Randers

---



---

# 1

## Motivación y objetivos

### 1.1. Introducción

Las ciudades crecían carentes de una ordenación básica y programada en particular tras la irrupción de la Revolución Industrial en las últimas décadas del siglo XVIII. Se caracterizaban por ser espacios donde prevalecía la heterogeneidad de usos, prósperos en actividad y donde la comunicación entre individuos era particularmente fluida [1]. Esta bonanza industrial contribuyó a un superlativo crecimiento demográfico durante el siglo XIX. Este fenómeno se vivió con gran intensidad en las grandes urbes norteamericanas, originándose de tal desbordamiento social los conocidos como *sprawls* o suburbios.

El modelo urbano disperso o expansivo tiene su origen en esta nueva ordenación urbana. Sus fundamentos son la descentralización de espacios y una planificación funcional del suelo, apoyándose en un complejo entramado de redes de comunicación y servicio. Cada nodo se define como un espacio monofuncional, con una densidad urbana reducida, y en el cual la actividad mayoritaria se concentra en una determinada franja horaria. La operatividad de estos primeros núcleos austeros y con numerosas carencias básicas fue posible gracias al auge de la industria automovilística. Tradicionalmente los puntos de actividad industrial y comercial estaban emplazados alrededor de las estaciones de ferrocarril y puertos marítimos. E.L. Glaeser [2] señala el



---

uso del vehículo y el incremento del transporte de mercancías por carretera como factores de primer orden para lograr una descentralización palpable. El crecimiento demográfico originado tras la Revolución Industrial se acentuó a lo largo del siglo XX, derivando en una expansión extraordinaria del modelo en la práctica totalidad de las ciudades.

Una de las más importantes consecuencias de este fenómeno son los elevados costes económicos asociados a la construcción y mantenimiento de infraestructuras y redes de servicio [3–7]. La evolución de las materias primas utilizadas en la construcción son interesantes indicadores para ilustrar el grado de complejidad urbana alcanzado. Sirva el ejemplo de territorios en expansión como Brasil, India o China, los cuales durante estos primeros años del siglo XXI han duplicado o triplicado su consumo de cemento [8]. E. Morin [9] destaca la importancia de la complejidad de los sistemas auto-organizados en relación al número de interacciones que pueden llegar a generarse. Esta aportación resulta fundamental a la hora de analizar las actuales ciudades como estructuras devoradoras de recursos naturales y principales responsables de emisiones nocivas a la atmósfera. En este sentido, R. Madlener y Y. Sunak afirmaron que las ciudades son responsables del 75 % del consumo de los recursos naturales [3].

En relación a las emisiones nocivas emitidas por las urbes, son numerosos los estudios realizados que analizan tal paradigma en función a diferentes rasgos característicos: nivel de actividad económica, influencia geográfica del emplazamiento, impacto de ciertas estrategias puestas en marcha para la reducción de emisiones, las características del ordenamiento urbano en la generación de emisiones, etc [10–18]. En contraposición al modelo expansivo, la ciudad compacta se basa en la concentración de volúmenes, elevada densidad urbana, heterogeneidad de usos, intercambio y comunicación. Ello supone que las redes de servicio no sean tan extensas y costosas, reduciendo la dependencia al vehículo y aumentando el protagonismo del transporte público [19, 20]. M. Gottdiener y L. Budd [21] afirman que duplicar la densidad urbana de un barrio disminuye el uso del vehículo entre un 20-40 %. R. Madlener y Y. Sunak aportan el ejemplo de Hong Kong como ciudad de extremada densidad urbana y menor gasto energético atribuible al transporte por persona, en comparación a una terna de ciudades norteamericanas representativas. Los anteriores autores comparten la idoneidad de la compacidad urbana como criterio para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Por contra, los detractores de estos criterios advierten que un exceso de concentración puede originar el efecto *isla de calor*. El aumento en la temperatura del aire, una menor circulación del viento, mayor contaminación del aire, etc. son algunas de

las consecuencias inmediatas, repercutiendo directamente en el aumento del consumo energético [22, 23].

Según S. Pincetl [24], las ciudades del siglo XXI deben de afrontar dos importantes retos. El primero se centra en concebir las metrópolis como "naturalezas reconstruidas". Esta concepción parte de comprender que el desarrollo urbano alcanzado ha sido posible gracias al aprovechamiento de materiales naturales y de sus repetidas transformaciones. Ello conduce a tratar de concienciar a la sociedad del impacto que producen las acciones del ser humano en el medio natural. Este desafío enlaza con el segundo reto: las ciudades son espejos de la sociedad, es decir, reflejan la intencionalidad humana. S. Pincetl argumenta que si bien el incremento de la interacción ha derivado en los niveles de huella ecológica conocidos, la concienciación y educación en un contexto de desarrollo sostenible pueden ayudar a revertir la situación.

Son varios los estudios dedicados a analizar la relación entre el emplazamiento y la tipología constructiva frente al nivel de emisiones nocivas emitidas a la atmósfera. J. Minx et al. encontraron evidencias de elevadas emisiones de CO<sub>2</sub> tanto en asentamientos rurales como urbanos del Reino Unido [25]. J. Heinonen [26] destaca el elevado impacto que tiene la renta per cápita en detrimento de la tipología del volumen constructivo. Esta conclusión se extrae del estudio realizado que analiza la influencia del estilo de vida en relación a las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por otro lado, R. Ewing et al. [27] realizaron un estudio relativo a las tipologías de los hogares estadounidenses, concluyendo en que las viviendas unifamiliares consumen un 35 % y 21 % más de energía para calefacción y refrigeración que otro tipo de tipologías arquitectónicas. Hay que tener en cuenta que pese a la progresiva urbanización del planeta, en 2030 la población rural se mantendrá en los 3.400 millones de habitantes decreciendo hasta 3.000 millones en 2050, representando un 40 % y 34 % del total mundial respectivamente [28].

Hasta la fecha, el diseño de la inmensa mayoría de los volúmenes arquitectónicos se realiza siguiendo criterios estructurales, de habitabilidad, funcionabilidad o estéticos, dejando a un lado la capacidad para la producción de energía. Utilizando terminología perteneciente a la disciplina biológica, estos volúmenes se asemejan a organismos heterótrofos, dependientes absolutos de los recursos de la Tierra.

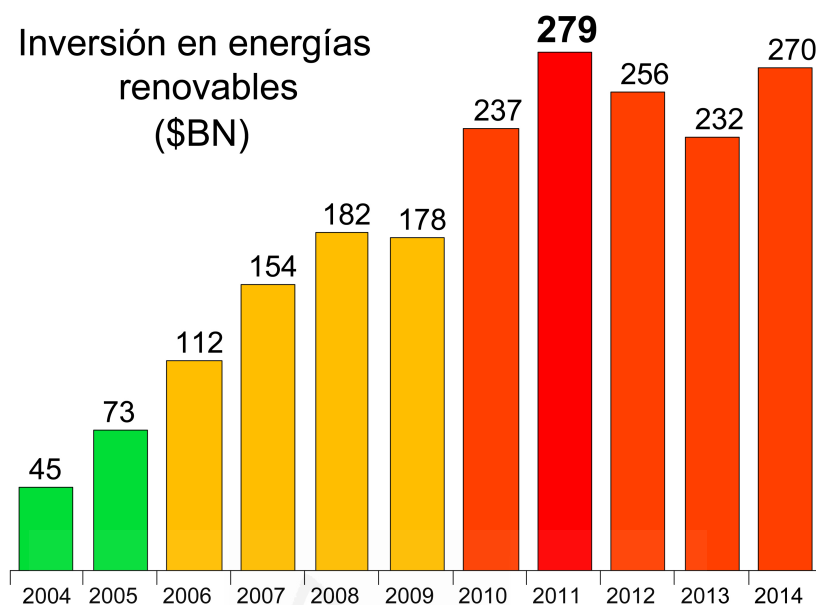


Figura 1.1: Evolución de la inversión en energías renovables, 2004-2014.

Tabla 1.1. Evolución de la inversión en función al tipo de fuente renovable y a la región geográfica

Billones de dólares americanos

Fuente: Global Trends in Renewable Energy 2014

categoria	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	% 2013-2014
eólica	17.9	29.1	39.6	61.6	75.2	81.2	98.9	84.2	84.1	89.3	99.5	11 %
solar	12.0	16.3	22.1	38.0	60.8	63.7	103.3	155.7	144.3	119.8	149.6	25 %
biofuels	3.9	9.6	28.4	28.7	19.2	10.2	10.1	10.4	7.0	5.5	5.1	-8 %
biomasa	7.4	9.6	12.1	15.8	16.9	13.9	16.0	17.4	12.4	9.3	8.4	-10 %
hidro	2.6	7.2	7.6	7.1	7.8	6.3	5.7	7.2	6.4	5.5	4.5	-17 %
geotérmica	1.2	1.0	1.5	2.0	1.7	2.9	3.0	3.7	1.8	2.2	2.7	23 %
marina	0.0	0.1	0.9	0.8	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.4	110 %
	45.1	72.9	112.1	153.9	181.8	178.5	237.2	278.8	256.4	231.8	270.2	17 %
inversiones por región geográfica	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	% 2013-2014
Estados Unidos	5.4	11.6	29.1	33.0	35.1	24.3	35.1	50.0	38.2	36.0	38.3	7 %
Brasil	0.8	3.1	5.2	11.8	12.1	7.9	7.7	10.1	7.2	3.9	7.6	93 %
AMER(excl. US& Brasil)	1.7	3.3	3.9	5.0	5.8	5.8	12.2	9.2	10.2	12.2	14.8	21 %
Europa	23.6	33.6	46.7	66.4	81.6	81.2	111.1	120.7	89.6	57.3	57.5	0 %
Oriente Medio& África	0.6	0.8	1.1	2.4	2.3	1.7	4.2	2.9	10.4	8.7	12.6	46 %
China	3.0	8.2	11.1	16.6	25.7	39.5	38.7	49.1	62.8	62.6	83.3	33 %
India	2.7	3.1	4.9	6.3	5.6	4.3	9.0	12.7	7.4	6.4	7.4	14 %
ASOC (excl. China & India)	7.2	9.2	10.0	12.5	13.6	13.7	19.3	24.1	30.5	44.7	48.7	9 %

Tabla 1.1: Evolución de la inversión en función al tipo de fuente renovable y de la región geográfica, 2004-2014.

Las conocidas como energías renovables se han posicionado como una interesante opción para la producción de electricidad. Esta etiqueta aglutina a un conjunto de sistemas que aprovechan la energía proveniente de fuentes de origen natural con elevada tasa de renovabilidad, para la transformación en energía disponible de consumo. El interés por las energías renovables se constata a la vista de los datos de inversión en proyectos para la producción

de energía utilizando recursos renovables durante el periodo 2004-2014 [29]. La inversión realizada a nivel mundial en 2004 se situó en los 45 billones de dólares. Durante los siguientes años, la inversión creció año a año hasta alcanzar su máximo histórico en 2011, con un total de 279 billones.

En 2014, esta cifra se situó en 270 billones de dólares, lo que supone un incremento más de 6 veces el montante invertido en 2004. Los principales productores energéticos, China, EE.UU., Alemania o Japón, copan los primeros puestos en inversión realizada. La diversidad en los países responsables de estas inversiones ilustra la magnitud de la revolución actual. Los países del Medio Oriente y África, destinaron una inversión total de 12 billones de dólares en 2014, un incremento del 44 % con respecto al año anterior. En los dos últimos años la inversión ha repuntado en todas las áreas geográficas a excepción de Europa donde la inversión ha descendido un 47 % en el periodo 2011-2014. Por contra los incrementos más significativos se han registrado en China y los países asiáticos, con un incremento del 32 % y 59 % respectivamente.



Figura 1.2: Inversión destinada en relación al país de procedencia. El grupo de países desarrollados lo componen el conjunto de estados miembros de la OECD, excluyendo Mexico, Turquía y Chile.

Una buena parte de estas inversiones tiene como destino el ámbito de la microgeneración. En él se engloban aquellas tecnologías de producción energética para el abastecimiento individual o restringido a unos pocos usuarios. Esta restricción viene dada por un valor máximo de potencia

generada, manejándose 100 kW como valor estándar, aunque en la práctica este límite queda a expensas del marco normativo de cada país.

Tabla 1.2. Diferentes baremos de clasificación para los sistemas de microgeneración eólica  
kW Fuente: Small Wind Turbine Report

	Asociación	Clasificación	Rango
Internacional	Comisión Electrotécnica Internacional	small wind turbine	50
Canadá	Natural Resources Canada (NRCan)	mini wind turbine	0.3-1
Canadá	Canadian Wind Energy Association (CanWEA)	small wind turbine	1-30
China	Renewable Energy & Energy Efficiency Partnership (REEEP)	small wind turbine	<100
Alemania	Bundesverband WindEnergie (BWE)	small wind turbine	<75
Reino Unido	RenewableUK	micro wind	0-1.5
Reino Unido	RenewableUK	small wind	1.5-15
Reino Unido	RenewableUK	small-medium wind	15-100
Reino Unido	Microgeneration Certification Scheme (MCS)	micro & small wind turbine	<50
Estados Unidos	American Wind Energy Association (AWEA)	small wind turbine	<100

Tabla 1.2: Criterios de distintos países para la definición de los sistemas de microgeneración energética.

Son numerosos los países, encabezados por los líderes en producción energética global, que han impulsado diferentes estrategias para el impulso y consolidación del sector microenergético [30]. Estas estrategias van encaminadas tanto a promover la accesibilidad energética en regiones carentes de este servicio básico [31–38], como a incentivar el autoabastecimiento en edificaciones de toda índole emplazados en territorios con redes eléctricas consolidadas.

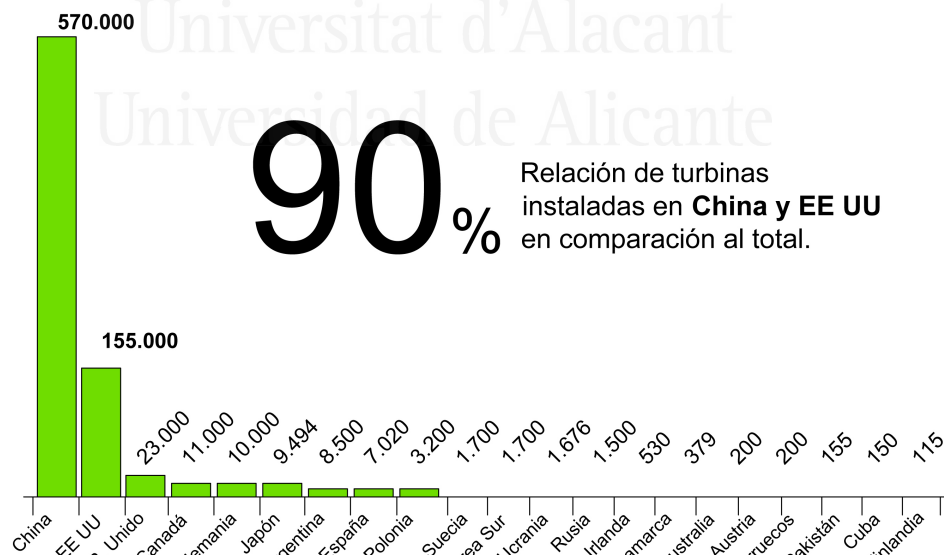


Figura 1.3: Número de turbinas eólicas de baja potencia instaladas en función del país.

Dentro de las distintas vías de I+D+i en el campo de la microgeneración,

el sector eólica despierta un gran interés a tenor de los datos aportados por *World Wind Energy Association*. A fecha de 2012 se estiman unas 806.000 turbinas de baja potencia implantadas capaces de producir 678 MW de electricidad. Ello supone un incremento del 18 % con respecto a 2011, en el que se había registrado 576MW. El objetivo propuesto a alcanzar son 3GW de capacidad instalada para 2020.

Desde los años ochenta, China ha promovido la instalación de aerogeneradores en las zonas rurales, siendo una alternativa fiable y rentable a las redes convencionales como expresa J. Byrne et al. [39]. El interés del gobierno chino se pone de manifiesto a través del programa de incentivos destinado a la industria minieólica, como así señalan S. Zhang y J. Qi [40]. En el caso de Estados Unidos, durante esta última década se han puesto en marcha programas nacionales para el desarrollo y consolidación de la industria microeólica, a los que se unen los propios de cada estado subvencionando la implantación de este tipo de sistemas de producción energética. El número de turbinas eólicas de baja potencia implantadas se estima que ha superado las 155.000 siendo capaces de generar unos 216 MW, según los datos recogidos a principios de 2013 por *American Wind Energy Association*. Alemania, Canadá o Reino Unido también disponen de estrategias enfocadas al desarrollo y promoción de la microgeneración, destinando una buena parte de sus esfuerzos a subvencionar la instalación de pequeñas turbinas eólicas.

***La insostenibilidad energética de los actuales modelos urbanos es uno de los mayores retos que se presenta en la actualidad. Los avances culminados en los últimos años en el entorno de la microgeneración ha derivado en la posibilidad de proyectar viviendas, edificaciones y equipamiento urbanos capaces de alcanzar una cierta autonomía energética. Dicha integración permite proyectar diseños arquitectónicos a partir de resolver la demanda racional estimada mediante la incorporación de este tipo de sistemas. Esta investigación aborda el desarrollo de un sistema de microgeneración capaz de integrarse en un volumen arquitectónico el cual aproveche la cinética de las brisas eólicas para la producción de electricidad.***

## 1.2. Objeto de la investigación

Se considera viento a toda aquella masa de aire en movimiento. El desigual calentamiento de la superficie terrestre junto con otros fenómenos

---

---

atmosféricos, origina la circulación de masas de aire en la atmósfera a diferentes presiones. Las fuerzas de coriolis y centrífuga actúan como fenómenos de primer orden a la hora de generar estas corrientes conocidas como vientos geostróficos a cientos de metros de la superficie. Según se descende, estos fenómenos pierden relevancia en favor de la morfología del terreno. A principios del siglo XX, W. Bjerknes enunció el siguiente teorema: *si los gradientes de presión y temperatura tienen direcciones diferentes, se crea energía que obliga al aire a moverse en el sentido que va del extremo del vector gradiente de presión al vector gradiente de temperatura, por el camino más corto.*

La demostración práctica de dicho teorema a lo largo de la capa límite terrestre permite detectar patrones eólicos en terrenos con características específicas, como el caso de las corrientes catabáticas y anabáticas. Las primeras se producen en las montañas con una circulación en sentido descendente hacia los valles. Su origen proviene del enfriamiento del aire en las cotas altas y el consiguiente aumento de su densidad. El caso contrario viene dado por las corrientes anabáticas, unas circulaciones de viento con sentido ascendente que se producen en los días calurosos. Otro patrón interesante es el que se produce en las zonas costeras a raíz del fenómeno de la inversión térmica. A consecuencia del diferencial térmico entre las masas de aire en contacto con el agua y las que están en contacto con la tierra, se originan unas brisas de dirección predominante [41]. A lo largo del día, las masas de aire próximas a la superficie terrestre se calientan gracias a la radiación solar, provocando su ascenso hacia cotas más elevadas. Este movimiento es aprovechado por masas de aire proveniente de las proximidades de la superficie del mar para ocupar dicho espacio. Según se acerca la noche este movimiento se invierte al producirse a mayor velocidad el enfriamiento del terreno, originando brisas procedente desde la superficie terrestre hacia la superficie acuosa.

En las últimas décadas han proliferado las investigaciones que tienen por objeto originar la circulación de cierta cantidad de masas de aire para su aprovechamiento energético. Estos son los casos de las chimeneas solares capaces de aprovechar la radiación solar, para originar cierta circulación eólica y dirigirla hacia la superficie de barrido de una turbina; o los generadores de conversión ciclónica capaces de reproducir vórtices de entidad con objeto de su aprovechamiento. En agosto de 1903 I. Cabanyes publicó un artículo titulado *Proyecto de motor solar* en la revista española Energía Eléctrica [42], donde describía la geometría y el funcionamiento de un sistema compuesto por un cilindro de sección recta construida en torno a una gran extensión descrita por el autor como *superficie de caldeo*. Sin que

tuvieran conocimiento de la publicación de Cabanyes, a principios de los ochenta ingenieros alemanes proyectaron una chimenea solar construida en la localidad de Manzanares [43, 44]. Su altura era de 194.6 m y el colector superaba los 240 m. de diámetro.

Este sistema se fundamenta en el efecto invernadero que se produce en el interior del colector. Su cubierta transparente permite que se produzca el calentamiento de las masas de aire presentes gracias a la radiación solar, promoviendo el movimiento interior con dirección hacia la chimenea en la cual se disponen una o varias turbinas eólicas. Alrededor de esta invención se han sumado numerosas actualizaciones, la mayoría teniendo como objeto el incremento de la eficiencia de la producción eléctrica, en particular la mejora del aprovechamiento térmico en

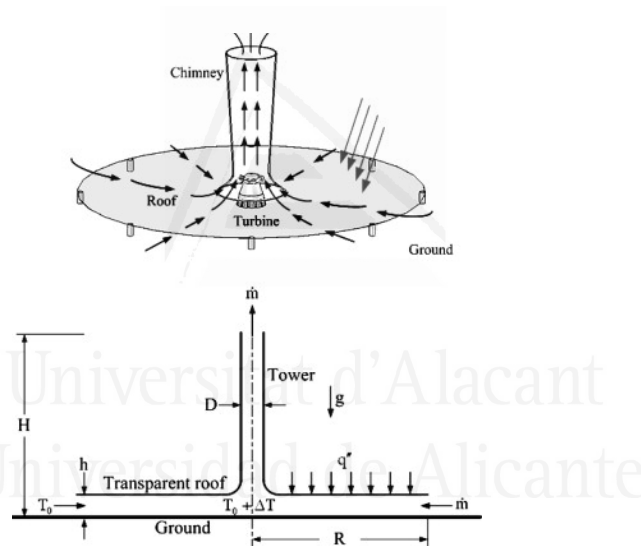


Figura 1.4: Funcionamiento esquemático de la chimenea solar.

el interior del colector y reducción de las pérdidas suscitadas en la circulación eólica [45–51]. La implantación de estas megainstalaciones capaces de producir cientos de MW de electricidad alcanzando los 1000 m. de torre y diámetros de colector de 7 km, queda limitada a planicies con un clima homogéneo y elevada absorción solar [52–54]. Los desiertos se presentan como terrenos especialmente indicados para este tipo de sistemas, siendo varios los proyectos emprendidos o en fase de estudio, casos de Mildura (Australia), Arizona (Estados Unidos), Quinghai o Shangai (China), Atacama (Chile) o en varios países africanos.



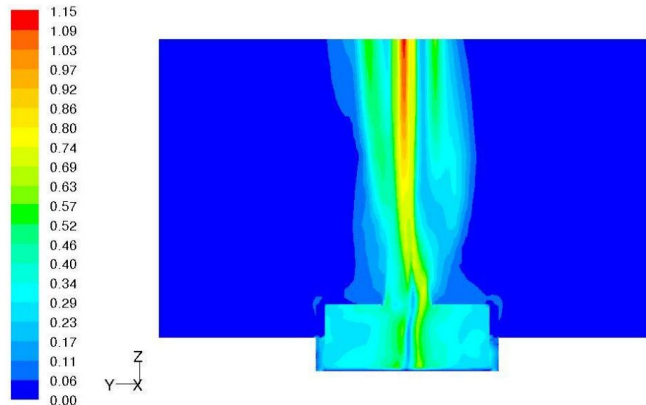


Figura 1.5: Contorno de velocidad de la simulación CFD practicada a un prototipo de conversión ciclónica.

Los conocidos como generadores de conversión ciclónica también forman parte de los sistemas que se fundamentan en la concentración de flujo eólico para su aprovechamiento energético. La geometría de estos sistemas está diseñada para generar vórtices en su interior de los cuales poder extraer su energía [55, 56]. Estos generadores pueden generar alrededor de 200MW de electricidad alcanzando alturas próximas a los 100m y diámetros de 200m.

Las turbinas eólicas son los sistemas de aprovechamiento de las corrientes eólicas con mayor cuota de implantación. Su rendimiento viene dado por el coeficiente de potencia, formulado mediante la expresión 1.1,

$$C_p = \frac{N}{P} \quad (1.1)$$

siendo  $N$  la potencia eléctrica generada por la turbina y  $P$  la potencia eólica de impulsión. Hace unas décadas, el investigador alemán A. Betz [57] presentó su teoría del aprovechamiento eólico, en la cual establecía el rendimiento máximo de las turbinas en torno al 59.5% de la potencia eólica. En posteriores estudios se ha comprobado que este valor es menor al tener en cuenta el rendimiento de los numerosos componentes que incluye una turbina: palas, caja multiplicadora, transformador, mecanismos de control, etc. V.L. Okulov y J.N. Sørensen [58] realizaron el cálculo de  $C_p$  en función a la configuración particular del rotor, reduciendo en la mayoría de casos el rendimiento a obtener. Para una de las configuraciones más comunes, el rotor tripala de eje horizontal, el rendimiento aerodinámico máximo se sitúa en el orden del 50% sobre la potencia del viento.

Las investigaciones centradas en la mejora del rendimiento de las turbinas

eólicas se orientan en dos grandes vías. La primera engloba aquellos trabajos destinados a optimizar el rendimiento particular de los componentes integrantes del sistema mecánico. Este grupo comprende investigaciones tales como el trabajo de R. K. Singh et al. [59, 60] desarrollando una sección aerodinámica capaz de optimizar la sustentación generada a reducidas velocidades del orden de 3-7m/s, obteniendo un mayor coeficiente de potencia. Otros trabajos ilustrativos de esta vía se centran en mejorar la eficiencia de los componentes mecánicos encargados de la conversión de la energía eólica en energía eléctrica [61–64], la utilización de nuevos materiales para el diseño estructural, etc.

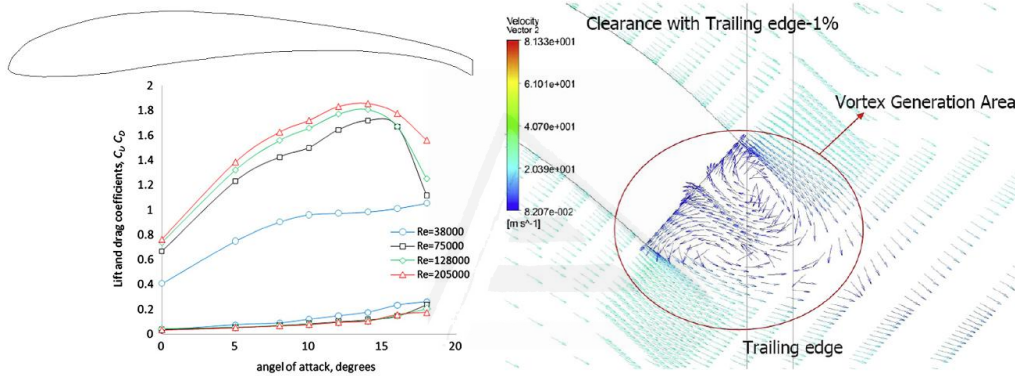


Figura 1.6: Diseño y características del perfil AF300 desarrollado por R.K. Singh.

La segunda vía engloba el tratamiento de la circulación eólica, con el objeto de mejorar las características del viento antes de que se produzca la incidencia con las palas de la turbina. La potencia eólica de impulsión se describe mediante la expresión 1.2,

$$P = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (1.2)$$

siendo  $\rho$  la densidad del aire,  $S$  la superficie de barrido de la turbina y  $v$  la velocidad del viento. **La dependencia cubica de la velocidad justifica que desde hace unos cuarenta años se venga investigando diseño de estructuras complementarias incorporadas a la turbina eólica con el propósito de mejorar sus prestaciones a partir del incremento de la velocidad de circulación del viento.**

---

### 1.3. Estudio del estado del conocimiento

A finales de los años setenta R. Oman y K. Foreman presentaron un accesorio incorporado a una turbina de eje horizontal capaz de mejorar su rendimiento potencial [65–67]. Este prototipo tiene su origen en los planteamientos iniciales de G.M. Lilley y W.J. Rainbird a mediados de los años cincuenta [68].

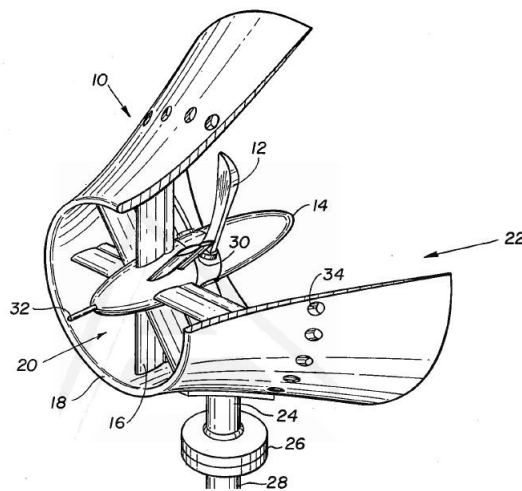


Figura 1.7: Perspectiva del prototipo de K. Foreman y R. Oman.

El modelo consiste en una geometría de cono truncado hueco y secciones rectas incorporando la sección de menor superficie sobre la zona de rotación del aerogenerador. Esta disposición provoca un incremento instantáneo de la velocidad eólica, mientras la parte posterior facilita la salida ordenada del flujo minimizando los efectos turbulentos.

Son varios los modelos evolucionados a partir de esta geometría. [69–71]. Uno de los prototipos que ha obtenido mejores resultados es el diseñado por Y. Ohya y T. Karasudani [70, 72]. Sus investigaciones se han centrado tanto en la mejora de la entrada de flujo eólico como en la optimización de su sección longitudinal. En la figura 1.8 se recogen varias de las secciones ensayadas en túnel de viento, mientras que en la tabla 1.3. se detalla la relación longitud/diámetro, y el parámetro  $\mu$  que relaciona la superficie de salida y entrada. Los resultados muestran que la configuración con mejores prestaciones en relación al coeficiente de potencia es la sección *Cii*.

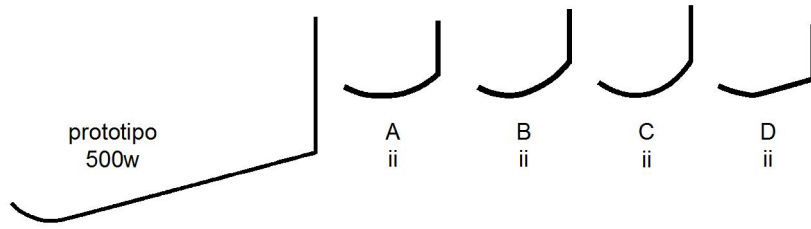


Figura 1.8: Secciones de prototipos de concentración eólica para turbinas de eje horizontal.

Tabla 1.3. Parámetros geométricos de los distintos prototipos

parámetro	prototipo	A ii	B ii	C ii	D ii
$Lt/D$	1.470	0.225	0.221	0.221	0.225
$\mu$	2.345	1.173	1.288	1.294	1.119

Tabla 1.3: Parámetros geométricos de los prototipos diseñados por Y. Ohya et al.

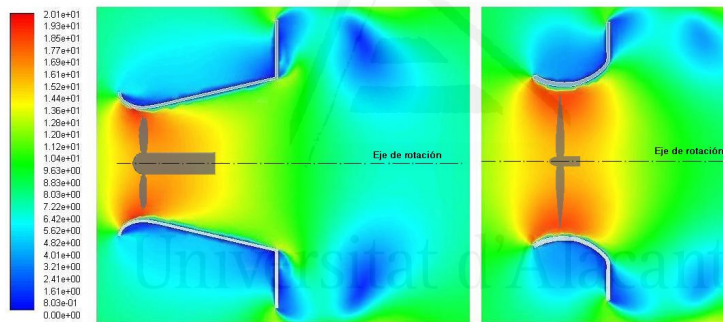


Figura 1.9: Simulación del prototipo inicial y el modelo Cii de concentración eólica diseñados por Y. Ohya et al.

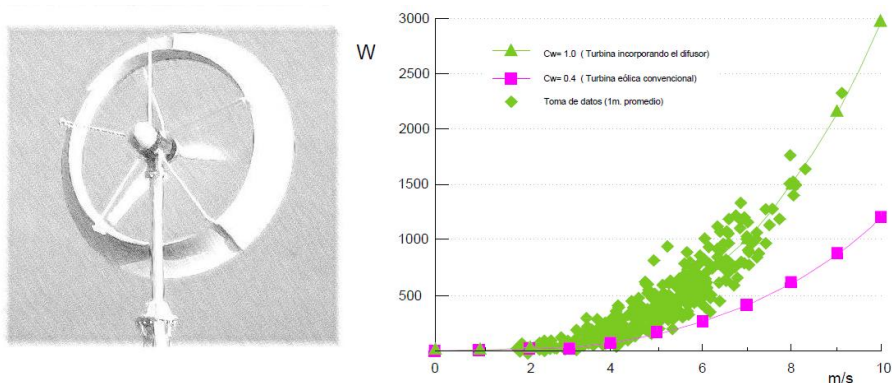


Figura 1.10: Potencia eléctrica generada en relación la velocidad del viento.

La incorporación del prototipo en diversas zonas de la ciudad japonesa de Fukuoka confirmaron el incremento de potencia eléctrica generada en comparación al rendimiento obtenido por una turbina sin dicho accesorio. En la figura 1.9 se muestra el resultado de la simulación mediante software CFD del prototipo inicial y de la actualización *Cii*, mientras la figura 1.10 se muestran la potencia eléctrica generada en condiciones reales de viento [72, 73].

