Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

Caracterització de l'estela d'un aerogenerador mitjançant un túnel de vent

Autor/a

Antoni Calderer Elias

Tutor/a

Allen Bateman Pinzón

Departament

Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental

Intensificació

Mecànica de fluids

Data

Juliol de 2009

AGRAÏMENTS

Voldria agrair la col·laboració prestada a totes aquelles persones que m'han ajudat i recolzat durant l'elaboració del present treball.

Cal fer una menció especial i agrair al Professor Allen Bateman, tutor de la present tesina, per l'ajuda prestada, sense la qual no hauria estat possible la realització de la mateixa, i per posar a la meva disposició tots els medis que han sigut necessaris. També vull agrair especialment a Vicente De Medina, el qual ha col·laborat intensament i m'ha guiat a l'hora de realitzar el treball, i per la seva enorme il·lusió a l'hora de treballar i atendre qualsevol problema o dubte.

Al Professor Fernando Porté, qui hem va brindar l'oportunitat de formar part d'un grup d'investigació prestigiós del Departament d'Enginyeria Civil de Saint Anthony Falls Lab (University of Minnesota), qui a més, hem va donar suport i atenció en tot moment. Dintre del grup de treball vull destacar a Leonardo Chamorro que hem va ajudar a iniciar-me en el tema dels aerogeneradors.

A més a més, cal agrair a tots els professors que han contribuït en la meva formació, la qual, després de moltes hores de classe i estudi, ha fet possible l'elaboració d'aquesta tesina.

Voldria dedicar la present tesina a la família, i agrair-los hi l'esforç que han fet durant tots aquests anys que ha durat la carrera.

Per acabar, agraeixo el suport de tots els amics i companys de classe, amb els quals hem compartit molts bons moments tant fora com a dins de les aules.

Títol: Caracterització de l'estela d'un aerogenerador mitjançant un túnel de vent

Autor: Antoni Calderer Elias
Tutor: Allen Bateman Pinzón

RESUM

Conèixer el comportament del flux de vent a l'entorn d'un aerogenerador és essencial per un bon disseny dels parcs eòlics, i en especial, per determinar la distribució òptima de les turbines.

La turbulència és un fenomen molt complex, gens fàcil de resoldre mitjançant equacions matemàtiques. Si bé, existeixen metodologies que ho fan possible, els resultats obtinguts no sempre són satisfactoris. Per tant, és necessari recórrer a estudis experimentals. Les mesures de camp poden ser complicades de dur a terme ja que les condicions atmosfèriques són incontrolables i, a més, no permeten obtenir un gran nivell de detall. L'estudi d'un model reduït en el laboratori resulta ser una eina eficaç.

Diversos autors han investigat sobre diferents aspectes relacionats amb les esteles generades pels aerogeneradors. La majoria d'ells, però, ho han fet en condicions de flux entrant uniforme. Tanmateix, sabem que els aerogeneradors es troben a l'interior de la capa límit atmosfèrica, la qual pot arribar a centenars de metres, i per tant, el flux que arriba a la turbina no és uniforme.

La present tesina estudia de forma experimental, un model reduït d'aerogenerador mitjançant un túnel de vent, ubicat al SAFL (Saint Anthony Falls Lab, University of Minnesota). En aquest, s'hi simula la capa límit atmosfèrica per analitzar quin és l'efecte que té sobre l'estela de la turbina.

L'escalat entre el model i el prototipus és de gran complexitat. Les condicions d'una turbina real, per exemple una de 20 metres de diàmetre, no són possibles de simular amb exactitud amb una turbina de 15 cm. El nombre de Reynolds que s'assoleix al model és molt inferior. Per aquest motiu, els resultats que s'obtenen en aquest experiment no seran exactes als de la realitat. Ara bé, altres autors han comprovat que certes formes qualitatives d'aquests resultats mantenen certa semblança.

L'estudi es centra en l'obtenció de mesures detallades de dues components de la velocitat, longitudinal i vertical, a diferents plans transversals aigües avall de la turbina. S'han tingut en compte dos tipus de superfícies, una de llisa i una altre de rugosa. Les mesures s'han realitzat amb un anemòmetre de fil calent, cosa que ha permès quantificar la turbulència.

S'ha donat especial èmfasis a la distribució de velocitats darrera la turbina, a la intensitat de turbulència i al flux de potència, tots ells en la direcció longitudinal. La velocitat ens dóna una idea de la potència que pot generar una turbina, mentre que les altres dues fan referència a les sobrecarregues a què estarà sotmesa.

Aquesta tesina és només una part d'una sèrie d'experiments i d'estudis que s'estan duent a terme al SAFL. Entre ells s'hi contempla la implementació d'un model numèric, mitjançant tècniques LES. Un cop acabat, és preveu un estudi de camp per validar i calibrar els resultats.

Title: Wind tunnel experiment to characterize a wind turbine wake

Author: Antoni Calderer Elias
Tutor: Allen Bateman Pinzón

ABSTRACT

Having a well studied behavior of the flow over wind turbines is essential to determine a good design of a wind farm, and, in particular, is necessary to determine the optimum spatial distribution of wind turbine seating.

Turbulence is clearly a complex process, and one which cannot be easily solved. Although some methodologies may give a good solution, sometimes they do not converge to the actual solution. Therefore, experimental studies need to be carried out. Field studies are not easy to develop. The variability of the wind and other atmospheric phenomenon pose challenges moreover, field studies yield very few data. A wind tunnel turns out to be an efficient tool.

Great number of studies about turbine wakes refers to uniform flow conditions. However, it is well known that wind turbines are affected by the atmospheric boundary layer. As a consequence, it is necessary to have a better understanding of such conditions.

In general, the vertical inhomogeneity of the incoming boundary-layer flow, which is modulated by the surface roughness, plays an important role on the distribution of turbulence properties within the turbine wake.

Wind-tunnel experiments were performed to study turbulence in the wake of a model wind turbine placed in a boundary layer developed over rough and smooth surfaces. The tunnels is placed at SAFL (Saint Anthony Falls Lab, University of Minnesota)

Scale effects of the model are a complex to determine. The conditions of a full scale turbine of about 20 meters diameter are not possible to simulate inside a wind tunnel. It is not possible to achieve such a large Reynolds number. However, other authors have observed that small scale models and a prototype have similar qualitative behaviors.

This study focuses on obtaining detailed measurements of the stream-wise and vertical components of the wind speed. Hot-wire anemometry was used to characterize the cross-sectional distribution of mean velocity and turbulence levels at different locations downwind of the turbine for both surface roughness cases.

Special emphasis was placed on quantifying the magnitude and spatial distribution of the velocity deficit and the enhancement of the turbulence intensity in the turbine wake with respect to the incoming boundary-layer flow. These quantities are important factors affecting turbine power output and fatigue loads in wind parks.

ÍNDEX

AGRAÏMENTS **2**

RESUM **3**

ABSTRACT **4**

1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS **7**

1.1. INTRODUCCIÓ 7
1.2. OBJECTIUS 9

2. ESTAT DE L'ART SOBRE LA CARACTERITZACIÓ DE LES ESTELES **10**

3. TEORIES AERODINÀMIQUES DELS AEROGENERADORS **14**

3.1. INTRODUCCIÓ 14
3.2. ANALOGIA DEL DISC 15
3.2.1. Teoria del moment 16
3.2.2. El coeficient de potència 17
3.2.3. El límit de Betz 17
3.2.4. El coeficient de torsió 17
3.3. TEORIA DEL ROTOR 18
3.3.1. Moviment de rotació de l'estela 18
3.3.2. Teoria del moment angular 19
3.3.3. Màxima potència 21
3.3.4. L'estructura de l'estela 21
3.4. TEORIA DE LES ASPES DEL ROTOR 22
3.5. LA FORÇA I EL MOMENT AERODINÀMIC 24
3.5.1. La força de resistència 24
3.5.2. El coeficient de resistència 26
3.5.3. La capa límit 26
3.5.4. Separació de la capa límit 26
3.5.5. La força de sustentació i la circulació 27
3.5.6. El coeficient de sustentació 29
3.5.7. Teoria de perfils 30
3.5.8. Característiques resistents d'un perfil 31
3.5.9. Variació de les característiques d'un perfil en funció del nombre de Reynolds ... 32

4. DESCRIPCIÓ DEL TÚNEL I DELS APARELLS DE MESURA **34**

4.1. EL TÚNEL DE VENT 34
4.1.1. Descripció Física 34
4.1.2. Historia 36
4.2. ELS APARELLS DE MESURA 36

4.2.1. Anemòmetre de fil calent ... 36
4.2.2. Tub de Pitot estàtic ... 38
4.2.4. Estroboscopi ... 40

5. RELACIÓ ENTRE EL MODEL I LA REALITAT ... 41

5.1. INTRODUCCIÓ ... 41
5.2. PARÀMETRES DE DISSENY DEL MODEL ... 42
5.2.1. Relació entre el radi i l'altura del centre de la turbina ... 42
5.2.2. Velocitat específica de la turbina ... 42
5.2.3. Les aspes de la turbina ... 44
5.2.4. La pila de suport de la turbina ... 44
5.2.5. La rugositat de la superfície ... 44

6. PROCEDIMENT EXPERIMENTAL ... 46

6.1. L'EXPERIMENT ... 46
6.1.1. La turbina ... 46
6.1.2. Fases de l'experiment ... 46

7. RESULTATS ... 49

7.1. INTRODUCCIÓ ... 49
7.2. CARACTERITZACIÓ DE LA CAPA LÍMIT DEL TÚNEL ... 49
7.3. COMPORTAMENT EN RÈGIM LLIURE ... 50
7.4. DETERMINACIÓ DE LA SIMETRIA ... 52
7.5. RESULTAT EN CONDICIONS DE SUPERFÍCIE RUGOSA ... 53
7.5.1. Velocitat ... 53
7.5.2. Intensitat de turbulència ($u'2/U$) ... 56
7.5.1. Flux de potència ... 59
7.5.2. Tensions de Reynolds ($u'w'$) ... 62
7.5.3. Curtosis ... 65
7.5.4. Espectre de d'energia ... 66
7.6. RESULTATS EN CONDICIONS DE SUPERFÍCIE LLISA ... 68
7.6.1. Velocitat ... 69
7.6.2. Intensitat de turbulència ... 70
7.6.1. Flux de potència ... 72
7.6.2. Tensions de Reynolds ($u'w'$) ... 73
7.6.3. Espectre d'energia ... 74

8. CONCLUSIONS ... 76

8.1. FUTURES LÍNIES D'INVESTIGACIÓ ... 78

9. REFERÈNCIES ... 79

1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS

1.1. INTRODUCCIÓ

La qüestió de les fonts d'energia és una de les més importants en el món actual, tant a nivell econòmic com polític i social. Una de les noves vies energètiques amb molt bones perspectives de futur és l'energia eòlica. Per posar-la a la pràctica de manera efectiva és important entendre el disseny òptim de les turbines i l'estudi del flux de vent al seu voltant.

En el disseny dels parcs eòlics, és fonamental, entendre l'esquema de col·locació de les turbines, i en particular, la distància entre la primera fila de turbines i la segona, en relació a la direcció del vent. És ben conegut el fet que les turbines de la segona fila acostumen a patir més averies causades pels alts nivells de turbulència generats per la primera.

Són moltes les qüestions que es consideren en el disseny de l'emplaçament de les turbines, com per exemple el preu del terreny, els costos de la connexió elèctrica, la geografia, etc. En aquest projecte s'intentarà respondre qüestions de caire científic i tècnic, per guiar la implementació del parc de manera òptima. És posarà especial èmfasis en les distribucions de velocitat i d'intensitat de turbulència longitudinals. El cub de la velocitat ens indica la potència que una turbina serà capaç de generar, mentre que la intensitat de turbulència ens dóna una idea de les carregues de fatiga que estarà sotmesa la turbina.

Per això, és molt important fer estudis a nivell experimental, teòrics i numèrics. Alguns dels estudis experimentals es duen a terme directament al camp, però presenten moltes limitacions. Per exemple, les condicions atmosfèriques són variables, i per tant, incontrolables, com la temperatura o la velocitat. Com a conseqüència es presenta la necessitat de recórrer a experiments controlats en els túnels de vent.

Figura 1. Parc eòlic de Hamish Hill, Austràlia, extret de Sathyajith Mathew (2006)

Els estudis numèrics basats en models matemàtics, a més de ser molt complicats, no asseguren bons resultats. Per tant, és necessari que estiguin validats experimentalment. A més, en el cas de models matemàtics amb acceptació, també calen dades experimentals per determinar-ne els paràmetres. Com per exemple, l'efecte de la rugositat del terreny o la temperatura.

Els models matemàtics més coneguts i les seves implementacions numèriques es basen en les equacions de Navier-Stokes de la dinàmica de fluids, juntament amb teories de turbulència com la de Kolmogorov. Una de les característiques del flux d'aire turbulent és la presència de remolins d'escales geomètriques i energètiques molt variables. El problema de la turbulència és realment d'escala múltiple. Normalment es fa la simplificació de considerar, només, dues escales, les petites i les grans, que es presenten de manera acoblada en les equacions matemàtiques. El problema de la barreja d'escales porta moltes dificultats en les simulacions numèriques, basant-se en la manera de fer separacions d'escales.

En particular, un dels models en el càlcul de la turbulència és el LES (Large Eddy Simulation) que implementa les equacions de Navier-Stokes modificades d'acord amb la teoria de Kolgomorov. El mètode de Kolgogmrov consisteix en escriure la velocitat total a cada punt com a suma de la component de les grans escales i de les petites escales. Per obtenir la primera, s'aplica un filtre matemàtic que suprimeix l'escala petita. Això és una convolució de la velocitat amb una funció filtre. Aquesta mateixa convolució s'aplica a les equacions de Navier-Stokes per obtenir-ne l'equació de la velocitat de grans escales. L'efecte de les petites escales es manifesten en aquestes equacions per mitjà d'un tensor d'esforços, que s'acaba convertint en un augment de la viscositat efectiva del fluid. "Subgrid Scale Parametritzations" és el mètode que complementa el LES per tal de trobar la velocitat de les petites escales.

Part del present estudi experimental es basa en mesurar la velocitat del vent a diferents posicions respecte la turbina. D'aquestes dades se n'obtenen velocitats mitges i fluctuacions que permeten quantificar la turbulència. En particular, s'obté una caracterització de l'estela en diferents condicions. Per comparar aquests resultats experimentals amb els resultats de simulacions numèriques, primer se n'hauria de fer un filtre discret consistent amb el de Kolmogorov. Aquest resultat correspondria a la velocitat de grans escales de la teoria de turbulència, però sense l'efecte de les petites escales. La diferència entre els valors mesurats i la velocitat filtrada hauria de correspondre a la velocitat de petites escales calculades numèricament.

Un altre aspecte de la recerca experimental és millorar i ampliar certes formulacions utilitzades en altres treballs, en condicions més simples i limitades. Per exemple, moltes es basen en un punt molt concret en relació a la turbina i no tenen en compte diferents textures de rugositat de la superfície del terreny. A través d'un estudi tan detallat com el que es presenta a continuació, es podran introduir lleugeres modificacions d'aquestes formules per tal d'adaptar-les a diferents condicionants

1.2. OBJECTIUS

Un dels principals objectiu de la present tesina és l'obtenció d'una sèrie de dades experimentals a partir d'un túnel de vent, com a eina de suport i validació d'un model numèric que, actualment, s'està desenvolupant a la Universitat de Minnesota. Aquest model es basa en tècniques LES (Large Eddy Simulation) i es complementa amb "Sub-grid Scale Parametritzations".

A més, també es pretén entendre el comportament del flux a l'estela que es genera a la sortida d'un aerogenerador. Això és indispensable per un bon disseny dels parcs eòlics. Concretament, es volen establir uns paràmetres que ajudin a determinar la distància de separació entre la primera i la segon fila d'aerogeneradors. Per assolir-ho s'han marcat els següents objectius:

- Estudiar el camp de velocitats de l'estela, i veure com aquest evoluciona amb la distància. La potència generada per una turbina es calcula com el cub de la velocitat per un factor de potència característic de cada turbina. Així, sabent com evoluciona la velocitat tindrem una idea de la potència que podrà generar la segona turbina en funció de la separació respecte la primera.

- La intensitat de turbulència és un dels paràmetres més utilitzats per analitzar les carreges de fatiga generades per les fluctuacions del vent. Sabent el camp d'intensitats de turbulència podrem tenir una idea de les carregues aplicades sobre la segona turbina en funció de la distància. Aquest fet, ens permetrà millorar les formules existents, que tot i no estar validades, són d'us actual. Com per exemple, les de *Quarton et al (1989)* o les de *Crespo et al (1996).* Totes elles es basen en la suposició que el flux que arriba a la turbina és uniforme, cosa que, per l'efecte de la capa límit, no es certa. A més, només contemplen un sol punt, i consideren que és representatiu de tota la secció transversal.

- Recorrer a altres variables, com el flux de potència, la curtosis i l'espectre d'energies, ens permetrà entendre una mica millor com es comporta la turbulència i quines són les escales que hi intervenen.

- Finalment, ens plantegem quantificar quin és l'efecte que la rugositat de la superfície té sobre tots aquests resultats. Això ho aconseguirem fent l'experiment sobre dues superfícies amb diferent rugositat.

És important destacar que l'objectiu d'aquest projecte no és quantificar amb exactitud tots els valors de les variables que es pretenen analitzar, sinó només aproximar les formes d'aquestes, els comportaments i entendre els fenòmens que hi intervenen. Com es detallarà en l'apartat del model i el prototipus, el nombre de Reynolds del túnel és inferior que el de la realitat. Per solucionar això, s'ha d'optar per utilitzar un model de turbina reduït amb geometria completament diferent. Tot i ser diferent, el nostre model treballarà de forma més o menys anàloga.

2. ESTAT DE L'ART SOBRE LA CARACTERITZACIÓ DE LES ESTELES

Les esteles que es formen a la sortida d'un aerogenerador d'eix horitzontal estan constituïdes per estructures turbulentes molt complexes on el moviment és rotatori, en forma d'espiral. Hi ha tres fenòmens bàsic que expliquen la generació d'aquestes, la turbina, els gradients de pressió tant longitudinals com radials i pels vòrtexs generats per les puntes de les aspes.

Al llarg dels darrers anys, diversos investigadors han realitzat gran quantitat d'estudis tant numèrics com experimentals amb l'objectiu de caracteritzar la turbulència d'aquests tipus de turbines. Són dues les característiques en que es centren tots aquests estudis i que són més destacables pel seu interès pràctic. Per una banda, el dèficit de velocitat ocasionat per la pèrdua d'energia del vent al topar amb la turbina. És una característica que va estretament lligada amb la reducció de potència que experimentarà la turbina posterior que hi pugui haver en un parc eòlic. Per altre banda, els nivells de turbulència, que fan que la turbina posterior estigui sotmesa a uns esforços addicionals, i que per tant, necessiti d'uns majors costos de manteniment. *Vermeer et al. (2003)* ho estudia de forma exhaustiva en condicions de flux entrant uniforme.

Es coneix que el comportament d'una turbina en termes de rendiment es relaciona amb les característiques turbulents del flux entrant. Per exemple, *Sheinman et al (1992)* Rosen van demostrar que si no es té en compte l'efecte de la turbulència en el flux d'entrada, es pot estar sobreestimant més del 10% la potència generada per la turbina.

Un estudi realitzat per *Medici et al (2006)* en un túnel de vent, demostra que l'estela que forma una turbina de vent localitzada en el regim lliure, canvia substancialment amb la presència de turbulència en el flux entrant. És important dir que aquest efecte causat per la presència de turbulència, s'espera que sigui molt superior si en comptes de trobar-nos en el règim lliure ens trobéssim parcialment o totalment immersos dins de la capa límit. La capa límit es caracteritza per forts gradients de velocitat i d'intensitat turbulenta en la direcció paral·lela a la component vertical. Aquesta alta variació espacial, juntament amb la anisotropia que causa la interferència amb el terra, fan que s'esperi una estructura de l'estela gens axisimètrica.

Altres circumstancies que també afecten al flux entrant, i conseqüentment, a l'estructura de l'estela, són les característiques aerodinàmiques de la superfície del terreny, com ara la rugositat d'aquest, els gradients de temperatura, la topografia del terreny, la presencia d'altres turbines, etc.

Entendre detalladament les propietats de l'estela sota diverses característiques del flux entrant, és essencial per maximitzar l'energia produïda per la turbina i per mantenir la integritat física d'aquesta. De fet, l'habilitat de predir la distribució espacial del dèficit mig de velocitat, és ideal per optimitzar el disseny alhora de col·locar les turbines als parcs eòlics. La distribució espacial de la intensitat de turbulència generada a l'interior de l'estela, és necessària per determinar les càrregues associades a la fatiga tant de la turbina com de l'estructura amb si mateixa. Cal afegir que la caracterització de les propietats turbulentes a les esteles de les turbines, serveix també com a guia per desenvolupar anàlisis numèrics i sobretot com a validació dels resultats numèrics obtinguts mitjançant LES (Large Eddy Simulation).

La intensitat de turbulència longitudinal a la direcció del vent (I_u) juga un paper directe en la força mitja ($\overline{F}$) i en el moment flector (M) que actuen sobre la turbina. La

intensitat de turbulència es defineix com la desviació estàndard de la component longitudinal de la velocitat mitja del vent (σ_u) dividit per la velocitat mitja del vent ($\overline{U}$)

$$I_u = \frac{\sigma_u}{\overline{U}} \tag{1}$$

Per tal d'entendre la influència que la intensitat de turbulència te sobre la força mitja $\overline{F}$, observem que la força instantània total que actua a la turbina és

$$dF = \frac{1}{2}\rho C_f \, dA(U+u)^2 = \frac{1}{2}\rho C_f \, dA(U^2 + 2Uu + u^2) \tag{2}$$

on ρ és la densitat de l'aire, C_f és el coeficient de força aerodinàmic, S l'àrea de la secció transversal, U la velocitat mitja del vent i u fa referència a les fluctuacions del vent. Si fem la mitjana temporal de l'expressió anterior obtenim,

$$\overline{dF} = \frac{1}{2}\rho C_f \, dA(U^2 + \sigma_u{}^2) \tag{3}$$

i si la velocitat U és uniforme i I_u constant s'obté,

$$\overline{F} = \frac{1}{2}\rho < C_f > AU^2(1 + I_u{}^2) \tag{4}$$

On <> representa una mitjana espacial de la secció transversal de la turbina.