El prototipo Vortec 7 fue desarrollado por investigadores neozelandeses en 1997 incorporado en una turbina de eje horizontal de 7.3 m [71, 74]. En la figura 1.11 se recoge la geometría de este modelo inspirado en el modelo inicial de K. Foreman y R. Oman.

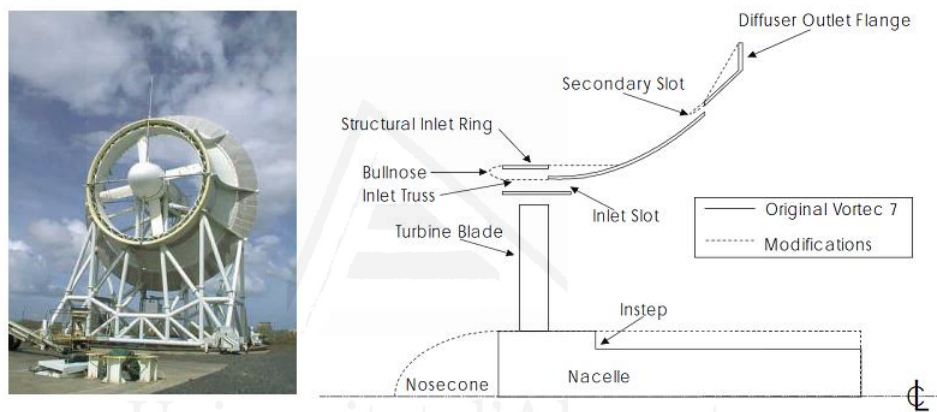


Figura 1.11: Vista general del prototipo Vortec 7.

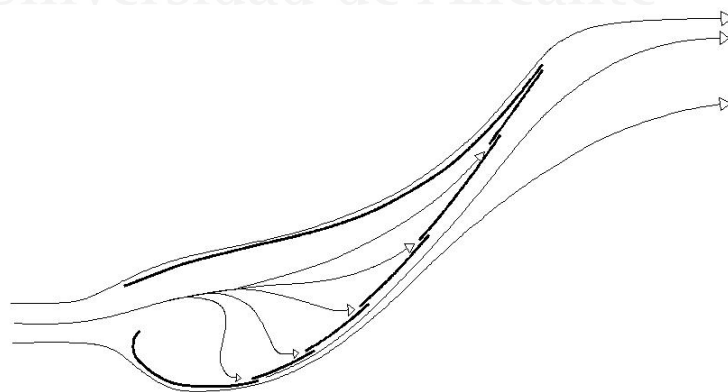


Figura 1.12: Detalle de la fragmentación de tramos en la mitad superior del Vortec 7.

Una de las actualizaciones realizadas de mayor interés es la modificación

de su sección inicial con objeto de minimizar la capa límite desarrollada. Inicialmente esta sección se proyectó como un elemento de trazo único, desarrollándose una capa turbulenta de elevado espesor sobre la superficie. En la modificación realizada se introdujeron varias ranuras convirtiendo el cuerpo inicial en una concatenación de superficies de menor extensión según se muestra en la figura 1.12.

Una de las investigaciones complementarias a la incorporación de estructuras de concentración eólica en pequeñas turbinas de eje horizontal, ha sido la realizada por T.Y. Cheng et al. [75] con objeto de analizar el comportamiento de estos elementos en relación a la superficie de barrido de los álabes de la turbina. Su geometría se caracteriza por una sección cónica de 30° de inclinación y una profundidad de 10 cm a partir de la circunferencia de entrada de flujo con diámetro de 30 cm. La sección de expulsión del flujo incorpora un reborde de sección recta de 3 cm. de longitud. En el diseño de las palas se ha utilizado un modelo NACA-4415 para definir su sección, con longitudes de cuerda de 2.15 cm incrementándose hasta 3.31 cm en el extremo de punta. La superficie de cada pala ocupa un 5% de la superficie de barrido. Los resultados muestran como su inclusión mejora las prestaciones en turbinas que ocupan una menor superficie de barrido.

Se puede considerar el prototipo de K. Foreman y R. Oman como el punto de partida en la era moderna de la incorporación de accesorios concentradores de flujo en las turbinas eólicas, conocidos como sistemas DAWT (*Diffuser Augmented Wind Turbine*). Si nos remontamos varios siglos atrás, los molinos persas incluían una estructura perimetral de adobe y barro, para proteger el artefacto eólico dispuesto en su interior. En la parte inferior se incluía una estancia donde se encontraba la rueda de molido. La estructura de adobe tenía una abertura longitudinal en la cara perpendicular a la dirección predominante del viento, y en la parte posterior se ejecutaba una abertura de mayor dimensión para que el viento continuase su curso.

Estos molinos eran característicos de la península del Sijistán, en la actualidad un territorio situado entre Irán y Afganistán. Según recoge J. Caro Baroja, los historiadores R. Blanchard y S. Hedin estimaban que la velocidad de los vientos superaban los 100 km/h con facilidad [76, 77] y con un rango de circulación predominante. Estos fenómenos comenzaban entre los meses de mayo y junio, prolongándose alrededor de ciento veinte días hasta finales de septiembre.

La inclusión de la estructura producía efectos asociados a la protección del artefacto eólico. El paso de viento a través de la abertura de ataque incrementaba la velocidad de circulación una vez incidía en las aspas. En

---

complemento, la estructura impedía que el viento incidiera contrariamente al giro del molino, un efecto que reforzaba considerablemente tanto la rotación como la integridad estructural del artefacto eólico. En la figura 1.13 se ilustra uno de estos molinos persas, presentando una estructura singular en base a las distintas descripciones de los historiadores que relatan este elemento como *generalmente una torre cuadrangular*.

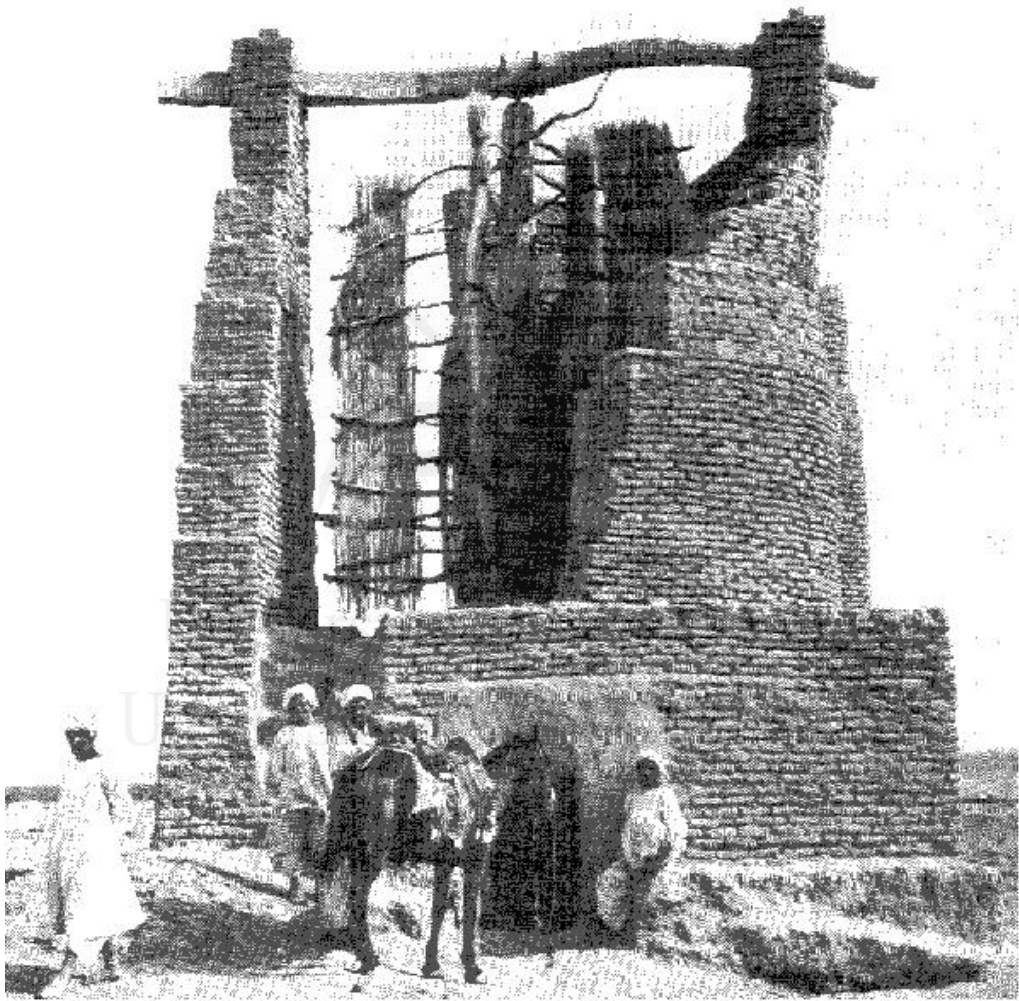


Figura 1.13: Perspectiva del molino persa vista desde la abertura de mayor dimensión.

En este caso la torre se compone de un muro longitudinal frente a otro muro con una geometría semicircular, disponiendo entre ambos elementos las distintas aberturas de entrada y salida de la corriente eólica. La justificación de este diseño se encuentra en la adaptación que realiza el viento en circulación libre una vez acomete el volumen del molino y su estructura

de protección. Este comportamiento provoca que en la esquina más alejada de la cara donde se sitúa la abertura de menor dimensión, se produzcan velocidades especialmente elevadas acelerando su erosión. El diseño curvo es una solución para paliar este fenómeno incrementando su vida útil.

En el caso del molino persa, el artefacto eólico rotaba alrededor de un eje vertical. En la actualidad, son varios los modelos de turbinas eólicas en relación a la geometría proyectada en torno al eje de rotación:

- Darrieus: Aerogenerador patentado por G. Darrieux a principios de los años treinta, constituido en general por tres palas arqueadas con principio y fin en el propio mástil, y una estructura a modo de trípode [78].
- Savonius: Aerogenerador diseñado por S. Savonius compuesto por dos semicilindros enfrentados el uno del otro, dispuestos alrededor de un eje vertical. Su geometría puede presentar distintas modificaciones como se ilustra en la figura 1.14, siendo usual la inclusión de un tercer semicilindro, modificación con la distancia de las palas con el eje, sustitución del semicilindro por otro tipo de geometría de incidencia, etc.
- Giromill: Rotor con una estructura alrededor del eje vertical que sujeta las palas dispuestas a una determinada distancia. En los últimos años son varios los modelos que incluyen palas inclinadas con cierta curvatura.

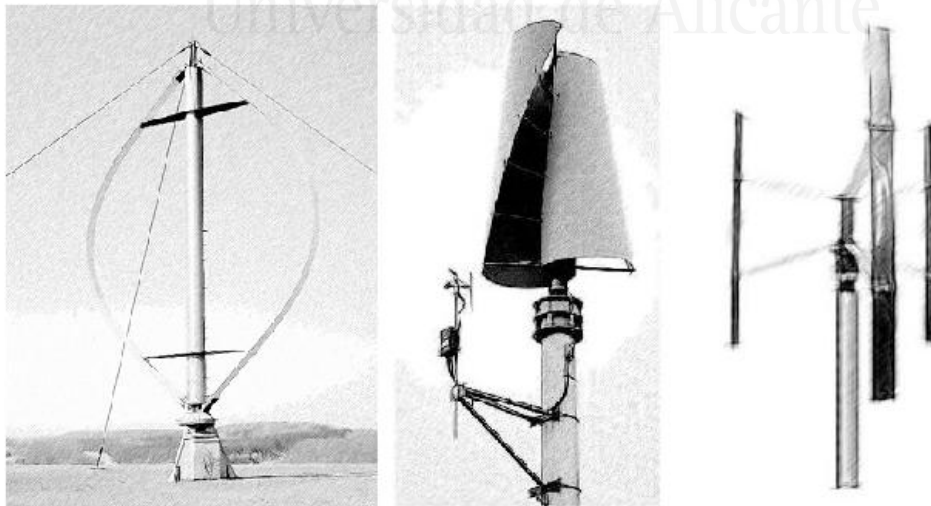


Figura 1.14: Vista general de un aerogenerador Darrieus, Savonius y Giromill.



Son especialmente escasas las estructuras de concentración eólica diseñadas para rotores de eje vertical. Recientemente R. Nobile et al. [79] presentaron un modelo compuesto por ocho secciones modelo NACA 0018 erigidas perpendicularmente sobre un anillo con superficie inclinada circunscribiendo la turbina. La sección aerodinámica tiene una cuerda de 100 cm, espesor de 18 cm y una altura de 260 cm. La dimensión entre los centros de cuerdas opuestas es de 550 cm. Estas dimensiones se justifican debido al propósito de la investigación, la instalación de dicho sistema de microgeneración eólica en edificios altos con objeto de generar una potencia entre 5 y 10 kW.

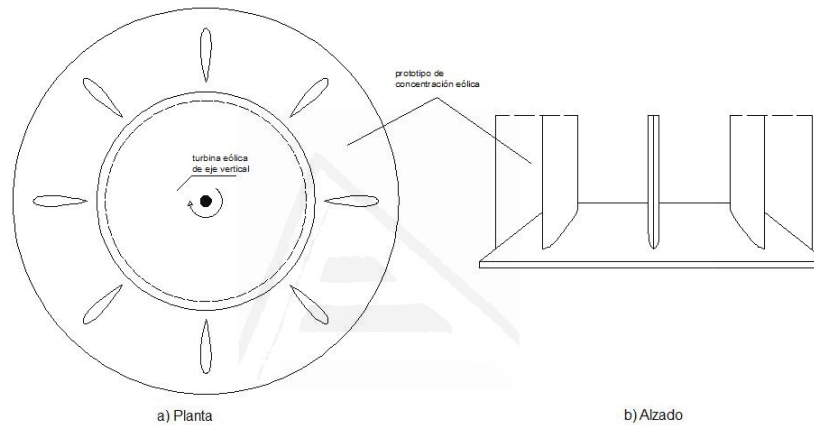


Figura 1.15: Prototipo de concentración eólica para aerogenerador de eje vertical proyectado por R. Nobile et al.

Los resultados de las primeras simulaciones se muestran en la figura 1.16.

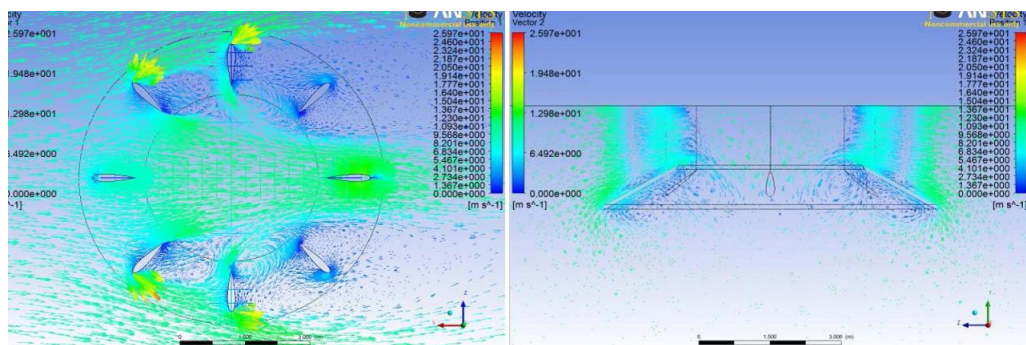


Figura 1.16: Simulación numérica CFD del prototipo inicial diseñado por R. Nobile et al.

En ensayos en tunel del viento, la introducción de la interfaz perimetral

produjo un incremento del  $C_p$  alrededor del 30-35 % respecto al rendimiento potencial de la turbina.

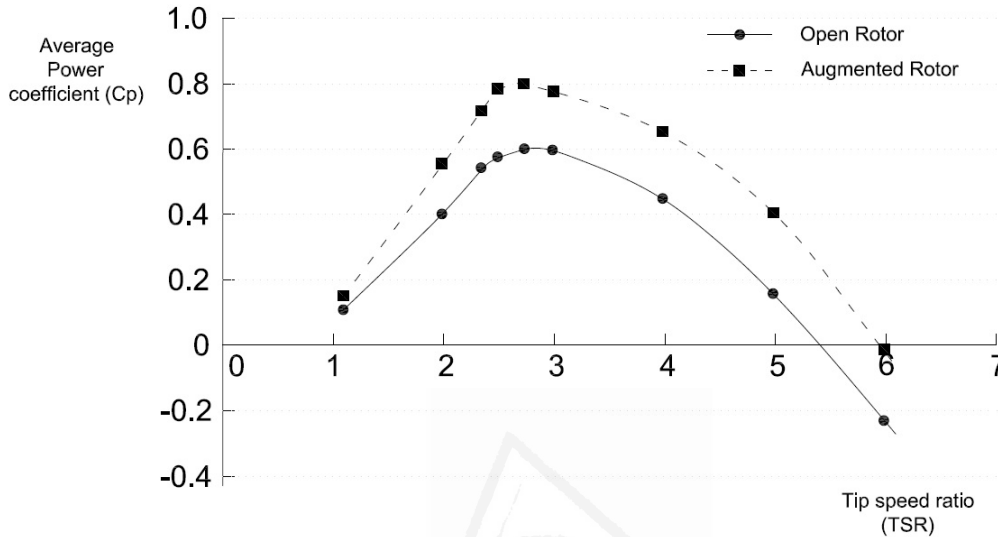


Figura 1.17: Coeficiente de potencia en relación al TSR de la interfaz integrada en el rotor en comparación al rendimiento específico de la turbina.

La incorporación de sistemas de microgeneración eólica en volúmenes arquitectónicos es pequeña, si se compara con los sistemas de microgeneración solar o sistemas alimentados por biomasa. La naturaleza turbulenta e intermitente de las corrientes circulantes próximas a la superficie queda acentuada debido al efecto pantalla originado por la concentración urbana. La integración de estos sistemas en el entramado urbano queda reservado a equipamientos o volúmenes constructivos instalados en espacios abiertos [80], y edificaciones de cierta altura en los cuales las consecuencias de estos efectos sea residual y la acción eólica incida de notable manera sobre su estructura. Una de las primeras investigaciones en este ámbito es el sistema conocido como *Crossflex*, desarrollada por T. Sharpe y G. Proven [81]. El sistema está compuesta por turbinas de eje vertical tipo Darrieus las cuales son incorporadas a las esquinas, crestas y puntos singulares de edificios con cierta altura mediante una estructura de sujeción *ad-hoc*. Este sistema trata de aprovechar la aceleración que se produce en la circulación eólica una vez se adapta al volumen constructivo.

Los ensayos realizados se han realizado en una turbina de altura 2.73m y diámetro de 2.43m, siendo la longitud del perfil de 3.55m de sección simétrica

y cuerda 7 cm. Con corrientes eólicas constantes en torno a velocidades entre 6 y 10 m/s, el sistema *Crossflex* es capaz de alcanzar las 450 rpm aproximándose a generar 1kW de potencia, umbral de entrega del sistema.

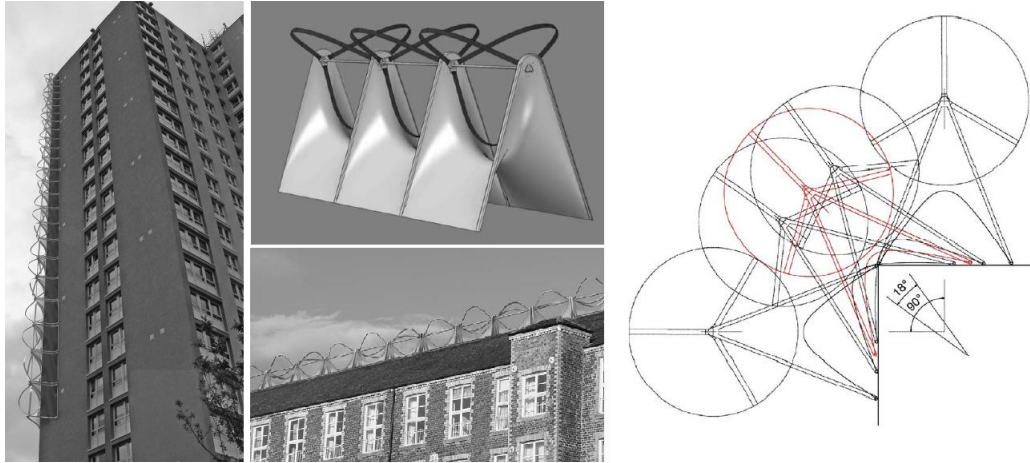


Figura 1.18: Solución *Crossflex* incorporada a las aristas verticales y crestas de los edificios.

En 2010 se finalizaron las obras de la *Strata Tower*, primer rascacielos en incorporar turbinas eólicas capaces de producir alrededor del 8% de la electricidad demandada por sus usuarios. Otro ejemplo es el rascacielos *World Trade Center* en Bahrein, en la actualidad en construcción y que incorpora en su diseño tres turbinas eólicas de eje horizontal. La integración de turbinas en rascacielos es una buena alternativa para conseguir corrientes eólicas de mayor uniformidad y velocidad de circulación. W.T. Chong [82,83] ha llevado a cabo varios estudios sobre la incorporación de una interfaz en una turbina de eje vertical en el caso de un rascacielos.

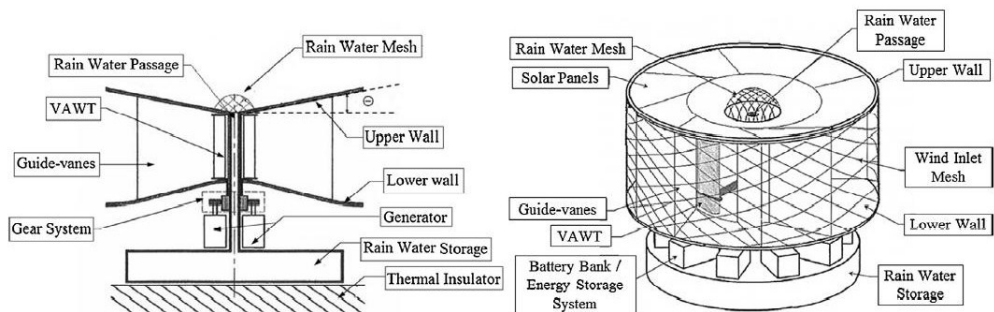


Figura 1.19: Sección y perspectiva del prototipo de concentración eólica para turbina de eje vertical diseñado por W.T. Chong et al.

La geometría se compone de varias superficies dispuestas para la canalización de las corrientes eólicas y dos grandes aberturas opuestas a las anteriores que facilitan la salida de la corriente eólica. Esta geometría se completa con dos discos acoplados en cada uno de los extremos, uno de los cuales está preparada para la recogida de aguas pluviales. Los resultados obtenidos en túnel de viento muestran como la incorporación de la interfaz en la turbina eólica incrementa la potencia eléctrica en 3.48 veces respecto al funcionamiento exclusivo de la turbina eólica.

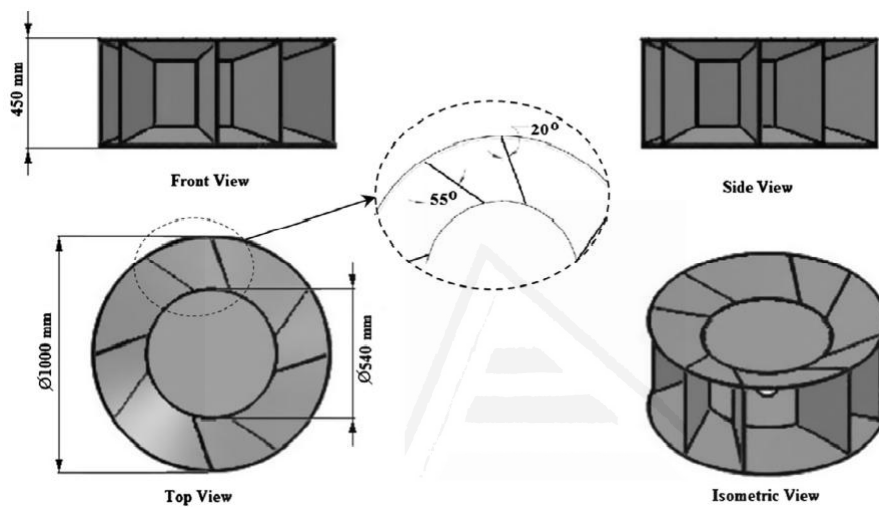


Figura 1.20: Varias secciones de la arquitectura interior del prototipo diseñado por W.T. Chong et al.

Anteriormente se recogían varios ejemplos de instalaciones capaces de generar la circulación de masas de aire para su posterior aprovechamiento energético. A menor escala, W.T. Chong et al [84] han desarrollado un sistema capaz de reciclar las corrientes de aire expulsadas a través de las torres de refrigeración. Sobre la maquinaria instalada en las cubiertas de los grandes edificios, se dispone una estructura compuesta por dos turbinas de eje vertical y unos paneles capaces de concentrar y dirigir el flujo eólico expulsado de la maquinaria de refrigeración. Los resultados de los ensayos realizados concluyen con la posibilidad de recuperar el 13 % de la energía consumida por este tipo de instalación.

Estos proyectos e investigaciones muestran el potencial existente en la integración de sistemas de microgeneración eólica en edificios de gran altura. Los avances en el desarrollo de esta tecnología posibilita que las edificaciones actuales y futuras puedan ser proyectadas a partir de su capacidad para generar la energía necesaria para suplir la demanda de los usuarios. Ello

---

unido a las distintas técnicas para la racionalización del consumo energético (diseño bajo soluciones pasivas, implementación de soluciones domóticas para el control y monitorización del gasto, etc.) facilita el diseño de volúmenes arquitectónicos autónomos en términos energéticos.

## 1.4. Objetivos

En base a la hipótesis inicial, los siguientes pasos se establecerán en función del método científico y las distintas fases que lo comprenden. La primera fase se refiere a la enunciación empírica de la hipótesis y el conocimiento que lleva aparejada esa enunciación. Esta tarea facilitará la aparición de nuevos objetivos e información fundamental para proponer una definición válida a modo de especificación formal, recogiendo el compendio de los objetivos extraídos de la hipótesis y en el análisis realizado en el estado del conocimiento. Seguidamente, basándose en dicha definición formal se elaborará una propuesta de solución, también en términos formales para, basándose en ella, proponer una solución estructural. Esta última será la que se desarrolle y verifique mediante simulación fluidodinámica computacional.

La actual investigación se centra en el aprovechamiento de las corrientes eólicas sobre la superficie terrestre para la generación eléctrica para el uso doméstico y de pequeño equipamiento de servicio. Estas corrientes quedan comprendidas en la conocida como capa límite terrestre. La complejidad para determinar el límite de esta capa [85] recomienda definir un umbral máximo de circulación en el cual contextualizar su estudio. Por ello, esta investigación trata el aprovechamiento las brisas eólicas circulantes sobre la superficie terrestre próximas a 10m., en línea con la altura promedio de los volúmenes de tipología rural, instalaciones industriales, docentes, auxiliares, de servicio y mantenimiento.

***El objetivo fundamental del presenta trabajo es formalizar el método para la caracterización de una interfaz incorporada sobre un aerogenerador de eje vertical.*** Su propósito es suplir la baja densidad energética de las brisas circulantes sobre la superficie terrestre mediante su captación y concentración, consiguiendo un incremento significativo de la velocidad antes de ser inyectada de manera eficiente sobre la superficie de barrido de la turbina. La interfaz se comportará como un elemento concentrador eólico diseñado para optimizar el aprovechamiento de las corrientes con independencia de la dirección de éstas. Los contextos de aplicación son numerosos, tales como viviendas aisladas, edificaciones agropecuarias, instalaciones industriales, construcciones de

servicio, auxiliares, de control técnico, mantenimiento, etc. así cualquier volumen arquitectónico ubicado en un entorno similar y que precise electricidad para su correcta operatividad.

***El segundo objetivo será la aplicación práctica del procedimiento, es decir, el modelado de una interfaz en función a unas determinadas determinadas características del aerogenerador de eje vertical, las condiciones estructurales y los requisitos energéticos del volumen arquitectónico sobre el cual se realiza la implantación.***

El paso inicial a la hora de comenzar a precisar el método de caracterización es la definición de una hipótesis inicial, la cual delimite el objeto de la problemática a tratar. En nuestro caso, esta hipótesis se describe de la siguiente manera: *"diseño de un sistema de microgeneración eólico de uso doméstico capaz de suplir la baja densidad energética y naturaleza turbulenta de las microcorrientes, concentrándolas de tal manera se consiga aumentar su velocidad para su aprovechamiento energético"*.

Esta descripción del problema arroja dos objetivos iniciales a satisfacer. El primero referido a la capacidad productiva del sistema para el aprovechamiento energético de las brisas,

***O1.- Óptima transformación de la cinética eólica en energía eléctrica.***

y el segundo, a la capacidad del sistema para adaptarse a la naturaleza turbulenta, intermitente y de baja energía de las corrientes eólicas sobre las cuales se centra la investigación.

***O2.- Óptimo funcionamiento con independencia de la dirección eólica.***

Los sistema de microgeneración aglutinan un amplio conjunto de arquitecturas particulares que tienen como propósito la transformación de la energía proveniente de un determinado tipo de fuente para su consumo doméstico. En el caso actual se delimita la actuación a los sistemas de microgeneración eólica, en concreto a las estructuras anexas a estos sistemas capaces de mejorar sus prestaciones funcionales. La actual investigación se sitúa en este ámbito teniendo como objeto profundizar en la premisa de la concentración eólica para alcanzar un aprovechamiento determinado de las brisas circulantes sobre la superficie terrestre. Este motivo justifica una separación inicial del sistema de microgeneración propiamente dicho y el desarrollo de una arquitectura afín al objeto propuesto. Esta primera

---

aproximación describiría esta arquitectura como: "*sistema de uso doméstico compuesto un subsistema mecánico capaz de transformar la cinética eólica en energía eléctrica, y una estructura que satisfaga la concentración del flujo dirigida hacia el sistema mecánico*".

El fundamento de esta estructura reside en dos cualidades complementarias: la capacidad de concentrar y direccionar el flujo eólico hacia una región de incidencia previamente delimitada. Tales cualidades precisan de un tramo material compuesto al menos por dos superficies opacas capaces de confinar cierta cantidad de flujo. En el estado del conocimiento se han ilustrado prototipos que incorporaban estructuras convergentes alcanzando interesantes incrementos en la velocidad de circulación previa a la incidencia en el sistema mecánico. En síntesis, el objetivo fundamental de la estructura concentradora a modelar es:

*O3.- Incremento de la velocidad de circulación previa a la incidencia en el sistema mecánico.*

Con anterioridad se hacía mención a los esfuerzos viscosos que se producen en las superficies materiales inmersas en la circulación de un flujo. Estos esfuerzos son los responsables de la formación de una capa turbulenta localizada en nuestro caso particular, tanto en las superficies de la estructura concentradora como en la superficie aerodinámica de las palas de rotación del sistema mecánico. Lo deseable es minimizar estos fenómenos con el fin de conseguir un flujo uniforme y controlable. Por tanto, la arquitectura de la interfaz se caracterizará por tratar de alcanzar estos requisitos.

*O4.- Uniformidad en la inyección del flujo hacia la superficie de incidencia.*

Una incidencia defectuosa sobre las palas en constante rotación alrededor de un eje determinado facilita el desarrollo de efectos turbulentos nocivos para el mantenimiento de la uniformidad pretendida. Ello justifica incorporar el siguiente objetivo para la definición de la arquitectura:

*O5.- Ausencia de efectos turbulentos en el curso de la inyección del flujo al sistema mecánico.*

En lo que respecta a la disposición del sistema resultante en el volumen arquitectónico caben dos posibilidades: implantación próxima a la edificación o integración en el propio volumen arquitectónico. El primer caso restringe

la instalación a aquellos volúmenes arquitectónicos que cuenten con una parcela anexa, mientras en el caso de una implantación integrada en el propio volumen, la anterior restricción carece de fundamento. Una de las ventajas asociadas a esta posibilidad es la supresión de la torre o mástil de sustentación del sistema mecánico en beneficio del uso de la propia estructura arquitectónica, con el consiguiente ahorro de costes y disminución de la siniestralidad achacable a tal elemento [86].

#### *O6.- Integración en el volumen constructivo.*

La integración influye de manera directa en la resolución de determinadas prestaciones características de la estructura concentradora y de la edificación. Estas prestaciones se pueden clasificar en tres grupos:

- Relativas a la estructura concentradora: Este conjunto engloba aquellas cualidades características del elemento en sí, tales como el peso, resistencia estructura frente a la acción de cargas determinadas, geometría, etc.
- Relativas al volumen arquitectónico: Este conjunto engloba aquellas cualidades de la edificación necesarias para completar un integración efectiva. La cubierta es el lugar previsto para el emplazamiento del dispositivo con independencia de la tipología del volumen edificatorio. Esta ubicación resulta favorable para la captación de las brisas sin que se vea afectada la habitabilidad de la edificación y la funcionalidad del equipamiento de servicio. Para que este espacio sea apto para la instalación del sistema de microgeneración, son necesarias varias acciones para alcanzar un ordenamiento constructivo que permita salvaguardar cuestiones estructurales o posibles incompatibilidades con elementos pertenecientes a otro tipo de instalaciones (ventilación, antena de TV, sistemas solares, etc).
- Relativas a la integración: Este conjunto engloba aquellas tareas de análisis del comportamiento tanto del sistema de microgeneración eólico una vez incorporado, como en lo que se refiere al ámbito estructural, habitabilidad o confort interior de la edificación.