El moment flector s'obté d'una forma similar,

$$\overline{M} = \int_0^H \frac{1}{2}\rho C_f U^2 (1 + I_u^2) c(\xi)\xi d\xi \tag{5}$$

on $c(x)$ és la mida característica de l'element situat a la posició ξ i H és l'altura del centre de la turbina. L'equació (5) Assumeix una distribució entrant uniforme de velocitats i d'intensitat de turbulència.

Segons *Rosen et al (1996)* generalment s'usa la intensitat turbulenta com a mesura de la fatiga acumulada a la turbina, encara que en alguns casos pot ser més convenien utilitzar la el flux de potència per mesurar certs aspectes de la fatiga.

En general, els estudis de turbulència per a turbines situades dintre de la capa límit es simplifiquen a la mesura d'un sol punt, o considerant únicament valors mitjos. Normalment es considera que la velocitat a l'altura del centre de la turbina és representatiu de tota la turbina.

Un mètode per tenir en compte els efectes de l'estela en els nivells de turbulència consisteix en determinar la intensitat turbulenta efectiva I_{wake}, com a composició de la intensitat turbulenta ambient I_o i de la contribució de la turbina I_+, tal i com es mostra en la següent expressió:

$$I_{wake}^2 = I_0^2 + I_+^2 \Rightarrow I_+ = \sqrt{I_{wake}^2 - I_0^2} \tag{6}$$

Gràcies a això, i tenint en compte el fet que el valor de I_0 és fàcilment mesurable, podrem trobar el valor final de la intensitat turbulenta donat que es coneixen expressions empíriques que aproximen el valor de I_+ per a unes determinades condicions. Un exemple d'aquest tipus d'expressió, en el cas de flux en règim lliure, seria el proposat per *Quarton et al (1989)*:

$$I_+ = 4.8 C_T^{0.7} I_0^{0.68} (x / x_n)^{-0.57} \tag{7}$$

on C_T el coeficient de torsió de la turbina i x_n és la longitud que es caracteritza per una màxima afluència de l'estela. Segons *Vermeulen et al (1980)*, aquesta longitud es defineix com:

$$x_n = \frac{\sqrt{0.214 + 0.144m}\left(1 - \sqrt{0.134 + 0.124m}\right)}{\left(1 - \sqrt{0.214 + 0.144m}\right)\sqrt{0.134 + 0.124m}} \frac{r_0}{\left(\frac{dr}{dx}\right)} \tag{8}$$

on $m = \frac{1}{\sqrt{1 - C_T}}$, $r_0 = R\sqrt{\frac{m+1}{2}}$ i R és el radi de la turbina.

La velocitat de creixement de l'estela (dr/dx), té en compte la contribució de la turbulència ambient dr/dx_a, la part tallant dr/dx_m, i finalment, la turbulència mecànica dr/dx_λ. Així doncs, la velocitat de creixement es defineix com:

$$dr/dx = \sqrt{\left(\frac{dr}{dx}\right)_a^2 + \left(\frac{dr}{dx}\right)_m^2 + \left(\frac{dr}{dx}\right)_\lambda^2} \tag{9}$$

on cada contribució s'estima de la següent manera:

$$\left(\frac{dr}{dx}\right)_a^2 = 2.5 I_0 + 0.005$$

$$\left(\frac{dr}{dx}\right)_m^2 = \frac{(1-m)\sqrt{1.49+m}}{9.76(1+m)}$$

$$\left(\frac{dr}{dx}\right)_m^2 = \left(\frac{dr}{dx}\right)_\lambda^2 = 0.012 B \lambda$$

B és el nombre de fulles de la turbina i λ és la velocitat específica, que es mesura com el quocient entre el mòdul de la velocitat del punt amb major radi de la turbina i la velocitat longitudinal de vent.

Una altre expressió per obtenir la turbulència afegida de la component corresponent a la turbina, és la proposada per *Crespo et al (1996)*, obtinguda combinant resultats, tant numèrics, com experimentals. El rang de valors pels quals l'expressió és vàlida son: $5 < \frac{x}{d} < 15$, $0.07 < I_u < 0.014$ i $0.1 < a < 0.4$, on a es el factor de velocitat induïda.

$$I_+ = 0.73 a^{0.8325} I_0^{0.0325} (x/d)^{-0.32} \tag{10}$$

En aquest cas I_+ està expressada en funció del coeficient de velocitat induïda a en comptes del coeficient C_T utilitzat per *Quarton et al (1989)* anteriorment. Això no genera cap problema ja que segons l'analogia del disc actuador, estan relacionats entre ells de la forma següent: per a $a < 0.5$ s'obté $C_T = 4a(1 - a)$.

Una altre expressió a considerar per calcular I_+ és la proposada per *Hassan (1992)*:

$$I_+ = 5.7 C_T^{0.7} I_0^{0.68} (x/x_n)^{-0.96} \tag{11}$$

Per a tenir en compte la configuració de turbines en un parc eòlic, *Frandsen et al (1999)* van desenvolupar un model, que ha esdevingut estendard a Europa, i es basa en la llei geostròfica de resistència. Per tal de considerar la turbulència generada per les turbines, incrementa la rugositat del terreny de tal manera que aquest increment de rugositat sigui equivalent l'efecte que generarien les turbines. Finalment s'obté:

$$I_+ = \frac{1}{2}\left(I_0 + \sqrt{I_0^2 + I_{++}^2}\right) \tag{12}$$

on

$$I_{++}^2 = \frac{0.36}{1 + 0.2\sqrt{s_1 s / C_T}} \tag{13}$$

Aquí, s_1 i s son les distàncies de separació entre turbines normalitzades pel diàmetre de la turbina.

No obstant, avui en dia encara no disposem d'una formula validada a l'interior d'un parc eòlic.

En la present tesina, es pretén caracteritzar l'estela mitjançant mesures detallades en túnel de vent de la distribució de la velocitat mitja en la direcció longitudinal, de la intensitat turbulenta i de les tensions tallants de Reynolds en plans perpendiculars situats a diferents distàncies respecte la turbina (x/d = 3, 5, 10 and 15). Això es farà considerant l'efecte de capa límit generada per la superfície del terreny en condicions homogènies de temperatura. S'analitzaran en condicions de superfície llisa i superfície rugosa i es compararan els resultats obtinguts.

3. TEORIES AERODINÀMIQUES DELS AEROGENERADORS

En aquest apartat descriurem de forma teòrica les característiques aerodinàmiques dels aerogeneradors. Es descriuran els fenòmens que tenen lloc quan el flux de vent passa a través de la turbina, així com les forces i pressions que es generen. Això es farà a través de l'aplicació del principi de conservació del moment axial i del moment angular. El moment angular ens descriurà el moviment rotatori del flux a la sortida de la turbina. També es descriurà com és el moviment en una estela. Finalment, es tractaran alguns temes sobre els perfils aerodinàmics per entendre com s'aconsegueix que el model tingui comportaments semblants al prototipus, tot i que el nombre de Reynolds d'un i altre siguin diferents.

3.1. INTRODUCCIÓ

Un aerogenerador és un dispositiu per extreure l'energia cinètica del vent. A l'extreure aquesta energia la velocitat del vent d'aquella massa d'aire que passa a traves del rotor de la turbina disminueix. Aquesta massa d'aire afectada per una menor velocitat la podem delimitar per un contorn, que s'estén tant aigües amunt com aigües avall de la turbina formant un tub de corrent allargat amb secció circular. La característica principal de la superfície de control es que mai serà travessada pel flux de vent, raó per la qual el flux màssic es manté constant al llarg de tot el tub de corrent. Com que l'aire de l'interior del tub està sotmès a una disminució de la velocitat, i si considerem que l'aire és un fluid incomprensible, la secció transversal circular s'expandirà per acomodar l'aire que es mou mes lentament.

El fet que hi hagi una turbina a l'interior del flux, fa que l'aire que s'aproxima a la turbina disminueixi gradualment de velocitat, de tal manera que quan l'aire arriba a la posició del rotor de la turbina, la velocitat és inferior a la velocitat del flux lliure. Simultàniament, el tub comença a expandir-se també abans d'arribar a la posició de la turbina com a conseqüència de la disminució de la velocitat. Com que el flux encara no ha entrat en contacte amb la turbina, no s'ha realitzat cap treball extern, i la pressió estàtica de l'aire augmenta per tal de compensar la disminució de l'energia cinètica.

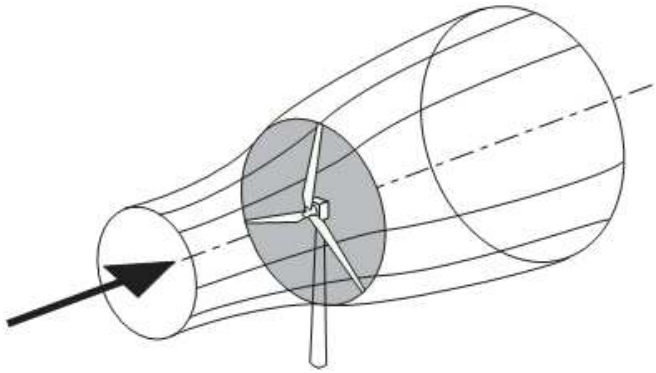


Figura 2. Tub de flux on s'extreu energia cinètica, extret de Burton et al (1995)

A mesura que l'aire passa a traves del rotor la pressió estàtica va disminuint, arribant a valors inferiors als de la pressió atmosfèrica. L'aire que acaba de superar la turbina es caracteritza per tenir una velocitat més pausada i una pressió estàtica menor. Aquest fenomen és el què coneixem com a l'estela d'un flux. A mesura que ens allunyem aigües avall de la turbina, la pressió estàtica de l'estela va recuperant, per equilibri, el valor de la pressió atmosfèrica. Aquest augment de pressió es compensa amb una

disminució de l'energia cinètica, i per tant es produeix una disminució de la velocitat del vent. Així doncs, l'única diferencia entre el flux entrant lluny de la turbina i el flux sortint també lluny de la turbina és que l'energia cinètica ha disminuït.

3.2. ANALOGIA DEL DISC

El mecanisme explicat anteriorment ens diu que la turbina extreu energia cinètica del vent però no sabem que passa amb aquesta energia. Doncs, una part d'aquesta energia va destinada a fer girar la turbina, però una altre part retorna al flux en forma de turbulència que es dissipa en calor.

Per realitzar un anàlisis del comportament aerodinàmic d'una turbina sense considerar un disseny específic, és a dir, només considerant el procés d'extracció de la turbina, s'utilitza el concepte de l'analogia del disc. A la *Figura 3* es pot veure un esquema del disc.

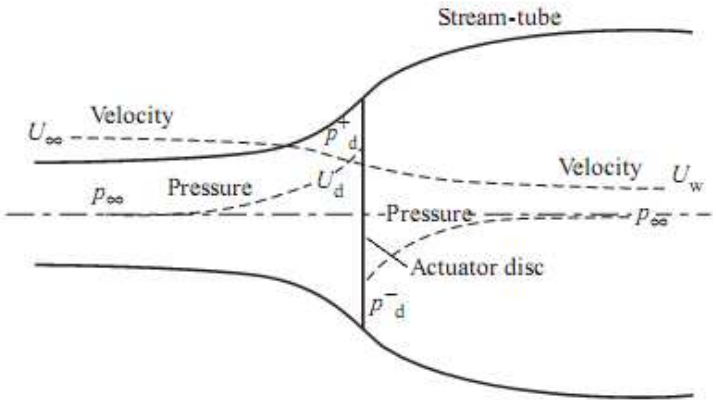


Figura 3. Esquema de l'analogia del disc amb el corresponent tub de flux, extret de Burton et al (1995)

A l'entrada del disc, el tub de flux està format per una area tranversal inferior a l'àrea del disc i aigües avall per una area superior a la del disc. L'expansió del tub és deguda a què el flux màssic es manté constant al llarg de tot el tub de flux. La massa d'aire que passa per una secció transversal del tub de flux per unitat de temps és ρAU, on ρ és la densitat de l'aire, A és l'àrea transversal del tub i U és la velocitat del flux. El flux màssic es manté constant al llarg del tub de flux i per tant es compleix:

$$\rho A_\infty U_\infty = \rho A_d U_d = \rho A_w U_w \tag{14}$$

El símbol ∞ fa referència a la situació de molt aigües amunt, *d* es refereix just a la posició del disc i *w* a la de l'estela a llarga distància.

Habitualment es considera que el disc provoca una variació de velocitat que ha de ser imposada al flux en regim lliure. La component longitudinal d'aquest flux en la posició del disc ve donat per $-aU_\infty$, on a és el que s'anomena factor de flux axial induït o factor d'entrada. Com a conseqüència, la velocitat longitudinal neta al disc serà

$$U_d = U_\infty(1-a) \tag{15}$$

3.2.1. Teoria del moment

L'aire que passa a través del disc es veu sotmès a un canvi general de velocitat, $U_\infty - U_w$ i a una taxa de variació de moment igual a la variació de velocitat multiplicat pel flux màssic:

$$Taxa\ de\ variació\ de\ moment = (U_\infty - U_w)\rho A_d U_d \tag{16}$$

La totalitat de la força necessària per generar aquesta variació de moment prové de la variació de pressió que te lloc a través del disc. Per altre banda, el tub de flux està delimitat per aire a pressió atmosfèrica, per la qual cosa la força neta serà nul·la. Per tant,

$$(p_d^+ - p_d^-)A_d = (U_\infty - U_w)\rho A_d U_\infty (1-a) \tag{17}$$

Per obtenir la diferència de pressió $(p_d^+ - p_d^-)$ s'aplica l'equació de Bernoulli de forma separada a la secció d'entrada i a la secció de sortida. És necessari que l'equació de Bernoulli s'apliqui separadament ja que l'energia total aigües amunt és diferent a la d'aigües avall. L'equació de Bernoulli ens diu que l'energia total d'un flux, que està compost per energia cinètica, energia de pressió i energia potencial, es manté constant sempre i quant no es realitzi treball. D'aquesta manera l'energia expressada en unitats de volum s'escriu com,

$$\frac{1}{2}\rho U^2 + p + \rho g h = constant \tag{18}$$

Aigües amunt tenim,

$$\frac{1}{2}\rho_\infty U_\infty^2 + \rho_\infty g h_\infty = \frac{1}{2}\rho_d U_d^2 + p_d^+ + \rho_d g h_d \tag{19}$$

Assumint que el flux és incomprensible $(\rho_\infty = \rho_d\ i\ h_\infty = h_d)$ tenim que,

$$\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 + p_d = \frac{1}{2}\rho_d U_d^2 + p_d^+ \tag{20}$$

De la mateixa forma, aigües avall tenim,

$$\frac{1}{2}\rho U_w^2 + p_\infty = \frac{1}{2}\rho U_d^2 + p_d^- \tag{21}$$

i restant les dues equacions obtenim anteriors,

$$(p_d^+ - p_d^-) = \frac{1}{2}\rho(U_\infty^2 - U_w^2) \tag{22}$$

operant obtenim,

$$\frac{1}{2}\rho(U_\infty^2 - U_w^2)A_d = (U_\infty - U_w)\rho A_d U_\infty (1-a) \tag{23}$$

i per tant,

$$U_w = (1 - 2a)U_\infty \tag{24}$$

Veiem que la meitat de la velocitat es perd aigües amunt del disc i l'altre meitat aigües avall.

3.2.2. El coeficient de potència

La força que la turbina fa contra l'aire es la següent

$$F = (p_d^+ - p_d^-)A_d = 2\rho A_d U_\infty^2 a(1 - a) \tag{25}$$

Aquesta força actua sobre el disc, i per tant, el treball realitzat per aquesta força és FU_d. Coneixent el treball també podem saber la potència que s'ha extret de l'aire com

$$P = FU_d = 2\rho A_d U_\infty^3 a(1 - a) \tag{26}$$

Llavors definim el coeficient de potència com

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 A_d} \tag{27}$$

On el denominador representa la potència disponible a l'aire en absència del rotor, i per tant

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \tag{28}$$

3.2.3. El límit de Betz

El màxim valor de C_p es dóna quan

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a) = 0 \tag{29}$$

s'obté un valor de $a = 1/3$.

Per tant,

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} = 0{,}593 \tag{30}$$

Aquest valor màxim del coeficient de potència és conegut com el límit de Betz, després que el científic alemany Albert Betz obtingués el seu valor. Mai cap turbina ha aconseguit superar aquest límit, de fet, és un valor que serveix per comparar el rendiment d'una aerogenerador real amb l'aerogenerador ideal.

3.2.4. El coeficient de torsió

Una forma alternativa de definir la força que actua sobre el disc com a conseqüència de la disminució de pressió definida per (25), és mitjançant el coeficient d'e torsió C_t, expressat en forma adimensional.

$$C_t = \frac{Torsor}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A_d} \tag{31}$$

$$C_t = 4a(1-a) \tag{32}$$

Apareix un problema quan $a \geq \frac{1}{2}$, ja que la velocitat del vent a l'estela ve determinada per $(1-2a)U_\infty$, que en aquest cas esdevé nul·la o inclús negativa. En aquestes condicions la teoria del moment descrita anteriorment deixa de ser aplicable, per la qual cosa s'ha de recórrer a modificacions empíriques.

A la següent figura es mostra la variació dels dos coeficients definits anteriorment en funció del valor d'a.

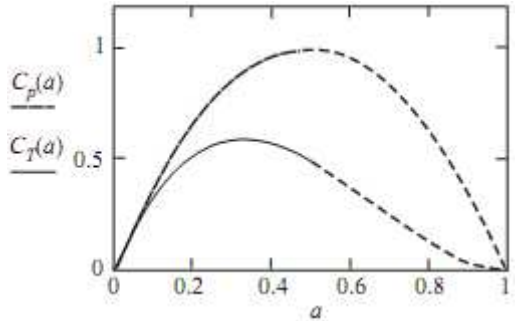


Figura 4. Variació dels coeficients C_p i C_t en funció del factor a, extret de Burton et al (1995)

3.3. TEORIA DEL ROTOR

La manera com les turbines d'eix horitzontal transformen l'energia cinètica del vent en energia útil es basa en el següent mecanisme. El disseny aerodinàmic de les ales del rotor permet que les ales escombrin tota l'àrea d'un disc, on es desenvolupa una diferència de pressió, que com s'ha comentat anteriorment, és la responsable de la pèrdua de moment a l'estela i per tant, la pèrdua d'energia cinètica. Aquesta energia perduda pot ser aprofitada mitjançant un generador adjunt, amb la funció de convertir el moment torçor aerodinàmic en energia elèctrica. El generador actua proporcionant-li a la turbina un moment torçor del mateix valor que el torçor aerodinàmic però de sentit contrari, de forma que la turbini giri amb velocitat angular constant.

3.3.1. Moviment de rotació de l'estela

El fet que les forces aerodinàmiques de l'aire causin un moment torçor a la turbina fa que l'aire també estigui sotmès a un torçor igual i de sentit contrari. Com a conseqüència d'aquesta reacció, l'aire gira en sentit contrari al gir del rotor de la turbina. L'estela de la turbina es caracteritza per tenir un moment angular i, per tant, les partícules de l'aire tenen una component de la velocitat tangencial a la rotació i una altra axial. A la *Figura 5* es pot observar trajectòria d'una partícula d'aire que passa a través d'un rotor.

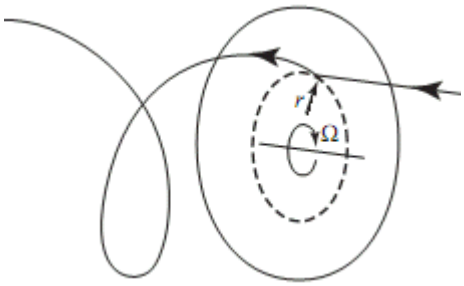


Figura 5. Trajectòria d'una partícula d'aire passant a través del rotor de la turbina, extret de Burton et al (1995)

Que l'aire adquireixi una component tangencial de velocitat significa un augment d'energia cinètica que, per altre banda, es veu compensada per una caiguda de la pressió estàtica de l'aire, en adició a les ja comentades en apartats anteriors.

El flux entrant a la turbina no te cap tipus de moviment rotacional, en canvi el flux sortint va girant a velocitat constant a mesura que va avançant per l'estela. La transferència de moviment rotatori al fluid es du a terme a través de l'espessor del disc (veure *Figura 6*). El fet de tenir velocitat tangencial ens permet definir el coeficient de flux tangencial induït a'. Aigües amunt del disc la velocitat tangencial és zero. Immediatament després del disc la velocitat tangencial és $2\Omega r a'$. A la meitat de l'espessor del disc, a una distància radial r respecte l'eix del disc, la velocitat tangencial és $\Omega r a'$.

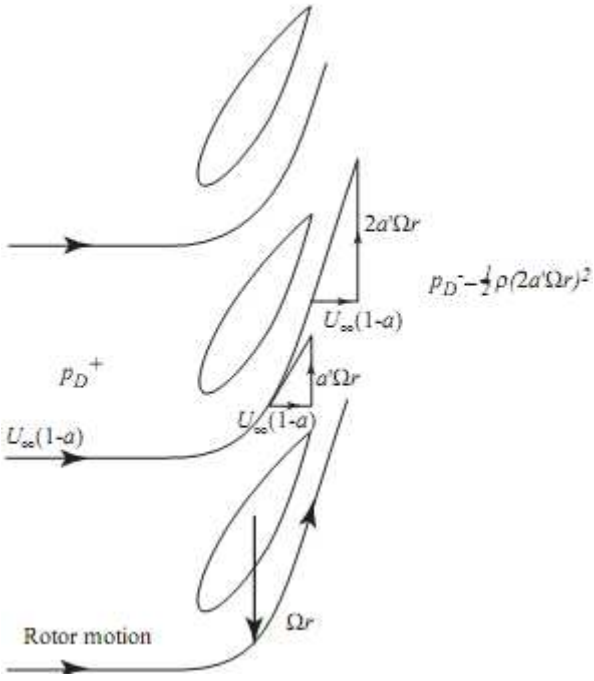


Figura 6. Creixement de la component tangencial de la velocitat a través de l'espessor del disc, extret de Burton et al (1995)

3.3.2. Teoria del moment angular

La velocitat tangencial no serà igual per a tots els punts, sinó que variarà en funció de la distància al centre, de la mateixa manera, tampoc ho serà la velocitat axial de cada punt. Per veure més detalladament com aquestes dues components varien, considerarem un anell anular de diàmetre r i espessor diferencial dr.

La component tangencial de la velocitat del fluid serà degut a un increment del moment torçor que actua sobre l'anell, per altre banda, la força axial també actuant sobre l'anell serà responsable d'una disminució de velocitat. La totalitat del disc es compon de molts anells anulars. Cadascun d'ells actua de forma independent, afectant únicament a l'aire que l'hi passa.

El torçor a l'anell serà igual al canvi de moment angular de l'aire que passa a través de l'anell, per tant,

$$torçor = variació\ moment\ angular$$
$$= taxa\ flux\ màssic \times variació\ velocitat\ tangencial \times radi$$

$$\delta Q = \rho \delta A_d U_d (1-a) 2\Omega \mathrm{r}^2 \tag{33}$$

on δA_d es considera com l'àrea de l'anell.

El moment torçor a l'eix del rotor també és δQ i per tant, tenim un increment de potència,

$$\delta P = \delta Q \Omega$$

Finalment, la potència total extreta del vent es pot determinar a partir de la taxa de variació del moment axial definida per l'expressió (26).

$$\delta Q = 2\rho \delta A_d U_\infty^3 (1-a)^2 \tag{34}$$

per tant,

$$2\rho \delta A_d U_\infty^3 a(1-a)^2 = \rho \delta A_d U_\infty (1-a) 2\Omega^2 a' r^2 \tag{35}$$

i

$$U_\infty^2 a(1-a) = \Omega^2 a' r^2 \tag{36}$$

on $\Omega \mathrm{r}$ és la velocitat tangencial de l'anella anular, a partir del qual ens definim $\lambda_r = \Omega \mathrm{r}/U_\infty$ que definit com la relació entre la velocitat tangencial i la velocitat del flux entrant en un punt determinat. Si ho apliquem a la punta de l'ala de la turbina tenim que $r = R$, i per tant $\lambda = \Omega \mathrm{R}/U_\infty$. El valor de λ és un paràmetre fonamental en l'estudi de turbines.

$$a(1-a) = \lambda_r^2 a' \tag{37}$$

L'àrea de l'anell és $\delta A_d = 2\pi r \delta r$, per tant, aplicant l'expressió (3.17), la potencia s'incrementa

$$\delta P = \delta Q \Omega = \left(\frac{1}{2} \rho U_\infty^3 2\pi r \delta r\right) 4a'(1-a)\lambda_r^2 \tag{38}$$

El terme que es troba entre parèntesi representa la potència del flux i el terme fora del parèntesi és l'eficiència de l'aspa.

$$\eta_r = 4a'(1-a)\lambda_r^2 \tag{39}$$

En termes de coeficient de potència

$$\frac{d}{dr}C_p = \frac{4\pi\rho U_\infty^3 (a-a)a'\lambda_r^2 r}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 \pi R^2} = \frac{8(1-a)a'\lambda_r^2 r}{R^2} \tag{40}$$

$$\frac{d}{d\mu}C_p = 8(1-a)a'\lambda^2\mu^3 \tag{41}$$

on $\mu = r/R$

Sabent que a i a' varien radialment, l'equació (41) es pot integrar per determinar el coeficient global de potencia del disc per a una relació λ donada.

3.3.3. Màxima potència

Els valors de a i a' que proporcionaran una eficiència major es poden determinar derivant l'expressió (39) i igualant-la a zero.

$$\frac{d}{da'}a = \frac{1-a}{a'} \tag{42}$$

De l'equació (38) obtenim,

$$\frac{d}{da'}a = \frac{\lambda_r^2}{1-2a} \tag{43}$$

operant,

$$a'\lambda_r^2 = (1-a)(1-2a) \tag{44}$$

Combinant les expressions (38) i (42) obtenim els valors requerits de a i a' que maximitzen el coeficient de potència incremental.

$$a = \frac{1}{3}\ i\ a' = \frac{a(1-a)}{\lambda^2\mu^2} \tag{45}$$

El flux en la direcció longitudinal pel valor màxim del coeficient de potència és el mateix que s'ha obtingut anteriorment sense rotació, que és uniforme en tot el disc. Per altre banda, a' varia en funció de la component radial.

La màxima potencia obtinguda integrant l'expressió (41) és

$$C_p = \int_0^1 8(1-a)a'^{\lambda^2\mu^3}d\mu = \frac{16}{27} \tag{46}$$

que és exactament el mateix que pel flux sense rotació.

3.3.4. L'estructura de l'estela

El moment angular a què es veu sotmesa l'estela fa que l'energia cinètica augmenti. Tanmateix, aplicant el teorema de Bernoulli podem deduir que si l'energia cinètica

augmenta s'haurà de compensar amb una disminució de la pressió, que per altre banda ens ve definida per la següent expressió,

$$\Delta p_r = \frac{1}{2}\rho(2\Omega a' r)^2 \tag{47}$$

La velocitat tangencial augmenta si ens apropem al centre, per aquest motiu també disminueix la pressió, creant un camp de pressions radial associat a al moviment de rotació. El gradient de pressions compensa la força centrifuga del fluid en rotació. La caiguda de pressió que experimenta el fluid al travessar el disc deguda a la variació del moment axial, que es constant en tota la secció transversal del disc, se li ha de sumar la caiguda de pressió associada a la rotació del flux.

Si l'estela no s'expandís en el moment que es produeix la disminució de la velocitat, tant el moviment de rotació com el gradient de pressions degut a la rotació es mantindrien en un valor constant a mesura que l'estela es va desenvolupant. Per altre banda, la pressió hauria de disminuir gradualment com a conseqüència de la variació de moment, fins arribar a un cert punt on l'estela es trobaria tant desenvolupada que la pressió acabaria desapareixent. Per tant, la pressió en una estela completament desenvolupada seria l'atmosfèrica i la variació que s'hauria produït al llarg del desenvolupament vindria donat per (47). Finalment, podem dir que la força longitudinal que provoca la disminució de la velocitat del fluid és aquella causada per la caiguda gradual de pressió que té lloc quan el fluid travessa el disc transversal, cosa que ja havíem assumit quan hem analitzat la teoria del moment. Així doncs, la pressió associada a la rotació no contribueix en la disminució de moment.

Si tornéssim a realitzar l'anàlisi mitjançant la teoria del moment, però en aquest cas, considerant els efectes produïts tant pel moviment de rotació com per l'expansió que te lloc a l'estela, veuríem que a la posició on l'estela es troba completament desenvolupament, la velocitat axial induïda seria lleugerament superior a $2a$ definida en la teoria simple. Aquest efecte només seria significant en el cas que la relació entre la velocitat tangencial i la velocitat longitudinal fos inferior a 1.5, cosa que està fora del rang a què operen els aerogeneradors d'avui en dia. Per altre banda també es comprova que energia cinètica de la rotació es compensa per la disminució de la pressió estàtica. Així que la diferencia entre aquest anàlisi i l'anàlisi simple és menyspreable.

3.4. TEORIA DE LES ASPES DEL ROTOR

La teoria de les aspes va ser proposada per Froud i Taylor. Es tracta d'integrar les forces de sustentació i de resistència actuant a un element diferencial. Per tant, ens donarà una idea de la relació entre les propietats del perfil aerodinàmic, la rotació del rotor i la potència generada. Per dur-ho a terme farem la suposició que les forces aerodinàmiques aplicades sobre les aspes es poden calcular a partir de dues úniques components de la velocitat, ignorant la tercera component en la direcció del radi.

Les components de la velocitat, en un punt situat a una distància r de l'eix del rotor, depenen de la velocitat del vent, de les característiques del flux i de la velocitat de gir del rotor. Aquests ens determinaran l'angle d'atac. Així que si coneixem com varien els coeficients C_d i C_l en funció de l'angle d'atac podrem saber el valor de les forces que actuen sobre les aspes en funció dels coeficients a i a'.

Considerem un turbina amb un nombre N d'aspes de radi R amb corda c i angle β (entre el pla del disc i la línia de sustentació nul·la). Les aspes giren a velocitat angular Ω i la velocitat del vent és U_∞, i per tant, tenim que la velocitat tangencial de les aspes és Ωr. A més a més sabem que la velocitat angular a l'estela és $a'\Omega r$. Finalment deduïm que la velocitat tangencial neta és $(1+a')\Omega r$. La *Figura 7* mostra totes les forces i velocitats relatives a una corda a distància r de l'eix.

De la *Figura 8* deduïm que la velocitat relativa resultant a l'aspa és

$$W = \sqrt{U_\infty^2(1-a)^2 + \Omega^2 r^2(1+a')^2} \tag{48}$$

que actua amb un angle ϕ respecte el pla de rotació tal que,

$$sin\phi = \frac{U_\infty(1-a)}{W} \; i \; cos\phi = \frac{\Omega r(1+a')}{W} \tag{49}$$

l'angle d'atac ve donat per

$$\alpha = \phi - \beta \tag{50}$$

La força de sustentació en un espessor δr, normal a la direcció de W, és

$$\delta L = \frac{1}{2}\rho W^2 c C \delta r \tag{51}$$

i la força de resistència és,

$$\delta D = \frac{1}{2}\rho W^2 c C_d r \delta r \tag{52}$$

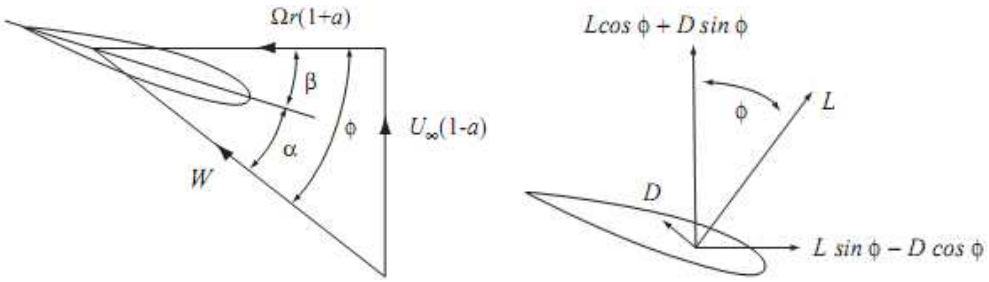


Figura 7. Velocitats a l'esquerra i forces a la dreta d'una aspa, extret de Burton et al (1995)

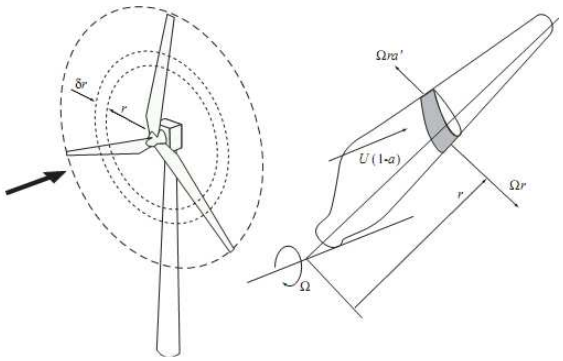


Figura 8. Esquema d'un anell anular descrit per una aspa, extret de Burton et al (1995)

3.5. LA FORÇA I EL MOMENT AERODINÀMIC

La força i el moment ocasionats per un fluid en moviment sobre un cos que s'hi troba immers és deguda a dues fonts principals. Aquestes fonts estan associades a la teoria de capa límit, que té lloc quan un fluid es mou lentament a les proximitats d'una superfície, i son les següents:

- Distribució de pressions actuant de forma normal a la superfície d'un cos.
- Distribució d'esforços tallants a la superfície d'un cos ocasionada per la viscositat del fluid o la força de fricció.

No importa quan de complexa sigui la forma del cos, les forces i els moments aerodinàmics sempre seran deguts a aquestes dues causes. Tant la pressió com els esforços tallants tenen dimensions d'unitats de força per unitats d'àrea, però la pressió sempre actuarà perpendicularment a la superfície, mentre que els esforços tallants actuaran tangencialment a la superfície *Figura 9*.

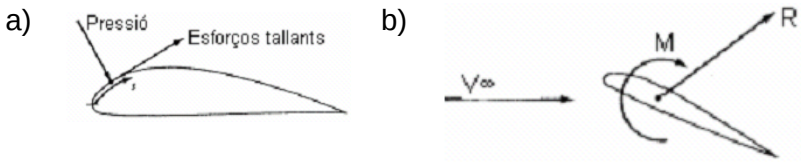


Figura 9. a) Actuació de la pressió i els esforços tallants. b) Força i moment aerodinàmic

L'efecte net de la distribució de pressions al llarg de tota la superfície dóna lloc a la força aerodinàmica R, i el moment aerodinàmic M, *Figura 9*.

Aquesta força aerodinàmica es pot descompondre en dues components. La component en la direcció paral·lela al fluid, o el que és el mateix, resistència aerodinàmica (drag), i la component que l'hi és normal o sustentació (lift).

Entendre el funcionament d'aquestes dues forces es un aspecte fonamental per a poder realitzar un estudi d'una turbina de vent, doncs la força de sustentació és l'encarregada de provocar la rotació de la turbina. És per aquest motiu que a continuació s'explicarà, des d'una òptica enfocada a les turbines de vent, alguns detalls referents a aquestes dues forces.

3.5.1. La força de resistència

La força de resistència aerodinàmica d'un cos immers en un fluid es defineix com a la força que experimenta el cos en la direcció del fluid. Si el fluid es mou lentament la resistència s'atribueix directament a la tensió viscosa de tallant, atribuïda al fet que, a la paret del cos, la velocitat relativa és nul·la. Aquest tipus de flux s'anomena flux d'Stokes, en honor a George Stokes.

Dos segles avanç d'Stokes, Isaac Newton va demostrar que la tensió tallant d'un fluid entre dues parets és proporcional al gradient de velocitats transversal:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \tag{53}$$

on la constant de proporcionalitat μ representa la viscositat cinemàtica del fluid.

A partir de la teoria de Newton, Stokes va determina que la força de fricció d'una esfera que es troba a l'interior d'un fluid que es mou lentament és:

$$Resistència = 3\pi\mu Ud \tag{54}$$

on d és el diàmetre de l'esfera i U és la velocitat general del fluid.

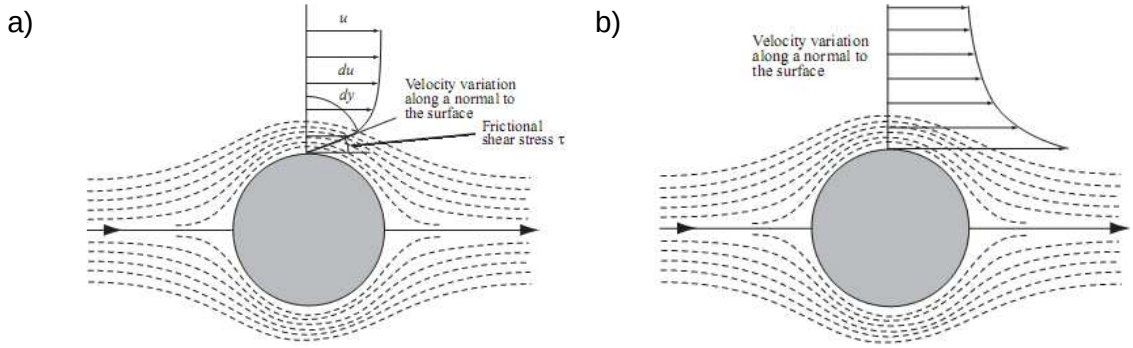


Figura 10. a) Flux a través d'un cilindre circular. b)Fluid no viscós a través d'un cilindre, extret de Burton et al (1995)

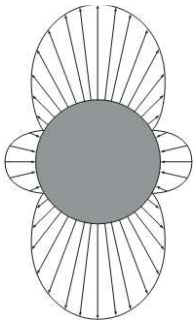


Figura 11. Distribució de pressions d'un fluid no viscós que transcorre a través d'un cilindre, extret de Burton et al (1995)

Observant la *Figura 10* podem veure que la forma qualitativa d'un flux a través d'un cilindre és molt semblant per a un fluid viscós i un altre de no viscós. Tanmateix, la naturalesa del dos fluxos és completament diferent, ja que un fluid no viscós no ocasiona cap tipus de fricció al cos. A la *Figura 11* es mostra la distribució de pressions ocasionada pel fluid no viscós. La distribució simètrica en les dues direccions mostra clarament que la resultant serà nul·la.

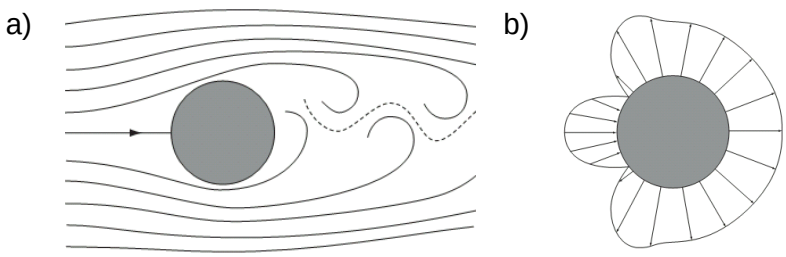


Figura 12. Flux amb viscositat baixa i velocitat alta. a) Fenomen de separació de la capa límit. b) Pressions ocasionades per la separació del la capa límit, extret de Burton et al (1995)

En un fluid real, en canvi, quan la viscositat es baixa i la velocitat del fluid és relativament alta, es produeix majoritàriament una força de pressió deguda a què el fluid no segueix el contorn del cos, donant lloc a un fenomen conegut com a separació de la capa límit. Quan això ocorre la zona afectada es troba a baixa pressió. Aquest fenomen es pot apreciar a la *Figura 12*.

3.5.2. El coeficient de resistència

Si l'equació (54) de la resistència d'Stokes s'aplica a una esfera obtenim

$$Resistència = 3\pi\mu Ud = \left[24\left(\frac{\mu}{\rho Ud}\right)\right]\left(\frac{1}{2}\rho U^2\right)\left(\frac{\pi d^2}{4}\right) \tag{55}$$

donant lloc a la forma estandarditzada del coeficient de resistència $(C_d) \times Pressió\ Dinàmica \frac{1}{2}\rho U^2 \times Area\ frontal\ (A)$. Llavors el coeficient de resistència es defineix com:

$$C_d = \frac{Resistència}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \tag{56}$$

Cal destacar que $\rho Ud/\mu$ és el nombre de Reynolds (Re), que representa el quocient entre les forces d'inèrcia i les forces viscoses. Per a un nombre de Reynolds alt les forces viscoses són petites i vic eversa. El terme corresponent al coeficient de fricció de l'equació (A3.3) és $C_d = 24/Re$ i com veiem, depèn directament del nombre de Reynolds. En altres tipologies de cossos aquest terme pot arribar a ser molt més complex, tanmateix continua essent funció del nombre de Reynolds. De fet, es pot generalitzar que el coeficient C_d disminueix a l'incrementar el nombre de Reynolds.

3.5.3. La capa límit

El motiu pel qual el flux es separa del cos per a un nombre de Reynolds alt és per l'existència d'una capa límit molt fina propera a la superfície del cos on el fluid es mou més lentament i les forces que predominen son les viscoses. Fora d'aquesta capa el fluid es comporta pràcticament com a fluid perfecte.

La força de resistència en un perfil pot estar causada indistintament pels mecanismes viscosos o per als efectes de pressió i el coeficient de les forces de resistència varia en funció de l'angle d'atac i el nombre de Reynolds.

3.5.4. Separació de la capa límit

A l'interior de la capa límit d'un fluid real, just a la zona on la velocitat del fluid es redueix per l'efecte de la viscositat, s'observa que també la pressió va disminuint al llard de la superfície fins arribar al punt de separació. A partir d'aquest punt la pressió passa a ser negativa i el fluid es separa de la superfície formant una estela. Quan es produeix aquest efecte de separació, el flux exterior difereix bastant del que contempla la teoria no viscosa i per tant la força aerodinàmica resultant serà completament diferent.

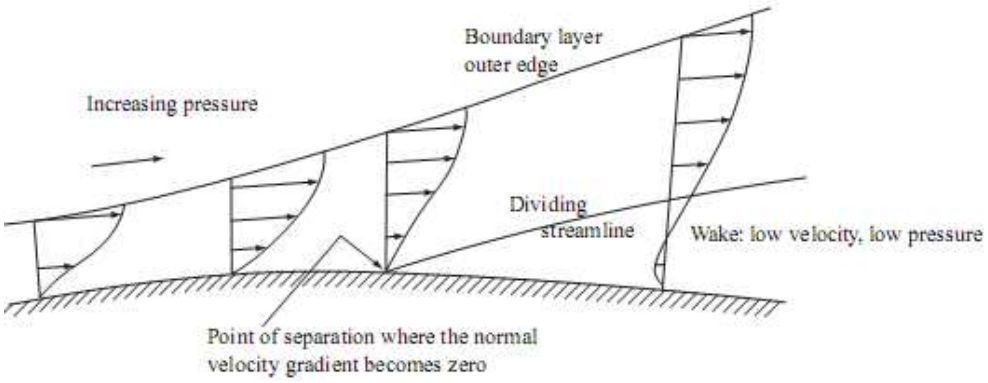


Figura 13. Efecte de separació de la capa límit, extret de Burton et al (1995)

3.5.5. La força de sustentació i la circulació

La sustentació en un cos immers, es defineix com la força que el fluid exerceix sobre el cos en la direcció normal a la direcció del fluid. La força de sustentació només es dóna si el flux incorpora una circulació a l'entorn del cos. Per il·lustrar aquest concepte mostrarem l'exemple d'un cilindre que gira, *Figura 14*. S'observa que s'incrementa la velocitat del fluid que passa per sobre del cilindre i conseqüentment, es redueix la pressió. En contra, a la part inferior del cilindre la velocitat del fluid disminueix, resultant un augment de pressió. Es pot apreciar clarament una força resultant normal al fluid, com a resultant d'aquestes pressions. Aquesta és la força de sustentació.

Aquest fenomen es conegut com l'efecte de Magnus en honor al seu descobridor i explica, per exemple, perquè les pilotes de tennis tracen trajectòries corbes quan giren. El flux circulatori a l'entorn del cos és degut al fregament i te la mateixa estructura que un vòrtex.

La força de sustentació ve determinada pel teorema de Kutta-Joukowsky, dos investigadors que, de forma independent, es van adonar que aquesta era la clau per entendre el fenomen de la sustentació.

$$L = \rho(\Gamma \times U) \tag{57}$$

on Γ representa la circulació a l'entorn del cilindre, i es defineix de la següent forma:

$$\Gamma = \int \mathrm{v}\,\mathrm{ds} \tag{58}$$

ds representa el camí tancat a l'entorn del cilindre i v és la velocitat tangencial al llarg del camí s. Per conveniència s'escull un camí circular de radi r a l'entorn del cilindre i s'ignora la velocitat general del flux. Llavors es demostra que $v = k/r$, on $k$és una constant. A la superficie del cilindre $r = R$, per tant, $v_r = \Omega R = k/R$. Llavors, $k = \Omega R^2$.