En síntesis, se puede profundizar en la definición de objetivos a alcanzar tales como:

#### *O7.- Estructura resistente y de reducido peso.*

#### *O8.- Durabilidad ante climatología adversa.*



---

O9.- *Adaptabilidad a condiciones extremas eólicas.*

O10.- *Accesibilidad a las distintas partes que compongan la estructura.*

O11.- *Monitorización de los parámetros que definen el comportamiento del volumen arquitectónico resultante.*

La tabla 1.4 resume el resultado a alcanzar en el modelado del sistema, especificado formalmente de la siguiente manera:

*sistema de generación eléctrica de uso doméstico integrado en un volumen arquitectónico, compuesto por un sistema mecánico y una interfaz concentradora de flujo eólico, de materiales ligeros y elevada resistencia estructural, con partes dinámicas adaptables en función de las condiciones eólicas y equipado con circuitos electrónicos de control del comportamiento.*



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

**Tabla 1.4. Objetivos a satisfacer**

	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10	O11
Requerimientos	Óptima transformación cinética en movimiento circular	Óptimo funcionamiento con independencia de su dirección	Incremento de velocidad de circulación previa incidencia en el sistema mecánico	Uniformidad de inversión del tipo hacia la superficie de incidencia	Ausencia de efectos turbulentos alrededor de la rotación	Integración de la construcción	Estructura resistente y de reducido peso	Durabilidad ante climatología adversa	Adaptabilidad a condiciones extremas odicas	Accesibilidad a las distintas partes que compongan la estructura	Monitorización de los parámetros del volumen arquitectónico resultante
R1											
R2											
R...											
R...											
R...											
R...											
R...											
R...											
R...											
R...											
R...											

Tabla 1.4: Objetivos a satisfacer en el modelado del prototipo.

---

En resumen,

1. El interés por las energías renovables ha crecido progresivamente a tenor de la inversión destinada en esta última década a proyectos de I+D+i.
2. El sector eólico aparece como uno de los sectores con mayor inversión destinada y creciente capacidad productiva. A fecha de 2012 se estiman que las turbinas de baja han producido 678 MW de electricidad, un 18 % con respecto a 2011, situándose como objetivo global 3GW de producción en 2020.
3. Los países líderes en producción energética (China, EE.UU, Reino Unido, Canadá y Alemania) apuestan por el desarrollo de sistemas de microgeneración eólica con destino a satisfacer la demanda suscitada en particular en el ámbito rural.
4. La implementación de accesorios de concentración eólica consigue importantes mejoras en las prestaciones de las turbinas eólicas de baja potencia, en especial en el incremento en la potencia eléctrica generada.
5. El ámbito de la concentración eólica aparece como un campo de reciente investigación, limitándose el conocimiento actual al desarrollo de unos pocos prototipos.
6. Hasta la fecha, la inclusión de estos sistemas en volúmenes urbanos se limita a recientes proyectos de edificación abierta, en especial a rascacielos.
7. Esta investigación se enmarca en el aprovechamiento de las corrientes eólicas sobre la superficie terrestre para la generación eléctrica para uso doméstico.

## Bibliografía

- [1] Salvador Rueda Palenzuela. La ciudad compacta y diversa frente a la conurbación difusa. *Boletín CF+ S, Madrid, Ministerio de Fomento*, 2003.
- [2] Edward L Glaeser and Matthew E Kahn. Sprawl and urban growth. *Handbook of regional and urban economics*, 4:2481–2527, 2004.
- [3] Reinhard Madlener and Yasin Sunak. Impacts of urbanization on urban structures and energy demand: What can we learn for urban energy planning and urbanization management? *Sustainable Cities and Society*, 1(1):45–53, 2011.
- [4] DW Jones. Urbanization and energy. *Encyclopedia of energy*, 6(1-6):329–335, 2004.
- [5] John I Carruthers and Gudmundur F Ulfarsson. Urban sprawl and the cost of public services. *Environment and Planning B*, 30(4):503–522, 2003.
- [6] Robert W Burchell, George Lowenstein, William R Dolphin, Catherine C Galley, Anthony Downs, Samuel Seskin, Katherine Gray Still, and Terry Moore. Costs of sprawl–2000. 2002.
- [7] Roberto Camagni, Maria Cristina Gibelli, and Paolo Rigamonti. Urban mobility and urban form: the social and environmental costs of different patterns of urban expansion. *Ecological economics*, 40(2):199–216, 2002.
- [8] International Cement Review. The global cement report 10th edition. 2013.
- [9] Edgar Morin. La epistemología de la complejidad. *Gazeta de antropología*, (20):10, 2004.
- [10] Stéphane Hallegatte and Jan Corfee-Morlot. Understanding climate change impacts, vulnerability and adaptation at city scale: an introduction. *Climatic Change*, 104(1):1–12, 2011.
- [11] Harriet Bulkeley, V Castán Broto, Mike Hodson, and Simon Marvin. Cities and the low carbon transition. *Europ. Finan. Rev*, pages 24–27, 2011.
- [12] Vanesa Castán Broto and Harriet Bulkeley. A survey of urban climate change experiments in 100 cities. *Global Environmental Change*, 23(1):92–102, 2013.
- [13] Benjamin K Sovacool and Marilyn A Brown. Twelve metropolitan carbon footprints: A preliminary comparative global assessment. *Energy policy*, 38(9):4856–4869, 2010.
- [14] Patricia Romero Lankao and Hua Qin. Conceptualizing urban vulnerability to global climate and environmental change. *Current opinion in environmental sustainability*, 3(3):142–149, 2011.
- [15] Elaine B Sharp, Dorothy M Daley, and Michael S Lynch. Understanding local adoption and implementation of climate change mitigation policy. *Urban Affairs Review*, page 1078087410392348, 2010.
- [16] Jungah Bae and Richard Feiock. Forms of government and climate change policies in us cities. *Urban studies*, 50(4):776–788, 2013.
- [17] Rachel M Krause. An assessment of the impact that participation in local climate networks has on cities implementation of climate, energy, and transportation policies. *Review of Policy Research*, 29(5):585–604, 2012.

- 
- [18] Edward L Glaeser and Matthew E Kahn. The greenness of cities: carbon dioxide emissions and urban development. *Journal of Urban Economics*, 67(3):404–418, 2010.
- [19] David Dodman. Urban form, greenhouse gas emissions and climate vulnerability. *Population Dynamics and Climate Change*, page 64, 2009.
- [20] Rachel M Krause. Symbolic or substantive policy? measuring the extent of local commitment to climate protection. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 29(1):46–62, 2011.
- [21] Mark Gottdiener and Leslie Budd. *Key concepts in urban studies*. Sage, 2005.
- [22] T Susca, SR Gaffin, and GR Dellosso. Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution*, 159(8):2119–2126, 2011.
- [23] Hashem Akbari and Steven Konopacki. Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies. *Energy Policy*, 33(6):721–756, 2005.
- [24] Stephanie Pincetl. Nature, urban development and sustainability—what new elements are needed for a more comprehensive understanding? *Cities*, 29:S32–S37, 2012.
- [25] Jan Minx, Giovanni Baiocchi, Thomas Wiedmann, John Barrett, Felix Creutzig, Kuishuang Feng, Michael Förster, Peter-Paul Pichler, Helga Weisz, and Klaus Hubacek. Carbon footprints of cities and other human settlements in the uk. *Environmental Research Letters*, 8(3):035039, 2013.
- [26] Jukka Heinonen and Seppo Junnila. A carbon consumption comparison of rural and urban lifestyles. *Sustainability*, 3(8):1234–1249, 2011.
- [27] Reid Ewing, Keith Bartholomew, Steve Winkelman, Jerry Walters, and Geoffrey Anderson. Urban development and climate change. *Journal of Urbanism*, 1(3):201–216, 2008.
- [28] Gerhard K Heilig. World urbanization prospects: the 2011 revision. *United Nations, Department of Economic and Social Affairs (DESA), Population Division, Population Estimates and Projections Section, New York*, 2012.
- [29] Virginia Sonntag-O’Brien Ulf Moslener Christine Grüning Angus McCrone, Eric Usher. Global trends in renewable energy investment 2014. 2014.
- [30] Anthony E Jones, Marty Irwin, and Afshin Izadian. Incentives for microgeneration development in the us and europe. In *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pages 3018–3021. IEEE, 2010.
- [31] Mohsen Fadaee Nejad, Mohd Amran Mohd Radzi, MZ Kadir, Hashim Hizam, et al. Hybrid renewable energy systems in remote areas of equatorial countries. In *Research and Development (SCORED), 2012 IEEE Student Conference on*, pages 11–16. IEEE, 2012.
- [32] D Saheb-Koussa, M Haddadi, and Belhamel. Economic and technical study of a hybrid system (wind–photovoltaic–diesel) for rural electrification in algeria. *Applied Energy*, 86(7):1024–1030, 2009.
- [33] Uwe Deichmann, Craig Meisner, Siobhan Murray, and David Wheeler. The economics of renewable energy expansion in rural sub-saharan africa. *Energy Policy*, 39(1):215–227, 2011.
-

- [34] Annabel Yadoo and Heather Cruickshank. The value of cooperatives in rural electrification. *Energy Policy*, 38(6):2941–2947, 2010.
- [35] P Díaz, CA Arias, R Peña, and D Sandoval. Far from the grid: A rural electrification field study. *Renewable Energy*, 35(12):2829–2834, 2010.
- [36] Charles Kirubi, Arne Jacobson, Daniel M Kammen, and Andrew Mills. Community-based electric micro-grids can contribute to rural development: evidence from kenya. *World development*, 37(7):1208–1221, 2009.
- [37] Tania Urmee, David Harries, and August Schlapfer. Issues related to rural electrification using renewable energy in developing countries of asia and pacific. *Renewable Energy*, 34(2):354–357, 2009.
- [38] K Kaygusuz. Energy services and energy poverty for sustainable rural development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2):936–947, 2011.
- [39] John Byrne, Aiming Zhou, Bo Shen, and Kristen Hughes. Evaluating the potential of small-scale renewable energy options to meet rural livelihoods needs: A gis-and lifecycle cost-based assessment of western china’s options. *Energy policy*, 35(8):4391–4401, 2007.
- [40] Sufang Zhang and Jianxun Qi. Small wind power in china: Current status and future potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5):2457–2460, 2011.
- [41] Erik T Crosman and John D Horel. Sea and lake breezes: a review of numerical studies. *Boundary-layer meteorology*, 137(1):1–29, 2010.
- [42] Isidoro Cabanyes. Proyecto de motor solar. *La Energia Eléctrica–Revista General de Electricidad y sus Aplicaciones*, 8:61–65, 1903.
- [43] W Haaf, K Friedrich, G Mayr, and J Schlaich. Solar chimneys part i: principle and construction of the pilot plant in manzanares. *International Journal of Solar Energy*, 2(1):3–20, 1983.
- [44] W Haaf. Solar chimneys: part ii: preliminary test results from the manzanares pilot plant. *International Journal of Sustainable Energy*, 2(2):141–161, 1984.
- [45] Guoliang Xu, Tingzhen Ming, Yuan Pan, Fanlong Meng, and Cheng Zhou. Numerical analysis on the performance of solar chimney power plant system. *Energy Conversion and Management*, 52(2):876–883, 2011.
- [46] Roozbeh Sangi, Majid Amidpour, and Behzad Hosseinizadeh. Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants. *Solar energy*, 85(5):829–838, 2011.
- [47] Kai Zhang, Xiaosong Zhang, Shuhong Li, and Geng Wang. Numerical study on the thermal environment of ufad system with solar chimney for the data center. *Energy Procedia*, 48:1047–1054, 2014.
- [48] EP Sakonidou, TD Karapantsios, AI Balouktsis, and D Chassapis. Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow. *Solar Energy*, 82(1):80–94, 2008.
- [49] Ramadan Bassiouny and Nader SA Korah. Effect of solar chimney inclination angle on space flow pattern and ventilation rate. *Energy and Buildings*, 41(2):190–196, 2009.

- 
- [50] Hermann F Fasel, Fanlong Meng, Ehsan Shams, and Andreas Gross. Cfd analysis for solar chimney power plants. *Solar Energy*, 98:12–22, 2013.
- [51] A Koonsrisuk, S Lorente, and A Bejan. Constructal solar chimney configuration. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(1):327–333, 2010.
- [52] Xiping Zhou, Fang Wang, Jian Fan, and Reccab M Ochieng. Performance of solar chimney power plant in qinghai-tibet plateau. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8):2249–2255, 2010.
- [53] P Cottam, P Duffour, and P Fromme. An analysis of an optimised solar thermal chimney for desert deployment. In *Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation-Proceedings of the 5th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, SEMC 2013*, pages 959–964, 2013.
- [54] Peng-hua Guo, Jing-yin Li, and Yuan Wang. Annual performance analysis of the solar chimney power plant in sinkiang, china. *Energy Conversion and Management*, 87:392–399, 2014.
- [55] Louis M Michaud. The atmospheric vortex engine. In *Science and Technology for Humanity (TIC-STH), 2009 IEEE Toronto International Conference*, pages 971–975. IEEE, 2009.
- [56] Diwakar Natarajan. Numerical simulation of tornado-like vortices. 2011.
- [57] Albert Betz. Die windmühlen im lichte neuerer forschung. *Naturwissenschaften*, 15(46):905–914, 1927.
- [58] Valery L Okulov and Jens N Sørensen. Refined betz limit for rotors with a finite number of blades. *Wind Energy*, 11(4):415–426, 2008.
- [59] Ronit K Singh, M Rafiuddin Ahmed, Mohammad Asid Zullah, and Young-Ho Lee. Design of a low reynolds number airfoil for small horizontal axis wind turbines. *Renewable energy*, 42:66–76, 2012.
- [60] Ronit K Singh and M Rafiuddin Ahmed. Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications. *Renewable Energy*, 50:812–819, 2013.
- [61] M Shahabi, M-R Haghifam, M Mohamadian, and SA Nabavi-Niaki. Microgrid dynamic performance improvement using a doubly fed induction wind generator. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 24(1):137–145, 2009.
- [62] Whei-Min Lin and Chih-Ming Hong. Intelligent approach to maximum power point tracking control strategy for variable-speed wind turbine generation system. *Energy*, 35(6):2440–2447, 2010.
- [63] Thanasis K Barlas and GAM Van Kuik. Review of state of the art in smart rotor control research for wind turbines. *Progress in Aerospace Sciences*, 46(1):1–27, 2010.
- [64] Ali M Eltamaly and Hassan M Farh. Maximum power extraction from wind energy system based on fuzzy logic control. *Electric Power Systems Research*, 97:144–150, 2013.
- [65] BL Gilbert and KM Foreman. Experiments with a diffuser-augmented model wind turbine. *Journal of Energy Resources Technology*, 105(1):46–53, 1983.
-

- [66] KM Foreman, B Gilbert, and RA Oman. Diffuser augmentation of wind turbines. *Solar Energy*, 20(4):305–311, 1978.
- [67] KM Foreman. Preliminary design and economic investigations of diffuser augmented wind turbines (dawt). *Final Report, 15 May 1979-31 Mar. 1980 Grumman Aerospace Corp., Bethpage, NY.*, 1, 1981.
- [68] GM Lilley and WJ Rainbird. A preliminary report on the design and performance of ducted windmills. 1956.
- [69] A Nasution and DW Purwanto. Optimized curvature interior profile for diffuser augmented wind turbine (dawt) to increase its energy-conversion performance. In *Clean Energy and Technology (CET), 2011 IEEE First Conference on*, pages 315–320. IEEE, 2011.
- [70] Yuji Ohya, Takashi Karasudani, Akira Sakurai, Ken-ichi Abe, and Masahiro Inoue. Development of a shrouded wind turbine with a flanged diffuser. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(5):524–539, 2008.
- [71] Derek Grant Phillips et al. *An investigation on diffuser augmented wind turbine design*. PhD thesis, ResearchSpace@ Auckland, 2003.
- [72] Yuji Ohya and Takashi Karasudani. A shrouded wind turbine generating high output power with wind-lens technology. *Energies*, 3(4):634–649, 2010.
- [73] Shuhei Takahashi, Yuya Hata, Yuji Ohya, Takashi Karasudani, and Takanori Uchida. Behavior of the blade tip vortices of a wind turbine equipped with a brimmed-diffuser shroud. *Energies*, 5(12):5229–5242, 2012.
- [74] DG Phillips, RGJ Flay, and TA Nash. Aerodynamic analysis and monitoring of the vortec 7 diffuser-augmented wind turbine. *Transactions of the Institution of Professional Engineers New Zealand: Electrical/Mechanical/Chemical Engineering Section*, 26(1):13, 1999.
- [75] TY Chen, YT Liao, and CC Cheng. Development of small wind turbines for moving vehicles: Effects of flanged diffusers on rotor performance. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 42:136–142, 2012.
- [76] Julio Caro Baroja. *Historia de los molinos de viento, ruedas hidráulicas y norias*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 1995.
- [77] Amin Saeidian, Mohammad Reza Bemanian, Ehsan Zamani, Mohammad Reza Pourjafar, and Mojtaba Gholi. A survey in sustainable design of iranian windmill technology in desert areas. *Elixir Int. J.*, (48), 2012.
- [78] Herbert J Sutherland, Dale E Berg, and Thomas D Ashwill. A retrospective of vawt technology. *Sandia Report, SAND2012-0304*, 2012.
- [79] Rosario Nobile, Maria Vahdati, Janet F Barlow, and Anthony Mewburn-Crook. Unsteady flow simulation of a vertical axis augmented wind turbine: a two-dimensional study. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 125:168–179, 2014.
- [80] L Chen, FL Ponta, and LI Lago. Perspectives on innovative concepts in wind-power generation. *Energy for Sustainable Development*, 15(4):398–410, 2011.



- 
- [81] Tim Sharpe and Gordon Proven. Crossflex: Concept and early development of a true building integrated wind turbine. *Energy and Buildings*, 42(12):2365–2375, 2010.
- [82] WT Chong, WP Hew, SY Yip, A Fazlizan, SC Poh, CJ Tan, and HC Ong. The experimental study on the wind turbines guide-vanes and diffuser of an exhaust air energy recovery system integrated with the cooling tower. *Energy Conversion and Management*, 87:145–155, 2014.
- [83] WT Chong, KC Pan, SC Poh, A Fazlizan, CS Oon, A Badarudin, and N Nik-Ghazali. Performance investigation of a power augmented vertical axis wind turbine for urban high-rise application. *Renewable Energy*, 51:388–397, 2013.
- [84] WT Chong, SC Poh, A Fazlizan, SY Yip, CK Chang, and WP Hew. Early development of an energy recovery wind turbine generator for exhaust air system. *Applied Energy*, 112:568–575, 2013.
- [85] A Portela, Manuel Castro, and R González. Parametrización de la capa límite atmosférica en los modelos numéricos de pronóstico meteorológico. *Física de la Tierra*, (3):103, 1991.
- [86] Chia Chen Ciang, Jung-Ryul Lee, and Hyung-Joon Bang. Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods. *Measurement Science and Technology*, 19(12):122001, 2008.

---

# 2

## Especificación estructural de la solución

En este capítulo se trata la resolución del método de caracterización a partir de la aportación de requerimientos de diferente alcance, capaces de satisfacer los anteriores objetivos descritos. Todo requerimiento es clasificable en función de su intensidad de alcance, es decir, la cantidad de elementos del problema que se vean afectados. Este parámetro resulta útil a la hora de proyectar una estructura de resolución desglosada en diferentes niveles.

Los primeros niveles se articulan en torno a factores esenciales de diseño. Estos factores surgen de la información contenida en las respuestas a interrogantes tales como: "*¿Para qué...?*", "*¿Cómo...?*", "*¿Con qué...?*". Los factores que responden a la primera interrogante se conocen como factores de arquitectura, por la información proporcionada relativa a la utilidad o uso del futuro sistema. De las respuestas dadas a la segunda interrogante se originan los factores de estructura, los cuales profundizan en la programación y ordenación de las acciones para la resolución. Los factores que responden a la tercera interrogante se conocen como factores de tecnología, aglutinando la información relativa a los materiales, elementos y técnicas de resolución necesarias para formalizar la solución. En posteriores niveles se desglosan los factores circunstanciales, que tienen por objeto satisfacer requisitos de carácter local, singular o característico de un contexto determinado. Estos

---

enfoques aportan información a partir de las respuestas dadas a interrogantes tales: "*¿Quién...?, ¿Cuánto...?, ¿Dónde...?, etc.*".

El resultado final es la construcción de un árbol que ilustre la aplicación de dicha metodología con objeto de alcanzar una resolución precisa y justificada a la problemática planteada.

## 2.1. Requerimientos relativos a la arquitectura del sistema

El modelo descrito es el resultado del ensamblaje de dos sistemas independientes: un sistema mecánico encargado de transformar la cinética eólica en energía eléctrica, y una interfaz concentradora de flujo eólico, de materiales ligeros y elevada resistencia estructural, con partes dinámicas adaptables en función de las condiciones eólicas y equipado con circuitos electrónicos de control del comportamiento. Ambos sistemas pueden ser modelados de manera independiente y con diversidad de enfoques: operativos, económicos, estructurales, etc. El diseño de un artefacto de naturaleza compleja y su integración en un volumen arquitectónico origina ciertas incertidumbres, inexistentes en el caso de la resolución individual de cada uno de sus componentes. Estos aspectos conducen a la construcción de tres ramas interconectadas, destinando una de ellas a la resolución de los requisitos propios a la integración eficaz en el volumen arquitectónico.

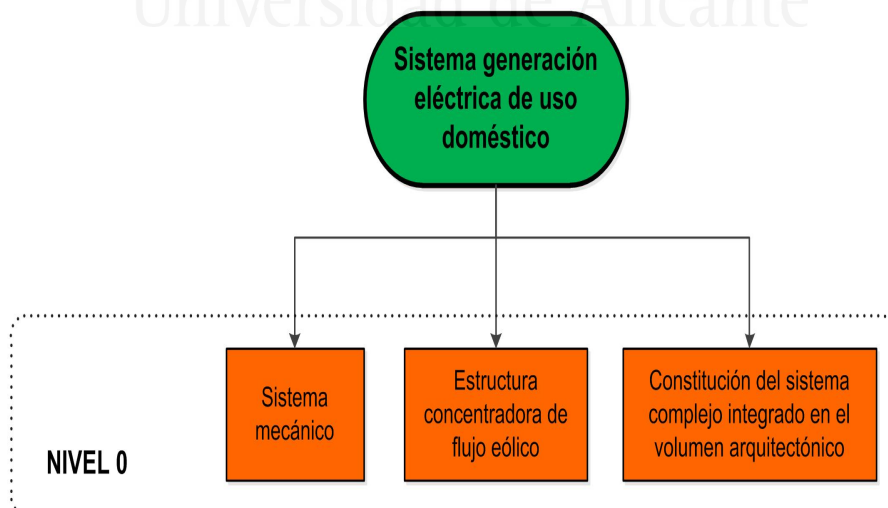


Figura 2.1: Árbol estructural, detalle del nivel 0 completado.

El siguiente nivel comprende requerimientos de carácter esencial desde el punto de vista de la arquitectura del sistema. Estas prestaciones irán completando la tabla de objetivos elaborada en el capítulo inicial.

El primer objetivo es la óptima transformación de la cinética eólica en energía eléctrica. El profundo conocimiento existente en torno a las turbinas eólicas motiva su elección como sistema mecánico apto para llevar a cabo dicha transformación. Las turbinas eólicas son sistemas compuestos por un número determinado de palas, que aprovechan la incidencia del viento sobre su superficie para generar un movimiento de rotación alrededor de un eje de giro. La fuerza resultante de esta incidencia se descompone en dos componentes vectoriales conocidas como arrastre y sustentación.

Se define la fuerza de arrastre ( $D$ ) como la ejercida sobre la superficie del cuerpo inmerso en la dirección de la corriente libre. La fuerza de sustentación ( $L$ ) se define como la ejercida sobre la superficie del cuerpo inmerso en dirección perpendicular a la de la corriente libre. Los coeficientes de arrastre y sustentación son parámetros adimensionales expresados en las ecuaciones 2.1 y 2.2 respectivamente.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho c_r v^2} \quad (2.1)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho c_r v^2} \quad (2.2)$$

La eficiencia en la incidencia del flujo eólico en los aerogeneradores de eje horizontal depende fundamentalmente del mecanismo de orientación. Este mecanismo se encarga de orientar la góndola según la dirección eólica, con el propósito de alcanzar una incidencia perpendicular sobre las palas de la turbina. La naturaleza turbulenta e intermitente de las corrientes que predominan sobre la superficie terrestre reduce la eficacia en la consecución de este propósito. En la figura 2.2 se observan las pérdidas generadas en el proceso de reorientación de un aerogenerador de grandes dimensiones enclavado en un entorno de vientos de dirección relativamente predominante. [1]. Estas pérdidas se multiplican en un contexto de brisas cambiantes e intermitentes similar al producido en la superficie terrestre, a lo que hay que añadir los perjuicios derivados de la sobreactuación que reducen la vida útil del mecanismo.

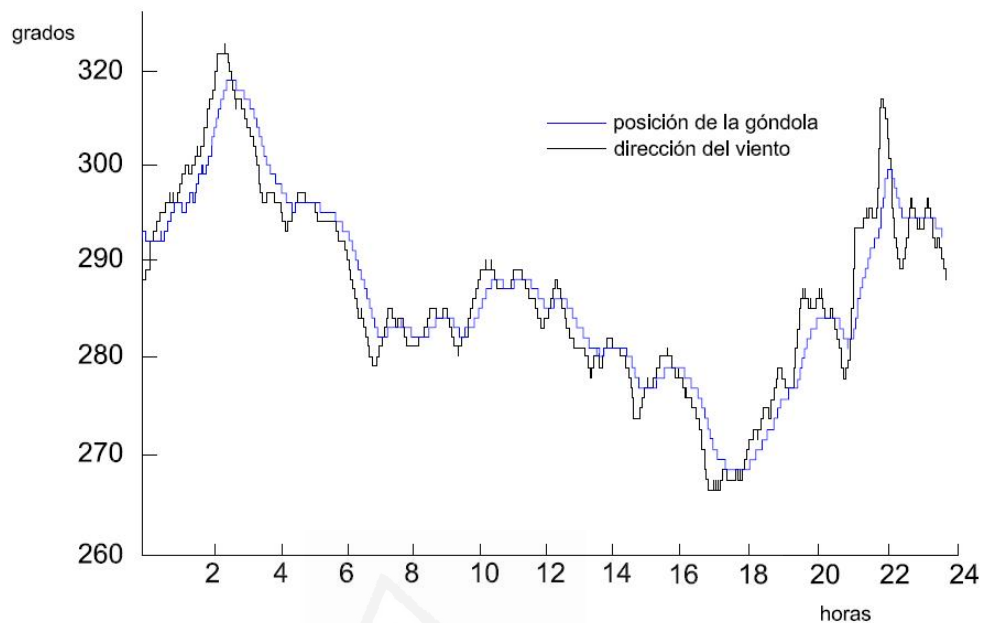


Figura 2.2: Posicionamiento de la góndola de un aerogenerador de eje horizontal en función a la dirección del viento.

En el caso de los aerogeneradores de eje vertical la incidencia se produce en planos idénticos al trazado por la rotación, desechando la necesidad de utilizar este tipo de mecanismo. Esta circunstancia conduce a una incidencia eficaz y un mejor par de arranque frente a las velocidades reducidas. **Ante la tesitura de obtener una óptima transformación de la cinética eólica en movimiento rotación, se propone como sistema mecánico una turbina configurada a partir de un eje vertical.**

La implantación de una turbina de eje horizontal resulta interesante en emplazamientos donde se produzcan patrones de circulación de cierto potencial energético durante periodos de tiempo prolongados. Esta puntualización es igualmente aplicable a la estructura acoplada a una turbina que actúan en un rango direccional delimitado. Las condiciones de intermitencia, variabilidad direccional y reducida velocidad de las brisas eólicas conducen a la ausencia de un sentido predominante. Ante tal comportamiento y con objeto de captar tales brisas, se propone una geometría que otorgue idéntica relevancia a cualquier sentido adoptado por la corriente. **Este criterio se traduce en la práctica en un diseño estructural independiente al curso que adopte la circulación eólica.**

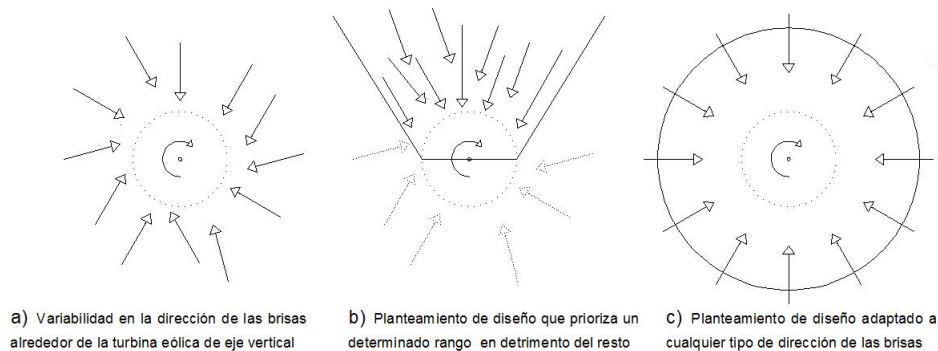


Figura 2.3: Posibles configuraciones de la estructura concentradora en función del rango de actuación eólico.

La integración de la estructura concentradora en la turbina eólica tiene por objeto fundamental el incremento de la velocidad de las brisas repercutiendo directamente en el aumento de potencia eléctrica generada. Con anterioridad en el estado del conocimiento se han visto diversos prototipos proyectados bajo el criterio de la concentración de flujo eólico. Estos diseños se fundamentan en la ecuación de continuidad para fluidos ideales. La expresión relaciona la velocidad de un flujo determinado con la sección de paso en su circulación a través de un tramo de paredes impermeables. En el caso de que la sección 1 tenga mayor superficie en comparación a la sección 2, el tramo converge reduciéndose paulatinamente la sección de paso lo que deriva en un incremento de su velocidad. En el caso contrario se produce un aumento paulatino de la sección, decreciendo la velocidad de circulación.

$$\oint_c v \rho dS = -v_1 \rho_1 S_1 + v_2 \rho_2 S_2 \quad (2.3)$$

Teniendo en cuenta esta ecuación, se puede modelar una **estructura compuesta por un número determinado de tramos de recorrido convergente, en los cuales la corriente eólica avance e incremente progresivamente su velocidad hasta su inyección en la turbina.**

La hipótesis que caracteriza a los fluidos ideales es la ausencia de viscosidad, despreciándose los esfuerzos cortantes que aparecen en la circulación próxima sobre superficies materiales. Estos esfuerzos son responsables de la formación de una capa turbulenta en cualquier superficie material inmersa en la circulación de un fluido. Su desarrollo provoca la aparición posterior de estelas, turbulencias o efectos vorticiales. La figura

---

2.4 ilustra el comportamiento de un perfil aerodinámico inmerso en una corriente fluida. El ángulo de ataque ( $\beta$ ) mide la inclinación entre el vector característico de la circulación y la cuerda de la sección aerodinámica.

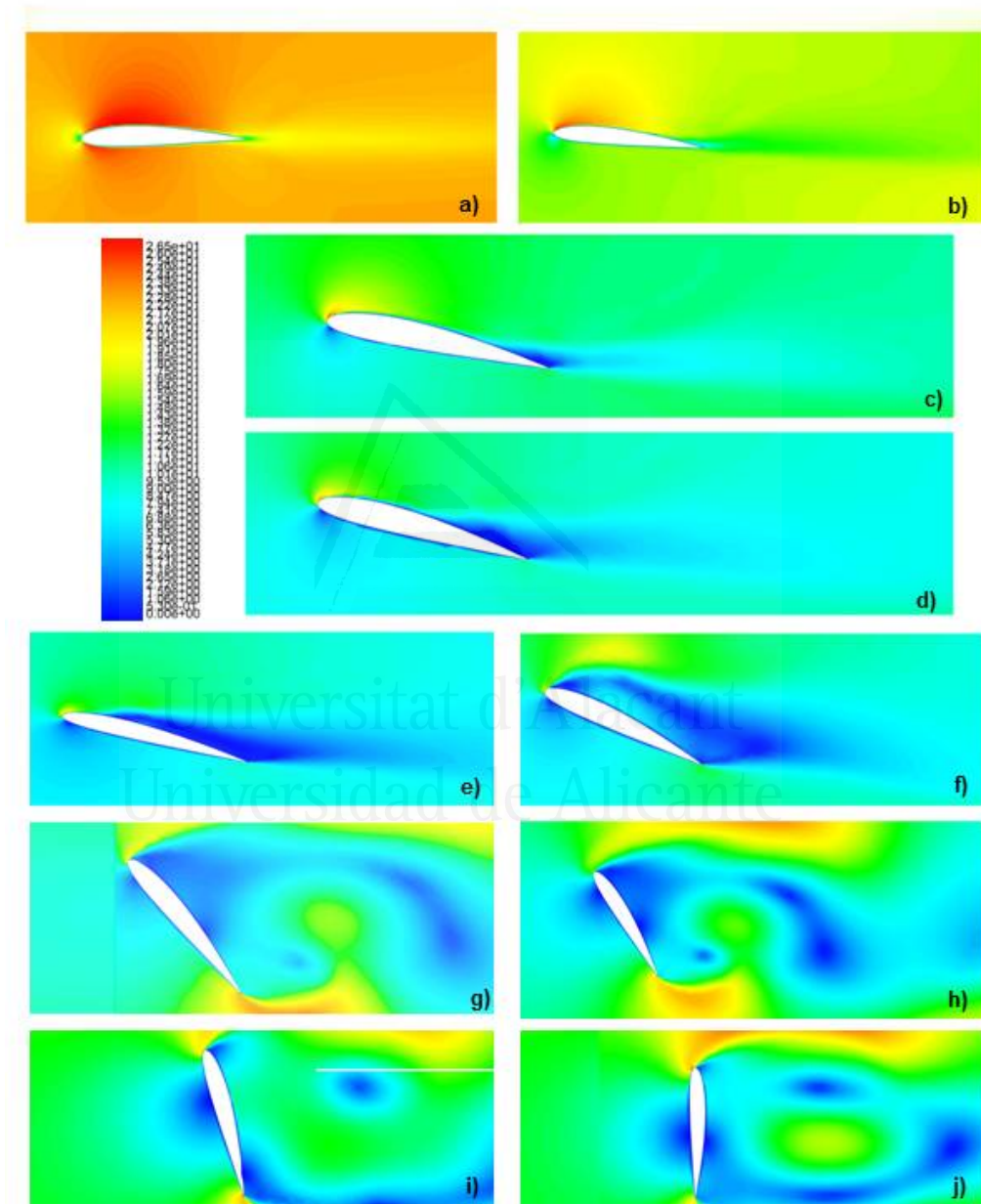


Figura 2.4: Análisis dinámico del perfil aerodinámico NACA 2412. Posiciones en base al ángulo de ataque en orden correlativo:  $0^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  y  $90^\circ$ . Fuente: Elaboración propia.

A partir de un ángulo nulo ( $\beta_0$ ) en perfiles simétricos, la fuerza de sustentación generada comienza a incrementarse según lo hace al ángulo de ataque, originándose una estela de limitadas proporciones. En perfiles asimétricos, el incremento de la fuerza de sustentación se produce a partir de  $\beta_0$  ligeramente negativos. Esta tendencia continua hasta alcanzar un punto máximo ( $\beta_{max}$ ) en el cual se produce una degradación brusca de la fuerza de sustentación correspondiéndose con el incremento de la fuerza de arrastre. Este punto está relacionado con el desprendimiento de la capa limite generada a lo largo de la superficie del perfil, provocando la formación posterior de vórtices y turbulencias.

En el sistema de microgeneración se producen dos comportamientos diferenciados en relación al curso del flujo: el paso a través de la estructura de concentración, y el tramo de inyección hacia las palas de rotación. **En el primer caso, se considera un diseño eficiente aquel que minimice la formación de dicha capa turbulenta para facilitar el avance del flujo lo más uniforme posible hacia el sistema mecánico. En el segundo caso, se considera un diseño eficiente el modelado para inyectar flujo minimizando la formación de posibles efectos turbulentos y vórtices no deseados.**

Tabla 2.1. Valores de  $\beta_0$ ,  $\beta_{max}$ ,  $C_L$  y  $C_D$  para distintos perfiles aerodinámicos

° Fuente: National Advisory Committee for Aeronautics, Gottingen University

nomenclatura	$\beta_0$	$C_L$	$C_D$	$\beta_{max}$	$C_L$	$C_D$
E 168	0.00	0.0000	0.14490	11.00	1.0285	0.04478
E 174	-3.50	0.0017	0.02583	8.00	1.1876	0.02145
E 195	-2.75	0.0101	0.01706	8.75	1.1906	0.02165
E 214	-2.50	0.0213	0.02450	13.25	1.4098	0.06675
EPPLER 422	-9.00	0.0051	0.10512	3.50	0.9601	0.03473
EPPLER 638	-3.00	0.0077	0.29120	7.50	1.0508	0.03784
GOE 134	-2.00	0.0161	0.02905	10.50	1.3790	0.02978
GOE 118	-4.25	0.0230	0.05024	8.75	1.3415	0.04655
GOE 6K	0.50	0.0187	0.19341	7.25	1.0010	0.04758
NACA 0012	0.00	0.0000	0.01693	10.75	0.9917	0.05469
NACA 0024	0.00	0.0000	0.02484	9.25	1.1793	0.03458
NACA 1410	0.00	0.0079	0.14640	9.75	1.0294	0.05126
NACA 2410	-0.75	0.0262	0.15280	10.75	1.1890	0.05631
NACA 2414	-1.00	0.0465	0.01902	13.00	1.3158	0.04989
NACA 4412	-2.75	0.0233	0.02414	9.25	1.3316	0.02495
NACA 6412	-4.00	0.0124	0.04081	10.50	1.6004	0.03041
NACA 22112	-1.00	0.0387	0.01695	10.50	1.0979	0.04881
NACA 24112	-1.75	0.0380	0.01570	12.25	1.2756	0.03783
NACA 63212	-0.50	0.0218	0.01971	10.00	1.0688	0.05580
RAF 32	-2.50	0.0056	0.02897	9.25	1.3166	0.02476
RAF 38	-1.75	0.0671	0.01802	8.25	1.0548	0.02100

Tabla 2.1: Análisis dinámico par distintos perfiles aerodinámicos. Valores  $\beta_0$ ,  $\beta_{max}$  y coeficientes  $C_L$  y  $C_D$  para  $Re=100.000$ .



---

El fundamento esencial en el diseño de las secciones aerodinámicas es conseguir un rango de ataque con elevada efectividad en base a la sustentación generada y a la mínima formación de efectos turbulentos. A este respecto el comportamiento de las secciones aerodinámicas se define a partir de la función 2.4,

$$f = (R_e, v_w, \nu, g) \quad (2.4)$$

Siendo  $R_e$  el número de Reynolds,  $v_w$  la velocidad promedio del viento en circulación libre,  $\nu$  la viscosidad cinemática y  $g$  la geometría característica de la sección del perfil aerodinámico. La tabla 2.1 muestra los valores característicos de varias secciones aerodinámicas. **Una estructura que concentre la inyección de flujo eólico en la región de sustentación tiene la capacidad de optimizar la fuerza generada para originar la rotación de las palas, minimizando los efectos turbulentos posteriores.**

En lo que respecta al ensamblaje e integración, anteriormente se justificó **el uso de la cubierta como espacio idóneo para la colocación del sistema de microgeneración eólico.** Esta ubicación origina varias contingencias a solventar: evaluación estructural del volumen arquitectónico ante nuevas cargas a soportar, compatibilidad de uso con otro tipo de instalaciones, adecuación funcional del sistema a los usos propios de la cubierta, etc.

En adelante, se tendrá en cuenta si la integración se realiza en un volumen arquitectónico de nueva construcción o un edificio ya existente. En el caso de su integración en un volumen de nueva construcción, esta nueva carga es contemplada a la hora de realizar el cálculo de la estructura, mientras que las posibles incompatibilidades pueden ser resueltas en fase de diseño. En el segundo caso, se precisa un análisis estructural en relación a la nueva carga a incorporar. Ello implica adoptar como premisa fundamental de diseño **el uso de materiales ligeros de elevada resistencia estructural con objeto de minimizar dicha acción,** sin que ello ponga en riesgo las características estructurales del sistema. Su implantación en cubierta sugiere además que **tales materiales tengan un adecuado comportamiento ante la exposición exterior.** Otra faceta a resolver es la compatibilidad del sistema frente a otro tipo de instalaciones, como bien pueden ser instalaciones de ventilación, recogida pluviales, antenas de TV, etc.

Uno de los mayores inconvenientes es la reducción del rango operativo en el sistema resultante. La inclusión de la estructura concentradora permite alcanzar un rendimiento nominal en presencia de brisas de reducida velocidad, derivando en la pronta activación de los mecanismos de regulación

propios de la turbina. Estos dispositivos tiene como propósito regular la entrega de potencia eléctrica una vez se alcanza el pico de potencia eléctrica admisible por la turbina. A partir de este punto la entrega de potencia disminuye según se incrementa la velocidad del viento, a causa de la alimentación de estos mecanismos. En presencia de vientos importantes, el rotor alcanza el punto de corte (*cut-out-speed*), procediendo a su parada con objeto de preservar su integridad estructural.

Esta problemática se agrava en presencia de vientos importantes, alcanzándose valores de inyección capaces de poner en riesgo la propia integridad del sistema. **Este comportamiento obliga a modelar una estructura capaz de regular la entrada de flujo hasta el punto de negar la entrada su entrada en casos extremos.**

Los dos últimos objetivos están referidos a dotar de accesibilidad a las distintas partes del sistema con objeto de su revisión, y monitorizar el comportamiento del sistema resultante. En el primer caso, la solución pasa por **habilitar aberturas practicables para realizar las labores pertinentes de mantenimiento.**

En el segundo caso, **se propone la implementación de dispositivos de control con el propósito de seguir la evolución desde el punto de vista de la operatividad del sistema resultante, y por otro lado, desde el punto de vista de la integración en el volumen arquitectónico.** En lo referido a la operatividad, la misión de los dispositivos es aportar información de parámetros de primer orden tales como el coeficiente de potencia ( $C_p$ ), velocidad de inyección ( $v_i$ ), sustentación generada, etc. En lo referido a la integración, la misión de los dispositivos es aportar información de parámetros característicos relativos a la estabilidad estructural, habitabilidad y confort interior del volumen constructivo.

\* \* \*

A lo largo de esta sección se han propuesto los requerimientos necesarios para satisfacer los objetivos relacionados con la arquitectura del futuro sistema resultante. Estas prestaciones ocupan la columna vertical de la tabla de objetivos descrita en el capítulo inicial. La relación entre objetivo y su correspondiente requerimiento viene dada por la presencia del símbolo ✓. En algunos casos, las prestaciones de un requerimiento tienen una repercusión complementaria al proporcionado específicamente para un determinado objetivo, simbolizándose en este caso mediante el símbolo o. A la hora de

---

articular los requerimientos en su correspondiente rama del árbol estructural se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El sistema mecánico es el encargado de la transformación de la cinética eólica en movimiento rotacional en torno a un eje de giro. Este sistema se componen de un sinfín de elementos con su correspondiente cuota de rendimiento y eficiencia asociada. Con objeto de evaluar el comportamiento global, se han agrupado tales elementos en cuatro áreas en relación a su función específica, ramificándose de tal manera el nodo "*Sistema mecánico*":

SM- 1. Eje de rotación.

SM- 2. Dispositivo de transformación.

SM- 3. Estructura de montaje.

SM- 4. Palas de rotación.

En el caso del SM-2, en general las turbinas integran dispositivos electromagnéticos para la transformación del movimiento rotacional en energía eléctrica sin que haya relación con la naturaleza y acción del flujo eólico. A la hora de seleccionar este tipo de dispositivos nos ceñiremos a la numerosa investigación realizada en el ámbito de la transformación mecánico-eléctrica, sin que ello sea objeto a tratar en la actual investigación [2–10].

2. El nodo "*Estructura concentradora de flujo eólico*" queda desglosado en cuatro ramas:

EC- 1. Captación de las brisas eólicas.

EC- 2. Geometría operativa.

EC- 3. Ausencia de efectos turbulentos en la rotación.

EC- 4. Circulación uniforme.

En el caso de los nodos EC-1 y EC-2, los factores de arquitectura definidos en sendos requerimientos son suficientes para resolver estos objetivos parciales. Dotar de igual relevancia a la dirección que puedan adoptar implica modelar una estructura que pueda ofrecer igual comportamiento con independencia del curso de las mismas. En el caso de la geometría operativa, un modelado de convergente facilita la concentración y la aceleración de las brisas, derivando en el incremento de su velocidad. En el caso de los nodos EC-3 y EC – 4, se han propuesto sendas soluciones a profundizar según se avance en el análisis.

3. El grupo de objetivos O6-O11 están relacionados con el resultado del sistema complejo creado a partir del acoplamiento de la estructura concentradora en el sistema mecánico, y la posterior integración en el volumen arquitectónico. El nodo resultante queda desglosado en cinco ramas:

IN- 1. Habilitar superficie de apoyo.

IIN- 2. Composición material.

IIIN- 3. Estructura activa y adaptable a las condiciones eólicas.

IVN- 4. Accesibilidad a partes estratégicas del sistema resultante.

VN- 5. Monitorización y control del comportamiento.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

Requerimientos	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10	O11
	Óptima transformación edifica en movimiento circular	Óptimo funcionamiento de independencia dirección	Incremento velocidad circulación con su independencia en el sistema iterativo	Uniformidad de inyección hacia la superficie de incidencia	Ausencia de efectos turbulentos alrededor rotación	Integración en el volumen constructivo de la estructura	Estructura resistente y reducida peso	Durabilidad ante climatología adversa	Adaptabilidad a condiciones extremas edifica	Accesibilidad a las partes que componen la estructura	Monitorización de los parámetros del volumen arquitectónico resultante
R1	Selección de un arquerador de eje vertical	✓							✓		
R2	Estructura con diseño homogéneo	✓							◦		
R3	Estructura de tramo/s convergente/s		✓								
R4	Estructuras con geometría interior que minimice el desarrollo de capa límite			✓							
R5	Inyección efectiva	✓									
R6	Habilitar superficie disponible en forjado de cubierta					✓					
R7	Materiales ligeros de elevada resistencia estructural						✓				
R8	Materiales resistentes a la exposición exterior							✓			
R9	Estructura activa	✓							✓		
R10	Habilitar espacios para la revisión y mantenimiento del dispositivo									✓	
R11	Implementación de un circuito electrónico de control								✓		✓

Tabla 2.2: Objetivos a satisfacer en el modelado del prototipo.

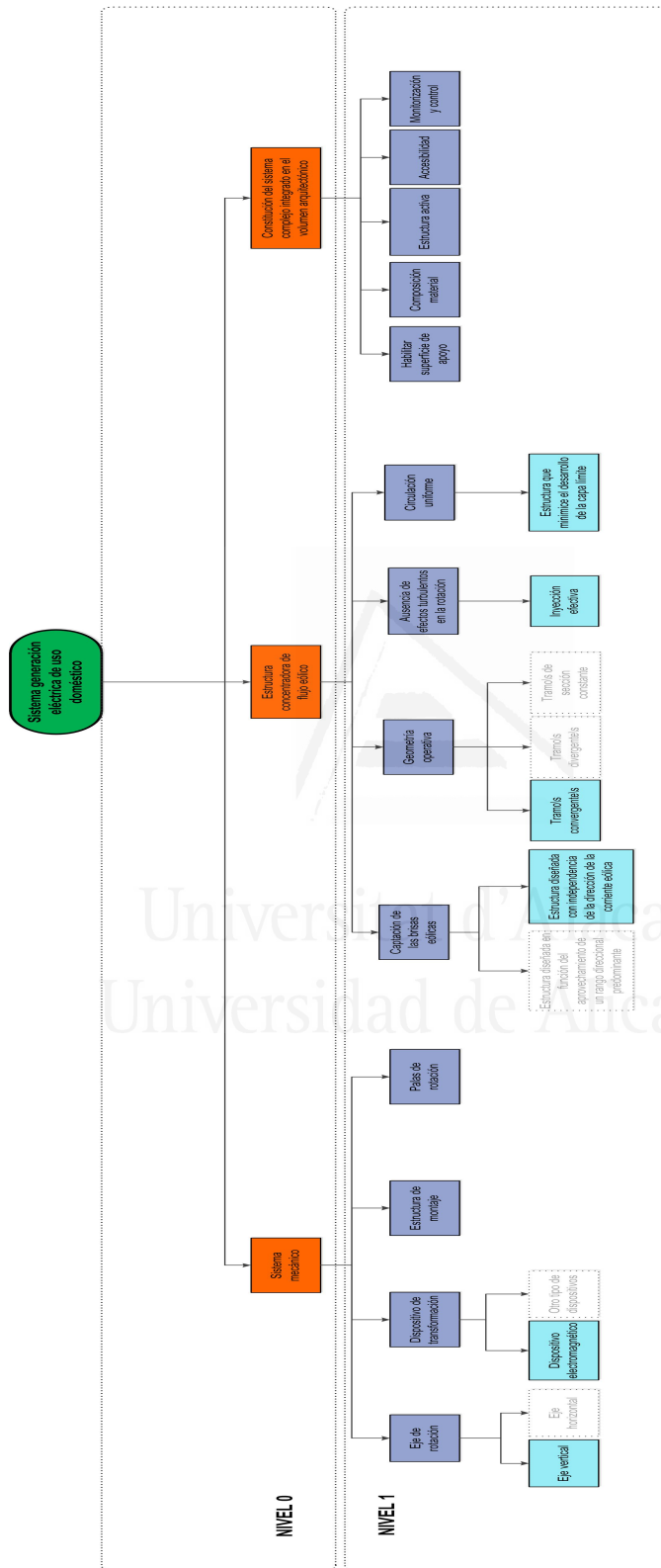


Figura 2.5: Árbol estructural, detalle del nivel 1 completado.

---

## 2.2. Requerimientos relativos a la estructura del sistema

Esta sección comprende el análisis suscitado a partir de la pregunta: *¿cómo resolver los requerimientos aportados en el ámbito de la arquitectura del sistema?* En las siguientes páginas se trata de dar respuesta a dicha pregunta mediante la aportación de soluciones de carácter estructural capaces de profundizar en la definición del sistema resultante.

### 2.2.1. Relativos al sistema mecánico

En el caso del sistema mecánico, la problemática se centra en resolver cómo optimizar la transformación cinética eólica en movimiento rotacional. El eje de rotación es parte fundamental a la hora de caracterizar la geometría global de la turbina, en especial en el modelado de las palas. En la tabla 2.3 se muestran los objetivos demandados al eje de rotación.

**Tabla 2.3. Tabla de objetivos relativos al eje de rotación.**

	O1	O2	O3
Requerimientos	Optimizar torque/ superficie de incidencia	relación de Peso propio reducido	Resistencia estructural
SM1.1			
SM1.2			
SM1.3			

Tabla 2.3: Objetivos relativos al eje de rotación.

El objeto O1 relaciona las características geométricas de la pala y la capacidad para generar un mayor o menor torque. Este parámetro mide la fuerza aplicada sobre un cuerpo que tiende a girar alrededor de un eje definido, expresado mediante la siguiente fórmula:

$$\tau = F * d \tag{2.5}$$

Siendo  $F$  el módulo de la fuerza aplicada y  $d$  la distancia al eje de giro. En lo relativo a turbinas de eje vertical, los modelos Darrieus y Giromill se caracterizan por aprovechar la fuerza de sustentación para la generación de rotación. Estableciendo un radio idéntico de rotación, **la turbina Giromill de**

palas rectas verticales genera un mayor torque en comparación al modelo Darrieus caracterizado por sus palas modeladas a partir de una curva troposkien o en algún caso catenaria [11]. Ello deriva en seleccionar el modelo de turbina Giromill de palas rectas verticales para llevar a cabo el diseño de una interfaz que mejore sus prestaciones potenciales.

El tándem peso reducido y resistencia estructural es una solicitud común en la práctica totalidad de los elementos estructurales que componen el sistema resultante. En complemento se propone para su resolución disponer un perfil hueco constituido a base de materiales ligeros de elevada resistencia. La tabla 2.3 queda completada según se ilustra a continuación.

Tabla 2.4. Tabla de objetivos y requerimientos relativos al eje de rotación

	O1	O2	O3
Requerimientos	Optimizar torque/ superficie de incidencia	relación de Peso propio reducido	Resistencia estructural
SM1.1	Selección de una turbina que aproveche la fuerza de sustentación para generar la rotación	✓	
SM1.2	Geometría del eje definido mediante un cilindro hueco		✓
SM1.3	Materiales ligeros de elevada resistencia estructural		✓

Tabla 2.4: Objetivos y requerimientos relativos al eje de rotación.

En lo relativo a la estructura de montaje, cabe diferenciar entre la plataforma base y el entramado de sujeción. La plataforma base es el elemento responsable de la estabilidad del conjunto y transmitir los esfuerzos generados a la estructura del volumen arquitectónico. Su eficacia está relacionada con la tipología de apoyo a seleccionar y las condiciones arquitectónicas habilitadas para su implantación. En consecuencia este nodo se traslada a la rama *constitución del sistema complejo integrado en el volumen arquitectónico*, procediéndose a su posterior resolución.

En relación al entramado de sujeción, el modelo Giromill se compone de montantes horizontales o con una leve inclinación solidarios al eje de rotación. Su misión principal es la transmisión de esfuerzos producidos en las palas de rotación. En la generación de estos esfuerzos tienen influencia directa tanto factores relativos a las pala de rotación (altura, sección, materiales, etc.) como relativos a la disposición de los montantes (número, estructura, puntos de sujeción, etc.). **Mediante las actuales herramientas informáticas de cálculo**



estructural se ha conseguido diseños con una elevada eficiencia, modelando estructuras capaces de minimizar el impacto de dichas solicitudes.

**Tabla 2.5. Tabla de objetivos relativos a la estructura de sujeción**

	O1	O2	O3
Requerimientos	Modelado eficaz de los montantes	Peso propio reducido	Sujeción adaptable a distintas secciones aerodinámicas
SM3.1			
SM3.2			
SM3.3			

Tabla 2.5: Objetivos relativos a la estructura de sujeción.

Al igual que en el caso anterior, se propone la utilización de materiales ligeros de elevada resistencia estructural con el propósito de optimizar el peso de la estructura sin que ello repercuta en su resistencia estructural. En cuanto a la sujeción de las palas, el objeto se define por la capacidad de apresarlas sin que ello produzca deformaciones o posibles daños estructurales de relevancia. Existen varias técnicas de resolución, siendo común el apresamiento exterior mediante la disposición de un elemento perimetral regulable a modo de brida de sujeción; o bien la introducción de un eje longitudinal en el alma de la pala acometiendo su sujeción en los extremos o en un puntos intermedios habilitados para tal propósito. En el caso que nos ocupa se propone la inclusión un mecanismo de sujeción regulable y de calibración. La primera característica viene al hilo de obtener un apresamiento eficaz con independencia de la sección aerodinámica utilizada; mientras la segunda está en relación a la posibilidad de variar el ángulo de ataque de la pala en función de sus características geométricas y de las características de la circulación interior eólica. La adopción de una u otra alternativa requiere la definición de objetivos y aportación de requerimientos de elevada precisión en campos eminentemente técnicos que escapan del objeto de este trabajo.

En lo que respecta a la constitución de las palas, con anterioridad se ha visto la existencia de un rango de elevada sustentación y reducida formación de fenómenos turbulentos. La geometría es el parámetro diferencial de la expresión 2.4, siendo los demás parámetros característicos del flujo objeto de análisis. Una primera alternativa para definir una configuración óptima es el propio modelado de una sección en relación a las características de la inyección. Una segunda posibilidad tiene que ver con la multitud de catálogos de secciones aerodinámicas, estructuras interiores y desarrollo de materiales, fruto de la prolífera investigación realizada durante los últimos años. Esta

circunstancia recomienda realizar un análisis exhaustivo con el propósito de encontrar secciones con un comportamiento óptimo en relación a la fuerza de sustentación generada, proponiendo su estructura interior con objeto de satisfacer los esfuerzos previstos [12–17].

Tabla 2.6. Tabla de objetivos y requerimientos relativos a la estructura de sujeción

	O1	O2	O3
Requerimientos	Modelado eficaz de los montantes	Peso propio reducido	Sujeción adaptable a distintas secciones aerodinámicas
SM3.1	Análisis de distintas secciones mediante cálculo estructural	✓	
SM3.2	Materiales ligeros de elevada resistencia estructural	✓	
SM3.3	Inclusión de un mecanismo de sujeción regulable		✓

Tabla 2.6: Objetivos y requerimientos relativos a la estructura de sujeción.

### 2.2.2. Relativos a la estructura concentradora de flujo eólico

Esta sección tiene por objeto la aportación de requerimientos de naturaleza estructural referidos al diseño de la interfaz concentradora. Estas soluciones surgen a raíz del planteamiento alrededor a cómo resolver los requerimientos aportados en el ámbito de la arquitectura del sistema. El nodo matriz se desglosó de la siguiente manera:

- Diseño independiente a la corriente eólica.
- Tramos/s convergente/s.
- Geometría que minimice el desarrollo de capa límite.
- Inyección efectiva de flujo eólico.

La consecución de un diseño independiente se consigue mediante una estructura que circunscriba a la turbina eólica a modo de volumen envolvente. Con anterioridad nos referíamos a la existencia de un rango angular en el cual se produce una gran fuerza de sustentación a la par que se minimiza los efectos turbulentos. Su reproducción permite el modelado de una estructura

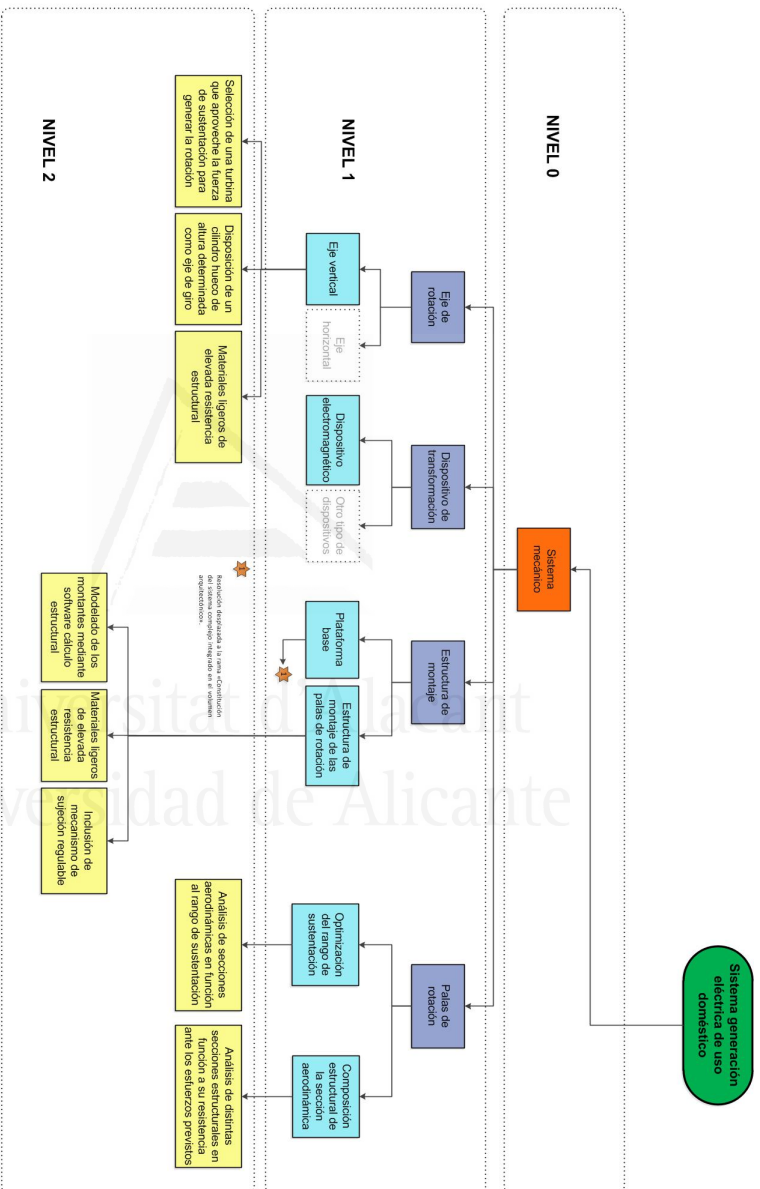


Figura 2.6: Árbol estructural, detalle del nivel 2 relativo al sistema mecánico.

homogénea y compuesta de varios tramos inyectores de flujo uniforme capaces de generar una elevada fuerza de sustentación durante toda la rotación. La eficacia en el modelado de los tramos viene dada por su capacidad para facilitar la entrada y adaptación de las corrientes eólicas a las nuevas condiciones geométricas. Ello está asociado al objeto de minimizar la capa límite a desarrollar a su paso, y las pérdidas locales que puedan surgir en la entrada como en la región próxima a la inyección. Cabe resolver el número óptimo de tramos y el modelado interior de los mismos con objeto de alcanzar una inyección efectiva y que minimice el desarrollo de la capa límite.

La eficacia de la inyección del flujo viene dada por la capacidad de dirigir el flujo acelerado hacia el rango de sustentación definido. La incidencia debe producirse en la superficie de la sección aerodinámica durante cualquiera de las posiciones que pueda adoptar dentro del rango definido entre  $\beta_0$  y  $\beta_{max}$ . Dicho rango es particular a cada sección aerodinámica. Esta circunstancia implica la dependencia entre la sección predeterminada y las características geométricas del tramo tipo. Es decir, a cada sección aerodinámica se puede definir un tramo determinado.

Mediante la caracterización de la incidencia a partir de una dirección determinada del flujo se consigue definir la sección de inyección del tramo tipo. A efectos de cálculo se establece como hipótesis un valor estándar para el rango de sustentación, el cual se adecua a las características de buena parte de las secciones aerodinámicas. **El modelado de las paredes interiores viene dado a partir de la aplicación de las ecuaciones diferenciales de Blasius o Falkner-Skan según proceda, con objeto de estimar las características de la capa límite desarrollada.** A principios del siglo XX, Blasius P.R.H. pudo precisar su desarrollo sobre una superficie material horizontal, mediante la ecuación diferencial descrita en la ecuación 2.6:

$$\frac{\partial^3 f}{\partial \eta^3} + f \frac{\partial^2 f}{\partial \eta^2} = 0 \quad (2.6)$$

siendo,

$$f(0) = f'(0) = 0, f'(\infty) = 1 \quad (2.7)$$

A partir de esta ecuación se pudo llegar a precisar el desarrollo de la capa límite sobre superficies con cierto grado de inclinación, conociéndose como la ecuación de Falkner-Skan.

$$\frac{\partial^3 f}{\partial \eta^3} + f \frac{\partial^2 f}{\partial \eta^2} + \alpha \left(1 - \frac{\partial f}{\partial \eta}\right)^2 = 0 \quad (2.8)$$

---

siendo,

$$f(0) = f'(0) = 0, f'(\infty) = 1 \quad (2.9)$$

Mediante estas ecuaciones se obtiene el espesor de desplazamiento ( $\delta^{**}$ ), parámetro que define la hipotética distancia que habría que desplazar la pared sólida hacia el interior de la capa límite para eliminar la capa turbulenta generada. Para el caso de una superficie plana horizontal, el espesor de desplazamiento se define mediante la expresión,

$$\delta^{**} = \frac{0,664x}{\sqrt{Re_x}} \quad (2.10)$$

y en el caso de una superficie plana inclinada,

$$\delta^{**} = x \sqrt{\frac{2-\alpha}{Re_x}} \lim_{\eta \rightarrow \infty} [\eta - f(\eta)] \quad (2.11)$$

Tanto el espesor de desplazamiento ( $\delta^{**}$ ), la velocidad de inyección ( $v_i$ ) como la velocidad promedio interior ( $v_p$ ) son parámetros de primer orden para evaluar el comportamiento del flujo a través de la estructura concentradora.

En el árbol estructural se resuelve mediante la inclusión del nodo "*Caracterización de la incidencia en función a un dirección eólica determinada*". Este hito recoge el procedimiento a seguir para el modelado de un tramo que satisfaga una inyección efectiva y minimice la formación de capa turbulenta a lo largo de sus paredes.

Este procedimiento se ilustra con sucesivos flujogramas incluidos en los planos con nomenclatura *I-xx* y en el capítulo siguiente donde se lleva a cabo el modelado de una estructura concentradora para un modelo determinado de turbina Giromill.

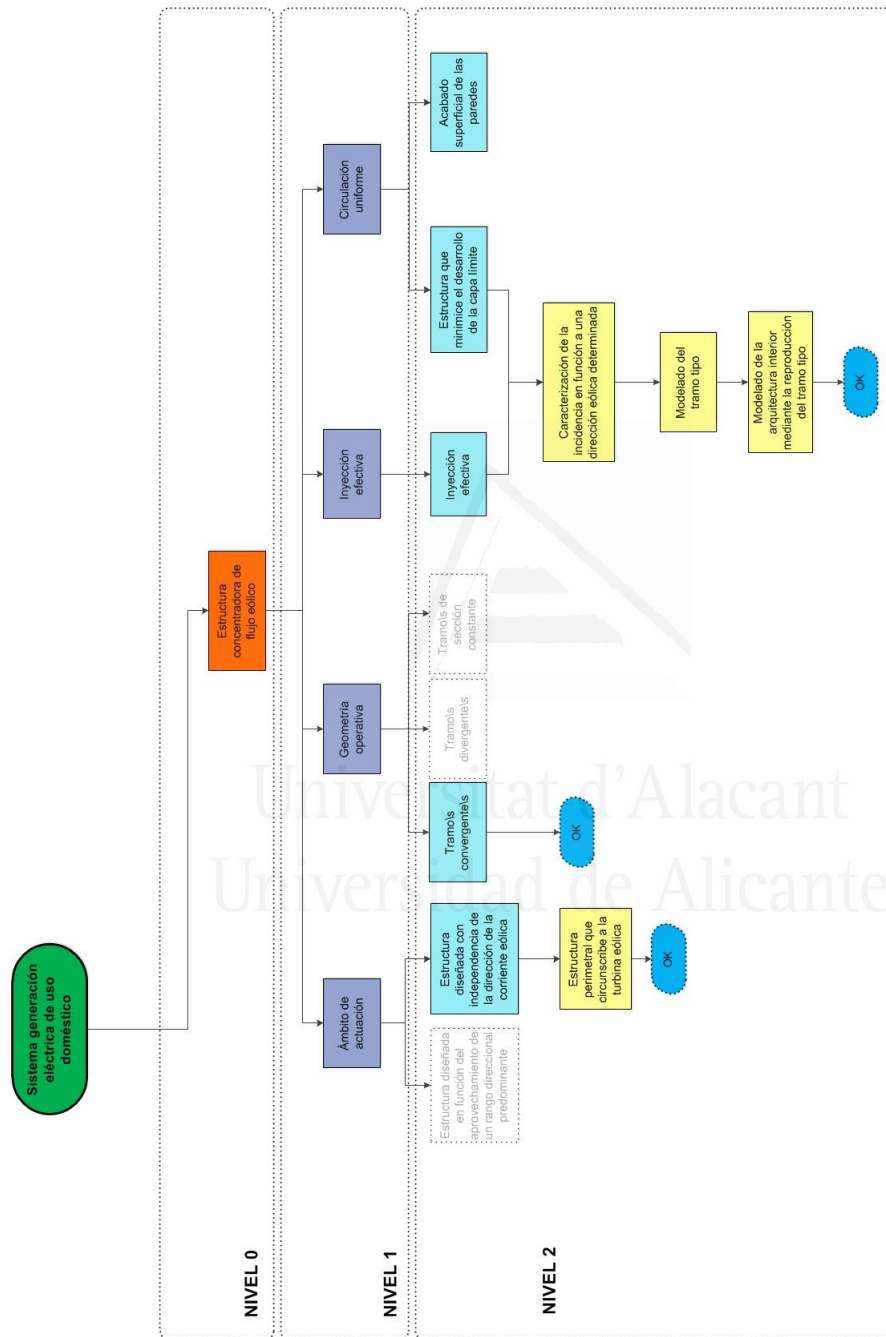


Figura 2.7: Árbol estructural, detalle del nivel 2 completado relativo a la estructura de concentración

---

### 2.2.3. Relativos a la constitución del sistema e integración en el volumen arquitectónico

En esta sección se trata la manera de resolver la integración del sistema de microgeneración en el volumen arquitectónico. La cubierta es uno de los elementos primitivos de las construcciones sirviendo de protección ante la lluvia y otras inclemencias climatológicas. Además, la cubierta es el lugar idóneo para la disposición de equipos e instalaciones tales como: antenas de TV y colectivas, maquinaria de refrigeración y equipamiento de servicio, sistemas de microgeneración fotovoltaicos y termosolares, terminación de las instalaciones de ventilación natural o forzada, etc.