La circulació Γ, que és la mateixa per a cada uns dels camins que envolten el cilindre és,

$$\Gamma = \int \frac{\Omega R^2}{\mathrm{r}}\,\mathrm{ds} = \int_0^{2\pi} \Omega R^2 d\varphi = 2\pi\,\Omega R^2 \tag{59}$$

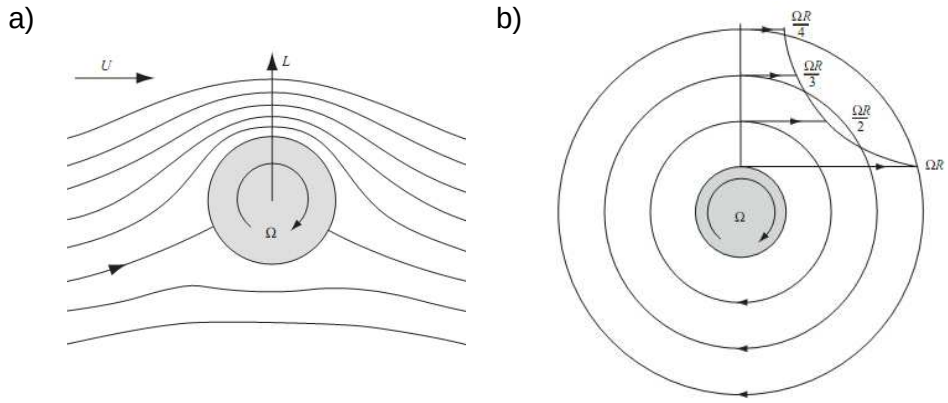


Figura 14. a)Flux a través d'un cilindre rotatori b) Circulació a través d'un cilindre rotatori, extret de Burton et al (1995)

Per tal de que es produeixi circulació a través d'un cos que no es troba en rotació, es imprescindible que el cos tingui un cantell afilat com el que té la secció transversal d'un perfil aerodinàmic. Així doncs, un perfil treballa de forma semblant al cilindre que s'acaba d'analitzar. Suposem que tenim un perfil com el que es mostra a la *Figura 15* i el sotmetem a un fluid perfecte amb un angle d'atac $\propto$ petit. Per la condició de fluid perfecte, no es formaria capa límit a les parets del perfil i per tant, la resultant que exerciria el fluid seria nul·la. Tanmateix, en un fluid real, si bé es produeix l'efecte de separació de la capa límit, aquest té lloc just al final del perfil on el cantell és afilat fent que el fluid abandoni el perfil de forma suau. Per tant, la disminució de pressió que es produeix per la separació de la capa límit es molt petita, fet que permet que es produeixi una circulació neta a l'entorn del perfil. La circulació surt com a resultat de que la velocitat a la part superior del perfil augmenta i a la part inferior disminueix, el que acaba provocant una força de sustentació. En contraposició, la força de resistència seria molt petita ja que, en absència d'estela, s'atribueix únicament a la fricció entre el fluid i la superfície del perfil. Aquesta situació causada per un cantell afilat és coneguda com a la condició de Kutta.

D'una forma similar a l'efecte de Magnus, apareix una diferencia de pressió a traves del perfil, i la circulació Γ es val $\pi U c sin\alpha$, on c és la longitud de la corda del perfil i α és l'angle d'atac. Encara que les velocitats i les pressions de la parts inferior i superior del perfil en la punta afilada del perfil han de ser les mateixes, les partícules que hi arriben no son les mateixes que anaven conjuntament abans de separar-se. Les partícules que passen per sobre arriben a la punta arriben primer ja que s'han accelerat per l'efecte del flux circulatori.

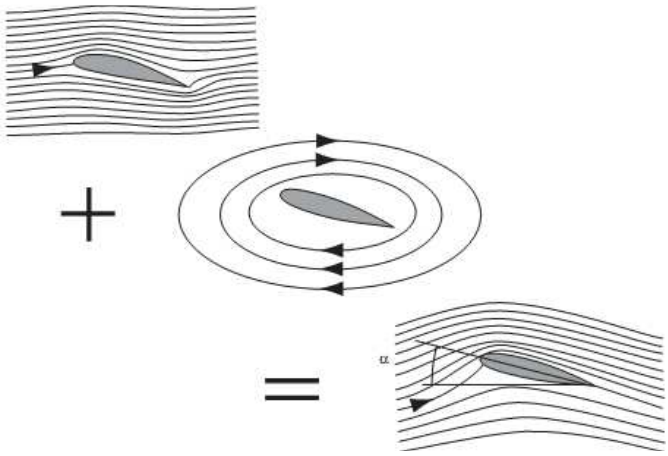


Figura 15. Flux a través d'un perfil amb un angle d'atac petit, extret de Burton et al (1995)

La variació de pressió a l'entorn d'un perfil es mostra a la *Figura 16*. La part superior està sotmesa a succió i és responsable de la major part de la força total de sustentació. La pressió s'ha calculat sense considerar la presència de la capa límit ni la pressió estàtica del fluid.

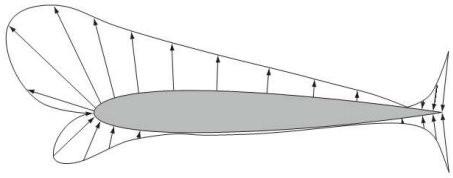


Figura 16. Distribució de pressions a l'entorn d'un perfil NACA0012 amb $\propto = 5$*, extret de Burton et al (1995)*

Si consideréssim l'efecte que la capa límit té sobre la distribució de pressions, obtindríem una força de resistència addicional a la produïda únicament per fricció.

3.5.6. El coeficient de sustentació

El coeficient de sustentació es defineix com

$$C_l = \frac{Sustentació}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \tag{60}$$

on U és la velocitat del flux i A és l'àrea en planta del cos. Per un cos allargat, com per exemple l'ala de la turbina, també es defineix per unitat de corda, tal i com havíem fet pel cas del coeficient de resistència, i per tant l'àrea en planta es substitueix per la longitud de la corda.

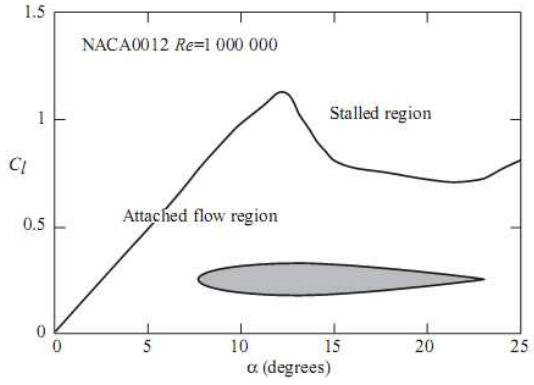
$$C_l = \frac{\frac{Sustentació}{unitat\ de\ longitud}}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{\rho(\Gamma \times \mathrm{U})}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{\rho \pi U c sin\alpha U}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = 2\pi sin\alpha \tag{61}$$

A la pràctica s'usa

$$C_l = a_0 sin\alpha \tag{62}$$

on a_0 és el pendent de la corba $dC_l/d\alpha$, i acostuma a estar a l'entorn de 5,73 (0.1/grau).

a)



b)

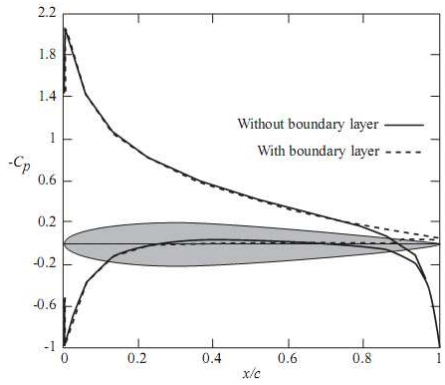


Figura 17. a) Variació del coeficient de sustentació en funció de l'angle d'atac. b)Corba $C_l - \alpha$ *per un perfil simètric, extret de Burton et al (1995)*

Un cop vist això, veiem que la sustentació depen de dos paràmetres, l'angle d'acat $\propto$ i de la velocitat del flux U. Una mateixa força de sustentació pot estar generada per diferents combinacions de $\propto$ i U. La variació del coeficient de sustentació per a un perfil típic es mostra a la *Figura 17a.*

3.5.7. Teoria de perfils

3.5.7.1. Terminologia

Les parts bàsiques utilitzades amb Perfils són les que es poden apreciar a la següent imatge (*Figura 18*):

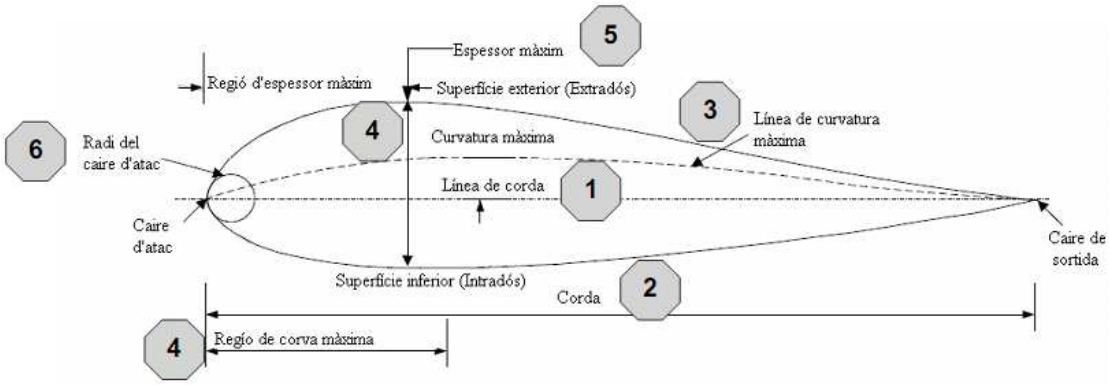


Figura 18. Parts d'un perfil alar

1. Línea de corda: és una línea recta que uneix el caire d'atac amb el caire de sortida.

2. Corda: és la longitud de la línea de corda. Totes les dimensions dels perfils es mesuren amb termes de la corda.
3. Línea de curvatura mitja: és la línea mitja entre l'extradós i l'intradós.

4. Curvatura màxima: és la distància màxima entre la línea de curvatura mitja i la línea de corda. La posició de la curvatura màxima és important per determinar les característiques aerodinàmiques d'un perfil.

5. Espessor màxim: és la distància màxima entre l'extradós i l'intradós.

6. Radi del caire d'atac: és una mesura de l'afilament del caire d'atac.

3.5.7.2. Variables geomètriques

A la geometria d'un perfil existeixen 4 variables principals:

- Configuració de la línea de curvatura mitja: pot ser que aquesta línea coincideixi amb la línea de corda, això significa que el perfil és simètric (la superfície superior i inferior equidisten de la línea de corda).

- Espessor.

- Localització de l'espessor màxim.

- Radi del caire d'atac.

3.5.7.3. Perfils NACA

La sèrie de perfils NACA va ser desenvolupada per oferir una família estandarditzada de perfils per l'avenç aeronàutic i anàlisis d'enginyeria. Els perfils són generats per polinomis que descriuen la forma de la línea de curvatura i la distribució d'espessor.

La línea de curvatura es defineix com el punt mig entre la superfície superior i inferior, és determina mitjançant polinomis que indiquen la seva distància des del punt de corda.

Per calcular les superfícies del perfil, es tracta d'agregar una distribució de grossor a la línea de curvatura, amb la distribució d'espessor especificada per un polinomi addicional. Per agregar el grossor es fa amb una direcció normal a la línea de curvatura.

3.5.7.4. Característiques dels perfils

Les característiques dels perfils queden il·lustrades a partir del coeficients aerodinàmics, generant el que es coneix com a diagrames polars. Aquests estan desenvolupats a partir de les suposicions de que les ales són infinites. A baixos valors de l'angle d'atac, C_L varia linealment amb l'angle d'atac. Quan l'angle d'atac augmenta el flux es separa i recircula formant un flux revers.

La conseqüència d'aquest flux és la caiguda de sustentació i un augment de la resistència aerodinàmica. A aquesta condició se l'anomena entrada en pèrdua. Al màxim valor de C_L on comença aquesta situació se l'anomena C_{lmax}. El valor d'angle d'atac on la sustentació és nul·la s'anomena α_l. Per perfil simètrics aquest angle seria zero.

Com veurem més endavant tots aquest diagrames varien d'acord amb el número de Reynolds.

3.5.8. Característiques resistents d'un perfil

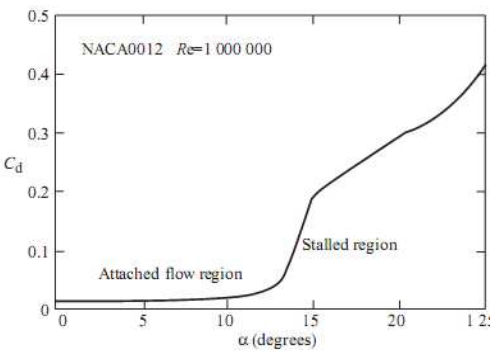
La definició del coeficient de resistència per a la pala d'un aerogenerador, no es basa en la superfície frontal, sinó en la superfície en planta, per raons que més tard quedaran paleses. Podem considerar que el flux a través d'un cos que te una envergadura en la normal del fluid és bidimensional. En aquests casos el coeficient es basa en la resistència per unitat de longitud de corda:

$$C_d = \frac{\frac{Resistència}{longitud\ de\ corda}}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} \tag{63}$$

Per una ala on la longitud de corda sigui gran, el valor de C_d és de l'ordre de 0.01 per a un nombre de Reynolds moderat.

El coeficient de resistència també varia amb l'angle d'atac. La *Figura 16* mostra que la pressió a la part superior del perfil va augmentant a mesura que el flux s'acosta al punt final del perfil (just després del punt de pressió nul·la). Aquest és el gradient de pressions adverses que fa reduir la velocitat de l'aire i per tant, es gener la força de resistència per pressions adverses.

a)



b)

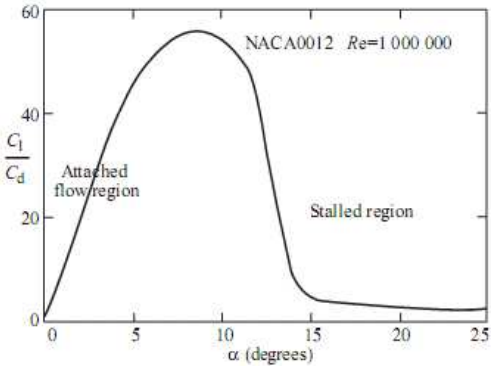


Figura 19. a)Variació de C_d en funció de l'angle d'atac per a un perfil NACA0012. b) Relació entre la sustentació i la resistència en funció de l'angle d'atac per a un perfil NACA0012, extret de Burton et al (1995)

La força del gradient de pressions adverses augmenta amb l'angle d'atac i per tant, es pot esperar que la força de resistència també augmenti amb l'angle d'atac. A la *Figura 16*b il·lustra la variació del coeficient C_d en funció de l'angle d'atac, també per a un perfil NACA0012.

La relació entre la força de sustentació i la força de resistència és el paràmetre fonamental per tal de determinar l'eficiència d'una turbina. Es desitjable aconseguir un valor alt d'aquest quocient, és a dir, volem la força resultant aerodinàmica estigui composta majoritàriament per la component de sustentació.

3.5.9. Variació de les característiques d'un perfil en funció del nombre de Reynolds

La naturalesa del flux a l'entorn d'un perfil ve determinat pel nombre de Reynolds, que efecte significativament als valors dels coeficients de resistència i de sustentació.

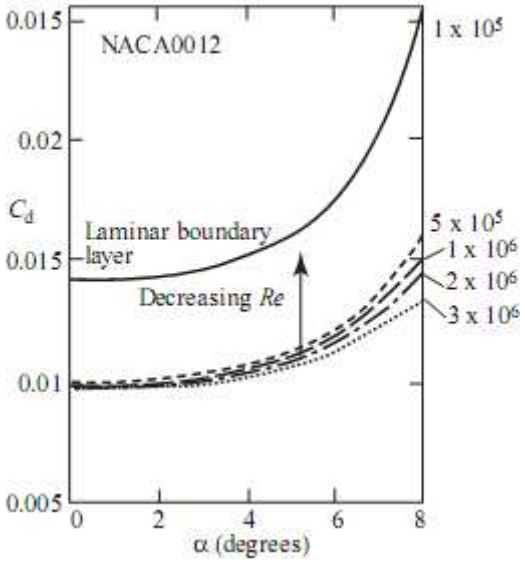


Figura 20. Variació del coeficient de resistència en funció del nombre de Reynolds per a angles d'atac petits, extret de Burton et al (1995)

Com a norma genera, el coeficient de resistència augmenta amb la disminució del nombre de Reynolds, i per sota d'un nombre de Reynolds de 200.000, la capa límit es manté laminar causant un augment brusc del coeficient. El coeficient de sustentació depèn de l'angle d'atac pel qual es produeix separació de la capa límit. Però per altre banda, l'angle d'atac que provoca separació de la capa límit augmenta al augmentar el nombre de Reynolds. Per tant, augmentant el nombre de Reynolds augmentarem el coeficient de sustentació. Aquest efecte es pot observar a la *Figura 21*.

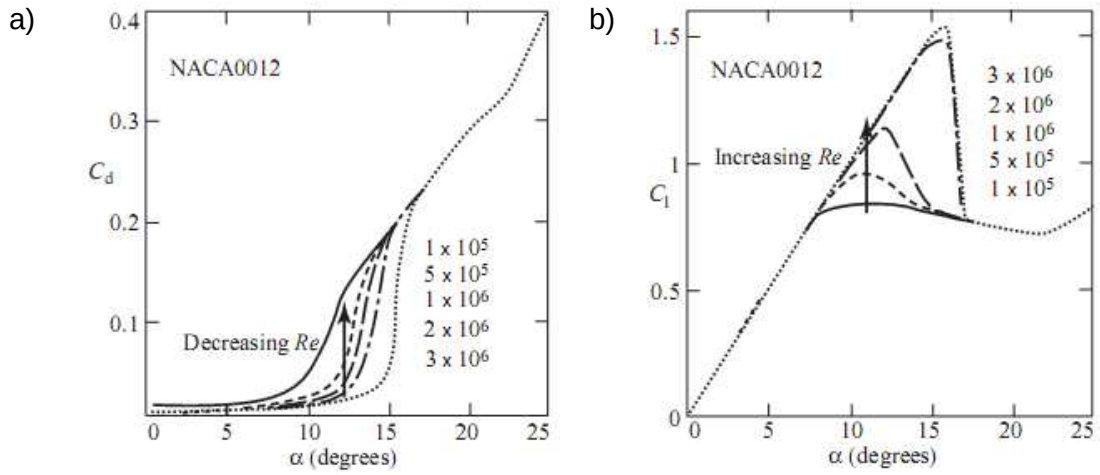


Figura 21. Variació dels coeficient de resistència (a) i de sustentació (b) en funció del nombre de Reynolds a la regió de pressions adveres, extret de Burton et al (1995)

3.5.10. Separació de la capa límit en un perfil

Si l'angle d'atac excedeix un cert valor crític (de l'ordre de 10º o 16º en funció del nombre de Reynolds) es produeix el fenomen de separació de la capa límit. Quan això succeeix es forma una estela a la part posterior del perfil, que redueix la circulació fent que disminueixi la força de sustentació i augmenti la de resistència. Per posar un exemple, si agafem una làmina prima amb el cantell frontal afilat i la sotmetem a un flux, veurem que si bé es produeix circulació i sustentació, amb un angle d'atac molt petit es produirà separació de la capa límit. Si corbessin la làmina lleugerament observaríem un millor comportament. Si a més a més augmentéssim l'espessor i arrodoníssim el cantell frontal la millora encara seria més notable.

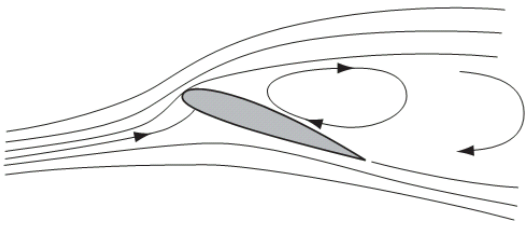


Figura 22. Separació de la capa límit en un perfil, extret de Burton et al (1995)

4. DESCRIPCIÓ DEL TÚNEL I DELS APARELLS DE MESURA

4.1. EL TÚNEL DE VENT

4.1.1. Descripció Física

El túnel de vent del laboratori de Saint Anthony Falls (*Figura 24*) és una estructura de fusta en forma de tub situada al quart pis de l'edifici. El túnel és de la tipologia de circuit tancat, pel que presenta certs avantatges respecte als de circuit obert: la qualitat del flux pot controlar-se molt bé gràcies a pantalles de turbulència, bresques, i deflectors de gir, les necessitats d'energia per funcionar son menors, ja que només han d'accelerar el flux al principi de cada sessió i després la potència consumida s'empra només en compensar les pèrdues per fregament.

La longitud del túnel és de 37.5m en els quals s'impulsa aire a través d'un gran ventilador de 2.4 m de diàmetre i 200 hp de potència. Es disposen de dues possibles seccions de mesura. La secció principal, usada en la majoria d'experiments, te una longitud de 17m i una secció reduïda de 1.7x1.7 m amb sostre ajustable per tal d'aconseguir diferents gradients de pressió. És interessant dissenyar el túnel de forma que la Càmera d'assaig sigui de secció menor que la resta del túnel, ja que per conservació de cabal es genera una velocitat major prop del model, així s'estalvia energia al ventilador, que genera el mateix efecte a la cambra d'assaig amb una potència menor, i a més redueix les pèrdues per fricció a les parets i nusos del túnel. La secció de mesura secundaria està formada per una secció transversal lleugerament superior, 2.44x2.44 m, i de 18m longitud. Aquesta secció secundària ha estat usada en molt poques ocasions, i de fet, tampoc no ho serà en el present estudi. No obstant, degut a la seva major dimensió, pot ser útil per a la realització de certs estudis d'aplicació, un exemple recent seria l'anàlisi de les càrregues de vent en portes i finestres.

La velocitat del vent en el túnel podria arribar a ser de 45 m/s, però per motius de seguretat estructural, no s'acostuma a sobrepassar els 20 m/s. Tanmateix, en aquest estudi la velocitat utilitzada serà molt inferior, de l'ordre de 2-3 m/s.