La viabilidad de la integración en el volumen arquitectónico queda a expensas de la capacidad del sistema resultante en asumir las funciones propias que caracterizan a dicho elemento constructivo. Este tema se desarrolla en los siguientes objetivos a satisfacer por el modelado del sistema de microgeneración:

1. Recogida de aguas pluviales y canalización hacia el exterior o instalación anexa.
2. Soporte material para la disposición de sistemas de microgeneración solar, equipamiento de servicio o similar.
3. Espacios habilitados para la distribución de circuitos, mecanismos e instalaciones necesarias para el adecuado funcionamiento del equipamiento técnico.

Tabla 2.7. Tabla de objetivos relativos a la estructura de sujeción

	O1	O2	O3
Requerimientos	Protección ante la lluvia	Incorporación de una superficie compatible a distintos usos funcionales	Habilitación de espacios practicable para equipamientos varios
IN1.1			
IN1.2			
IN1.3			

Tabla 2.7: Objetivos relativos a la constitución del sistema e integración en el volumen arquitectónico.

Los edificios de gran altura incluyen plantas de uso exclusivo destinadas al equipamiento técnico necesario para garantizar el abastecimiento y servicio.

Otra solución de similares características es la introducción de suelos técnicos, en general en oficinas y edificios destinados de uso comercial. Estos suelos se componen de un pavimento dispuesto sobre una estructura apoyada en el forjado, facilitando un espacio interior para la distribución de instalaciones. Esta solución posibilita que las instalaciones sean totalmente accesibles para revisión y mantenimiento.

Este sistema sirve de inspiración para proponer la introducción de un disco en cada uno de los extremos de los álabes, modelados con las prestaciones suficientes para satisfacer los objetivos impuestos. Su composición vendrá dada por una doble capa material separada con objeto de habilitar un espacio interior de uso técnico. El disco superior proporciona una superficie apta para la disposición de equipamiento, pudiendo albergar conducciones propias para la recogida de las aguas pluviales y dispositivos auxiliares propias del equipamiento dispuesto en superficie. Las prestaciones del disco inferior son similares, sirviendo de base para la arquitectura interior de la estructura concentradora, y facilitando un espacio para distribuciones varias y colocación de materiales elásticos capaces de absorber la dilatación y contracción de las diferentes estructuras.

A la hora de resolver la transmisión de esfuerzos cabe diferenciar entre la estructura concentradora y la turbina eólica. La incorporación de un disco inferior facilita el apoyo directo de la estructura sobre el forjado del volumen arquitectónico. Esta propuesta origina que se deba acometer cómo garantizar el anclaje con objeto de anular desplazamientos, vibraciones o esfuerzos no previstos. Un método efectivo para garantizar el anclaje del sistema de microgeneración eólico es la utilización de pasadores de sujeción insertados en la estructura del volumen arquitectónico. La inclusión de un material elástico intermedio satisface las pequeñas dilataciones que puedan experimentar ambas estructuras.

En el caso de la turbina, se propone un reparto superficial de las cargas al contrario de lo producido en las pequeñas turbinas de baja potencia con la presencia de un mástil de sustentación. Por ello se propone la disposición de una plataforma base diseñada mediante software de cálculo estructural apoyada en la estructura con objeto de garantizar una transmisión eficaz.



Tabla 2.8. Tabla de objetivos y requerimientos relativos a la estructura de sujeción			
	O1	O2	O3
Requerimientos	Protección ante la lluvia	Incorporación de una superficie compatible a distintos usos funcionales	Habilitación de espacios practicables para equipamientos varios
IN.1.1	Modelado de un disco superior con espacio disponible incorporando sistema de reutilización de aguas pluviales ✓		
IN.1.2	Modelado de un disco inferior con espacio disponible para la distribución de instalaciones	✓	
IN.1.3	Disposición de huecos practicables y accesibles		✓

Tabla 2.8: Objetivos y requerimientos relativos a la constitución del sistema e integración en el volumen arquitectónico.

La integración provoca la pronta activación de los mecanismos de regulación de potencia hasta forzar la parada de la turbina. Existen varios mecanismos de regulación integrables en las pequeñas turbinas:

- Sistemas pasivos: Este sistema recoge distintas técnicas para el diseño de palas las cuales una vez se supere el valor nominal reduzca la sustentación generada originando pequeños vórtices en el extremo de la pala [13, 18, 19]
- Modificación del ángulo de ataque de la pala: Este sistema queda englobado en el conjunto de mecanismos activos. En regímenes de vientos con velocidades relativamente elevadas, el mecanismo actúa incrementando el ángulo de incidencia del flujo produciendo una pérdida de sustentación [20, 21].
- Orientación del rotor: Este sistema característico en los rotores de eje horizontal se utiliza para orientar la góndola con respecto a la dirección del viento con objeto de conseguir la incidencia más efectiva. En el caso de pequeños aerogeneradores y con presencia de vientos importantes, este sistema actúa posicionando la góndola de manera perpendicular a la dirección del viento, minimizando la incidencia en las palas de la turbina.
- Mecanismos de control eléctrico: Estos mecanismos controlan la velocidad de rotación regulando la potencia de salida una vez se alcanza su valor máximo. [22].

La resolución de la problemática pasa inicialmente por la identificación de la interfaz de los anteriores estadios para poder actuar y adaptar la

**geometría con eficacia en función de las sollicitudes.** El rendimiento de la interfaz viene relacionado a la frecuencia de rotación de la turbina. A través de su monitorización se puede establecer una serie de hitos con el propósito de poder anticipar la adaptación de la interfaz a la activación de los mecanismos de la turbina.

En el caso de condiciones climatológicas inestables, fuertes vientos o ráfagas prolongadas con velocidades elevadas el flujo circulase a través de la interfaz bajo esta condiciones puede ocasionar consecuencias nefastas a la totalidad del sistema microenergético a tenor de las elevadas velocidades que se podrían alcanzar en su interior. La solución de esta problemática pasa por impedir el paso del viento al interior de la interfaz en los casos en que esta hipótesis se materialice.

### **2.3. Requerimientos relativos a la tecnología del sistema**

En esta sección se tratan aquellos materiales y técnicas de resolución necesarias para profundizar en la constitución del sistema. Estas prestaciones tienen origen en la información facilitada de las respuestas a la interrogante *¿Con qué...?*. Este contenido mejora la precisión de la solución final.

La estructura de la turbina se compone del eje de giro, la estructura de sujeción y la plataforma base. En diferentes nodos relativos a estos elementos, se ha justificado la necesidad de utilizar materiales ligeros de elevada resistencia estructural. El estudio de la resistencia de los materiales evalúa el comportamiento de un sólido determinado en el que actúan determinadas cargas de origen externo. La acción de estas cargas origina esfuerzos de diversa índole: flexión, compresión, tracción, torsión, etc. A las propiedades estructurales hay que unir aquellas propiedades que determinan la aptitud de un material frente a diferentes condiciones climatológicas: severo asoleamiento, ciclos térmicos extremos, emplazamientos con elevados niveles salinos, etc.

La elección de los materiales se lleva a cabo mediante un primer análisis de sus características estructurales en relación a este tipo de condiciones. Una vez se tenga una terna de materiales resistentes, se evalúa su aptitud para la exposición exterior. Este procedimiento se completa con la evaluación de los criterios circunstanciales, es decir criterios particulares del proyecto en particular; costes económicos, disponibilidad, mantenimiento, etc.

Los discos superior e inferior precisan de suficiente capacidad portante

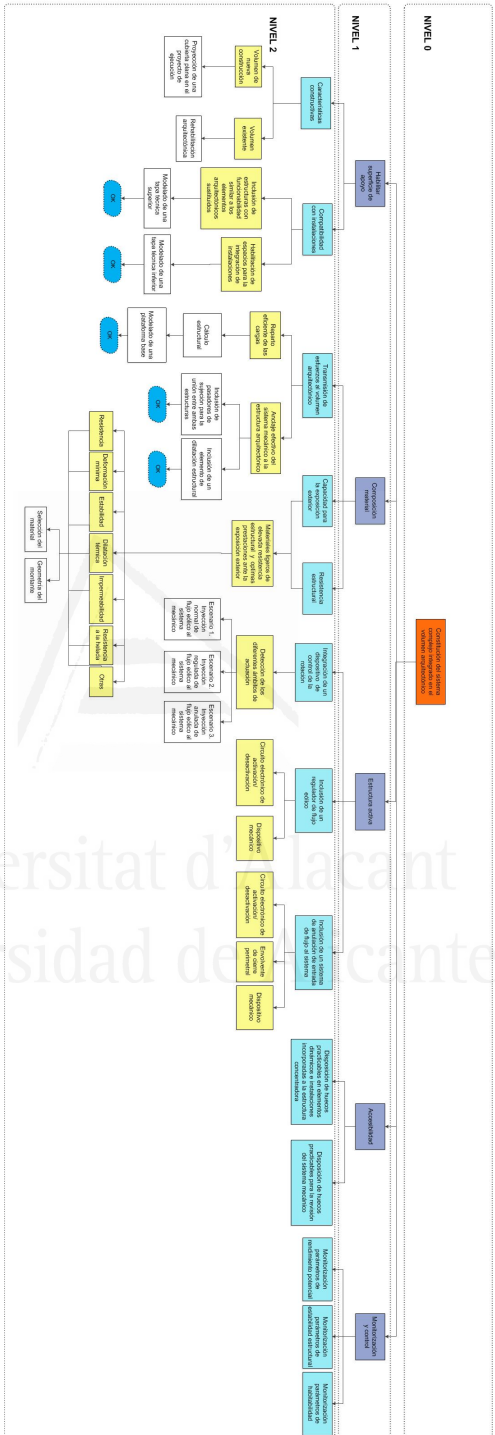


Figura 2.8: Árbol estructural, detalle nivel 2 relativo a la construcción e integración en el volumen arquitectónico.

para solventar los esfuerzos previstos. El disco superior se comporta como una superficie válida para el apoyo de sistemas fotovoltaicos o distinta maquinaria, así como soportar las posibles sobrecargas de agua o nieve. Se propone un diseño a base de doble panel sandwich con cámara intermedia con el propósito de insertar en su interior los mecanismos necesarios para el correcto funcionamiento de los distintos dispositivos. El disco se proyecta de manera que todos los elementos queden integrados en el interior de los paneles sandwich, modelando un elemento monolítico en una perspectiva exterior. El espesor del disco viene determinada por la altura de los elementos interiores integrados. La estructura de sustentación del disco se resuelve mediante disposición de una estructura portante en la parte central del alma de los álabes, consiguiendo que no hay perjuicio a la circulación del flujo a través de la interfaz. En el caso del disco inferior se propone un diseño similar al disco superior, compuesto por un doble panel sandwich con un núcleo honeycomb incluyendo en el caso del disco inferior una capa aislante a base de lana de roca, o similar y lámina de acabado de aluminio, fibra de vidrio o similar, y cámara de aire interior. Su modelado a modo de dispositivo elástico masa-muelle-masa mejora las prestaciones reforzadas con la inclusión de un aislante acústico tipo lana de roca o similar.

Los materiales empleados han ido evolucionando estos últimos años desde la utilización de aleaciones de aluminio y acero, hasta las actuales láminas de fibra de vidrio reforzada con resinas poliéster o epoxi, fibra de carbono o aramiditas, etc. Las últimas investigaciones en palas para grandes aerogeneradores están contextualizadas en la disciplina de la nanotecnología, con el objeto de fabricar materiales reforzados con nanotubos de carbono. M.R. Loos et al. [23] han desarrollado láminas de 29 pulgadas cinco veces más resistentes que los compuestos de fibra de carbono siendo más ligeras. Estos materiales satisfacen con suficiencia las solicitudes existentes en pequeñas turbinas eólicas, optimizando el peso del conjunto.

## 2.4. Conclusiones

A lo largo de este capítulo se ha profundizado en la definición de un método de caracterización de estructuras de concentración incorporadas en aerogeneradores de eje vertical, a partir de la aportación de requerimientos de carácter fundamental relativos al ámbito de la arquitectura, estructura y tecnología. Ello ha posibilitado la elaboración de un árbol de prestaciones y acciones a realizar para resolver dicha estructura. Este diagrama se sintetiza en la siguiente secuencia de pasos, delimitando el procedimiento

---

para caracterizar dichas estructuras.

En el capítulo siguiente se llevará a cabo la aplicación práctica de dicho método, detallándose los procedimientos necesarios para resolver los hitos incluidos.

Este método ha servido para precisar la siguiente definición del sistema de microgeneración concentrador de corrientes eólicas, en adelante conocido como sistema de microgeneración **EOLIA**:

*Sistema de generación eléctrica de uso doméstico integrado en un volumen arquitectónico, compuesto por:*

- *un aerogenerador de eje vertical con estructura modelada mediante software de cálculo estructural y palas de rotación de geometría óptima para el aprovechamiento de la inyección, constituidos por materiales ligeros y de elevada resistencia estructural.*
- *un sistema estructural circunscrito a la turbina encargado de la captación y aceleración de las brisas superficiales mediante su paso a través de los tramos convergentes modelados para minimizar la capa límite generada y conseguir una inyección eficiente sin efectos turbulentos en las palas de rotación, incorporando un disco superior e inferior para dotar de estabilidad estructural al conjunto y habilitando espacios para la distribución y soporte de instalaciones varias, todo ello integrando el sistema resultante en la cubierta horizontal sin que existan elementos que impidan la circulación libre de la corriente eólica.*

Universidad de Alicante

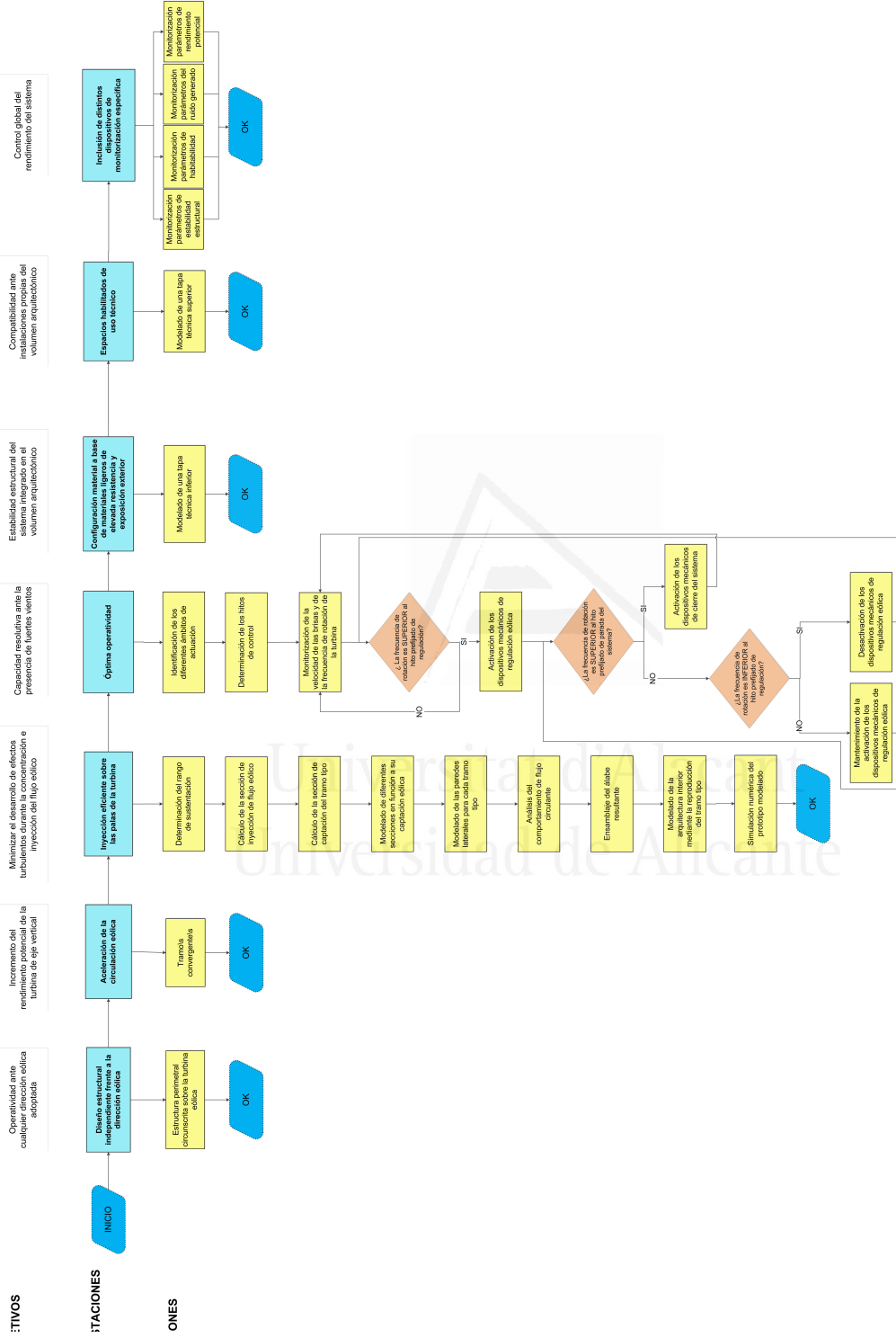


Figura 2.9: Método de caracterización de estructuras de concentración en rotores de eje vertical.

---

## Bibliografía

- [1] José Luis Rodríguez Amenedo, Juan Carlos Burgos Díaz, and Santiago Arnalte Gómez. *Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica*. 2003.
- [2] Andoni Urtasun, Pablo Sanchis, Idoia San Martín, Jesús López, and Luis Marroyo. Modeling of small wind turbines based on pmsg with diode bridge for sensorless maximum power tracking. *Renewable energy*, 55:138–149, 2013.
- [3] Hee-Sang Ko. Modeling and control of pmsg-based variable-speed wind turbine. In *Wind Turbine Control and Monitoring*, pages 3–21. Springer, 2014.
- [4] Hong-Woo Kim, Sung-Soo Kim, and Hee-Sang Ko. Modeling and control of pmsg-based variable-speed wind turbine. *Electric Power Systems Research*, 80(1):46–52, 2010.
- [5] Mahinsasa Narayana, GA Putrus, Milutin Jovanovic, Pak Sing Leung, and S McDonald. Generic maximum power point tracking controller for small-scale wind turbines. *Renewable Energy*, 44:72–79, 2012.
- [6] Tae-Uk Jung. Electromagnetic design analysis and performance improvement of axial field permanent magnet generator for small wind turbine. *Journal of Applied Physics*, 111(7):07E708, 2012.
- [7] I Şerban and C Marinescu. A sensorless control method for variable-speed small wind turbines. *Renewable Energy*, 43:256–266, 2012.
- [8] Sufang Zhang and Jianxun Qi. Small wind power in china: Current status and future potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5):2457–2460, 2011.
- [9] Frede Blaabjerg, Marco Liserre, and Ke Ma. Power electronics converters for wind turbine systems. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 48(2):708–719, 2012.
- [10] Oliver Gutfleisch, Matthew A Willard, Ekkes Brück, Christina H Chen, SG Sankar, and J Ping Liu. Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient. *Advanced Materials*, 23(7):821–842, 2011.
- [11] Herbert J Sutherland, Dale E Berg, and Thomas D Ashwill. A retrospective of vawt technology. *Sandia Report, SAND2012-0304*, 2012.
- [12] Gunjit S Bir and Paul G Migliore. *Preliminary structural design of composite blades for two-and three-blade rotors*. National Renewable Energy Laboratory, 2004.
- [13] Changduk Kong, J Bang, and Y Sugiyama. Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life. *Energy*, 30(11):2101–2114, 2005.
- [14] C Monroy Aceves, MPF Sutcliffe, MF Ashby, AA Skordos, and C Rodriguez Roman. Design methodology for composite structures: a small low air-speed wind turbine blade case study. *Materials & Design*, 36:296–305, 2012.
- [15] RH Barnes, EV Morozov, and K Shankar. Improved methodology for design of low wind speed specific wind turbine blades. *Composite Structures*, 119:677–684, 2015.
- [16] HF Zhou, HY Dou, LZ Qin, Y Chen, YQ Ni, and JM Ko. A review of full-scale structural testing of wind turbine blades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33:177–187, 2014.

- [17] Malcolm McGugan, G Pereira, Bent F Sørensen, H Toftegaard, and Kim Branner. Damage tolerance and structural monitoring for wind turbine blades. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2035):20140077, 2015.
- [18] Ezzeldin S Abdin and Wilson Xu. Control design and dynamic performance analysis of a wind turbine-induction generator unit. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 15(1):91–96, 2000.
- [19] Peter J Schubel and Richard J Crossley. Wind turbine blade design. *Energies*, 5(9):3425–3449, 2012.
- [20] Eduard Muljadi and Charles P Butterfield. Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 37(1):240–246, 2001.
- [21] Baku M Nagai, Kazumasa Ameku, and Jitendro Nath Roy. Performance of a 3kw wind turbine generator with variable pitch control system. *Applied Energy*, 86(9):1774–1782, 2009.
- [22] Francisco González-Longatt. Comportamiento de turbinas de viento a velocidad constante accionando generador de inducción de rotor tipo jaula de ardilla. *I Exposición Industrial Internacional de Energía Eólica*, 2008.
- [23] MR Loos, J Yang, DL Feke, I Manas-Zloczower, S Unal, and U Younes. Enhancement of fatigue life of polyurethane composites containing carbon nanotubes. *Composites Part B: Engineering*, 44(1):740–744, 2013.





Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

---

# 3

## Diseño del prototipo

Esta sección comprende el modelado y análisis del comportamiento de un prototipo diseñado a partir de la especificación estructural dada. En primer lugar se lleva a cabo el modelado de la arquitectura interior paso a paso en relación al número de tramos. Se realizarán una terna de varios prototipos con objeto de evaluar su comportamiento mediante respectivas simulaciones en el ámbito de la fluidodinámica computacional utilizando software CFD.

Antes de iniciar el modelado, es preciso establecer las siguientes hipótesis iniciales:

- a) En relación al emplazamiento, se ha seleccionado un terreno tipo sin accidentes geográficos de relevancia, alejado de zona costera, con vegetación dispersa con una altura de arbolado inferior a 10 m. La longitud de rugosidad ( $z_0$ ) es un parámetro asociado a la tipología del terreno, siendo de utilidad para la estimación de perfiles de velocidad eólicas turbulentas. Una de estas expresiones es la descrita a continuación,

$$\frac{dU(z)}{dt} = \frac{1}{\kappa} * u^* * \left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right] + \Psi \quad (3.1)$$

Siendo  $u^*$  la velocidad de agitación turbulenta,  $\kappa$  la constante de Von Kármán,  $z$  la distancia al suelo,  $z_0$  la longitud rugosidad y  $\Psi$  la estabilidad atmosférica. A lo largo de los años son varias las

investigaciones realizadas con el propósito de especificar un mayor número de tipologías. En términos de longitud de rugosidad, la hipótesis establecida se corresponde con un valor estimado de 0,05m.

**Tabla 3.1. Longitud de rugosidad en relación al tipo de terreno**

metros

Fuente: Eurocódigo EN 1991-1-4

Categoría del terreno		$z_0$
0	Borde del mar o zonas costeras expuestas a mar abierto	0.003
I	Superficies con vegetación baja como hierba y obstáculos aislados (árboles, edificios) con separaciones de al menos 20 veces la altura del obstáculo	0.01
II	Superficies con vegetación baja como hierba y obstáculos aislados (árboles, edificios) con separaciones de al menos 20 veces la altura del obstáculo	0.05
III	Superficies cubiertas con vegetación rural o con edificios o con obstáculos aislados con separaciones de un máximo de 20 veces la altura del obstáculo (pueblos, terreno suburbano o bosques)	0.30
IV	Superficies en las cuales al menos el 15 % de la superficie está cubierta por edificios y su altura media excede de los 15 m.	1.00

Tabla 3.1: Longitud de rugosidad en relación al tipo de terreno según el Eurocódigo EN 1991-1-4.

**Tabla 3.2. Longitud de rugosidad en relación al tipo de terreno**

metros

Fuente: Ver referencias [1-3]

Categoría del terreno		$z_0$
0	Superficie de hielo	$10^{-5}$
I	Mar abierto sin olas, grandes lagos	$10^{-4}$
II	Zonas costeras, desiertos	$10^{-3} - 2 * 10^{-3}$
III	Superficie nevada	$10^{-3} - 5 * 10^{-3}$
IV	Vegetación de poca altura y escasas edificaciones	0,01 – 0,03
V	Vegetación con altura típica de un metro	0,1 – 0,2
VI	Pueblos y suburbios de casas bajas	0,2 – 0,4
VII	Bosques	0,4 – 0,6
VIII	Centros de ciudades y suburbios densamente poblados	0,6 – 1,2
IX	Centros de grandes ciudades con edificios muy altos	2,0 – 3,0

Tabla 3.2: Longitud de rugosidad en relación a distintas tipologías de terreno.

b) En relación a las brisas, se ilustra en la figura 3.1 un perfil tipo de velocidades y dirección característico del emplazamiento dado.

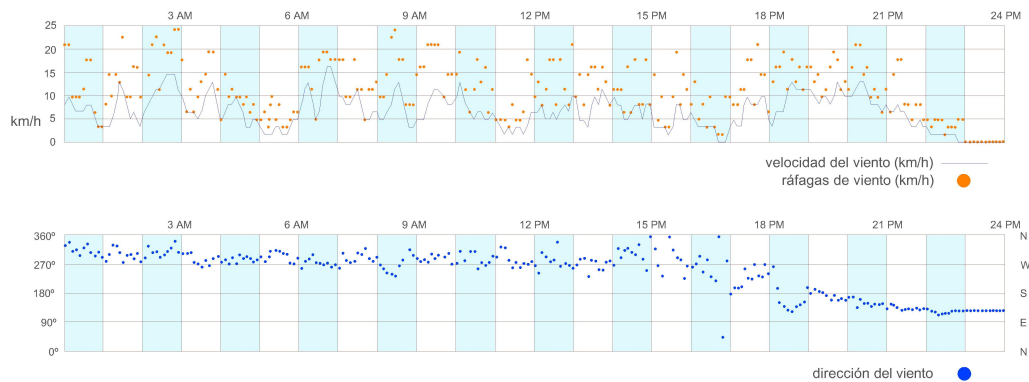


Figura 3.1: Perfil de velocidades y sentido de circulación en el emplazamiento dado.

La velocidad promedio del viento oscila entre los 5 y 15 km/h (1.39 y 4.17 m/s respectivamente), produciéndose ráfagas periódicas superando en algunos casos los 20 km/h (5.55 m/s). En cuanto al perfil de direcciones, el primer tramo del día, de 0:00 am a 15:00 pm, se comprende en un rango acimutal entre 90° y 120°. El segundo tramo del día, de 15:00 pm a 21:00 pm, comprende un rango acimutal superior a los 250° manteniéndose con pequeñas variaciones durante las últimas tres horas del día. La densidad del aire se determina como constante debido a la escasa relevancia de su variación en base a los cambios en la temperatura ambiente. En consecuencia, se fija un valor de  $1,204kg/m^3$  en un contexto tipo con temperatura ambiente de 20°, siendo su viscosidad cinemática  $1,501 * 10^{-5}m^2/s$ .

- c) En relación a la vivienda, se ha optado por un prisma homogéneo de base cuadrangular con objeto de minimizar el impacto de su geometría en la circulación eólica. El volumen consta de planta semisótano, baja y planta tipo, distribuyéndose 3 dormitorios, 2 baños, salón-estar, cocina, galería y terraza exterior en planta baja (véanse planos V-0/V-4). Las distintas simulaciones recogidas en el plano V-05 muestran la adaptación del flujo al volumen constructivo. En los alzados se observa la aceleración que experimenta el flujo en su propósito de salvar el volumen. Mientras en planta, se observa la zona de sombra y el desarrollo de una estela posterior, resultado de una simulación con brisas predominantes a 4 m/s (14.4 km/h) durante un periodo  $t= 20$  sg.
- d) En relación al aerogenerador, se utiliza un rotor de eje vertical tipo giromill de radio 2 m. El número de palas dispuestas son tres, en línea con los

resultados obtenidos por M. Castelli et al. [4] relativos al rendimiento de distintas configuraciones de rotor vertical en función a su número de palas.

### 3.1. Modelado de la arquitectura interior de la estructura concentradora

El procedimiento de cálculo se detalla en los planos con nomenclatura I-xx. El plano I-01 describe el procedimiento inicial para determinar el valor de  $\beta$ , entendiéndose que este parámetro mide el ángulo de ataque del flujo en la incidencia con el perfil aerodinámico.

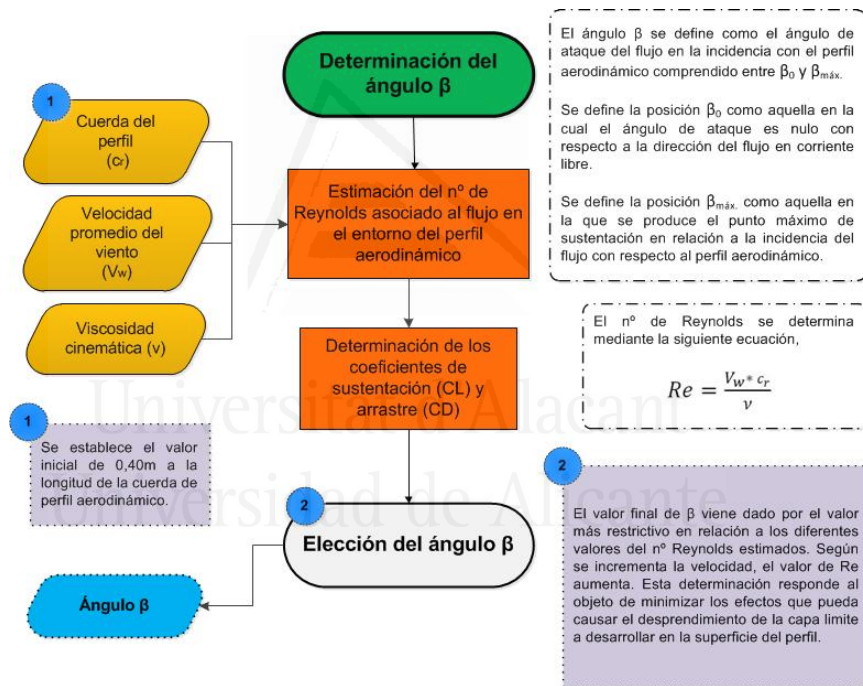


Figura 3.2: Procedimiento para la determinación del rango de sustentación en función al perfil aerodinámico.

En este caso, el valor de  $\beta$  se concreta en la horquilla comprendida entre el punto que se corresponde con un valor nulo, definido como  $\beta_0$ , y el punto en el cual se produce el valor máximo de sustentación, definido como  $\beta_{max}$ . Este ángulo se define a partir de la intersección entre la cuerda del perfil y el sentido de circulación de las brisas. En el caso de perfiles asimétricos, el valor de  $\beta_0$  se produce en un ángulo de ataque levemente negativo.

En el diseño del tramo o tobera tipo, la sección de inyección está asociada a  $\beta$  en base a su propósito de inyectar el flujo dentro de los límites determinados por su valor. Ello implica que para cada perfil exista una determinada sección de inyección tipo, y por ende una posible arquitectura interior de la interfaz. En consecuencia, con objeto de estandarizar este diseño con independencia del perfil utilizado, se adopta un valor de  $\beta = 12^\circ$ .

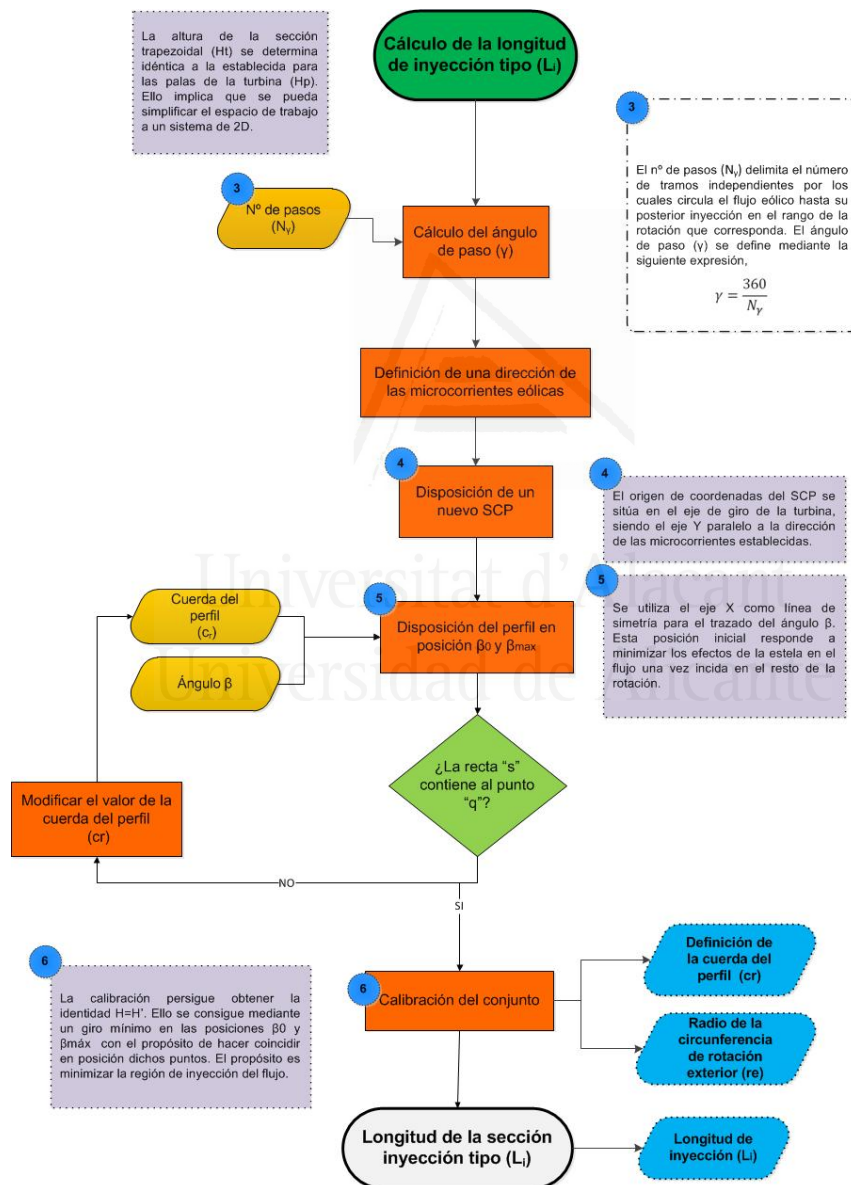


Figura 3.3: Geometría de la sección tipo. Determinación de la base de inyección

---

El valor de los coeficientes de sustentación y arrastre son determinados en diferentes ensayos practicados en el túnel del viento. En el plano se detalla la sección por puntos del perfil tipo utilizado, en este caso un modelo NACA 2412, junto al valor de los coeficientes de sustentación y arrastre en función al número de Reynolds.

En el plano *I-02*, se detalla el procedimiento para la definición de la base de inyección. La altura efectiva de la sección tipo se asocia al valor que alcance la pala de la turbina, lo que permite trabajar en un espacio bidimensional.

Se define una dirección de circulación para las brisas. El sistema de coordenadas se dispone con origen en el eje de la turbina, siendo el eje Y paralelo a la dirección del viento. El parámetro  $N_\gamma$  define el número de tramos en los que se divide la interfaz. El ángulo  $\gamma$  delimita el rango unitario resultante, y la porción de la rotación en la que un tramo tipo inyecta el flujo eólico.

$$\gamma = \frac{360}{N_\gamma} \quad (3.2)$$

La región comprendida por el ángulo  $\beta$  se proyecta en torno al eje X, perpendicular a la dirección del viento, con objeto de minimizar los efectos negativos de la estela generada al resto de rotación ejercida. Utilizándolo como eje de simetría se posiciona el rango comprendido entre  $\beta_0$  y  $\beta_{max}$ . De esta posición inicial, se fija la posición del punto  $E_{max}$  para utilizarlo como referencia en el proceso. El propósito es conseguir encajar el rango anterior dentro de la horquilla comprendida por el ángulo  $\gamma$ . Ello se reduce a conseguir que la recta  $s'$  sea coincidente con el punto Q. Esta acción se consigue mediante la iteración del valor de la cuerda a partir de  $E_{max}$  y actualizando la posición de los elementos definidos hasta el propósito definido. Se realiza el giro del conjunto con punto base en el origen de coordenadas, con objeto de conseguir la igualdad  $H = H'$ , tal y como se muestra en la figura proyectada en el plano. La longitud de inyección resulta de la intersección entre la recta  $t$ , y la recta  $m$ .

En el plano *I-03* se resuelve la sección tipo con el cálculo de la base de mayor longitud aplicando la ecuación de continuidad. Su proyección se realiza utilizando la mediatriz del segmento  $\bar{JQ}$  como eje de simetría. Con el propósito de conocer la geometría más efectiva se proyectan distintas secciones en función a su ángulo  $\epsilon$  para su posterior análisis. El ángulo  $\epsilon$  define el rango angular del tramo tipo. La superficie de barrido en un aerogenerador tipo giromill viene dada por la expresión 3.3,

$$S = \phi_i * H \quad (3.3)$$

Siendo  $\phi$  el diámetro de la interfaz y  $H$  la altura de los perfiles aerodinámicos. La integración de la interfaz permite aumentar dicha superficie. Para su estimación, se introduce un coeficiente de captación con objeto de relacionar la entrada de flujo en los diferentes tramos en función al perímetro de la interfaz.

$$S = C_c * \phi_i * H \quad (3.4)$$

En el plano *I-04a* se ilustra dicho procedimiento, mientras que en el plano *I-04b* se muestra el caso particular en el cual el coeficiente de captación resulta  $C_c = 1$ .

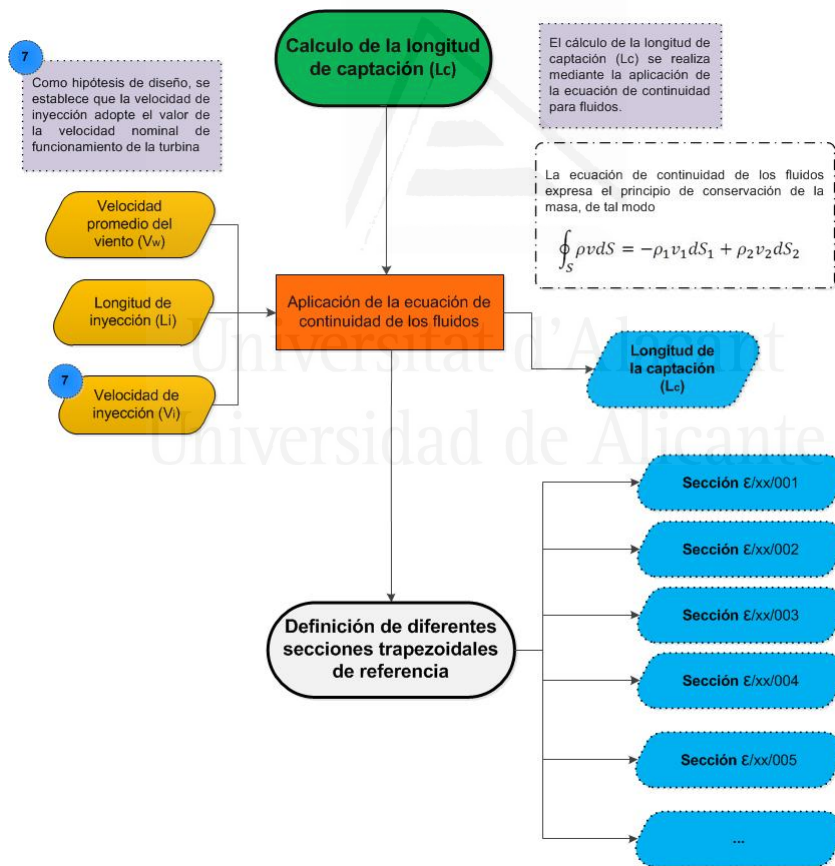


Figura 3.4: Geometría de la sección tipo. Determinación de la base de captación.

En el plano *I-05* se detalla el proceso de modelado de las caras en los



tramos tipo y su posterior ensamblaje para la constitución de superficies perpendiculares, en adelante designadas como álabes. Con la ayuda de un mallado se discretiza el espacio de trabajo para poder definir las posibles soluciones. El mallado rectangular queda definido por un paso unitario longitudinal para la altura ( $L_u$ ), y un paso angular unitario definido ( $W_u$ ).

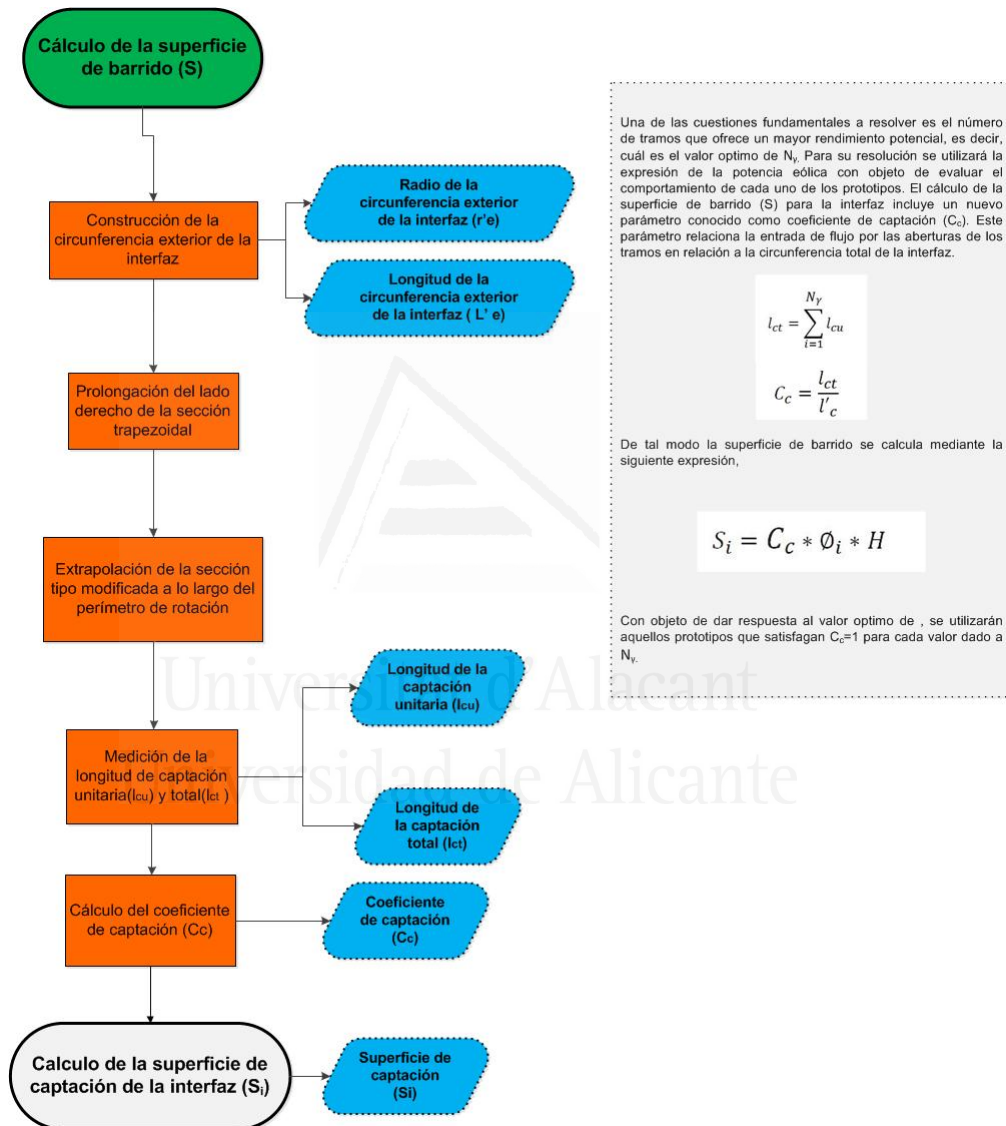


Figura 3.5: Procedimiento para la determinación de la superficie de captación de la interfaz.

Las distintas soluciones se componen de una concatenación de segmentos con objeto de poder estimar la capa límite a desarrollar a partir del cálculo del espesor de desplazamiento. La aplicación del algoritmo de Dijkstra en las

posibles soluciones define aquella concatenación que menor  $\delta^{**}$  global genera, y sobre la cual se puede definir su función curva. Dicho algoritmo determina el camino más corto entre dos vértices de un determinado grafo teniendo en cuenta el peso en cada arista. Se obtienen dos soluciones para cada pared, una cóncava y otra convexa, derivando en cuatro posibles configuración para la sección de la tobera.

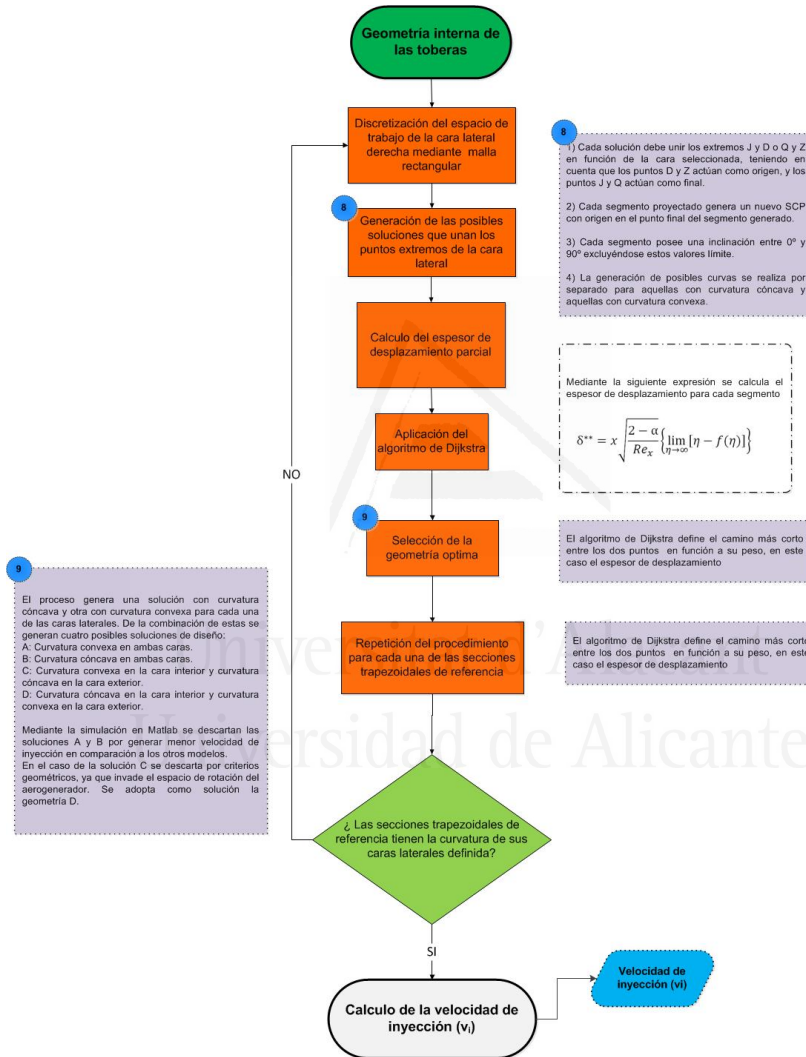


Figura 3.6: Modelado de las caras interiores de los tramos y constitución de los álabes de la interfaz.

Mediante simulación numérica con el software Simulink de Matlab, se obtiene que las configuraciones C y D ofrecen un mayor velocidad en la inyección del flujo. La configuración D se desecha por imposibilitar el

---

ensamblaje de la arquitectura de los álabes al invadirse el espacio reservado para la rotación de las palas de la turbina.

En relación al número  $N_\gamma$ , a partir de 14 aberturas los prototipos derivan en toberas con un menor recorrido. Una de las consecuencias directas de esta configuración es la reducción que se produce en el diámetro de la interfaz y por tanto en la superficie de captación de flujo eólico. En lo que respecta a la arquitectura interior, estos prototipos adolecen de álabes con una sección más reducida, tanto en longitud global como en el ancho del alma, en comparación a los prototipos con un menor número de aberturas.

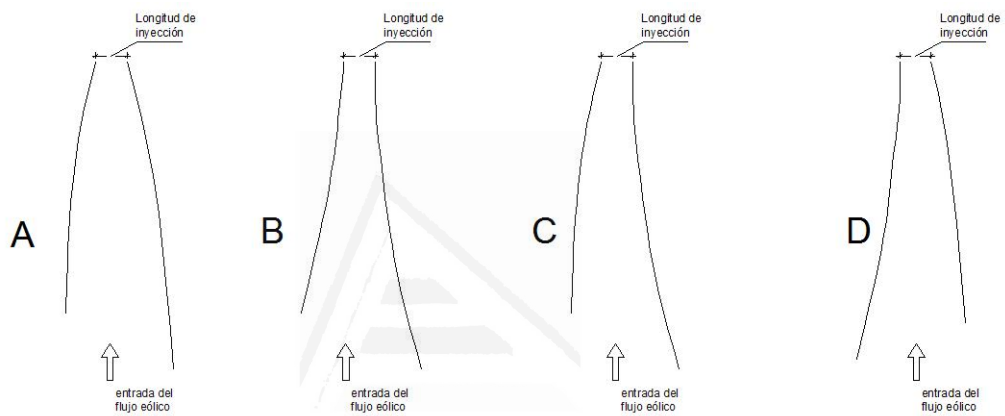


Figura 3.7: Posibilidades de configuración de las toberas.

Esta geometría fomenta que se produzca una circulación zigzagueante en el interior del tramo debido a la formación de vórtices tanto en la entrada como en la inyección, alejándose de la uniformidad pretendida. En el plano I-08 se ilustra la arquitectura del prototipo C, correspondiente a un valor de  $N_\gamma = 14$ , incluyendo un detalle del fenómeno comentado. Los resultados de la simulación representados en la tabla 3.4 y en los planos S-01/03 ratifican que este comportamiento reduce la velocidad de inyección sensiblemente respecto a los otros prototipos a analizar. A ello hay que unir la dificultad de aprovechamiento del alma de estas secciones interiores a efectos estructurales.

En el caso de prototipos con un número de aberturas inferiores a 12 presentan álabes definidos con curvas de mayor grado de convexidad, provocando un mayor arrastre y velocidades de inyección incluso menores a las registradas por el prototipo C. Los prototipos A, B y C definidos por sus arquitectura interiores a partir de  $N_\gamma = 12$ ,  $N_\gamma = 13$  y  $N_\gamma = 14$  respectivamente, son los modelos a analizar mediante simulación CFD (véase planos I-06 a I-08).

El modelado de la arquitectura interior de la estructura se realiza siguiendo el procedimiento descrito, detallándose en los planos con nomenclatura I-xx. Se realiza el cálculo de varios prototipos con objeto de valorar cuál es el número óptimo de tramos a efectos de potencia eólica de impulsión.

### 3.2. Simulación numérica mediante software CFD

El análisis de las diferentes arquitecturas se realiza mediante distintas simulaciones con el software ANSYS 14.5. Para la evaluación de los distintos prototipos se ha discretizado el dominio del fluido mediante una malla tetraédrica según los criterios recogidos en la siguiente tabla.

**Tabla 3.3. Características de la malla**

comando	criterio
<b>Sizing</b>	
Method	Triangles
Use Advanced Siz Function	On: Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Span Angle Center	Fine
Type	Element Size
Element Size	$5e^{-02}m$
Behavior	Hard
<b>Inflation</b>	
Inflation Option	First Layer Thickness
First Layer Height	$2,5e^{-003} m$
Maximum Layers	6
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre

Tabla 3.3: Características generales de la malla a utilizar en las simulaciones mediante software ANSYS 14.5.

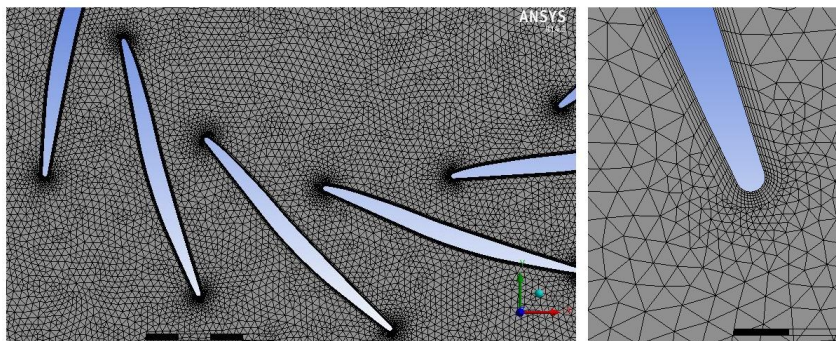


Figura 3.8: Detalle del mallado utilizado para los distintos prototipos

En el contorno de las superficies se ha utilizado la opción *inflation*, aumentando el número de elementos para mejorar la adaptación de la malla

y la precisión en los resultados. En la figura 3.8 se observa el detalle de la malla en el contorno de la geometría interior de la interfaz.

Tabla 3.4. Criterios de simulación

comando	magnitud
<b>Models</b>	
Model	Settings
Space	2D
Time	Unsteady, 1st-Order Implicit
Viscous	Transition SST model
<b>Material Properties</b>	
<b>air (fluid)</b>	
Density	1.225 kg/m <sup>3</sup>
Cp (Specific Heat)	1006.43 J/kg-k
Thermal Conductivity	0.0242w/m-k
Viscosity	1.7894 e <sup>-05</sup> kg/m-s
Molecular Weight	28.966 kg/kgmol
<b>Boundary Conditions</b>	
<b>inlet</b>	
Velocity Specification Method	1
X-Velocity (m/s)	Ver planos S-01/03
Y-Velocity (m/s)	Ver planos S-01/03
Angular velocity (rad/s)	0
Turbulent Specification Method	2
Intermittency	1
Turbulent Kinetic Energy (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	1
Specific Dissipation Rate (1/s)	1
Turbulent Intensity (%)	5
Turbulent Length Scale (m)	1
Hydraulic Diameter (m)	1
Turbulent Viscosity Ratio	10
is zone used in mixing-plane model?	no
<b>Solver Settings</b>	
Flow	yes
Turbulence	yes
Absolute Velocity Formulation	yes
Time Step (s)	0.001
Max. Iterations Per Time Step	50
Pressure	0.3
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.7
Turbulent Kinetic Energy	0.8
Specific Dissipation Rate	0.8
Intermittency	0.8
Momentum Thickness Re	0.8
Turbulent Viscosity	1
<b>Pressure-Velocity Coupling</b>	
Type	PISO
Skewness-Neighbour Coupling	yes
Skewness Correction	1
Neighbour Correction	1
<b>Discretization Scheme</b>	
Pressure	PRESTO!
Momentum	First Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	First Order Upwind
Specific Dissipation Rate	First Order Upwind
Intermittency	First Order Upwind
Momentum Thickness Re	First Order Upwind
<b>Solution Limits</b>	
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5e <sup>10</sup>
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e <sup>-14</sup>
Minimum Spec. Dissipation Rate	1e <sup>-20</sup>
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

Tabla 3.4: Criterios para la ejecución de las simulaciones mediante software ANSYS 14.5.

Para la simulación de las brisas se ha seleccionado un modelo de turbulencia (Shear Stress Transport turbulence model), ofreciendo una mayor

precisión en flujos turbulentos y fenómenos de desprendimientos de capas límites de superficies materiales [5]. El resto de condiciones de la simulación se ilustran en la tabla 3.4. Los resultados de las distintas simulaciones se recogen en los planos S-00/05, mientras que en la tabla 3.5 se muestra el valor de un vector característico de referencia en relación a su posición acimutal.

En los planos se incluye una nomenclatura específica para identificar el punto en el cual se originan los fenómenos de relevancia. En la arquitectura interior se han definido cuatro áreas con el propósito de delimitar los fenómenos desarrollados. A partir de una dirección en la circulación libre, se definen una región de ataque y otra de cola. La región de ataque es la mitad de la interfaz enfrentada a la corriente eólica, mientras que la región de cola es aquella que permanece en sombra. Estas dos regiones se dividen a su vez en dos subregiones en función al sentido de giro a adoptar. A ello hay que añadir la numeración de cada tramo de la interfaz con origen en la subregión de ataque en contra de giro.

A la vista de los resultados, el prototipo B, en adelante prototipo B01, ofrece un mejor rendimiento en comparación a los prototipos A y C. La velocidad de inyección es superior manteniendo una mejor uniformidad en especial con el prototipo C.

### **3.3. Dinámica eólica en la interfaz concentradora**

A lo largo de las distintas simulaciones se han observado comportamientos singulares que precisan de análisis. A partir de su descripción, se tratarán con especial interés aquellos que disminuyan la capacidad operativa de la interfaz, bajo el propósito de mejorar el grado de eficiencia del diseño inicial.

#### **3.3.1. Circulación interior alrededor de la rotación**

Uno de los fenómenos observados es el desarrollo de una circulación interior alrededor de las palas una vez producida sucesivas inyecciones de flujo. La sectorización practicada fomenta que se inyecte flujo acelerado progresivamente, lo que permite que se mantenga una circulación interior perimetral de velocidad elevada durante la rotación. Este comportamiento produce un efecto vórtice interior promoviendo una rotación efectiva de las palas de la turbina con brisas con velocidades moderadas.

En las simulaciones iniciales ilustradas en el plano S-02 se observa como la circulación interior avanza sin completarse el ciclo. Esta circunstancia se

Tabla 3.5. Velocidad de inyección con respecto a su posición acimutal  
metros/segundo

Fuente: Elaboración propia

posición	A							B							C						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
-90	-0.58	-1.43	-2.27	-3.69	10.81	12.21	15.50	-0.70	-0.88	-1.67	-2.04	8.88	12.92	17.88	-0.70	-0.40	-0.67	-1.41	4.95	10.39	11.11
-80	-0.79	-1.51	-1.91	-2.29	3.92	10.00	9.50	-0.74	-1.41	-2.18	-3.14	3.67	6.47	7.84	-0.32	-0.87	-1.89	-3.20	4.27	5.79	7.98
-70	-0.75	-0.96	-1.08	-1.24	4.38	8.89	13.92	-0.60	-0.70	-0.77	-0.76	3.93	8.73	11.18	-0.28	-0.54	-1.14	-2.43	1.55	6.48	10.54
-60	-0.25	-0.25	-0.61	1.04	6.44	11.38	15.18	-0.28	-0.35	-0.77	-1.44	6.01	10.98	16.76	0.21	0.40	0.57	0.65	1.89	4.17	5.99
-50	-0.17	0.33	0.73	1.24	2.08	4.18	6.97	0.37	1.23	2.05	1.86	1.06	2.60	7.84	0.11	1.27	1.89	0.65	1.89	4.17	5.13
-40	0.25	1.35	1.79	1.94	1.63	3.90	8.24	0.70	1.41	2.18	2.77	1.58	3.57	7.46	0.57	2.88	2.08	1.16	1.51	2.33	4.85
-30	0.42	1.75	2.03	2.11	2.31	3.35	7.29	0.70	1.67	2.05	2.22	2.63	3.25	6.35	0.67	2.21	3.60	2.69	2.57	6.71	4.56
-20	1.63	2.14	2.62	3.86	5.53	8.33	7.92	2.05	3.43	5.25	7.17	7.84	9.69	11.18	0.77	3.28	3.97	3.83	2.55	6.71	7.13
-10	1.50	4.50	6.06	7.18	9.40	10.55	13.29	1.81	3.17	6.28	7.53	8.10	10.02	11.93	1.97	3.75	4.54	5.36	5.63	7.86	8.83
0	1.21	3.95	5.46	6.65	7.59	8.33	10.76	1.44	4.40	6.15	6.98	6.80	7.76	9.70	1.51	4.02	5.11	6.89	7.34	6.48	7.98
10	2.29	4.27	5.94	7.23	10.35	12.49	12.66	2.51	3.70	5.76	8.27	10.44	12.92	15.28	2.32	4.29	5.67	5.72	7.00	8.78	10.54
20	2.50	4.90	6.77	8.75	9.89	12.21	15.18	2.51	4.93	6.92	8.08	10.18	12.56	14.90	2.04	4.35	6.05	7.53	8.19	10.62	11.96
30	1.38	3.87	5.58	7.35	7.59	8.89	12.97	2.09	4.58	6.79	7.72	8.62	10.66	13.04	2.08	4.02	4.82	6.89	7.85	8.78	10.83
40	2.29	4.11	5.70	7.18	8.50	10.55	12.34	1.91	4.31	6.02	6.80	7.06	9.05	10.07	2.32	3.82	5.39	6.26	7.85	8.78	10.26
50	2.33	4.66	6.53	8.23	9.66	11.94	13.92	2.46	4.76	6.53	8.08	9.40	12.27	13.42	2.04	4.15	5.86	7.53	8.70	10.16	11.96
60	1.83	4.11	5.82	7.53	8.51	10.55	12.66	2.14	4.31	6.15	7.53	8.88	10.34	13.79	1.90	3.68	5.11	6.38	8.36	9.93	11.68
70	2.00	4.19	6.06	7.53	8.28	9.17	12.03	1.86	3.61	5.12	6.44	7.58	9.37	12.67	2.04	2.95	5.20	6.89	7.51	9.01	10.54
80	2.21	4.34	6.17	7.88	9.43	11.94	14.24	2.19	4.31	6.15	7.72	9.14	10.98	13.42	2.01	3.62	5.39	6.64	8.36	9.47	11.40
90	1.67	4.27	6.17	7.88	9.89	11.66	13.92	2.37	4.40	6.15	7.90	9.14	10.66	10.81	1.69	3.48	4.07	7.02	7.51	9.70	10.54
100	1.38	3.64	5.46	7.18	8.28	10.00	12.34	1.58	3.43	5.12	6.62	7.58	9.37	10.44	1.51	3.21	4.73	6.51	7.34	9.24	11.11
110	1.42	3.72	5.82	7.53	8.74	11.38	12.97	1.77	4.05	5.51	7.53	8.36	9.69	11.56	1.55	3.48	5.30	7.28	8.36	9.24	10.83
120	1.38	4.03	7.00	8.40	9.43	12.17	13.92	1.49	4.23	6.66	9.55	10.18	12.27	13.04	1.23	2.88	4.35	5.49	7.51	9.93	9.40
130	0.96	3.01	4.99	7.00	8.57	8.33	11.71	1.30	3.70	6.15	5.52	9.14	10.02	11.56	0.99	3.15	4.07	6.13	8.02	7.86	9.12
140	0.83	2.06	4.40	6.30	6.90	8.83	11.40	1.21	3.43	5.25	6.62	8.10	9.05	9.70	1.13	2.41	4.16	5.49	8.70	9.01	10.54
150	1.21	2.53	6.89	8.40	8.51	9.44	13.92	1.30	4.05	6.28	7.90	11.49	11.30	13.42	0.88	1.67	3.69	4.22	5.97	6.25	8.83
160	0.88	1.98	3.45	5.61	8.05	7.78	10.13	0.88	2.90	4.87	6.62	8.10	8.73	10.07	0.74	2.08	4.73	6.64	8.36	9.93	9.97
170	0.04	0.80	4.28	7.35	8.74	10.00	10.45	0.56	2.20	4.74	6.98	9.66	10.02	10.44	0.67	1.27	3.12	5.75	7.00	8.09	9.40

Tabla 3.5: Simulación en los prototipos A, B y C. Vector característico de la velocidad de inyección con respecto a su posición acimutal.

debe al tiempo de exposición  $t=2$  sg establecido para cada simulación. En el plano M-01 se ilustran los resultados obtenidos incrementado el tiempo de exposición de la simulación. A partir de  $t=5$  sg se observa como se completa un ciclo completo con velocidad igual o superior a la prevista para la circulación libre. Según se incrementa el tiempo de exposición los valores intermedios se incrementan progresivamente gracias a la retroalimentación de flujo que se produce en las toberas de ataque. Tanto el torque como la sustentación generada es exponencialmente superior a la generada en una turbina convencional, gracias a la incidencia en el rango de  $\beta$ .