Figura 23. Imatge exterior del túnel de vent on s'hi observa la zona de treball just al davant de la secció de mesura

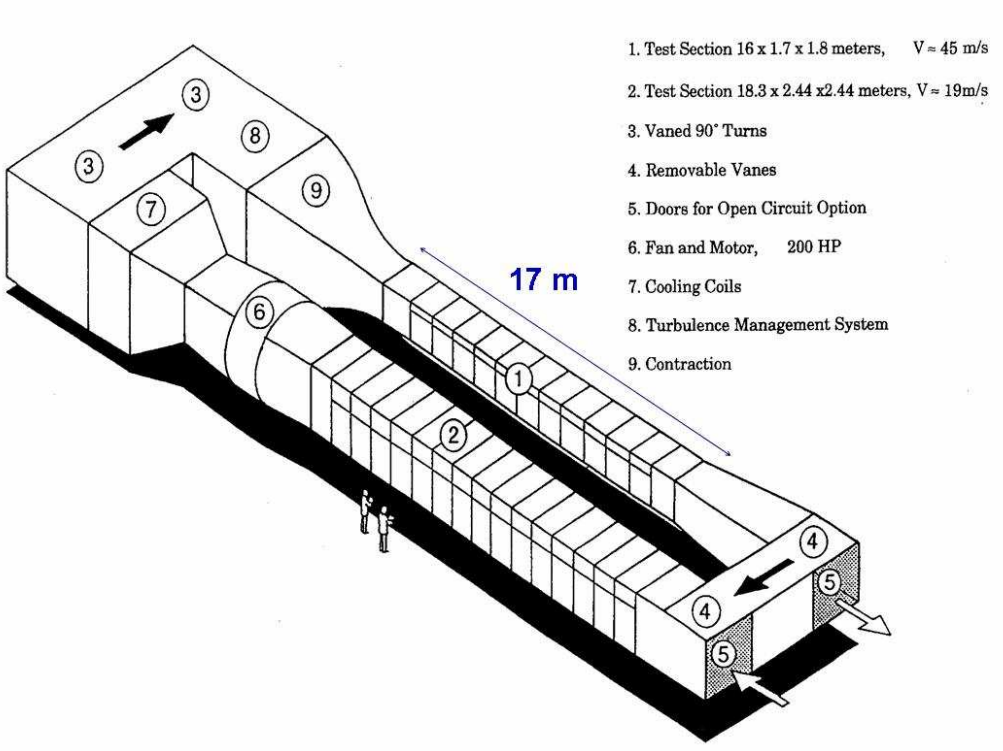


Figura 24. Esquema del túnel de vent de Saint Anthony Falls

A la *Taula 1* es mostra un resum de les característiques més importants ja comentades. Alguna altre característica destacable de la instal·lació és per exemple les dues portes de garatge situades a la part dreta de la *Figura 24* que possibiliten la introducció i extracció d'objectes de grans dimensions.

Taula 1. Resum de característiques geomètriques del túnel de vent del SAFL

Longitud en planta		$37.5m$
Secció principal	Area	$1.7\times1.7m^2$
	Velocitat vent	$2-45m/s$
	Ràtio de contracció	$6.6:1$
	Intensitat turbulenta	$<0.3\%$ en flux lliure
	Sostre Ajustable	$1.5-1.7m$
Secció secundària	Area	$2.4\times2.4m^2$
	Velocitat vent	$1-18m/s$
Ventilador	Diàmetre	$2.4m$
	Max RPM	900
	Motor elèctric	$200\ hp$

A l'interior del túnel s'hi troba instal·lat un dispositiu encarregat de subjectar alguns dels aparells de mesura (*Figura 23)*. Aquest és capaç de desplaçar-se automàticament al llarg de l'eix vertical, cosa que facilita la realització de les mesures.

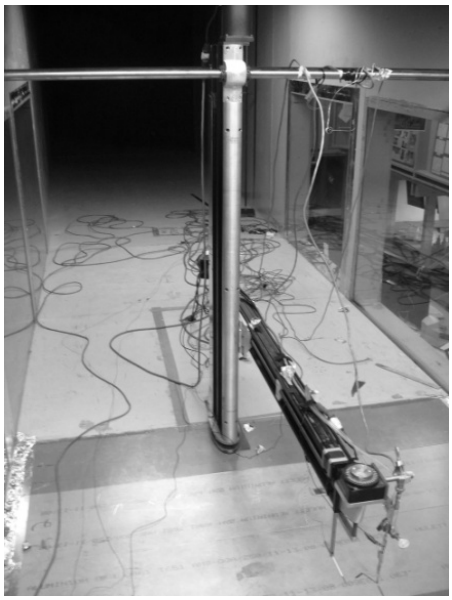


Figura 25. Detall de l'aparell encarregat de subjectar tant l'anemòmetre de fil calent com el tub de Pitot

4.1.2. Historia

Aquest túnel de vent va ser dissenyat pel professor Cesar Farrel i construït per tècnics del SAFL al 1991. És una estructura molt singular (únic túnel de vent a l'estat de Minnesota). Altres universitats de tot al món han construït o estan construint túnels de característiques similars bàsicament per poder realitzar estudis de turbulència considerant la interacció amb la capa límit atmosfèrica. No obstant, aquest túnel ha estat modificat recentment amb la integració d'un sistema hidràulic que permet variar les temperatures tant del terra com de l'aire de forma independent i així simular les condicions que es donen a l'atmosfera degut als gradients de temperatura. Val a dir que, pocs túnels de vent arreu del mon disposen d'aquesta característica, per la qual cosa reafirma la seva singularitat.

4.2. ELS APARELLS DE MESURA

4.2.1. Anemòmetre de fil calent

L'anemòmetre de fil calent a temperatura constant o també conegut com a CTA (Constant Temperature hot-wire Anemometry) és un aparell àmpliament utilitzat des de fa molt temps en experiments de la mecànica de fluids. Permet mesurar la velocitat d'un fluid amb gran precisió i mostreig (de l'ordre de 1 kHz) per tal de poder caracteritzar la turbulència d'un fluid. D'aquesta manera es pot conèixer, no només la velocitat mitja del fluid en un punt, sinó també les intensitats de turbulència, els moments d'ordres superiors i els espectres de potència.

El principi de funcionament es basa en l'ús d'un element tèrmic (fil calent) que serveix com a resistència variable en enfrontar-ho a un fluid. Aquests fils han de posseir dues

característiques importants perquè serveixin com a mesuradors de velocitat: el coeficient tèrmic de la resistència ha de ser alt (pel que la seva conductivitat varia molt ràpidament amb la temperatura) i han de tenir una resistència de manera que puguin ser escalfats fàcilment amb un nivell de corrent elèctric baixa. Quan es fa circular un corrent pel fil en presència d'un fluix estacionari, el fil tindrà una determinada temperatura i per tant una determinada resistència. Davant una variació del corrent elèctric o velocitat del fluid, el fil experimentarà una canvi de temperatura i per tant de la seva resistència, per la qual cosa aquesta serà el factor principal per al mesurament de la velocitat del fluid. Aquests estan construïts individualment muntant un fil fi de Platí o Tungstè sobre dos suports conductors. Els fils són típicament de 4µm a 10µm de diàmetre i al voltant de 1mm de llarg.

L'anemòmetre de fil calent que s'ha utilitzat en el present estudi és de doble fil, cosa que possibilita mesurar dues components de la velocitat del fluid. Els cables, que es creuen entre ells, tenen un espessor de $5\mu m$ i són de tungstè.

L'essència d'aquest anemòmetre és un circuit electrònic denominat pont de Wheatstone (*Figura 26*). Es pot demostrar que aquest circuit està equilibrat, és a dir, que $e_1 = e_2$, quan les resistències que el componen compleixen $R_1R_2 = R_3R_h$. La resistència R3 es pot variar de forma controlada. Aquesta resistència variable es fixa de tal forma que el pont es trobi en equilibri estant el fil a la temperatura de treball desitjada T_h. Si la velocitat del fluid augmentés en absència d'un sistema de control, la temperatura de la sonda començaria a baixar i amb ella la seva resistència, trencant l'equilibri del pont ($e_1 \neq e_2$). Per compensar aquest efecte les tensions e_1 i e_2 s'utilitzen com a entrades a un circuit amplificador que produeix com a sortida una tensió E que alimenta directament el pont. Això dóna lloc a un augment de la intensitat que circula pel fil i per tant de la seva temperatura, restaurant així l'equilibri inicial. En conseqüència la temperatura del fil es mantindrà constant i per tant la seva resistència. D'aquesta manera es pot obtenir una relació biunívoca entre la tensió de sortida de l'amplificador operacional i la velocitat del fluid que s'enfronta el fil.

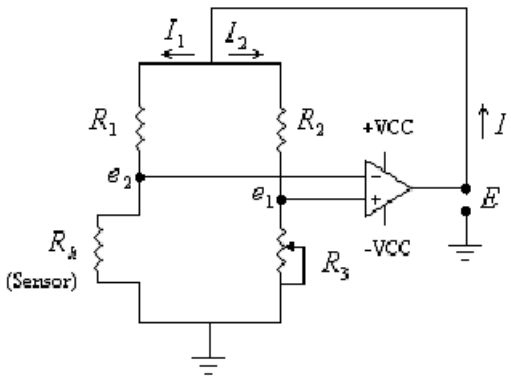


Figura 26. Esquema de connexió mitjançant el pont de Wheatstone

Un cop tenim el fil en equilibri s'ha de transformar els valors de voltatge en la mesura que desitgem obtenir. Per tant, es necessari realitzar una corba de calibració que ens permeti fer-ho. La fase de calibració es descriurà més detingudament a l'apartat de l'experiment. A la *Figura 27* es mostra un esquema del les etapes que s'han de seguir per a prendre mesures amb aquest instrument.

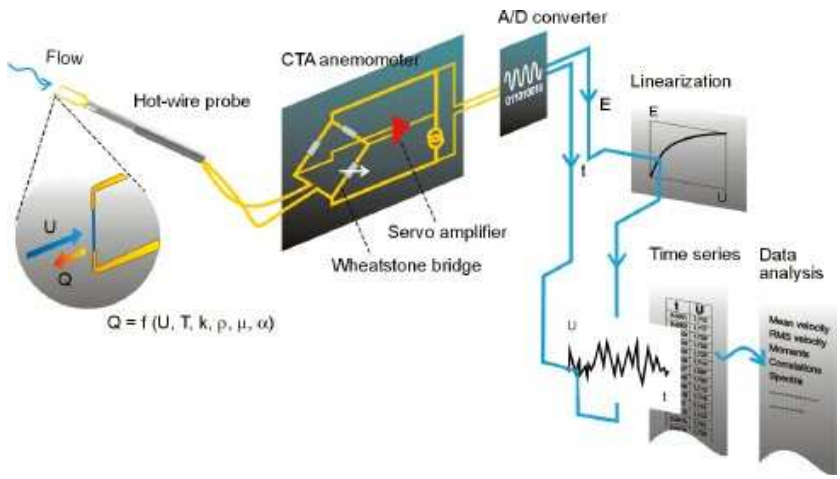


Figura 27. Esquema de funcionament de l'anemòmetre de fil calent

El CTA, juntament amb altres elements de mesura com sensors de temperatura, estan connectats a un ordinador central, on amb el programa A.A Lab Systems, s'encarrega de controlar i enregistrar el gran nombre de mesures obtingudes durant els experiments.

Figura 28. Anemòmetre de fil calent utilitzat en la presa de mesures

Com a curiositat voldria comentar que un CTA com el que s'ha utilitzat per a la realització d'aquest estudi té un cost econòmic força elevat (1000-2000$) a més de ser de gran delicadesa. Si el CTA entrés en contacte amb qualsevol objecte, aquest deixaria de funcionar. Per tant, és un aparell que requereix molta cura alhora de treballar amb ell.

4.2.2. Tub de Pitot estàtic

El tub de Pitot es pot definir com l'instrument per mesurar la velocitat d'un fluid mitjançant la diferència de pressions estàtica i dinàmica en una línia de corrent. Suposem que un fluid circula a través d'una canonada, en el nostre cas, circula pel túnel aerodinàmic. Tal canonada conté un orifici principal per on es mesura la pressió dinàmica (tal com es veu a l'esquema) i per tant, el fluid té velocitat zero en aquell punt. Cal tenir present que tots els punts solidaris a les parets del tub o la canonada tenen velocitat 0. Però com la pressió total es manté sobre una línia de corrent s'ha de complir que:

$$P_{T1} = P_{T2}$$

On P_t és la pressió total.

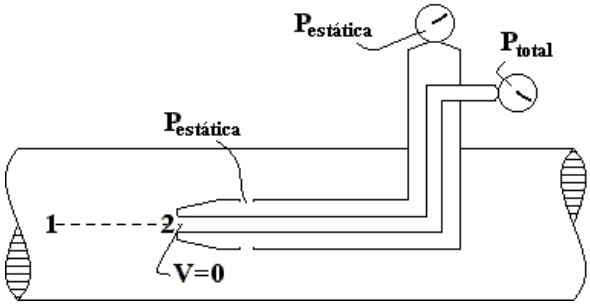


Figura 29. Esquema de funcionament del tub de Pitot estàtic

Si ens fixem en la il·lustració i aplicant el teorema de Bernoulli obtenim l'equació principal que ens servirà per determinar la velocitat del fluid.

$$P_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho_{aire} v^2 \Rightarrow P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho_{aire} v^2 \qquad (64)$$

On és la pressió, la densitat de l'aire (1,23kg/cm^3) i la velocitat que busquem.

Veient l'esquema podem deduir que

On és la densitat del fluid del manòmetre.

Igualant el teorema de Bernoulli amb aquesta última expressió i aïllant la velocitat obtenim que,

$$v = \sqrt{\frac{\rho_m 2g\Delta h}{\rho_a}} \qquad (65)$$

Aquest aparell és necessari per a calibrar l'anemòmetre de fil calent.

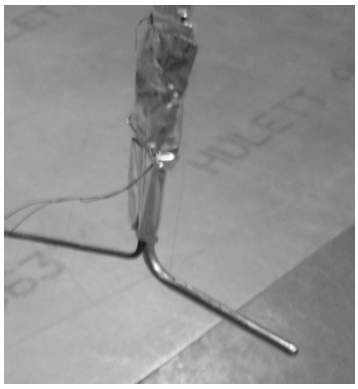


Figura 30. Tub de Pitot utilitzat al llarg de l'experiment

4.2.3. Sensors de temperatura

Assegurar una temperatura constant és essencial per evitar errors en la mesura mitjançant el l'anemòmetre de fil calent, ja que una petita variació introduiria un cert

error. Per tant, s'utilitzen uns sensors de temperatura amb una precisió de $\pm 0.01°C$, per tal d'assegurar que la temperatura del túnel es mantingui entre un rang de $\pm 0.02°C$.

4.2.4. Estroboscopi

L'estroboscopi és un instrument que permet visualitzar un objecte en moviment, com si estigués parat. Permet encendre i apagar una llum, en un lapse donat, la quantitat de vegades que es desitgi.

Conèixer la velocitat angular de la turbina és un aspecte fonamental en el present estudi, ja que ens permet calcular la velocitat específica de la turbina (velocitat tangencial dividida per la velocitat del vent). Com ja s'ha comentat, el fonament d'aquest estudi en model reduït es basa en que la velocitat especifica del model és la mateixa que la que pugui tenir un prototip de turbina de grans dimensions.

En essència, un estroboscopi està dotat d'una làmpada, normalment del tipus de descàrrega gasosa de xenó, similar a las emprades en el flaix de fotografia. En comptes d'emetre una ràfega de llum, emet una sèrie de ràfegues de llum consecutives i amb una freqüència regulable. Si tenim un objecte que està girant a *n* revolucions per minut, i regulem la freqüència de l'estroboscopi a *n* ràfegues de llum per minut i il·luminem amb ell l'objecte giratori, aquest, al ser il·luminat sempre en la mateixa posició, apareixerà i semblarà parat per als nostres ulls. Una llum d'estroboscopi regulada en el període apropiat pot aparentar congelar el moviment cíclic.

És important comentar que es podria cometre fàcilment un error, si per exemple s'igualés la freqüència d'un terç de volta. Per evitar-ho es fa una marca en una de les aspes del rotor, i així, si no tenim la freqüència correcte, l'aspa marcada s'anirà movent. Si la freqüència de les ràfegues de llum no coincideixen exactament amb la del gir, però s'aproxima molt a ella, veurem l'objecte moure's lentament, cap endavant o cap enrere depenent de la freqüència de les ràfegues de llum que tingui l'estroboscopi.

Una aplicació molt coneguda d'aquest instrument era l'ajust de la velocitat dels antics tocadiscs de discs de vinil. Aquests instruments portaven dibuixades unes marques en la vora del plat giradiscs, marques que eren il·luminades per la llum de la làmpada de descarrega gasosa, en aquest cas de neó, alimentada pel voltatge altern de la xarxa elèctrica de 50 Hz. Com que estava calculat el nombre de marques per a que, amb la velocitat del gir correcta, passés una marca cada segon per davant de la làmpada de neó, les marques apareixien immòbils quan efectivament la velocitat era la correcta.

En l'actualitat l'estroboscopi es segueix utilitzant per a verificar la velocitat de gir de màquines i motors de diverses classes, sense necessitat d'efectuar acoblament elèctric o mecànic .

De manera inversa, si enganxem en un disc giratori diverses imatges corresponents a diferents fases del moviment d'un objecte i la il·luminem amb l'estroboscopi de manera que es produeixi una ràfega de llum cada vegada que passi davant de nosaltres una imatge, quedant el plat sense il·luminar en l'espai que hi ha entre una imatge i l'altre, el resultat serà que veurem l'objecte en moviment. En aquest principi, anomenat estroboscòpic, es basen les pel·lícules de dibuixos animats.

5. RELACIÓ ENTRE EL MODEL I LA REALITAT

5.1. INTRODUCCIÓ

Estudiar experimentalment un aerogenerador a camp obert amb un nivell de detall de turbulència tant alt com el d'aquest estudi, seria pràcticament impossible. Per una banda, no existeixen aparells que puguin mesurar amb tanta precisió tants punts diferents. Per altre banda, a camp obert, hi intervenen gran quantitat de factors incontrolables, com la irregularitat del vent o altres fenòmens que tenen lloc a l'atmosfera. Per tant, és necessari realitzar l'estudi en un túnel de vent on les condicions estan completament controlades.

Val a dir que, aquest estudi pretén analitzar de forma general i qualitativa quin és el comportament del fluid un cop a passat a través de la turbina. D'aquesta manera el model reduït a utilitzar no vol representar un prototipus en concret, sinó que es pretén que representi, en general, a una turbina qualsevol que podem trobar actualment, com per exemple les habituals de 1MW potència.

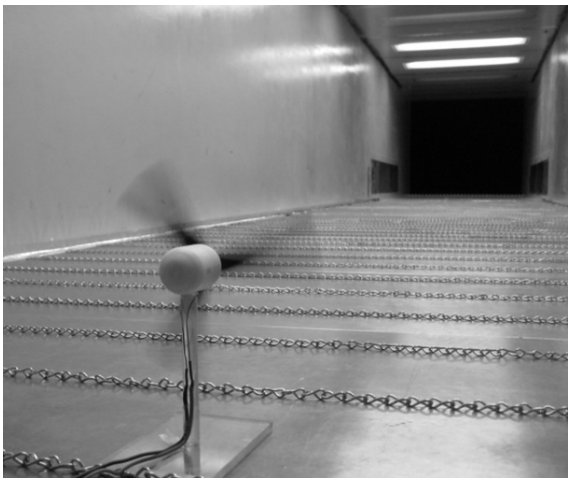


Figura 31. Imatge del model de turbina utilitzat durant l'experiment

Com que les característiques geomètriques del túnel de vent no poden encabir una turbina a escala real és necessari recórrer a un model reduït. Així que ens plantegem el repte de simular les condicions d'una turbina de desenes de metres amb un model de l'ordre de centímetres. Per portar-ho en pràctica de forma exacta seria necessari que el nombre de Reynolds del model i el del prototipus fossin del mateix ordre de magnitud. Ara bé, en un túnel de vent d'aquestes característiques i una turbina tant reduïda, no és possible assolir un valor del nombre de Reynolds tant gran com el de la realitat. Per fer-ho, seria necessari treballar amb un fluid de menor viscositat, cosa que no és factible pel gran cost que implicaria. Així que haurem de treballar amb un model amb un nombre de Reynolds molt menor.

Es recorda que el nombre de Reynolds es defineix com la relació entre les forces d'inèrcia i les forces viscoses,

$$RE = \frac{vl}{\upsilon}$$

on és la velocitat del fluid, una longitud característica i la viscositat cinemàtica del fluid.

Treballar amb un nombre de Reynolds molt més baix que el de la realitat pot fer pensar, a priori, que els fenòmens que succeeixin en el model no tinguin res a veure amb els del prototipus. No obstant, altres autors com Vermeulen et. al. (2003) ja han utilitzat prèviament models d'aquestes dimensions i han obtingut resultats qualitativament satisfactoris al comparar-los amb els del prototipus. Així que, els resultats potser no seran del tot equivalents, ara bé, certes propietats qualitatives bàsiques del fluid seran representatives.

Tot i treballar amb un nombre de Reynolds inferior, els resultats que obtindrem mantindran certa semblança amb els del prototipus. Aquesta, és una idea que es basa en utilitzar una turbina que geomètricament és diferent a la del prototipus. És a dir, una turbina on les aspes tinguin propietats aerodinàmiques diferents a la turbina real, de tal manera, que aquesta estigui preparades per treballar amb un nombre de Reynolds inferior. Així que, s'intentarà donar una idea del comportament aerodinàmic del perfil de les aspes, i com les seves propietats aerodinàmiques depenen del nombre de Reynolds.

A continuació descriurem els paràmetres de disseny del model utilitzat.

5.2. PARÀMETRES DE DISSENY DEL MODEL

5.2.1. Relació entre el radi i l'altura del centre de la turbina

Un dels objectius del present treball és determinar l'efecte que la turbulència de la capa límit té sobre l'estructura i les propietats de l'estela de la turbina. Per aquest motiu, és necessari que la nostre turbina estigui col·locada a l'interior de la capa límit del túnel de vent.

Les característiques constitutives del túnel fan que, a la secció de mesura, l'altura de la capa límit sigui d'uns 40 cm. Aquesta altura és la que ens fa decidir la dimensió del nostre model de turbina, perquè aquesta és trobi en plena capa límit, així que decidim que ha de tenir 15 cm de diàmetre.

Un cop decidit el diàmetre de la turbina del model d'estudi, ens falta determinar a quina altura la col·loquem. Aquí és on s'aplica la relació entre el radi i l'altura del centre de la turbina. Aquesta ha de mantenir la mateixa proporció que mantenen els aerogeneradors genèrics que podem trobar en els parcs eòlics. És a dir,

$$\frac{h}{r} = 1{,}53 \tag{66}$$

on h és l'altura del centre de la turbina i r és el radi de la turbina.

Amb la relació de l'expressió (66), l'altura del centre de la turbina del model resulta ser de 10,5 cm.

5.2.2. Velocitat específica de la turbina

La velocitat específica de la turbina, λ, es defineix com la relació entre la velocitat tangencial de la punta de les aspes de la turbina i la velocitat longitudinal del fluid al centre de la turbina. És a dir, es pot calcular mitjançant l'expressió:

$$\lambda = \frac{\Omega r}{v} \tag{67}$$

on Ω és la velocitat angular de la turbina, r el radi de la turbina i v la velocitat del vent a l'entrada del centre de la turbina.

Aplicant l'expressió (67) podem trobar la velocitat específica del model de turbina que estem estudiant. La velocitat angular Ω l'hem mesurat a partir de l'estroboscopi, el radi és de 7,5 cm i la velocitat longitudinal del vent la coneixem a partir de les mesures. A continuació es mostren els resultats per a cadascun dels dos casos estudiats, cas llis i rugós.

Cas llis: $\lambda_{llis} = 4{,}2$
Cas rugós: $\lambda_{rugós} = 4{,}4$

En ambdós casos, la velocitat específica pren valors lleugerament superior a 4, i per tant, estem dintre del rang de funcionament dels aerogeneradors de gran escala. Aquests tenen un rang de funcionen comprès entre 3 i 6.

La velocitat específica de la nostra turbina no dóna aquests valors per casualitat, sinó que s'han ajustat mitjançant un generador incorporat al model que permet controlar la resistència de l'eix de gir. A més, el disseny geomètric de les aspes del model és especial per a una turbina reduïda d'aquestes dimensions, i per tant, contribueix a que la velocitat especifica assoleixi el valor desitjat.

El fet de mantenir la velocitat específica del prototipus és un aspecte fonamental per assegurar que el comportament d'ambdós sigui semblant. Doncs bé, la velocitat específica també es pot definir com el quocient entre el coeficient de potència C_p i el coeficient de torsió C_T, definits a l'apartat de fonaments teòrics.

Es recorda que els coeficients de potència i de torsió es defineixen com:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 A_d}$$

$$C_T = \frac{Torsor}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A_d}$$

Així que, dividint aquests dos coeficients també s'obté la velocitat específica,

$$\frac{C_p}{C_T} = \frac{R\Omega}{U} = \lambda$$

D'aquesta manera, sabent que la velocitat específica del prototipus i el model són les mateixes, també ho seran la relació entre els dos coeficients. Per tant, podrem dir que tindran una forma semblant de treballar. Per exemple, considerem una situació on la turbina gira lentament, i en canvi, el vent, s'aproxima a una velocitat molt gran. Sota aquestes condicions, part de l'aire que travessa el rotor, passarà sense interactuar amb les aspes, i per tant, aquesta partícula ni transferirà energia a la turbina ni assolirà turbulència. Per altre banda, suposem un cas contrari, on la turbina gira ràpidament i la velocitat del vent és baixa. En aquest segon cas, la corrent del fluid serà desviada per la turbina, i per tant, es perdrà energia que passarà a ser turbulenta. treballant amb una velocitat específica de 4, com s'està fent, podem dir que el fluid transfereix energia

de forma eficient, és a dir, no hi ha partícules que no interactuïn ni partícules que es desviïn.

En definitiva, aconseguint igualar la velocitat específica del model i el prototipus, significa aconseguir que les partícules que passen a través del rotor, interactuïn amb les ales de la turbina de forma anàloga en el model i en el prototipus. De tal manera que, en ambdós casos, la transferència d'energia i la turbulència que es genera guarden una semblança.

5.2.3. Les aspes de la turbina

La turbina utilitzada al llarg de l'experiment és la mateixa que incorporen alguns avions teledirigits (GWS/EP-6030x3). És una turbina que ja ha estat estudiada a fons, i es coneix que la seva forma permet treballar amb un nombre de Reynolds baix, com el que tenim a l'experiment.

A l'apartat de fonament teòric, s'expliquen alguns conceptes fonamentals de la teoria de perfils aerodinàmics. És descriu el funcionament d'aquests, que es basa en la combinació entre les forces de resistència (drag) i de sustentació (lift). Aquestes dues forces depenen directament de molts paràmetres, així que s'intenta donar una idea de com actuen els més importants, com el nombre de Reynolds, l'angle d'atac en que l'aire encara el perfil, la rugositat del material, la forma de la corda, l'espessor i ample del perfil, etc.

Com s'ha vist, és una teoria molt complexa que depèn de molts paràmetres. La present tesina no pretén desenvolupar-los profundament, sinó només donar-ne una idea, per poder entendre que existeix la possibilitat de realitzar experiments amb un nombre de Reynolds baix.

5.2.4. La pila de suport de la turbina

La pila de suport de la turbina del model no tindrà cap efecte en els resultats. El motiu és que el seu diàmetre és molt inferior al diàmetre de la turbina, cosa que el fa insignificant a les distàncies on mesurarem. Amb uns petits càlculs es pot veure molt clarament.

El diàmetre de la pila és de 0,8 cm. La distància més curta a la que prendrem mesures és de 3d de la turbina. Això equival a una distància de 45 cm respecte la turbina. Així que 45 cm equival a 56 diàmetres de pila, en els quals, ja no quedarà cap rastre de la pila en el flux.

5.2.5. La rugositat de la superfície

En el nostre estudi considerarem dues superfícies amb diferent rugositat per poder veure com afecte en els resultats. Per escollir la rugositat pel cas llis, s'utilitzarà simplement la superfície metàl·lica de la qual està compost l'interior del túnel. Pel cas rugós, es procedirà a col·locar unes cadenes de 0,5 cm d'altura.

Realitzant la mesura d'un perfil de velocitat, en absència de turbina, per a cada tipus de superfície, podrem ajustar les dades al perfil teòric de velocitats que té forma exponencial (veure apartat 2 del resultats).

Amb l'ajust s'obté que la rugositat de la superfície del túnel en el cas llis és de 0,05mm i en el cas rugós de 1,2 mm.

Per escalar la rugositat d'un model no existeix cap formula validada, però, com que només es pretén donar una idea aproximada de l'equivalència de les dues superfícies a la realitat, aplicarem simplement una escala geomètrica. És a dir, sabent que el radi de la nostra turbina és de 7,5cm, i que un aerogenerador pot tenir un radi de 10m, l'escala geomètrica resulta ser de l'ordre de $\lambda_e = 1000/7{,}5 = 30$.

Si apliquem l'escala geomètrica a la rugositat del túnel s'obté que en el cas llis és de 0,01m i en el cas rugós és de 0,03m.

Així que, segons la *Taula 2,* el cas llis podria equivaldre a una superfície amb herbes i petites plantes, i el cas rugós a amb una extensió de conreu amb alguns arbres i alguna casa.

Taula 2. Rugositats típiques d'algunes superfícies, extret de Burton et al (1995)

Tipus de terreny	**Rugositat $z_0(m)$**
Ciutats i boscos	0,7
Zona forestal	0,3
Pobles rural amb arbres i cases	0,1
Zones de conreu amb algun arbre i alguna casa	0,03
Herbes i petites plantes	0,01
Desert pla, mar rugós	0,001

6. PROCEDIMENT EXPERIMENTAL

6.1. L'EXPERIMENT

Un cop assentades les bases teòriques que fonamenten el problema, i havent fet una breu descripció del túnel de vent i dels elements de mesura que es disposa, passem a descriure la configuració, geometria i condicions a que serà sotmesa la turbina en el seu estudi.

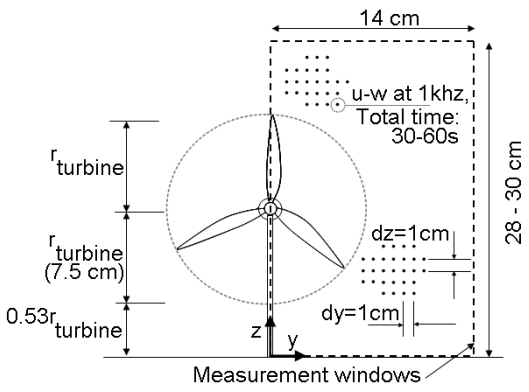
Es col·loca un model turbina en miniatura, compost per 3 aspes, en el túnel de vent de Saint Anthony Falls Lab (University of Minnesota) amb l'objectiu d'estudiar les característiques turbulentes de l'estela que s'hi forma.

La temperatura a l'interior del túnel de vent al llarg de l'experiment ha estat de $24°C$. A més, s'ha procurat que aquesta temperatura no variés en més de $\pm 0.2°C$, al llarg de totes les fases en què el túnel estava en funcionament. Això és necessari per evitar els errors de mesura de tipus tèrmic que es produeixen al treballar amb un anemòmetre de fil calent.

6.1.1. La turbina

La turbina consta de 3 aspes de $7.5cm$ de radi. El centre de la turbina es troba posicionat a una altura de $11.5cm$ respecte el terra. A la *Figura 32* es mostra un esquema de la turbina amb les principals característiques geomètriques, així com una fotografia de la mateixa.

a)



b)

Figura 32. a) Esquema de la turbina b) Imatge de la turbina i de les cadenes

6.1.2. Fases de l'experiment

Per dur a terme aquest experiment en el túnel de vent serà precís seguir una sèrie de fases. Algunes necessàries per a qualsevol estudi en un túnel de vent i altres inherents al fet de treballar amb un anemòmetre de fil calent. Totes elles es descriuen a continuació:

1) Estabilització del túnel

Aquesta fase consisteix en deixar el túnel en funcionament durant un cert període de temps (hores), a la velocitat i temperatura desitjades, per aconseguir un bon desenvolupament de la capa límit turbulenta, així com també, que la temperatura s'estabilitzi al valor desitjat de $24°C$.

Donades les grans dimensions del recinte de l'interior del túnel, i que la temperatura de l'ambient era molt superior als $24°C$, no resultava ser gens fàcil aconseguir el valor exacte de la temperatura. I si a més, el sistema de refrigeració s'avariava amb certa freqüència, aquesta, resultava ser la fase de l'experiment que portava més complicacions.

2) Presa de mesures

Es pretén caracteritzar la turbulència mitjançant la mesura de les diverses components de la velocitat en plans perpendiculars a l'eix x situats a distàncies $x/d = 3, 5, 10, 15$ respecte la turbina, on d és el diàmetre de la turbina. No obstant, l'anemòmetre de fil calent del que disposem, només és capaç de realitza mesures punt a punt. És per això que, per caracteritzar el pla complet, s'haurà de definir una malla de punts que siguin representatius.

Es coneix que la turbulència darrera la turbina presenta certes propietats de simetria, fet que ens pot simplificar molt la quantitat de punts a mesurar. És per això que inicialment s'han realitzat unes primeres sèries de mesures considerant els dos semiplans. Els resultats obtinguts, que es poden veure més endavant, mostren clarament aquesta simetria, cosa que ens confirma la possibilitat de prendre mesures exclusivament en un dels semiplans (*y* positiu).

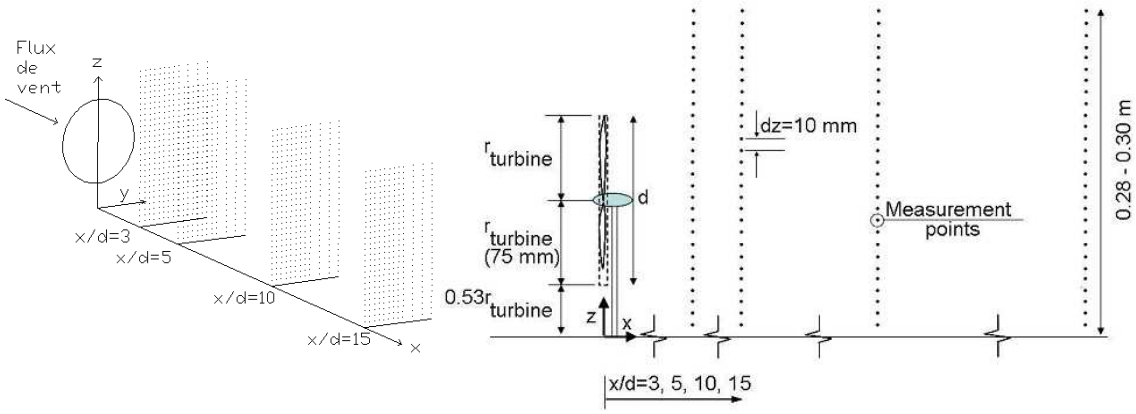


Figura 33. Esquema per il·lustrar els eixos de la turbina i la disposició espaial de tots els punts de mesura. A l'esquerra es mostra un esquema tridimensional i a la dreta el perfil

Cada un dels punts s'ha mesurat durant un període entre 30 i 60 segons a una taxa de 1 kHz. Això vol dir que, de cada punt se n'han pres entre 30 i 60 mil mesures. Per mostrar que aquestes mesures són suficients per caracteritzar el comportament del flux s'ha realitzat una sèrie de gràfiques on s'hi representa la velocitat mitja de diferents punts, escollits de forma aleatòria, en funció del nombre de mesures. Per fer-ho s'ha utilitzat la següent expressió: $\overline{U}(i) = \frac{\sum U_i}{i}$, on i representa el nombre de mesures. A la *Figura 34*. es mostra una d'aquestes gràfiques, on es pot observar que la velocitat mitja tendeix a la convergència. De fet, a les 20 mil mesures la velocitat mitja ja s'ha aproximat a la convergència. En general, tots els punts tenen un comportament semblant al que es mostra a la figura.

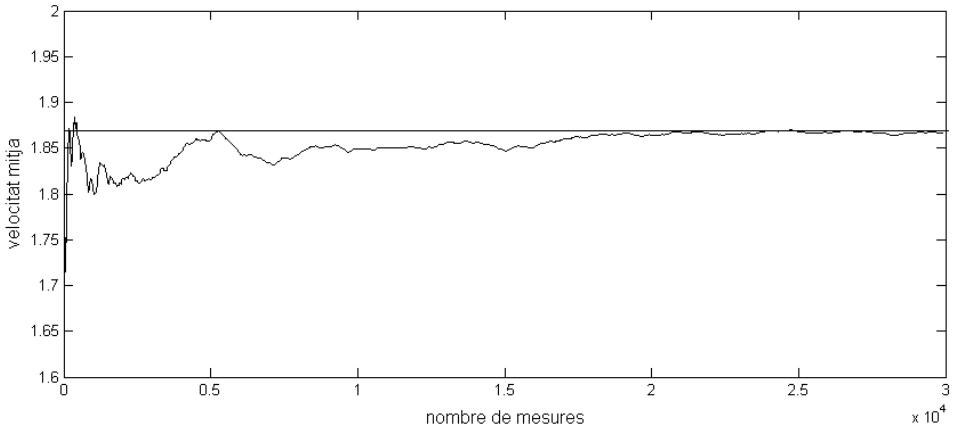


Figura 34. Representació de la velocitat mitja d'un punt en funció del nombre de mesures

3) Calibració

Un cop realitzades les mesures de velocitat, l'ordinador ens proporciona llistats de valors de voltatges. Per aquest motiu és necessària una fase de calibració, on es realitzen unes corbes voltatge-velocitat, és a dir, unes corbes que permetin convertir els valors de voltatge proporcionats pel CTA a valors reals de velocitat.

Aquesta fase es basa en prendre mesures de velocitat utilitzant simultàniament els dos aparells de mesura de que es disposa, el CTA i el tub de pitot. Com que el tub de pitot ens proporciona mesures directes de la velocitat, sabrem exactament quin valor de velocitat correspon a cada valor de voltatge. Fent-ho per diferents valors de velocitat obtindrem les corbes desitjades. *Bruun et al (1995)* tracta aquest tema en profunditat.

Aquest procés, llarg i pesat, s'ha de dur a terme cada cop que s'acabi un nou procés de mesura, ja que tot i que es procura mantenir el túnel sota les mateixes condicions al llarg de tots els dies de presa de mesures, aquest experimenta petites variacions. Si no s'anessin actualitzant les corbes de calibració, la conversió de voltatge a velocitat es veuria lleugerament afectada, fent que els resultats finals obtinguts no fossin del tot exactes.

7. RESULTATS

7.1. INTRODUCCIÓ

En aquest apartat mostrarem tots els resultats més representatiu per entendre el comportament de l'estela que es forma darrera la turbina. Així, en primer lloc es mostraran unes breus mesures en absència de turbina amb un doble objectiu. Per una banda, entendre com és el flux en una capa límit, i per l'altre, caracteritzar els paràmetres de la capa límit formada a l'interior del túnel. Seguidament, es mostraran unes mesures addicionals de la turbina en condicions de règim lliure, on el flux és més simple. Conèixer el comportament de la turbina sota unes condicions més simples, pot ajudar a entendre certs aspectes més complexes que es donen a l'interior de la capa límit. Finalment, s'assenyalaran els resultats de l'experiment en cadascun dels dos casos de superfície, fent primer, una comprovació de la condició de simetria que s'ha tingut en compte alhora de realitzar l'experiment.

Pel què fa els resultats de l'experiment, en primer lloc es comentarà el cas rugós, i finalment el cas llis. Comparant ambdós casos es podran extreure conclusions sobre quina és l'influencia que té la rugositat de la superfície sobre els resultats.

Per cadascun dels casos, es farà especial èmfasis al dèficit de velocitat, a la intensitat de turbulència i al flux de potència, i com aquests evolucionen amb la distància respecte la turbina. Aquestes dues són les variables que més interessen en l'enginyeria, doncs el dèficit de velocitat tindrà a veure amb el rendiment de la següent turbina, mentre que la intensitat de turbulència i el flux de potència influenciaran a les càrregues de fatiga.

Addicionalment, també es recorren a altres variables per entendre una mica millor els fenòmens el comportament de la turbulència. Així que es mostrarà, les tensions tallants de Reynolds, la curtosis i l'espectre de potències.

7.2. CARACTERITZACIÓ DE LA CAPA LÍMIT DEL TÚNEL

En primer lloc es mostrarà el resultat de mesurar una línia vertical, en absència de la turbina, per tal de mostrar el perfil de velocitats i de turbulència a l'interior del túnel (*Figura 35*). D'aquesta manera, es pretén caracteritzar les propietats i la geometria de la capa límit conformada dintre el túnel, tant per la superfície lliure com la rugosa.

Tal i com era d'esperar, ambdós perfils de velocitat obeeixen la llei exponencial característica de la capa límit, on la velocitat és petita a una altura propera a zero i va augmentat amb l'altura fins a estabilitzar-se. A partir de l'altura on la velocitat es manté constant, podem dir que finalitza la capa límit, i comença el règim lliure. En règim lliure, la superfície del terreny no interacciona amb el flux d'aire.

Per altre banda, la distribució de la intensitat de turbulència en una línia vertical també segueix el comportament esperat. És a dir, segueix una llei en forma exponencial inversa.

Finalment, mesurant el tallant $\overline{u'w'}/U$, s'aprecia una distribució pràcticament constant i molt propera a zero.

Per calcular-nos la rugositat i la velocitat friccional del terreny ajustarem els valors dels perfils de velocitats obtinguts per a cada cas a l'expressió teòrica de la capa límit:

$$U(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln\left(z/z_0\right) \tag{68}$$

on u^* és la velocitat friccional, z_0 és l'espessor de la rugositat de la superfície i κ la constant de Von-Karman que acostuma a ser 0,4.

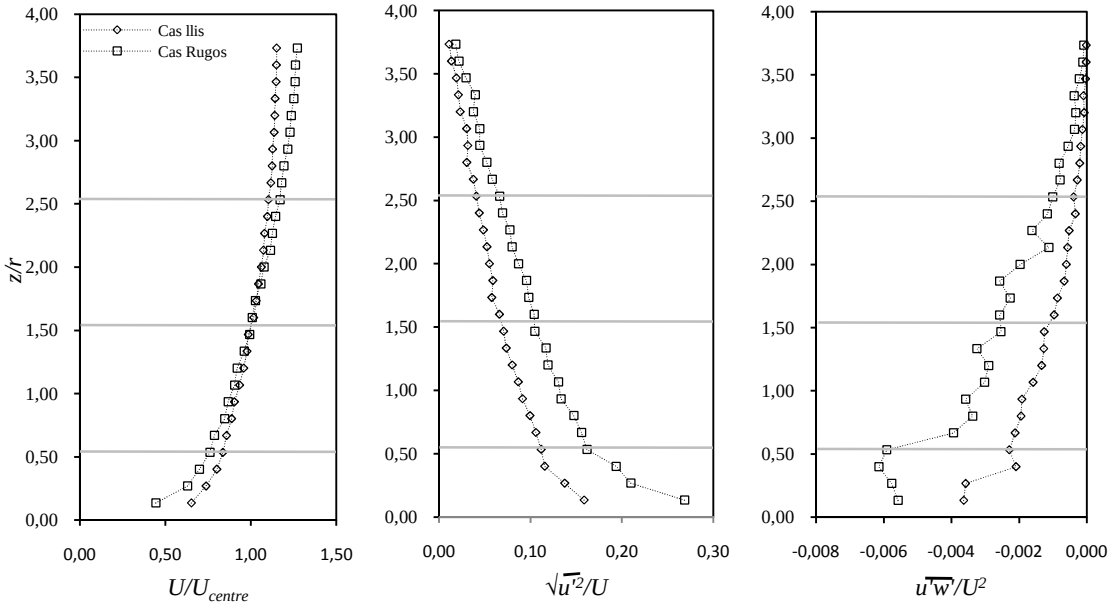


Figura 35. Característiques de la capa límit per ambdós casos de rugositat: velocitat mitja longitudinal, a l'esquerra, intensitat de turbulència, al centre i tensions tallants, a la dreta

A la taula següent es mostren els paràmetres que caracteritzen la capa límit, obtinguts com a resultat de transformar les gràfiques anteriors a escala logarítmica, i la posterior interpolació lineal.

Taula 3. Paràmetres de la capa límit

	u^*	z_0
Cas llis	0,11 m/s	0,05 mm
Cas rugós	0,16 m/s	1,2 mm

Com s'ha vist de forma aproximada, aquests paràmetres, per a un prototipus d'uns 30*m* d'altura, podrien ser els equivalents a una superfície d'herbes i petites plantes pel cas llis i a una superfície de conreu amb algun arbre i alguna casa pel cas rugós.

7.3. COMPORTAMENT EN RÈGIM LLIURE

Abans de passar a veure el que succeeix quan la turbina es troba a l'interior de la capa límit s'ha cregut oportú mostrar uns primers resultats en condicions de règim lliure. És a dir, col·locar la turbina a una certa altura on no es vegi influenciada per la capa límit. D'aquesta manera el flux entrant serà completament constant, tan en velocitats com en

tensions de Reynolds. Veure el que succeeix en unes condicions més simples, pot ajudar a entendre el que passa quan la turbina es troba sotmesa a les condicions complexes d'interacció amb la superfície.

Val a dir que, resultats com aquests, en condicions de règim lliure, ja han estat estudiats per altres autors, així que no hagués estat necessari realitzar aquestes mesures. Tanmateix, poder comprovar que els resultats són els mateixos que per altres autors, ens pot donar més credibilitat a la nostre turbina com a model.

En règim lliure, mesurar en una sola línia vertical és suficient per a caracteritzar tot el pla transversal, doncs els resultats presenten simetria axial respecte l'eix de la turbina. Això passa tant per la velocitat mitja longitudinal com per la intensitat de turbulència.

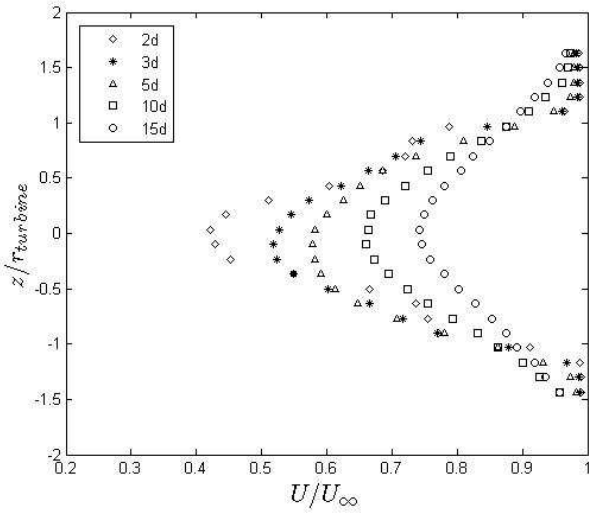


Figura 36. Perfil de velocitats en regim lliure per a diferents distàncies de la turbina. Mesures al llarg de l'eix vertical que passa pel centre de la turbina

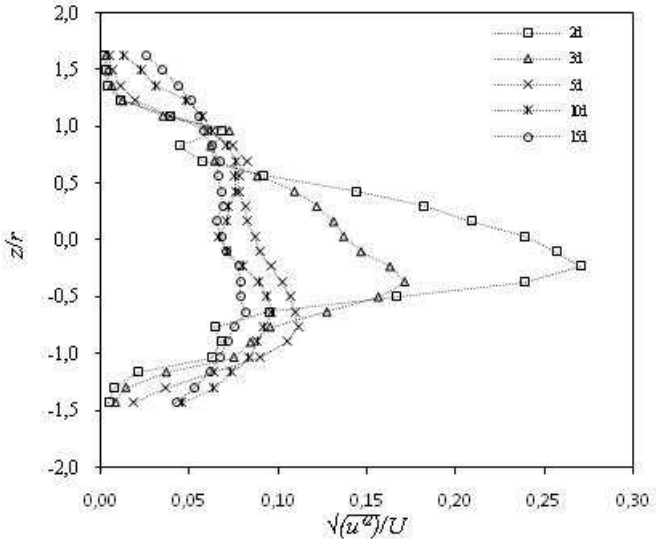


Figura 37. Perfil d'intensitat de turbulència en règim lliure per a diferents distàncies de la turbina. Mesures al llarg de l'eix vertical que passa pel centre de la turbina

Analitzant els perfils de velocitats, en aquestes condicions, s'observa que a una altura corresponent al centre de la turbina es on la velocitat assoleix un valor mínim, és a dir, on té lloc la màxima disminució de la velocitat. Aquest fet, també fa que les intensitats de turbulència assoleixin valors màxims a prop de la turbina.

Segons *Ainslie (1988) et al (2003)*, es poden diferenciar dues regions de l'estela, la regió pròxima a la turbina i la regió llunyana. Es defineix com a regió pròxima, aquella compresa entre el seu inici fins a la distància necessària pel complet desenvolupament de la distribució Gaussiana de turbulències. A la zona de l'estela pròxima s'observa un màxim d'intensitat de turbulència just a l'altura del centre de la turbina. Per altre banda, a l'estela llunyana, els valors màxims es donen a la zona a una altura corresponent a les puntes de les aspes. Això és degut als remolins helicoïdals generats per la punta de l'aspa *Hahm et al (2006)*.

7.4. DETERMINACIÓ DE LA SIMETRIA

Abans de passar a veure els resultats, mostrarem unes primers mesures amb l'objectiu de demostrar fins a quin punt la hipòtesis de simetria és correcte. Aquestes, contenen informació de tot un pla transversal complert, és a dir, mesures tant en la direcció positiva de l'eix *y* com en la negativa. Així que aquests dos plans han requerit mesures al llarg de 23 línies verticals situades, 11 a cada banda del pla *y*=0 i una al centre.

S'ha realitzat aquesta comprovació tant en superfície llisa com en rugosa, així com també a dues distàncies diferents (5d i 10d). En tots els casos s'observa una clara tendència simètrica. A la *Figura 38*. es mostren els resultats pel cas de superfície llisa a 5d. Els altres casos no es mostren ja que no aporten informació addicional. A l'apartat d'anàlisi dels resultats ja es consideraran.

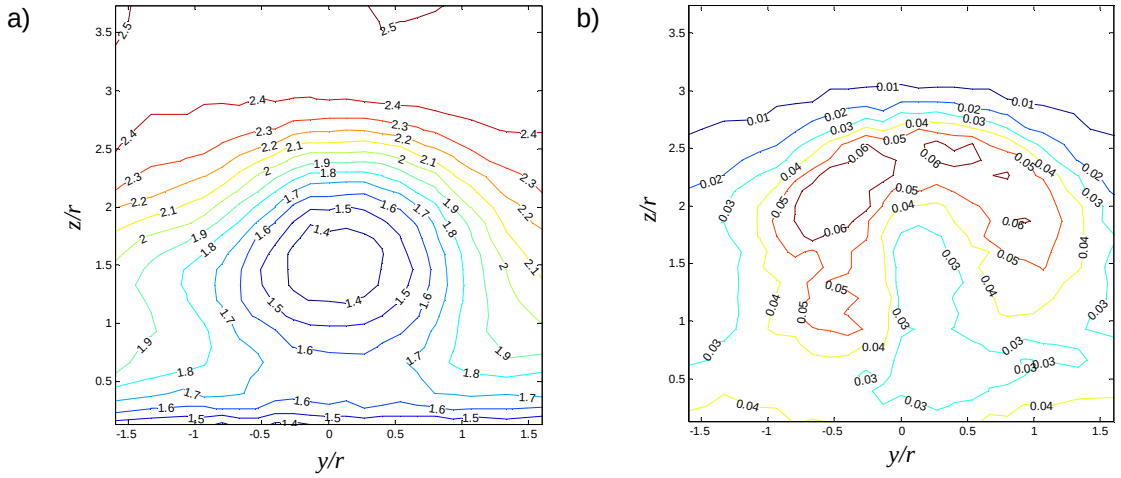


Figura 38. Distribució de la velocitats mitja U (a) i de turbulència $\overline{u'^2}$ (b) en un pla transversal complert situat a una distància de 5d rere turbina i en condicions de superfície lliure

En efecte, de les figures anteriors se'n pot extreure, que tant els perfil de velocitat mitja longitudinal, com el perfil d'intensitat de turbulència, també longitudinal, presenten un comportament simètric respecte el pla $y = 0$.

Aquest comportament simètric es dóna només en aquelles mesures en la direcció longitudinal. Quan agafem altres variables, com per exemple, les tensions tallants $\overline{u'w'}$, on hi intervé la direcció *z*, en cap cas tenim un comportament simètric.

7.5. RESULTAT EN CONDICIONS DE SUPERFÍCIE RUGOSA

A continuació es presenta, en tot detall, els resultats de velocitat i turbulència, obtinguts a diferents distàncies ($x/d = 3, 5, 10\ i\ 15$) aigües avall de la turbina, en el cas de superfície rugosa.

7.5.1. Velocitat

Fent una primera ullada als perfils de velocitats (*Figures 39 i 40*), s'observa, de forma clara, que no presenten una distribució amb simetria axial respecte l'eix de la turbina, cosa que passava en condicions de règim lliure, mostrat a l'apartat anterior. Aquesta situació era d'esperar, ja que el flux que arriba a la turbina no és uniforme, sinó logarítmic, i a més, també existeix interacció amb la superfície del terreny. Així que no és d'estranyar obtenir resultats no simètrics.

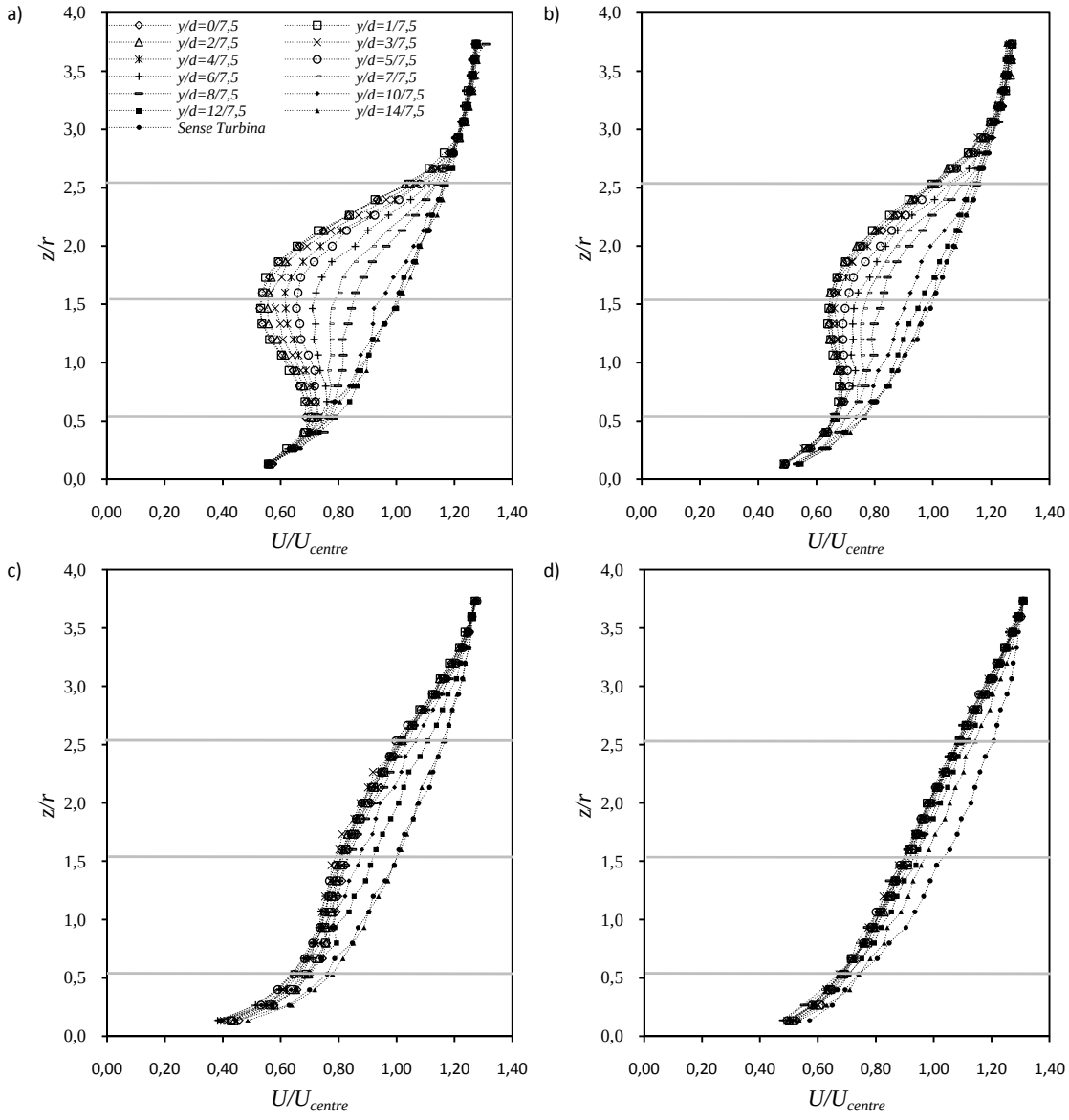


Figura 39. Perfils de velocitat mitja a diferents distancies aigües avall per al cas rugós. a) x/d=3, b) x/d=5, c)x/d=10, d) x/d=15. Les línies horitzontals representen la part superior, central i inferior de la turbina

Els gràfics de la *Figura 40*, que contenen plans transversals complets, han estat obtinguts per simetria, donat que només coneixem un semiplà. Així que només la meitat de les dades podem assegurar que siguin realment certes. És interessant poder veure tot el pla complet ja que ajuda a entendre el comportament del camp de velocitats longitudinals darrere la turbina.

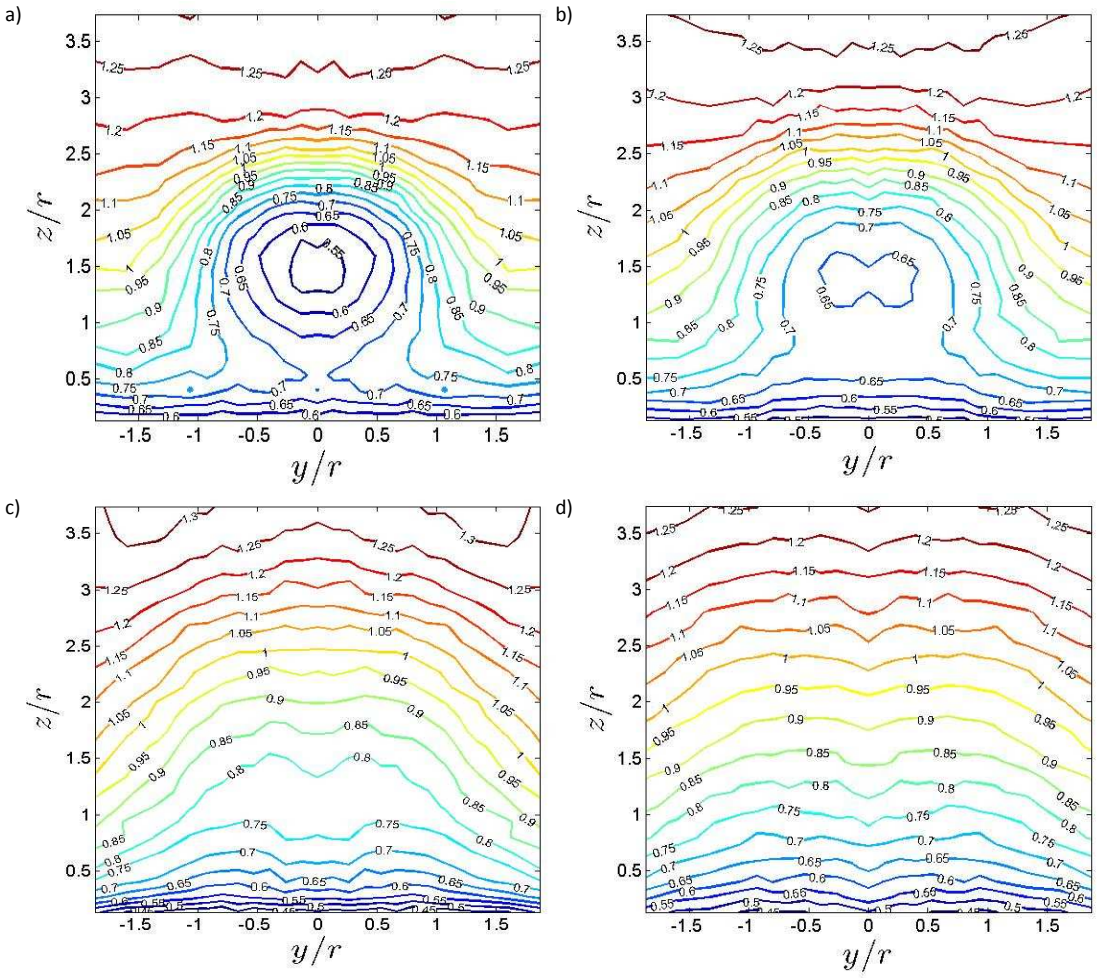


Figura 40. Velocitat mitja longitudinal a diferent plans transversals complerts aigües avall pel cas rugós. a) x/d=3, b) x/d=5, c) x/d=10, d) x/d=15

Si en comptes dels perfils de velocitats ens definim una nova variable que sigui el resultat de restar-li, a cada perfil, la velocitat d'entrada, $\overline{U}(x>0,y,z)-\overline{U}(x<0,y,z)$, obtenim el que es coneix com a dèficit de velocitat.

Observant els perfils de dèficit de velocitat (*Figura 41*) podem apreciar un comportament simètric respecte un eix, semblant al cas de règim lliure. En aquest cas però, l'eix de simetria no passa exactament pel centre de la turbina, sinó que està lleugerament desplaçat cap a munt.

Que el dèficit de velocitats presenti simetria és un aspecte que pot ser de gran interès, ja que possibilita l'aplicació de les formulacions existents en el règim lliure, a condicions de flux no uniforme.

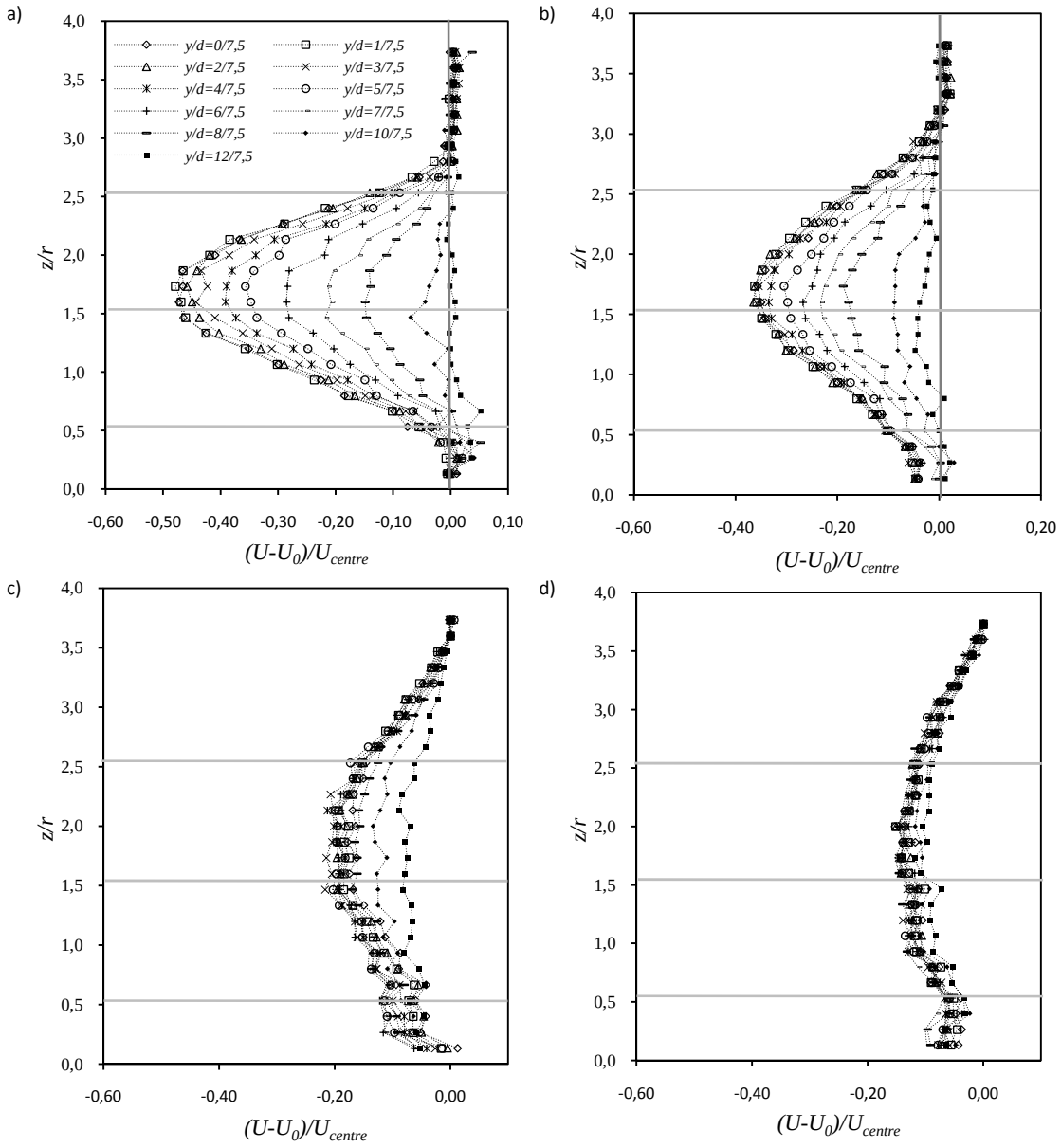


Figura 41. Perfils de dèficit de velocitat a diferents distancies aigües avall pel cas llis. a) x/d=3, b) x/d=5, c) x/d=10, d) x/d=15. Les línies horitzontals representen la part superior, central i inferior de la turbina

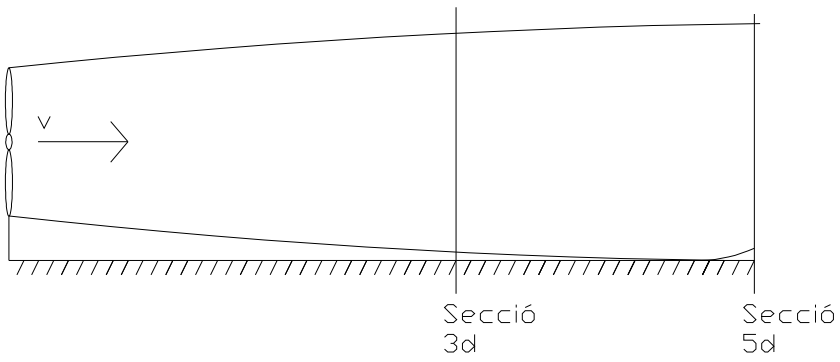


Figura 42. Dibuix esquemàtic que mostra com es desenvolupa l'estela longitudinalment, destacant la zona de contacte amb la superfície del terreny produïda entre 3d i 5d

Comparant els perfils de dèficit de velocitat per a diferents distàncies aigües avall de la turbina, s'observa que el comportament simètric va patint una lleugera distorsió amb la distància. Mentre que, a 3 diàmetres la simetria es casi perfecte, a mida que ens allunyem es va veient alterada. L'alteració succeeix únicament a la part inferior. Aquest és un efecte que es produeix com a conseqüència de l'impacta entre l'estela i la superfície del terreny. Com que el perfil a 3d de distància és perfectament simètric, en canvi, a 5d ja comença fer-se evident aquest efecte, podem deduir que el xoc té lloc a una distància compresa entre 3 i 5 diàmetres, però més propera a 5d. A la *Figura 42* es mostra esquemàticament en un pla *z-x* el comportament longitudinal de l'estela.