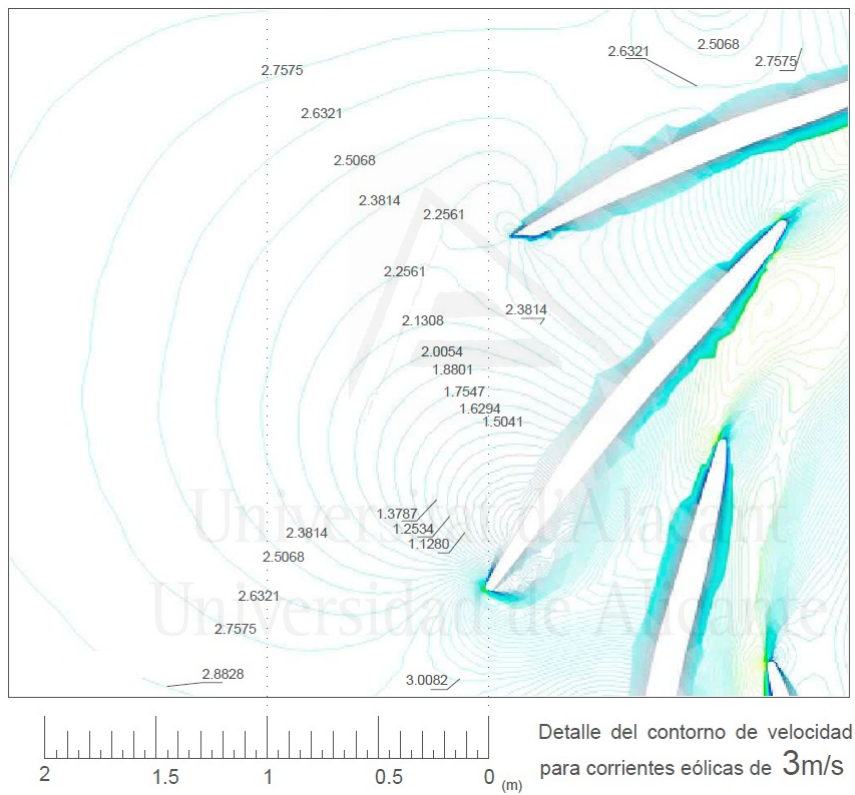


Figura 3.9: Zona de remanso originada en las proximidades a la interfaz concentradora.

Tomando como ejemplo la simulación obtenida a partir de un periodo  $t=40$ sg para brisas eólicas con velocidad promedio de 3 m/s, la velocidad de circulación obtenida para el prototipo B01 se sitúa en 5.57 m/s. Hay que tener en cuenta la zona de remanso que se origina en las proximidades de la interfaz debido a su adaptación a dicha geometría. En el plano S-04 se ilustra el impacto de dicho fenómeno. En el caso de una circulación eólica con una velocidad promedio de 3 m/s, a la entrada de las toberas 4 y 5 la velocidad



---

ha disminuido un 24.8 % y 8.4 % respectivamente.

### 3.3.2. Comportamiento de la interfaz en relación al radio de la turbina

El sistema **EOLIA** está concebido para el aprovechamiento de las brisas eólicas circulantes sobre la superficie terrestre para la generación de electricidad de uso doméstico. Es decir, queda englobado dentro del conjunto de los sistemas de microgeneración. El diseño de la interfaz así como los cálculos y simulaciones realizadas se han realizado a partir de la hipótesis de radio del aerogenerador de 2m. Estas turbinas poseen una potencia nominal alrededor de los 3500W. Se propone evaluar el comportamiento de varios prototipos en función al radio del aerogenerador.

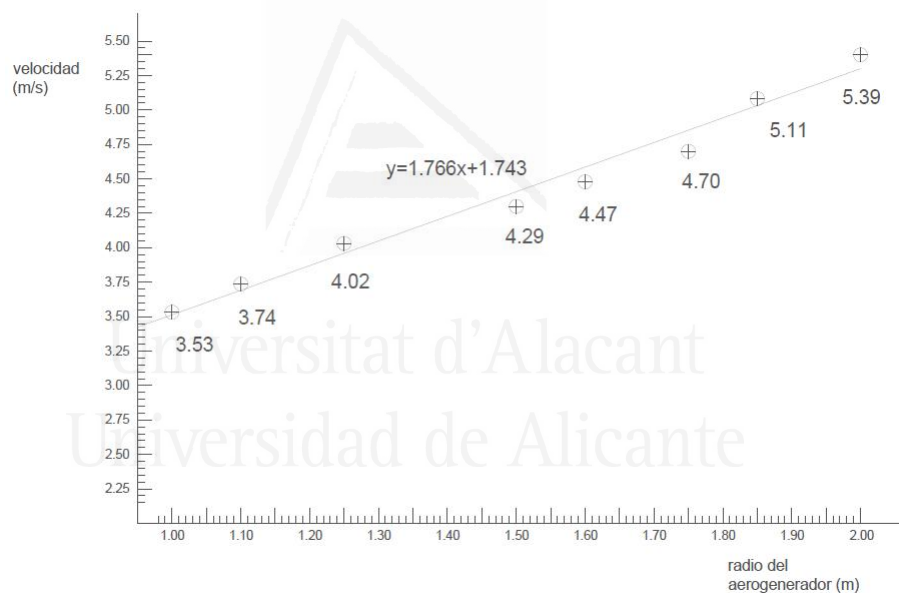


Figura 3.10: Gráfica de la función que relaciona la velocidad promedio interior con el radio del aerogenerador

En el plano M-02 se ilustran el comportamiento de distintos prototipos con radios a partir de 1 m. De los resultados obtenidos se observa un incremento progresivo de la velocidad según se aumenta el radio. Tomando como ejemplo las turbinas de 1 m. y 2 m. de radio, la velocidad promedio de circulación en el primer caso ronda los 3.6 m/s, mientras que en el caso de la segunda turbina la velocidad alcanza un promedio de 5.4 m/s. A ello se une la mayor capacidad de captación de flujo eólico según mayor es el

radio del aerogenerador. Siguiendo la anterior comparativa la primera turbina incorpora una interfaz de 1.58 m. de radio, mientras en el segundo caso la interfaz alcanza los 3.6 m.

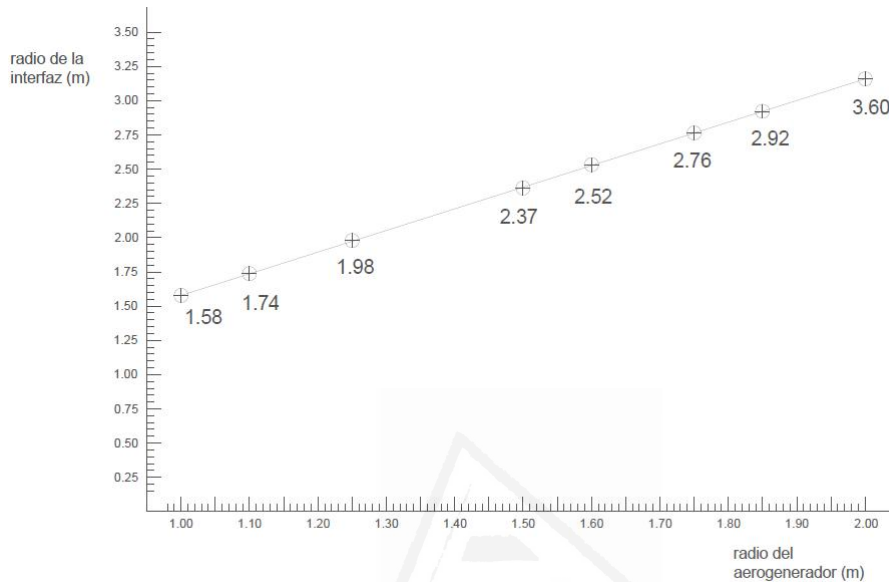


Figura 3.11: Gráfica de la función que relaciona el radio de la interfaz y del aerogenerador.

### 3.3.3. Origen y tratamiento de vórtices en determinados tramos de circulación

Uno de los objetivos pertenecientes al ámbito de la arquitectura es la consecución de una circulación uniforme en el interior de la estructura de concentración, ausente de efectos turbulentos alrededor de la rotación en referencia a la incidencia del flujo sobre las palas de la turbina. En las distintas simulaciones se observa el desarrollo de estos efectos turbulentos en zonas determinadas una vez el flujo eólico comienza a avanzar por el interior de la estructura.

Su desarrollo reduce la sección de paso con cierta uniformidad, llegando incluso a ocupar la totalidad del tramo como ocurre en la tobera 1 con velocidades moderadamente elevadas (véase *plano S-05*). Ello repercute en una menor velocidad de inyección y en una incidencia desordenada y turbulenta en la superficie de las palas. En el plano M-03 se observa como se origina el vórtice en la tobera 1, a partir de la adaptación del flujo eólico a la geometría interior de la interfaz. La formación de vórtices en la entrada de diversas toberas produce una concentración de energía difícilmente

---

aprovechable por el sistema.

Se define como objeto a alcanzar la ausencia de estos fenómenos en el interior de los tramos de circulación. Para ello se propone la introducción de un número determinado de aberturas en los alabes, con el propósito de facilitar la entrada de flujo eólico acelerado, reduciendo el impacto a la entrada de la tobera en relación al gradiente de velocidad entre las masas de aire presentes y las brisas eólicas. Uno de los beneficios asociados a este diseño es la reducción de la capa límite generada. Cada abertura provoca que se corte la capa turbulenta y comience de nuevo al inicio de cada tramo material.

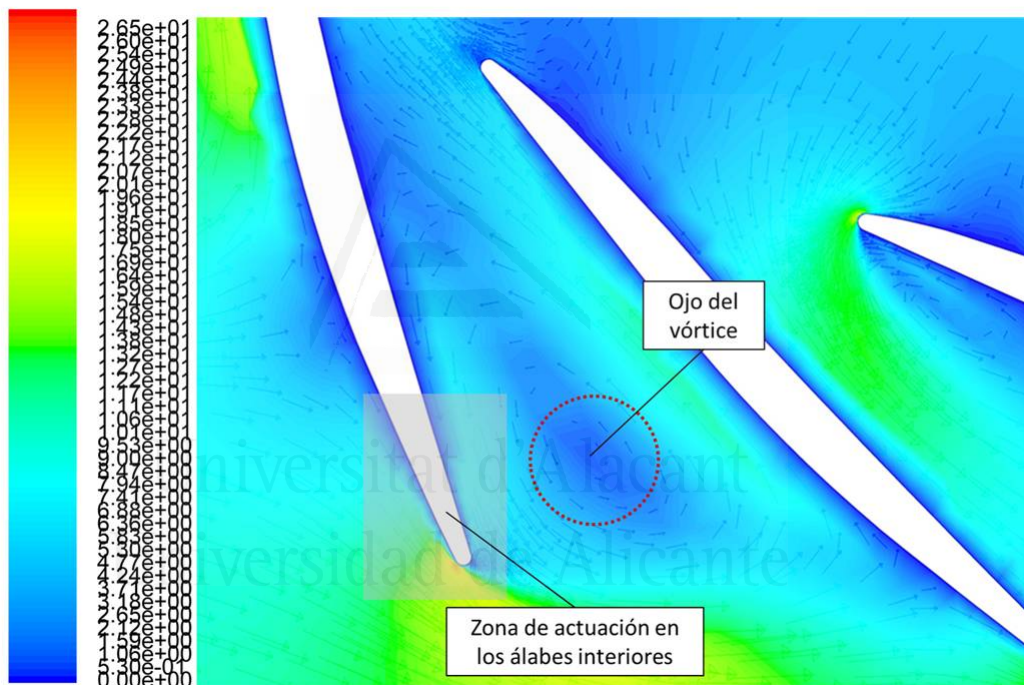


Figura 3.12: Desarrollo de un vórtice ocupando la totalidad de la tobera 1 del prototipo B01.

Se realizaron varias pruebas iniciales para calibrar la viabilidad de la propuesta. En el plano  $M - 04$  se muestra el diseño y simulación de estas soluciones preliminares para la tobera 1, tramo en el cual existe una mayor problemática. Los primeros prototipos elaborados incluyen hasta un máximo de tres aberturas, resultando poco efectivos a la hora de minimizar la zona de sombra.

Observando el comportamiento en la tobera 2, se detecta la bifurcación

del flujo avanzando buena parte hacia el interior del tramo y uniéndose una pequeña parte a la corriente libre. A efectos de *reciclar* este flujo se propone un diseño que incorpore un número determinado de aberturas las cuales inyecten flujo a la zona de relevancia del vórtice. A efectos particulares, este espacio queda acotada por la circulación concentrada alrededor del ojo con velocidades hasta un 50 % superior a la definida en las primeras líneas de corriente.

Se procede al modelado de distintos prototipos utilizando la sección convergente diseñada para la arquitectura interior y escalándola para adecuarla al ancho del extremo del alabe, y un ángulo de inclinación de 30 grados. Para reciclar el flujo sobrante de la tobera anterior, en este caso la tobera 2, se propone la introducción de una pieza a modo de espina saliente que actúe como canalizador de flujo para una efectiva inyección. Esta inclinación vendrá dada en relación al número de aberturas introducidas. La dimensión de esta espina está relacionada con la abertura de inyección con el objeto de que se produzca un paso eficiente del flujo reciclado minimizando posibles obturaciones a causa de reflexiones laterales. El anverso de la pieza está diseñado con una terminación aerodinámica para facilitar el avance del flujo sin que se produzcan efectos turbulentos de relevancia. Con esta configuración, la arquitectura de los álabes queda configurada mediante una alma central y un número determinado de extensiones.

Este diseño está inspirado en diferentes estudios realizados dentro del ámbito de la biomimética, disciplina que estudia las geometrías naturales para su aplicación en diseños eficientes multidisciplinares [6, 7]. Uno de los hitos más relevantes en este ámbito son los estudios en torno a la efectividad que tiene la piel del tiburón en relación a la reducción de fricción con el agua [8, 9]. La utilización de texturas para reducir la capa límite es una solución manejada en particular en la ingeniería aeronáutica. Son numerosos los estudios realizados en torno a la incorporación en el fuselaje unas pequeñas hendiduras conocidas como *riblets* para reducir la fricción con el aire. En los últimos años investigadores alemanes han experimentado en torno a la geometría de la piel de tiburón para desarrollar una pintura con nanopartículas dispuestas para la recreación de la piel del escualo, y ser aplicada en el campo de la aeronáutica [10].

Las aves y los insectos son objeto de numerosos estudios con el propósito de conocer al detalle sus habilidades en el vuelo. Al respecto, los trenes bala japoneses son receptores de varias de estas investigaciones con objeto de aplicar sobre su diseño soluciones basadas en geometrías orgánicas. La cabeza motriz de los trenes bala japoneses imita el pico del martín pescador,

---

en base a la enorme capacidad que tiene este pájaro para hacer incursiones en el agua a gran velocidad y con gran sigilo. Los resultados conseguidos han conseguido reducir el ruido generado a los niveles estipulados en la normativa de contaminación acústica [11–13]. Otras de las soluciones que se investiga en la actualidad es la introducción de texturas flexibles a modo de dientes de sierra en el techo, con objeto de reducir la capa límite.

En el plano M-05 se ilustra el comportamiento vectorial de cada uno de los prototipos modelados. El resultado es un reducción progresiva del vórtice generado y su traslado a la región adyacente a la última abertura realizada. Como se puede apreciar la influencia del vórtice es baja para el caso del prototipo con cinco aberturas, convirtiéndose en mínima para el prototipo de 6 aberturas, y casi residual para el prototipo final de 7 aberturas.

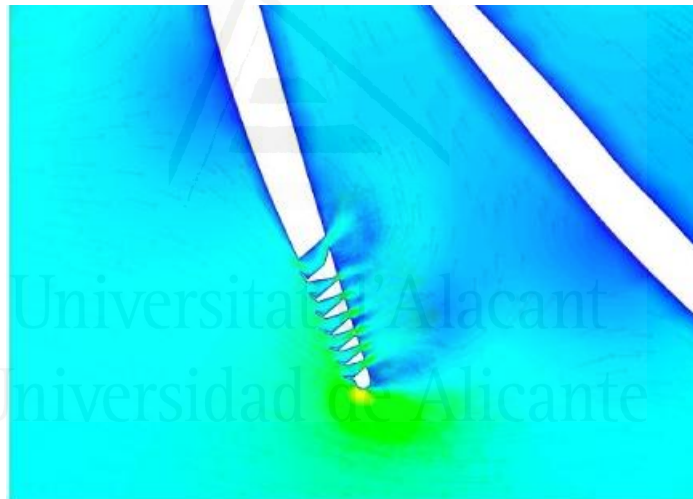


Figura 3.13: Detalle de la circulación en la tobera 1 del prototipo B02.

Con el propósito de optimizar el diseño, se propone modificar la última extensión incluyendo una cuña interior para reconducir el flujo inyectado lo más próximo posible a la superficie material. En el plano M-06 se observa el resultado satisfactorio de esta propuesta en comparación a los anteriores prototipos. En el plano M-07 se detalla el despiece acotado del álabe característico de la arquitectura interior, designándose en adelante este modelo como prototipo B02.

### 3.3.4. Análisis de la terminación interior del álabe

Unos de los efectos observados es la *huida* del flujo de la circulación interior. En la circulación forjada en el interior, las capas más próximas a los álabes tratan de salir a través de los tramos. Este fenómeno producido en las regiones de cola, provoca que la incidencia del flujo en las regiones próxima alcance un ángulo superior al estimado para la incidencia, además de la aceleración del flujo para salir de la interfaz. En las regiones de ataque, esta terminación provoca un pequeño cambio en la dirección de las capas más próximas. El resultado es una zona de menor velocidad y que resta uniformidad al paso del flujo. Se propone el rediseño de la zona con una terminación aerodinámica, que mejore la adaptación del flujo en ambas circulaciones y satisfaga la tolerancia de paso con las palas de rotación.

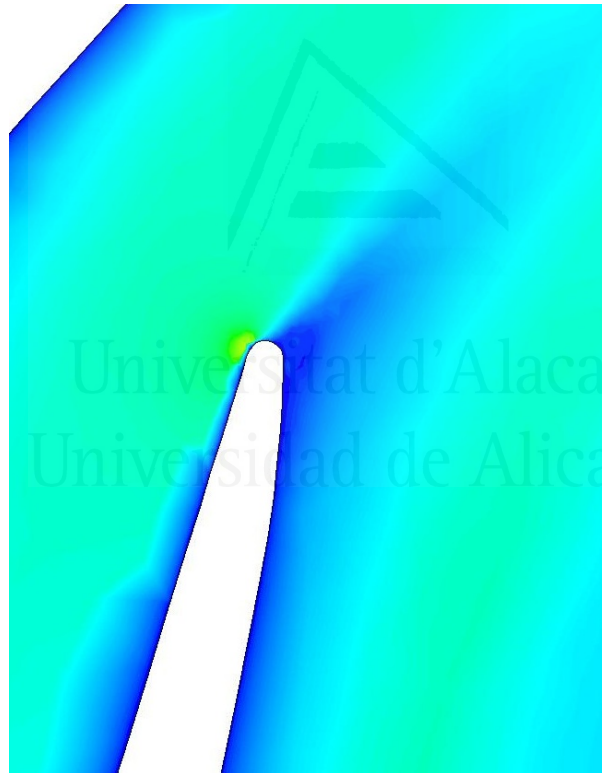


Figura 3.14: Estela generada en las proximidades de la terminación interior de los álabes del prototipo B02.

Uno de los efectos originados en estos primeros prototipos es la aceleración producida en las proximidades de las terminaciones debido a la huida del flujo. Ello provocaba que se formaran puntas locales de velocidad a cada

---

encuentro con los alabes. Esta aceleración tenían su repercusión alcanzándose una velocidad interior superior a la estimada en la circulación libre para periodos de tiempo  $t = 5$  sg. Con el diseño aerodinámico de la terminación, este fenómeno se modera requiriendo un mayor periodo de tiempo para completar un ciclo de velocidad superior a la circulación libre. Sin embargo, el curso de la circulación interior presenta una mayor estabilidad a tenor del análisis vectorial, repercutiendo en una incidencia de mayor eficiencia en relación al coeficiente de sustentación rango de sustentación. Ello facilita que se minimice el riesgo de desprendimiento de capa límite que pueda producirse en el perfil aerodinámico y las consecuencias negativas que ello pudiera generar.

En el plano M-08 se muestra el resultado de la simulación practicada al designado como prototipo B03. En comparación con el prototipo B02, la velocidad promedio se modera un 18 % hasta alcanzar los 4.55 m/s. Sin embargo, la inclusión de esta terminación reduce el efecto *huida* del flujo interior derivando en una circulación con mayor uniformidad y con una incidencia óptima en relación al ángulo de ataque. El coeficiente de sustentación se incrementa en los dos primeros tramos un 18 % hasta alcanzar un valor medio de 0.821. Además hay que sumar el tercer tramo con un promedio de 0.626, teniendo en cuenta que en los anteriores casos en una gran parte de los puntos de control se producía riesgo de desprendimientos. En total, el prototipo B03 alcanza un coeficiente de sustentación promedio para un pala de rotación con sección RAF-19il de 0.757.

En el plano M-09 se muestran los resultados de las distintas simulaciones practicadas al prototipo B03 para una terna de mayores velocidades de circulación de las corrientes eólicas. Como era de esperar el ciclo se completa en un menor periodo de tiempo con corrientes de mayor entidad.

### **3.3.5. Calibración del ángulo de ataque**

Con anterioridad se hacía hincapié a la importancia que tiene la geometría del perfil aerodinámico con el objeto de aprovechar la incidencia del flujo para la producción de fuerza sustentadora. La geometría del perfil es un factor de primer orden a la hora de aprovechar con eficiencia la circulación interior generada. En los planos M-10, M-11 y M-12 se ha realizado la comprobación observándose como la efectividad de la interfaz se revaloriza en función de la geometría del perfil. En estos casos los resultados corresponden a una arquitectura interior de alabes con terminación interior redondeada.

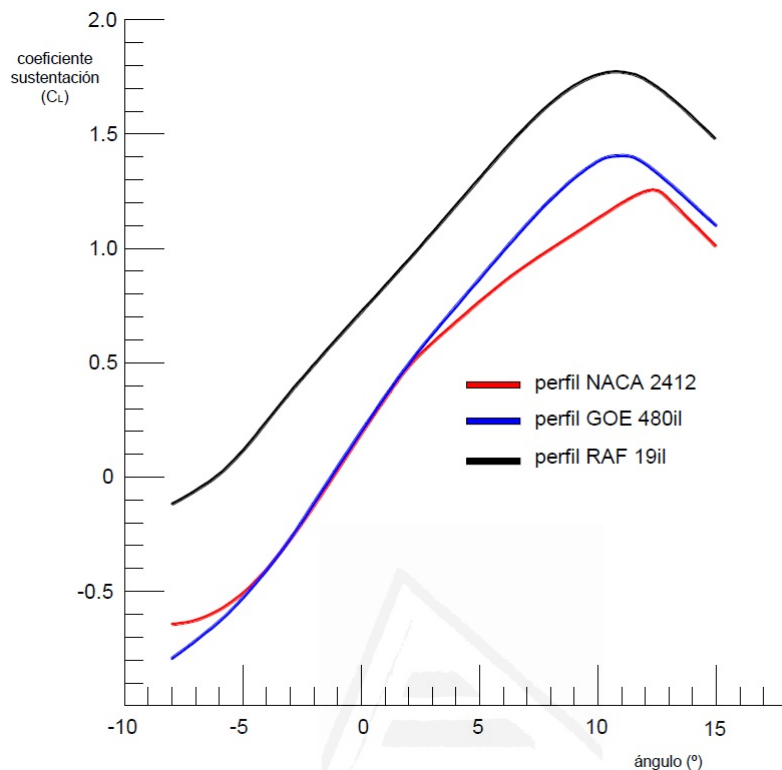


Figura 3.15: Coeficiente de sustentación en relación al ángulo de ataque, modelos NACA2410, GOE480, RAF19il.

La calibración del ángulo de incidencia de la pala resulta necesaria con objeto de optimizar la incidencia con independencia del perfil utilizado. La inclusión de este mecanismo permite variar el ángulo de ataque  $\beta$  en función a las características de la circulación interior y la geometría del perfil aerodinámica. Ello posibilita estandarizar el diseño de la interfaz ante cualquier geometría aerodinámica utilizada.

En el plano M-13 se ilustra la calibración realizada en el prototipo B03 a partir de los resultados obtenidos en una pala RAF-19il. Como se puede observar, un giro de  $2^\circ$  respecto a la posición inicial incrementa un 27% el coeficiente de sustentación promedio hasta alcanzar 0.962. A partir de mayores calibraciones en ciertas posiciones la sección aerodinámica alcanzaría el valor de  $\beta_{max}$  procediéndose al desprendimiento de la capa límite y la generación de turbulencias indeseables en la circulación interior.

En el plano M-14 se ilustra el funcionamiento del futuro mecanismo mediante el croquis de una articulación pasiva incorporado a la estructura de sustentación de las palas, la cual permite calibrar el ángulo de ataque



---

según los requerimientos del perfil. Esta solución se enmarca en un ámbito puramente industrial siendo espacio idóneo para versiones mejoradas de su diseño y origen de futuras investigaciones centradas en el desarrollo de un mecanismo de calibración dinámico, inspirado en los mecanismos *pitch-controlled* de las turbinas de eje horizontal [14, 15].

### 3.3.6. Régimen de actuación operativo

Los aerogeneradores incorporan distintos mecanismos para garantizar su óptima operatividad y estabilidad estructural en presencia de vientos de importancia. La disposición de la interfaz facilita que se pueda alcanzar a menores velocidades el funcionamiento nominal de la turbina gracias a la aceleración que se practica en el flujo eólico. Consecuentemente, su integración también provoca que se activen a menores velocidades los mecanismos de regulación de potencia y llegados al caso, el mecanismo de parada de la turbina.

La resolución se inicia por la identificación de la interfaz de los anteriores estadios para poder actuar y adaptar la geometría con eficacia en función de las solicitudes. El rendimiento de la interfaz viene relacionado a la frecuencia de rotación de la turbina. A través de su monitorización se puede establecer una serie de hitos con el propósito de poder anticipar la adaptación de la interfaz antes de que se produzca la activación de los mecanismos de la turbina.

Se propone el siguiente modelo base para la identificación del estadio de actuación, y en su caso la activación de los mecanismos de actuación propios de la interfaz: Se define el punto de control  $C$  a partir del número máximo de revoluciones a la que puede trabajar la turbina estando activados sus mecanismos de control de potencia. Mientras el valor de la frecuencia de rotación  $F$  sea menor a  $C$  el sistema de control permanecerá desactivado. En el momento en que alcanza dicho valor, se procede a su activación para un tratamiento de la señal de manera intensiva. A partir del punto de activación y en cada nuevo pulso el microcontrolador lleva a cabo el cálculo de la media aritmética, incluyendo en dicho cálculo los *valores de control*  $x$ . Estos valores se definen a partir del *punto de activación control*  $A$ . Este punto relaciona el periodo de tiempo  $t_1$  que requiere el mecanismo de control para su activación efectiva con el periodo  $t$ , definiéndose un valor  $r$ .

$$r = \frac{t_1}{t} \tag{3.5}$$

De manera que a cada nuevo pulso, el cálculo añade tantos valores de control  $x$  como estipule el valor  $r$ .

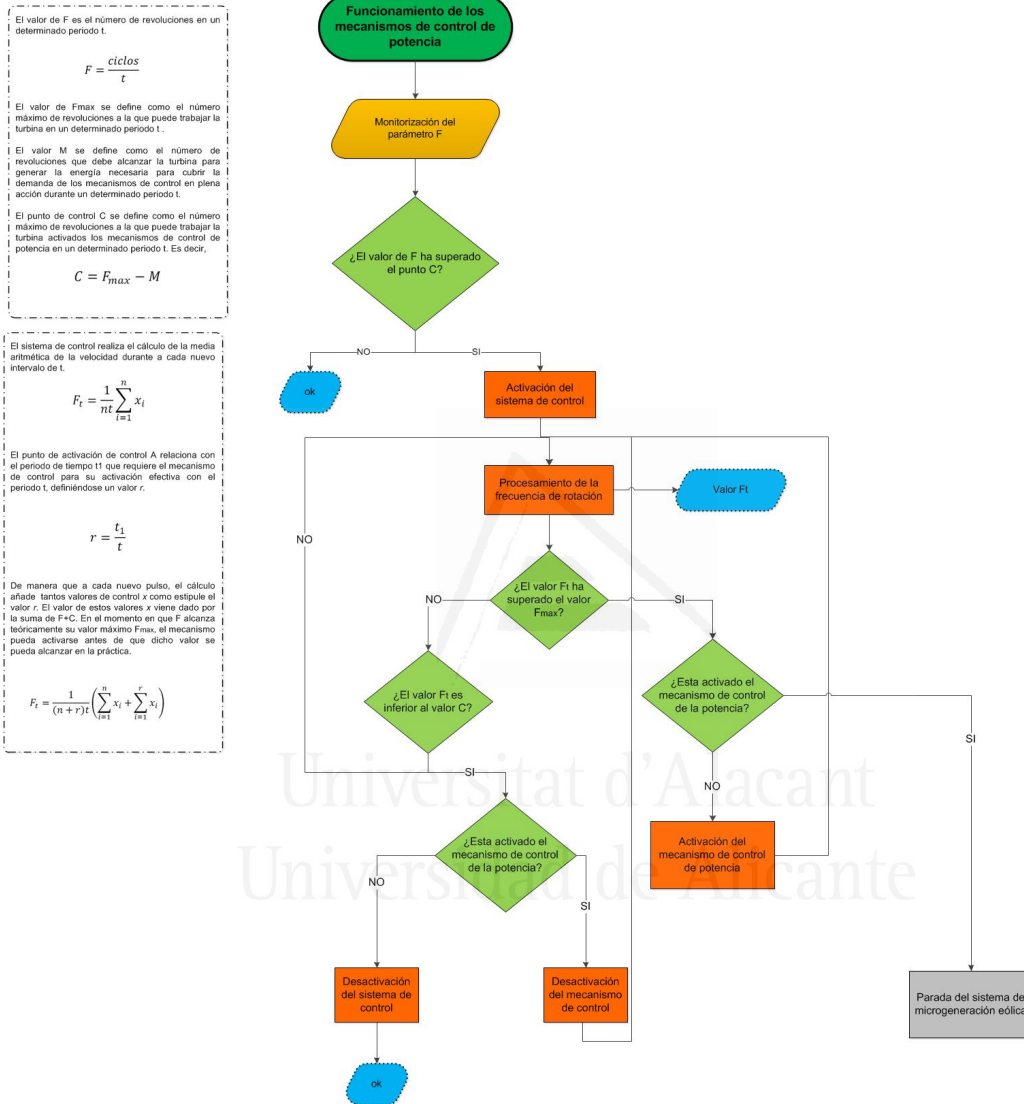


Figura 3.16: Flujograma de activación del mecanismo de control de potencia.

Este parámetro viene definido por la suma de  $F+C$ . En el momento en que  $F_t$  alcanza su valor máximo  $F_{max}$ , el mecanismo pueda activarse antes de que dicho valor se pueda alcanzar en la práctica. Su desactivación del mecanismo se produce cuando el valor de la media  $F_t$  disminuye por debajo del umbral de  $C$ , continuándose el control intensivo de la frecuencia. Cuando el valor de  $F_t$  vuelve a situarse por debajo del umbral de  $C$ , entonces el sistema de control

---

de potencia queda desactivado volviendo a a la monitorización estándar.

$$F_t = \frac{1}{(n+r)t} * \left( \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^r x_i \right) \quad (3.6)$$

La monitorización se realiza mediante un encoder absoluto, o en su defecto por circuito de acondicionamiento y control de la señal, compuestos por un temporizador, contador universal y un encoder incremental. La señal de salida es enviada a un microcontrolador, el cual es el encargado del tratamiento de la señal en relación a la definición del punto de control .

Existen dos posibles vías a la hora de adaptar la geometría para conseguir reducir la velocidad de circulación interior: o bien actuar en la geometría del tramo reduciendo el diferencial entre superficies de paso, o bien anulando la entrada de flujo en determinadas toberas situadas en la región de ataque con semejante repercusión final.

En el primer caso, se propuso la inclusión de un dispositivo que alcanzara dicho objetivo reduciendo la superficie de entrada del tramo tipo. Esta solución constaba de un tramo habilitado en la cara lateral derecha, el cual giraba hacia el interior del tramo mediante actuadores neumáticos dispuestos en puntos estratégicos del alma de los álabes. Las simulaciones realizadas en varios prototipos mostraban que esta solución era ineficaz debido a la aceleración que se producía a la entrada del tramo de circulación. A este fenómeno hay que unir los distintos fenómenos turbulentos que se originaban en las esquinas a causa de la nueva configuración de los álabes.

Por ello se propone anular parcialmente la entrada de flujo en determinadas toberas de la región de ataque. El propósito es suprimir aquellas inyecciones con una velocidad relevante, con la consiguiente reducción de velocidad en la circulación interior. Los tramos 3 y 4 son aquellos que mayor velocidad de inyección alcanzan siendo éstos objeto de trabajo. En el plano M-15 se muestran lo satisfactorio de la solución a raíz de los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas, con una disminución de la velocidad interior alrededor del 12%. Al hilo de esta solución se plantea el diseño de un dispositivo capaz de realizar el cierre parcial o total de los tramos de circulación. En el mismo documento se muestran los resultados de la simulación practicada en el caso de activarse el cierre parcial. Esta denominación responde a la anulación de circulación en 6 tramos de la estructura, alternando tramos cerrados y tramos aptos para la circulación. Esta solución es capaz de minorar la velocidad interior con independencia de la dirección eólica.

En el anterior flujograma se ha redactado una entrada con la descripción *parada del sistema de microgeneración eólica* en el caso de que la frecuencia alcance su valor máximo de rotación estando activados los mecanismos de regulación de potencia. Dicha hipótesis contextualiza casos de condiciones climatológicas inestables, fuertes vientos o ráfagas prolongadas con velocidades elevadas. En el caso de que el flujo circulase a través de la interfaz bajo estas condiciones puede ocasionar consecuencias nefastas a la totalidad del sistema microenergético a tenor de las elevadas velocidades que se podrían alcanzar en su interior. La solución de esta problemática pasa por impedir el paso del viento al interior de la interfaz en los casos en que esta hipótesis se materialice.

Los planteamientos que surgen para resolver esta problemática son los siguientes: negar el paso del flujo a la interfaz a través del taponamiento de la abertura, o negar la inyección del flujo al interior a través del cierre de las bocas de inyección. En este caso, la presión a la que estaría sometido el cierre sería muy superior en comparación a la ejercida en el primer planteamiento, debido a la concentración de flujo producida en su recorrido por las toberas.