7.5.2. Intensitat de turbulència ($\overline{u'^2}/U$)

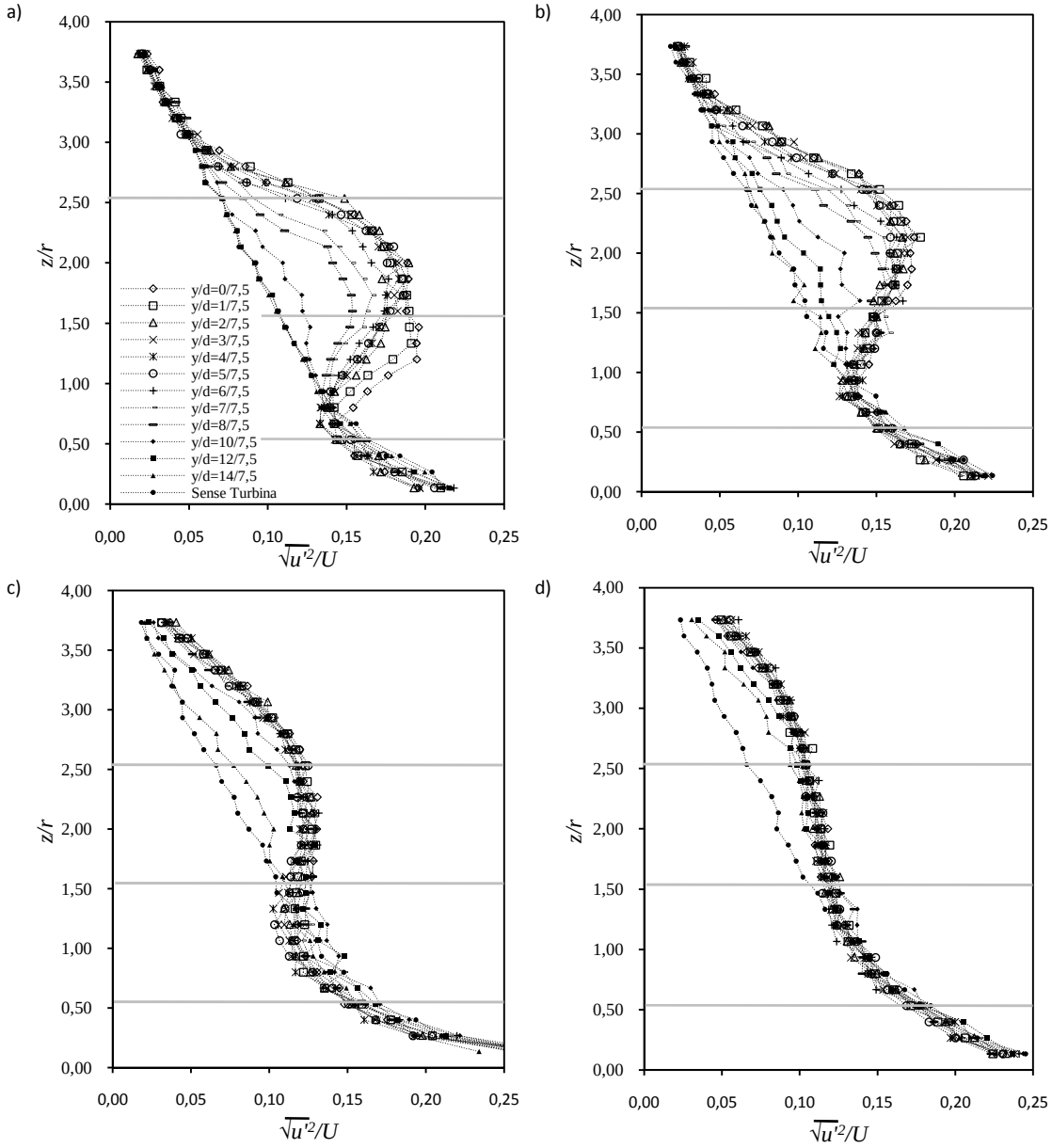


Figura 43. Perfils d'intensitat de turbulència a diferents distancies aigües avall per al cas rugós. a) x/d=3, b) x/d=5, c) x/d=10, d) x/d=15. Les línies horitzontals representen la part superior, central i inferior de la turbina

Després d'haver vist els resultats d'intensitat de turbulència en règim lliure on s'ha comprovat que la turbina n'incrementava els resultats, a priori, també podríem esperar que aquesta a l'interior de la capa límit augmenti. Aquest fet, conduiria cap a una major càrrega de fatiga a la possible turbina posterior en un parc eòlic.

Seguint una mateixa lògica, també podríem esperar que es produís un màxim d'intensitat de turbulència just a l'altura del centre de la turbina, sobretot en aquelles seccions transversals més pròximes a la turbina.

Si bé, no es compleixen en exactitud les previsions, tampoc no podem dir que els resultats s'hi allunyin molt (*Figura 43 i Figura 44*). La intensitat de turbulència de l'estela augmenta en bona part de la secció transversal, excepte a la zona propera a la superfície situada per sota del centre de la turbina. El valor màxim, ara, també existeix, però ja no es troba al centre de la turbina sinó lleugerament desplaçat cap a la part superior.

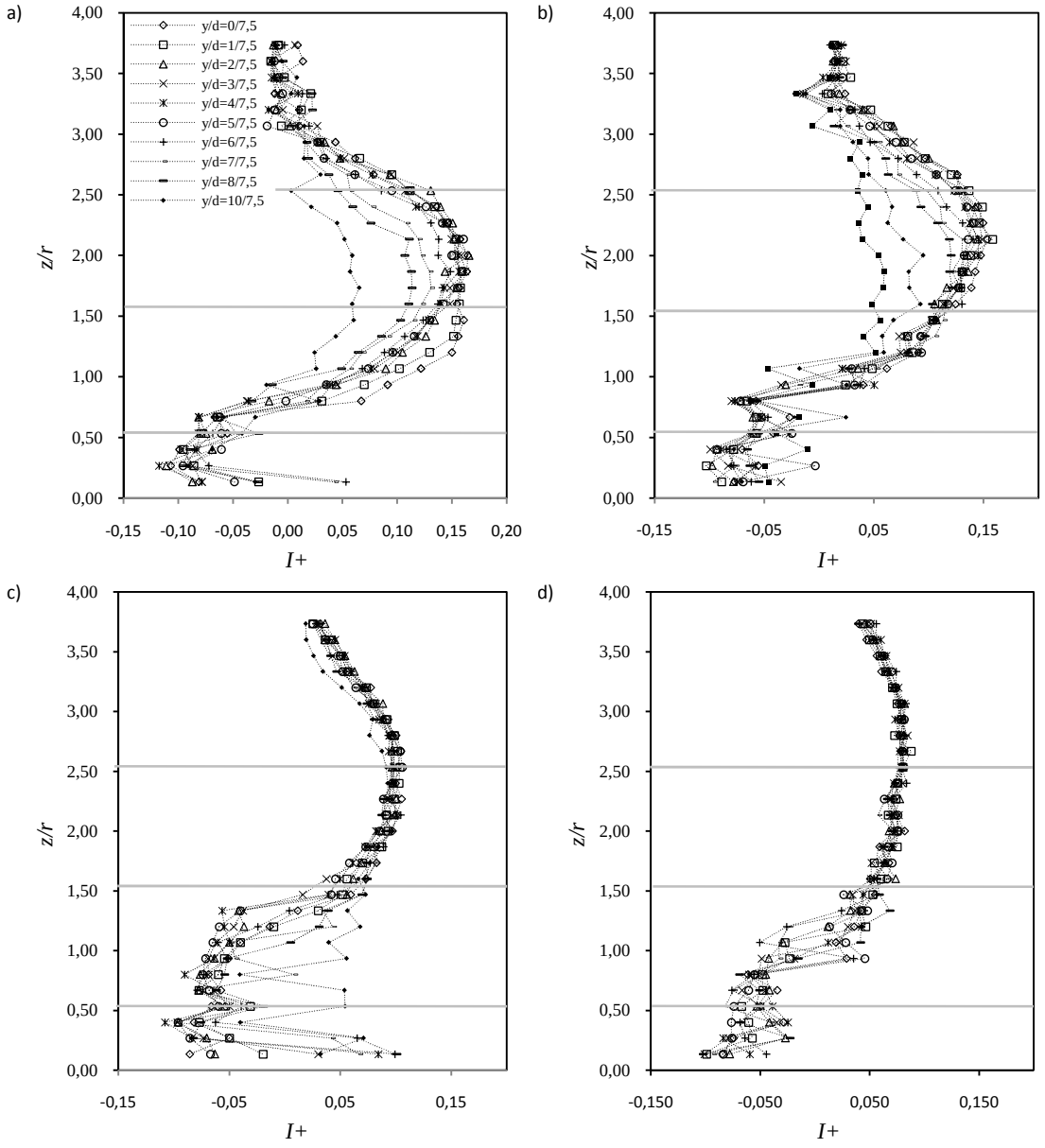


Figura 44. Perfils d'intensitat de turbulència afegida a diferents distancies aigües avall pel cas rugós. a) x/d=3, b) x/d=5, c) x/d=10, d) x/d=15. Les línies horitzontals representen la part superior, central i inferior de la turbina

Com que no coneixem totes les components del tensor de Reynolds no podem assegurar el motiu de perquè aquest fet succeeix. Tot i així, podríem intentar buscar l'explicació a la distribució de tensions tallants $\overline{u'w'}$, on si observa que les partícules tenen tendència concentrar-se a la part superior de la turbina. També podríem dir que a la part superior, el flux entrant circula a major velocitat i té menor intensitat de turbulència, ja que es troba més allunyat de la superfície. Al passar per la turbina es generen majors vòrtexs helicoïdal, i per tant, s'hi produeix un gran augment de turbulència respecte al flux entrant. En contra, a la part inferior de la turbina, el flux entrant circula a menys velocitat i amb una intensitat de turbulència alta, ja que està més pròxim al terreny, i, per tant, s'hi observa una lleu disminució.

Si observem com evoluciona la turbulència amb la distància, ens adonem clarament que tendeix a recuperar la del flux entrant, és a dir, a la part superior l'augment és cada cop menor, i a la part inferior la disminució també va sent menor. Malgrat que el flux tendeixi a recuperar les propietats del flux entrat, a una distància de 15d, encara s'hi aprecien els efectes de la turbina.

Com ja s'ha comentat, existeixen algunes formules que quantifiquen l'evolució de la intensitat de turbulència amb la distància, però es basen en la mesura puntual del centre de la turbina i consideren que aquest punt és representatiu de la turbulència de tota la secció transversal. Considerant que la distribució no és axisimètrica, un sol valor de turbulència mitja afegida per a cada secció no és suficientment representatiu per a la totalitat de la secció. Així que s'ha de buscar alguna forma per solucionar aquest problema i d'alguna manera considerar la distribució espacial del camp d'intensitats.

Una possibilitat és diferenciar entre les dues regions, on cadascuna d'elles pot estar caracteritzada per una intensitat de turbulència afegida mitja calculada de la següent forma:

$$\overline{I_+} = \frac{1}{A}\int_A I_+(x,y,a)dA \tag{69}$$

on A és la secció transversal de l'estela, i I_+es calcula d'acord amb l'equació (2).

En efecte, considerem les dues zones, clarament diferenciades, que contribueixen a la intensitat turbulenta mitja afegida $\overline{I_+}$: per una banda la seva part positiva $\overline{I_+^+}$, corresponent a la part amb altura superior a la del centre de la turbina i per altre banda, la part negativa $\overline{I_+^-}$, corresponent a l'altura inferior al centre d'aquesta. Si finalment apliquem l'expressió (69) a cada una d'elles, $\overline{I_+^+}$ i $\overline{I_+^-}$, s'obtenen les expressions a partir dels quals obtindrem la intensitat de turbulència mitja.

$$\overline{I_+^+} = \frac{1}{A_+}\int_{A_+}\sqrt{I_{wake}^2 - I_0^2}dA \quad si \;\; I_{wake} > I_0 \tag{70}$$

$$\overline{I_+^-} = \frac{1}{A_-}\int_{A_-}\sqrt{I_0^2 - I_{wake}^2}dA \quad I_{wake} < I_0 \tag{71}$$

on A_+ i A_- són les àrees transversals en que la intensitat turbulenta afegida pren valors positius ($I_{wake} > I_0$) o negatius ($I_{wake} < I_0$) respectivament. A més, també mesurarem el valor a l'altura del centre de la turbina, per poder contrastar amb les formules existents. Així també, com un valor global que inclogui la distribució transversal completa.

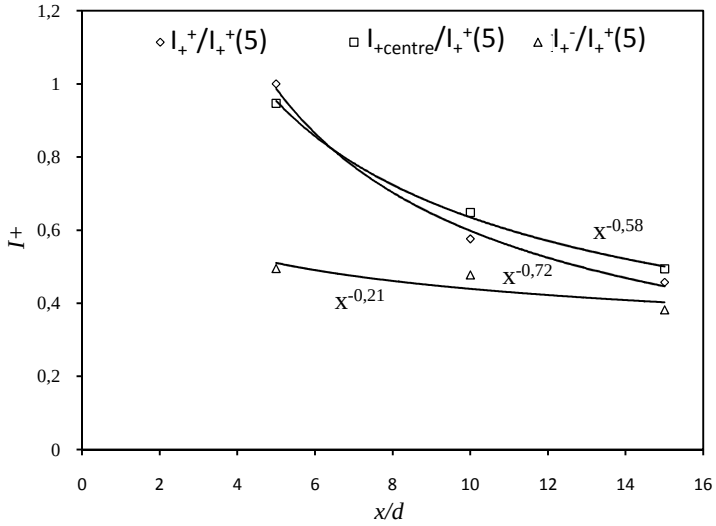


Figura 45. Representació de les parts positiva $\overline{I_+^+}$ i negativa $\overline{I_+^-}$ de la intensitat turbulenta mitja afegida en funció de la distancia, així com també de la del centre de la turbina $\overline{I_{+centre}}$ pel cas de superfície rugosa

A la *Figura 45* es mostren els valors de les parts positiva $\overline{I_+^+}$ i negativa $\overline{I_+^-}$ de la intensitat turbulenta mitja afegida. La distància es normalitza amb el diàmetre de la turbina i la intensitat turbulenta amb la que pren valor màxim, és a dir, a distància $x/d = 5$. El valor de la intensitat turbulenta a distància $x/d = 3$ no es representa a la gràfica, ja que aquesta distància correspon a l'estela propera, i nosaltres volem l'evolució a l'estela llunyana.

Si analitzem la variació d'aquestes funcions amb la distància, podem observar que entre $5 < x/d < 15$, s'obté de forma aproximada: $\overline{I_+^+} \propto x^{-0.58}$, $\overline{I_+^-} \propto x^{-0.21}$ i $\overline{I_{+centre}} \propto x^{-0.72}$. En general, aquetes quantitats mostren decreixements de l'ordre de $x^{-0.2 \to -0.7}$, cosa que concorda amb els resultats previs en règim lliure aportats per *Quarton et al (1989)* i *Crespo et al (1996)*.

Cal matissar que el decreixement de la part alta ($\overline{I_+^+}$), s'aproxima al decreixement del punt del centre de la turbina. Per tant, podríem dir que la intensitat de turbulència del punt amb l'altura del centre de la turbina és representatiu de la part amb intensitat de turbulència afegida positiva.

De la part amb intensitat de turbulència afegida negativa, podem es manté pràcticament constant amb la distància. Té un descens molt poc marcat.

7.5.1. Flux de potència

El flux de potència ens dóna una idea de la capacitat que té la part turbulenta del flux per generar un treball. Aquest treball pot ser un efecte a un objecte que es trobi en mig del fluid, per exemple una turbina. El flux de potència en la direcció longitudinal es defineix com,

$$Flux\ de\ potència = \overline{u'^2}U$$

on U és la velocitat mitja local en el punt on es realitza la mesura.

El flux de potència està compost per aquella part del flux que ha estat transformat en energia turbulenta. L'energia, un cop es transforma en turbulenta, deixa de ser aprofitable per a la següent turbina i queda predestinada a dissipar-se en calor. Per aquest motiu, seria interessant evitar de col·locar una segona turbina a la zona on el flux de potència sigui màxim.

Analitzats els perfils de turbulència a diferents distàncies aigües avall de la turbina (*Figura 46*), s'observen alguns trets que poden ser d'interès. En primer lloc, veiem un augment del flux de potència a la part superior de la turbina, mentre que a la part inferior s'aprecia una disminució. Aquest és un efecte que també es donava per la intensitat de turbulència afegida.

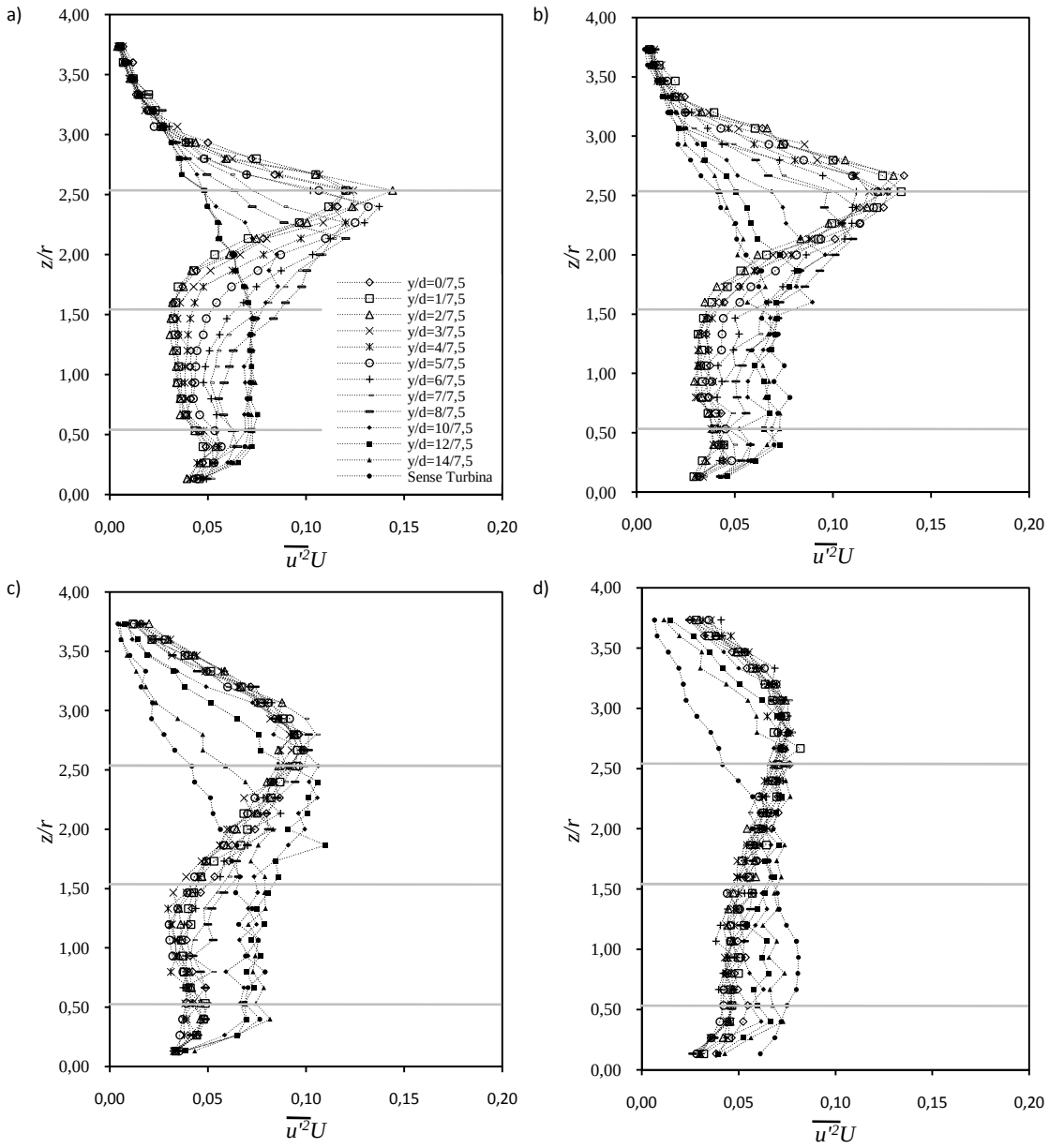


Figura 46. Perfils del flux de potència a diferents distancies aigües avall per al cas rugós.
a) x/d=3, b) x/d=5, c) x/d=10, d) x/d=15. Les línies horitzontals representen la part superior, central i inferior de la turbina

És important considerar que el flux de potència en el global de la secció no pot ser negatiu, ja que no és possible que l'energia que ha passat a turbulenta retorni

convectiva. Per comprovar que això es compleixi, s'ha integrat tot el pla transversal. En efecte, els resultats diuen que en el global de la secció el flux de potencia és positiu.

També s'observa que el valor màxim del flux de potència es dóna al punt de màxima altura de la turbina. Aquest és degut als grans vòrtexs originats per les puntes de les aspes.

Segons aquests resultats, al col·locar una turbina de les mateixes dimensions a l'interior d'una estela d'aquestes característiques, aquesta estaria sotmesa, a la seva part superior, als efectes màxims de la turbulència, cosa que podria ocasionar danys estructurals. Per evitar aquests possibles danys, podríem plantejar-nos la possibilitat de situar-ne una de menor dimensió ubicada per sota de la màxima turbulència.