Las posibilidades estructurales para proyectar el cierre de las aberturas se reducen a la intervención a partir de los discos superior o inferior. En los planos  $M - 16/19$  se propone un dispositivo de cierre a modo de persiana disponiendo la caja de recogida en la tapa superior como solución propuesta. En el instante de la activación del dispositivo, las dos primeras extensiones habilitan su posición mediante un dispositivo incluido en el disco inferior con el propósito de servir de riel para el descenso de las lamas. El material y el espesor de estas lamas es similar a la capa estructural de los álabes de la interfaz.

#### **Disco superior**

La funcionabilidad principal del disco superior se concreta en servir de superficie para el apoyo de los componentes del sistema de cierre. Este requerimiento implica la resolución de la estructura de sustentación del disco y de las cargas a soportar, sin que ello suponga un perjuicio a la circulación del flujo a través de la interfaz. La solución pasa por incluir la estructura portante en la parte central del alma.

La capacidad portante de la estructura está limitada al reducido espacio disponible. Este inconveniente implica que el reducido peso específico sea una característica fundamental a tener en cuenta junto a la resistencia para soportar las acciones previstas y sobrecargas posibles a la hora de la

---

selección de los materiales. La fibra de carbono así como distintas aleaciones de aluminio sobresalen por su resistencia y ligereza en comparación a otros materiales.

En cuanto a la composición interior del disco existen varias alternativas de diseño. La inclusión de una superficie a modo de cubierta del interfaz genera un espacio útil para la instalación de sistemas solares o de recogida y aprovechamiento de aguas pluviales para su uso doméstico. En el caso de la proyección de un solo plano, el espacio ocupado por las cajas del mecanismo de control dificultaría en sobremanera dicha posibilidad. Teniendo en cuenta la capacidad portante de los materiales seleccionados, se propone un diseño a base de doble panel sandwich con cámara intermedia con el propósito de insertar en su interior las cajas, fuentes neumáticas y los mecanismos necesarios para el correcto funcionamiento de los distintos dispositivos. El disco se proyecta de manera que todos los elementos queden integrados en el interior de los paneles sandwich, modelando un elemento monolítico en una perspectiva exterior. Existe una gran variedad de materiales y compuestos que satisfacen tales requerimientos, como puede ser la proyectada a base de núcleo estructural con geometría *honeycomb* y piel a base de un laminado de fibra de carbono. El espesor del disco viene determinada por la altura de la caja o en su defecto por la mayor altura de los elementos interiores integrados. En relación a la sustentación, el espacio disponible obliga a la proyección de una estructura singular compuesta por distintos pilares insertados en el centro del alma.

#### **Disco inferior**

El disco inferior es el nexo común entre el sistema de microgeneración y el volumen urbano. En líneas generales, se puede describir a este elemento como el filtro que intermedia entre dos ámbitos, el primero un entorno completamente mecánico caracterizado por distintas propiedades específicas y el segundo, un entorno social preparado para la cotidianidad del ser humano. La posibilidad de integrar estos dos elementos tal y como se ha concebido en este trabajo depende en grandes términos de que esta fusión sea compatible, es decir, la acción mecánica del sistema de microgeneración no interfiera en la estructura urbana consolidada y en las actividades desarrolladas en su interior. Ejemplos al respecto pueden ser la capacidad de la estructura urbana para absorber los esfuerzos generados por la disposición del sistema de microgeneración, o la generación de un nivel de ruido por encima de unos límites acústicos aceptables.

A la hora de regular esta relación en la cual se integra sistema de microgeneración y elemento constructivo considerándose un solo ente, se le pueden conferir las consideraciones técnicas que deben satisfacer las plantas técnicas en los edificios de gran altura. Estas plantas técnicas se definen como espacios ubicados dentro del propio edificio destinados en exclusividad a instalaciones hidráulicas, climatización, eléctricas, transporte o de cualquier otra actividad de servicio o mantenimiento, con objeto de garantizar su correcto funcionamiento. Los requisitos a solventar que caracteriza el diseño del disco inferior son el nivel de ruido junto a la transmisión de esfuerzos y la estanqueidad del sistema en el caso de activación del cierre de la interfaz.

En términos de diseño y con independencia de las propiedades de los materiales a seleccionar, la proyección de un elemento compuesto por una doble capa y cámara de aire interior resulta un diseño más efectivo en comparación a un elemento macizo del mismo espesor. La inclusión de una cámara de aire origina un dispositivo elástico masa-muelle-masa que atenúa la transmisión de ruido a las estancias colindantes, mejorándose dichas prestaciones con la inclusión de un aislante acústico tipo lana de roca o similar. Por ello se propone un diseño similar al disco superior, compuesto por un doble panel sandwich con un núcleo aislante a base de lana de roca, o similar y lámina de acabado de aluminio, fibra de vidrio o similar, y cámara de aire interior.

### **3.4. Simulación dinámica de la turbina implementada con la interfaz**

Como se ha comentado, los resultados mostrados se referían al comportamiento interior del flujo eólico. En los planos adjuntos se ha ilustrado el desarrollo de una corriente interior discurriendo alrededor de la turbina en forma de vórtice. En cada punto acimutal, el vector dirección de esta corriente se mantiene dentro de los límites del rango beta establecidos previamente. Ello permite mantener el control de la circulación sin que se produzcan desprendimientos de capa límites y efectos turbulentos de importancia.

Una vez validado el diseño en este sentido, se lleva a cabo la simulación de la interfaz incorporada a una turbina de eje vertical de palas verticales rectas. Esta nueva prueba tendrá como propósito evaluar el comportamiento conjunto de ambos sistemas, a partir de los datos de velocidad y potencia teórica producida por el sistema EOLIA. En este sentido hay que tener en

cuenta el diagrama de fuerzas que actuarán una vez se ponga en marcha. En la figura adjunta se muestran los diagramas a) y b) relativos a este instante.

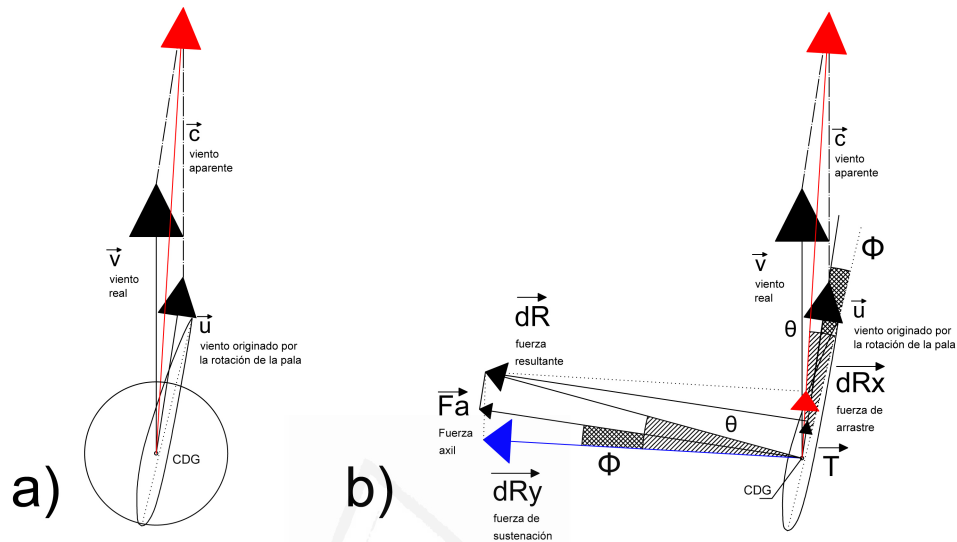


Figura 3.17: Descomposición de fuerzas actuantes en la sección aerodinámica de la pala de rotación

Las fuerzas que actúan sobre la sección de la pala se descomponen por un lado en el vector  $\vec{v}$ , relativo a la acción del viento y por otro, el vector  $\vec{u}$  relativo al movimiento de rotación de la pala y tangente a la circunferencia descrita. De la suma de estos vectores se obtiene el vector  $\vec{c}$  conocido como viento aparente.

En este contexto encontramos una de las grandes diferencias respecto al ejercicio libre de la turbina. La arquitectura de la interfaz consigue una elevada eficiencia en la acción del viento en cada uno de los puntos acimutales, mientras en el caso de la turbina esto solamente se produce en una reducida porción. En el resto de la rotación se producen fenómenos turbulentos a causa del estela producida por el paso de las palas, los desprendimientos de las capas límites desarrollados en la superficie de los perfiles, o la incidencia del viento contrario al sentido de giro de la turbina.

En el gráfico b) se ilustran la descomposición de fuerzas resultantes una vez incide el flujo de viento en la superficie de la interfaz. La fuerza de sustentación, vector  $d\vec{R}_y$  aparece perpendicularmente a la acción del viento aparente, mientras la fuerza de arrastre, vector  $d\vec{R}_x$ , se encuentra en la dirección definida por la corriente. A partir de éstas, podemos conocer la fuerza resultante  $d\vec{R}$  sobre la sección del perfil, así como la fuerza axial  $\vec{F}_a$  o

el torque  $\vec{T}$  generado. Esta descomposición está relacionada con un conjunto de ángulos característicos,  $\Phi$  es el ángulo que forma la cuerda del perfil con la velocidad aparente, y  $\theta$  el ángulo que forma el plano de rotación con la dirección aparente.

La simulación CFD realizada mantiene unas condiciones similares en cuanto a características de mallado y criterios para la ejecución de solver. A la hora de generar la rotación de las palas de la turbina debido a la acción del viento, se ha implementado a la simulación una macro conocida comúnmente en el software ANSYS como User Defined Function (UDF). La estructura de este archivo se ilustra a continuación:

```
C:\Users\vicente\AppData\Local\Temp\~vs4034.cpp 1
#include "udf.h"
static real Ux_prev = 0.0;
DEFINE_CG_MOTION(turbine_rotation, dt, vel, omega, time, dtime)
{
    Thread *t;
    face_t f;
    real NV_VEC (A); //defines a vector A[0]i + A[1]j + A[2]k
    real force, du;
    NV_S(vel, =, 0.0); //sets all velocity components to zero for x,y,z (eg vel[0]=0.0)
    NV_S(omega, =, 0.0); //sets all rotations components to zero for x,y,z (eg omega[0]=0.0)
    //omega[0] = 100;
    if (!Data_Valid_P ()) //Prevents program execution if the enviroment is not set to avoid errors
        return;
    t = DT_THREAD (dt);
    force = 0.0;
    begin_f_loop(f, t)
    {
        F_AREA (A, f, t);
        force += F_P (f, t) * NV_MAG (A); //force, penperdicular component to area of contact (dot product)
    }
    end_f_loop (f, t)
    du = dtime * force / (0.011213*2719*0.9); // dtime * force/((volume*density(aluminum))*swept area
    radius)
    Ux_prev += du;
    Message ("\n time = %f, Ux_omega = %f, force = %f\n",time, Ux_prev, force);
    omega[0] = Ux_prev; // [0] x dir, [1] y dir, [3] z dir
}
```

Figura 3.18: Macro UDF para generar la rotación de la turbina

El análisis y resultado se detalla en los planos  $M - 20$  y  $M - 21$ , así como en los vídeos adjuntos en la documentación gráfica. Su contenido compara y analiza el comportamiento del ejercicio libre de la turbina frente a la implementación de la estructura de concentración en diferentes intervalos de tiempo. Estas simulaciones se han realizado con una velocidad de viento de 3 m/s y dirección análoga al eje X, con sentido de derecha a izquierda. La escala cromática se ha acotado para mejorar la visualización del fenómeno en el interior de la interfaz.

El comportamiento de la interfaz proporciona una sustancial mejora de las características de incidencia del flujo eólico en las aspas de la turbina, lo



---

que se traduce en una mayor potencia eléctrica generada. **Los resultados obtenidos en la simulación muestran como la fuerza generada en las palas de la turbina incorporando la interfaz es alrededor de cuatro veces mayor.** Esta prestación valida el diseño sectorizado y modelado de aberturas en relación al rango de mayor sustentación proporcionado por los perfiles aerodinámicos.

**Otro dato interesante es el tiempo en completarse la primera vuelta de rotación. Una pala de la turbina en ejercicio libre tarda unos 22 sg., mientras la misma pala incorporada la interfaz reduce el tiempo a solo 9 sg. Con la interfaz incorporada la potencia generada con brisas de 3m/s supera el 1KW. Estos resultados son extrapolables a los obtenidos por la turbina en rotación libre con velocidades de viento de alrededor de 7.8 m/s, según la curva de potencia del aerogenerador modelado ilustrada en el plano  $F - 00a$  y  $F - 00b$ . Es decir, la incorporación de la interfaz mejora 2.6 veces el rendimiento obtenido con la turbina.**

Su contenido comprende una tabla de datos relativos a la velocidad diaria durante el año 2014, y varias tablas con datos de la velocidad del viento durante las 24 horas en un día determinado. Estas tablas varían en número entre 2 y 5 en función de la disponibilidad de los datos proporcionados por las estaciones meteorológicas. Utilizando la curva de potencia de un aerogenerador estándar de 2m. de radio y una potencia máxima de 3kW se realizan cálculos de la distribución de Weibull, n° de horas en las cuales el dispositivo estará en funcionamiento y potencia eléctrica alcanzada en dichas condiciones.

### 3.5. Conclusiones

En resumen,

- 1.- El prototipo modelado se define a partir de una arquitectura circunscrita en un aerogenerador de eje vertical, compuesta por 13 álabes de geometría definida insertados en el espacio comprendido entre dos piezas estructurales a modo de disco superior e inferior.
- 2.- La sectorización resultante de esta arquitectura permite reproducir a lo largo de la rotación inyecciones de flujo eólico acelerado en el rango de mayor sustentación característico de la sección aerodinámica de la pala de rotación.

- 3.- El resultado es una circulación interior alrededor de la rotación capaz de optimizar la fuerza de sustentación generada en la incidencia con la pala de la turbina, derivando en un torque exponencialmente superior a la generada en una turbina convencional.
- 4.- En las primeras simulaciones sin contar la acción de la turbina, el prototipo B03 alcanza una velocidad interior de 4.55 m/s, lo que supone un incremento del 51 % en un intervalo de 40 sg. con presencia de brisas eólicas con velocidad media de 3 m/s.
- 5.- El prototipo B03 alcanza un coeficiente de sustentación promedio para un pala de rotación con sección RAF-19il de 0.962.
- 6.- Según se aumenta el radio del sistema de microgeneración eólico se obtienen mejores prestaciones. La velocidad de la circulación interior aumenta alrededor de 52 %, y la superficie de captación se duplica en el caso de comparar dos sistemas de microgeneración de 1 m. y 2 m. de radio.
- 7.- Una vez incluimos la acción de la turbina los resultados ofrecen un impacto diferencial. Mientras la turbina en ejercicio libre tarda alrededor de 22 segundo en completar una vuelta, la incorporación de la interfaz reduce dicho tiempo en un 60 % hasta los 9 sg.
- 8.- El rendimiento del sistema EOLIA multiplica en más de 2.5 veces el rendimiento de la turbina en ejercicio libre, facilitando un arranque a velocidades más reducidas e incrementando el número de horas en funcionamiento.
- 9.- Los dispositivos de control permiten que la interfaz pueda seguir trabajando en régimen nominal en presencia de vientos de mayor entidad sin que se activen los mecanismo de control propios del aerogenerador.

---

## Bibliografia

- [1] Emil Simiu and Robert H Scanlan. *Wind effects on structures*. Wiley, 1996.
- [2] Claës Dyrbye and Svend Ole Hansen. *Wind loads on structures*. John Wiley & Sons, 1996.
- [3] Thomas V Lawson. *Wind Effects on Buildings: Design Applications*, volume 1. Spon Press, 1980.
- [4] Marco Raciti Castelli, Stefano De Betta, and Ernesto Benini. Effect of blade number on a straight-bladed vertical-axis darreius wind turbine. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 61:305–3011, 2012.
- [5] Florian R Menter. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 23(4):305–316, 2009.
- [6] Zhiguang Guo, Weimin Liu, and Bao-Lian Su. Superhydrophobic surfaces: from natural to biomimetic to functional. *Journal of colloid and interface science*, 353(2):335–355, 2011.
- [7] Bharat Bhushan and Yong Chae Jung. Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction. *Progress in Materials Science*, 56(1):1–108, 2011.
- [8] Johannes Oeffner and George V Lauder. The hydrodynamic function of shark skin and two biomimetic applications. *The Journal of experimental biology*, 215(5):785–795, 2012.
- [9] Brian Dean and Bharat Bhushan. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1929):4775–4806, 2010.
- [10] Volkmar Stenzel, Yvonne Wilke, and Wolfram Hage. Drag-reducing paints for the reduction of fuel consumption in aviation and shipping. *Progress in Organic Coatings*, 70(4):224–229, 2011.
- [11] Ashok K Goel. Biologically inspired design: A new program for computational sustainability. *IEEE Intelligent Systems*, 28(3):0080–84, 2013.
- [12] Karlson Hargroves and Michael Smith. Innovation inspired by nature: Biomimicry. *Ecos*, 2006(129):27–29, 2006.
- [13] K Nagakura. Localization of aerodynamic noise sources of shinkansen trains. *Journal of Sound and Vibration*, 293(3):547–556, 2006.
- [14] FD Bianchi, RJ Mantz, and CF Christiansen. Power regulation in pitch-controlled variable-speed wecs above rated wind speed. *Renewable Energy*, 29(11):1911–1922, 2004.
- [15] NA Schinas, NA Vovos, and GB Giannakopoulos. An autonomous system supplied only by a pitch-controlled variable-speed wind turbine. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 22(2):325–331, 2007.

---

# 4

## Vías de futura investigación

A lo largo de este trabajo se ha justificado el interesante potencial de aprovechamiento que ofrecen las brisas eólicas circulantes sobre la superficie terrestre. Partiendo de la naturaleza de estas corrientes, el modelado de una arquitectura afín puede conseguir su concentración y transformación en un recurso potencial. La interfaz es capaz de hacer trabajar en régimen nominal a una turbina de eje vertical tipo giromill a partir de brisas con leves velocidades. La totalidad del proceso realizado para el modelado de un sistema de microgeneración eólica, posteriormente reconvertido en un sistema híbrido de microgeneración energética, se enfocaba inicialmente para conseguir su integración en un volumen arquitectónico, en este caso una vivienda unifamiliar.

El diseño de viviendas y volúmenes autónomos en términos energéticos es el necesario camino que debe de adoptar la disciplina arquitectónica y urbanística. El planteamiento que se propone parte de un enfoque *bottom-up*, a partir del tratamiento de la vivienda como eje central de la disciplina urbanística. El fundamento del modelo se basa en la autonomía energética, entendida desde la capacidad para generar la energía necesaria para cubrir la demanda racional estimada. La producción de energía se satisface mediante sistemas de microgeneración energética y la racionalización del consumo se consigue a través de la integración de sistemas domóticos, diseños arquitectónicos basados en soluciones pasivas, y la concienciación respecto

---

al valor de los recursos naturales. Este fundamento es común a todos y cada uno de los elementos intervinientes en el ordenamiento urbano.

En este contexto el sistema de microgeneración presentado es próspero en viviendas aisladas, pequeñas agrupaciones rurales y urbanas, e instalaciones agropecuarias, auxiliares, servicio y mantenimiento, o cualquier otro tipo de instalación que demande energía eléctrica para su operatividad. En la mayoría de casos las características de estos emplazamientos resultan idóneas ya que permiten la circulación libre de las brisas reduciendo las consecuencias del efecto de apantallamiento a casos particulares. Estos casos se reducen a arboleda próxima a la vivienda con una altura considerable en comparación al volumen, o edificaciones colindantes sin la existencia de parcela. Así se presentan varios modelos de vivienda en el plano  $F - 01$  y su incorporación en una nave industrial en el plano  $F - 02$ .

## **4.1. Futuras evoluciones**

El diseño del prototipo  $B03$  proporciona suficiente base para la investigación de futuras evoluciones a desarrollar. A continuación se describen las líneas maestras de cuatro próximas evoluciones.

### **4.1.1. Implementación en elementos viarios**

Son numerosos las estructuras a las cuales incorporar el sistema de microgeneración EOLIA. Las carreteras y trazados viarios en general, tienen un elevado interés a efectos de cuota implantación. Son espacios especialmente indicados por la escasa presencia de elementos próximos que puedan entorpecer el curso de las brisas. Su longitud permite una considerable implantación de estos sistemas y concentrada en una zona geográfica determinada con presencia similar de corrientes.

La implantación de sistemas de microgeneración a lo largo del trazado permitiría aprovechar las corrientes residuales generadas a partir del tránsito de vehículos. Esta circunstancia es especialmente importante en autovías y carreteras con elevado tráfico, minimizando la intermitencia característica de las brisas superficiales. La aceleración que se produce una vez los vehículos y camiones traspasan las masas de aire tiene la importancia suficiente para ser captada por estos elementos.

Hay diferentes posibilidades para la incorporación de estos sistemas, destacando el prototipo farola y los prototipos pórtico o banderola. El

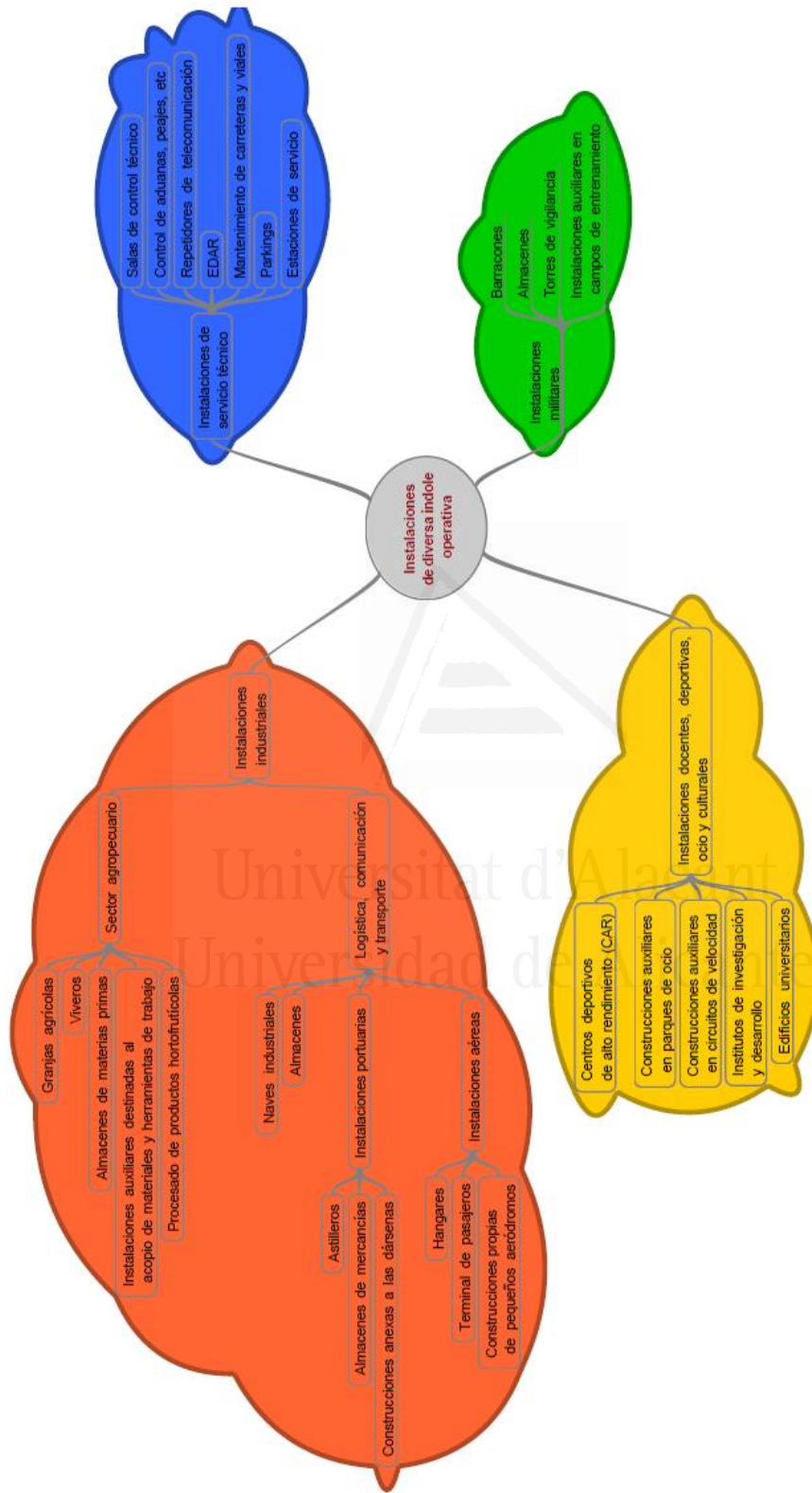


Figura 4.1: Modelo holístico de implantación del sistema de microgeneración EOLIA en volúmenes arquitectónicos

---

primero de ellos se presenta en el plano  $F - 02$ , incorporando las luminarias en el disco inferior, diseñado para su implantación tanto en trazados viarios, rotondas, parques empresariales, etc. Los prototipos pórtico o banderola están pensados para su implantación en carreteras, presentándose en el plano  $F-03$  La estructura de sustentación es similar a la utilizada para sus análogos implantados en la red viaria.

#### 4.1.2. Desarrollo de un envoltura de cierre solar

La ausencia de brisas durante prolongados periodos de tiempo condiciona el rendimiento del sistema híbrido a la capacidad de almacenamiento de energía y a la producción de energía a partir de la radiación solar. Esta hipótesis se produce con mayor frecuencia en las primeras horas del día como al final del mismo.

Una de las posibilidades para suplir esta carencia de flujo eólico pasa por el aprovechamiento del dispositivo de cierre. La activación del sistema de cierre de la interfaz se ha previsto para casos en los que el fuerte viento y las condiciones climatológicas desfavorables pudieran amenazar la integridad del conjunto. La activación de la envoltura en los casos de ausencia de viento implicaría la posibilidad de tener una superficie apta para su aprovechamiento. La utilización de la envoltura como una superficie solar posibilita el aprovechamiento de las primeras horas y las últimas horas de sol, incrementando el rendimiento del sistema solar. A partir del comienzo de brisas capaces de activar el sistema eólico, la envoltura se recogería.

Mediante sucesivas lecturas realizadas por un anemómetro se controla la velocidad de circulación de las brisas. La activación de la envoltura solar se produce en el momento en que la velocidad media para un determinado periodo  $t$  es incapaz de mantener la rotación de las palas de la turbina. Para evitar *falsas* activaciones de la envolvente se puede añadir un temporizador para validar que la ausencia de viento se produce en el intervalo especificado y se puede obtener rendimiento de la activación de la envolvente solar.

#### 4.1.3. Adaptación de la arquitectura a patrones eólicos definidos

En el capítulo 2 se hacía mención a la existencia de determinados patrones de circulación eólica en terrenos con características singulares. Estos casos están relacionados con superficies de morfología heterogénea, topografía singular o aparición periódica de determinados fenómenos meteorológicos. La circulación de las brisas se produce en un rango predominante de

manera unidireccional o bidireccional. En estos casos, el rendimiento de la interfaz es mejorable a través de un diseño adaptado a tales condiciones. La arquitectura de los prototipos estaría fundamentada en priorizar la captación y la canalización interior del flujo.

#### **4.1.4. Inclusión de sistemas de control de potencia aplicados a la turbina**

La constitución del sistema de microgeneración como un sistema híbrido compuesto por turbina eólica, interfaz, sistema de microgeneración solar y recogida de aguas facilita que se puedan explorar las sinergias generadas. El tratamiento de los anteriores sistemas de control de potencia se ha focalizado en la interfaz al ser objeto principal de estudio. La siguiente propuesta de futura actualización surge del comportamiento observado en las distintas simulaciones realizadas. La circulación interior generada a partir de brisas prolongadas reduce su potencial según nos aproximamos al eje de rotación. Este comportamiento posibilita que se pueda estudiar la posibilidad de proyectar un mecanismo que redujese el radio de rotación a fin de encontrarse con estas capas de menor velocidad.

#### **4.1.5. Parasoles integrados en el disco inferior**

La integración de un elemento a modo de parasol tiene una doble operatividad. El diseño adecuado de estos elementos reduce la radiación directa solar a la vivienda optimizando la entrada de luz solar en las épocas cálidas sin que ello suponga un mayor consumo en climatización. En segundo lugar, su integración resulta positiva a la hora de captar y canalizar flujo eólico hacia el interior de la interfaz, favoreciendo la aceleración del flujo sin obstaculizar el radio de acción de las aberturas.



---

Hace ya algún tiempo le pedí a un buen amigo que redactará unas líneas a modo de prólogo para ilustrar el camino que iba a emprender. Cuando recibí su regalo, volví a tener ese sentimiento casi olvidado después de tantos años,... me volvió a impartir una nueva lección. No encuentro mejores palabras para comenzar esta carrera.

*Cuando inicias una tesis tienes que observar  
lo que ocurre a tu alrededor, plantearte preguntas,  
pensar la manera de responderlas, trabajar en ello profundamente,  
hasta que esas preguntas hayan sido respondidas parcialmente  
y te hayan surgido nuevas preguntas.  
Cuando termines la tesis te habrás dado cuenta  
que ésta no es más que un grano de arena en el desierto  
y que es el comienzo de una apasionante carrera en busca del conocimiento.  
Si al final de la misma has sido capaz de seguir planteándote preguntas  
y, sobre todo, disfrutar intentando resolverlas,  
esta tesis habrá cumplido su misión.*

Pascual Urbán Brotóns  
Profesor Titular Escuela Politécnica Superior  
Universidad de Alicante

---



## Anexo

### A.1. Listado de planos

#### Nomenclatura

<i>V</i> – 00	Características del emplazamiento de la vivienda tipo
<i>V</i> – 01	Alzados de la vivienda unifamiliar tipo
<i>V</i> – 02	Acotación y distribución de la planta semisótano
<i>V</i> – 03	Acotación y distribución de la planta baja
<i>V</i> – 04	Acotación y distribución de la planta piso
<i>V</i> – 05	Simulación de flujo eólico alrededor de la vivienda tipo
<i>I</i> – 01	Determinación del ángulo $\beta$ para el perfil NACA2412
<i>I</i> – 02	Cálculo de la longitud de inyección tipo
<i>I</i> – 03	Cálculo de la longitud de captación tipo
<i>I</i> – 04a	Cálculo de la superficie de barrido de la interfaz
<i>I</i> – 04b	Caso particular $C_c = 1$ proyectado para la arquitectura $N_{eta} = 13$
<i>I</i> – 05	Discretización del espacio de trabajo en el prototipo B
<i>I</i> – 06	Arquitectura interior del prototipo A
<i>I</i> – 07	Arquitectura interior del prototipo B
<i>I</i> – 08	Arquitectura interior del prototipo C

---

<i>S</i> – 00	Simulación numérica interfaz. Caracterización de los fenómenos originados
<i>S</i> – 01	Contorno de velocidad interior en el prototipo A
<i>S</i> – 02	Contorno de velocidad interior en el prototipo B
<i>S</i> – 03	Contorno de velocidad interior en el prototipo C
<i>S</i> – 04	Contorno de velocidad en las proximidades de la interfaz
<i>S</i> – 05	Desarrollo de vórtices en las toberas de ataque
<i>M</i> – 01	Simulación del prototipo B01 para diferentes periodos de tiempo
<i>M</i> – 02	Comportamiento del prototipo B01 en relación al radio del aerogenerador
<i>M</i> – 03	Origen de los vórtices en la entrada de las toberas
<i>M</i> – 04	Introducción de aberturas en el álabe
<i>M</i> – 05	Simulación CFD de prototipo B02 en función al número de extensiones
<i>M</i> – 06	Simulación CFD de prototipo B02 de la extensión nº7
<i>M</i> – 07	Despiece acotado del álabe perteneciente al prototipo B02
<i>M</i> – 08	Simulación CFD del prototipo B03
<i>M</i> – 09	Simulación CFD del prototipo B03 en $f^\circ$ de la velocidad eólica
<i>M</i> – 10	Simulación para el prototipo B01. Incidencia sobre perfil NACA-2412
<i>M</i> – 11	Simulación para el prototipo B01. Incidencia sobre perfil GOE-480 il
<i>M</i> – 12	Simulación para el prototipo B01. Incidencia sobre perfil RAF-19 il
<i>M</i> – 13	Calibración del ángulo de ataque perfil RAF-19 il en prototipo B03
<i>M</i> – 14	Detalle del mecanismo de calibración de las palas
<i>M</i> – 15	Simulación CFD del mecanismo de regulación, prototipo B03
<i>M</i> – 16	Detalle del alma del álabe del prototipo B03
<i>M</i> – 17	Detalle del disco superior
<i>M</i> – 18	Integración del sistema híbrido solar en el disco superior
<i>M</i> – 19	Detalle del disco inferior
<i>M</i> – 20	Rotación de una turbina de eje vertical en ejercicio libre
<i>M</i> – 21	Rotación de una turbina de eje vertical con la interfaz incorporada
<i>F</i> – 00 – <i>a</i>	Estimación de la potencia eléctrica a generar por el prototipo. Caso 1

---

- F* – 00 – *b*      Estimación de la potencia eléctrica a generar por el prototipo.  
Caso 2
- F* – 01      Integración del sistema EOLIA en vivienda unifamiliar
- F* – 02      Integración del sistema EOLIA en nave industrial
- F* – 03      Sistema EOLIA incorporado en una estructura viaria pórtico  
y banderola



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante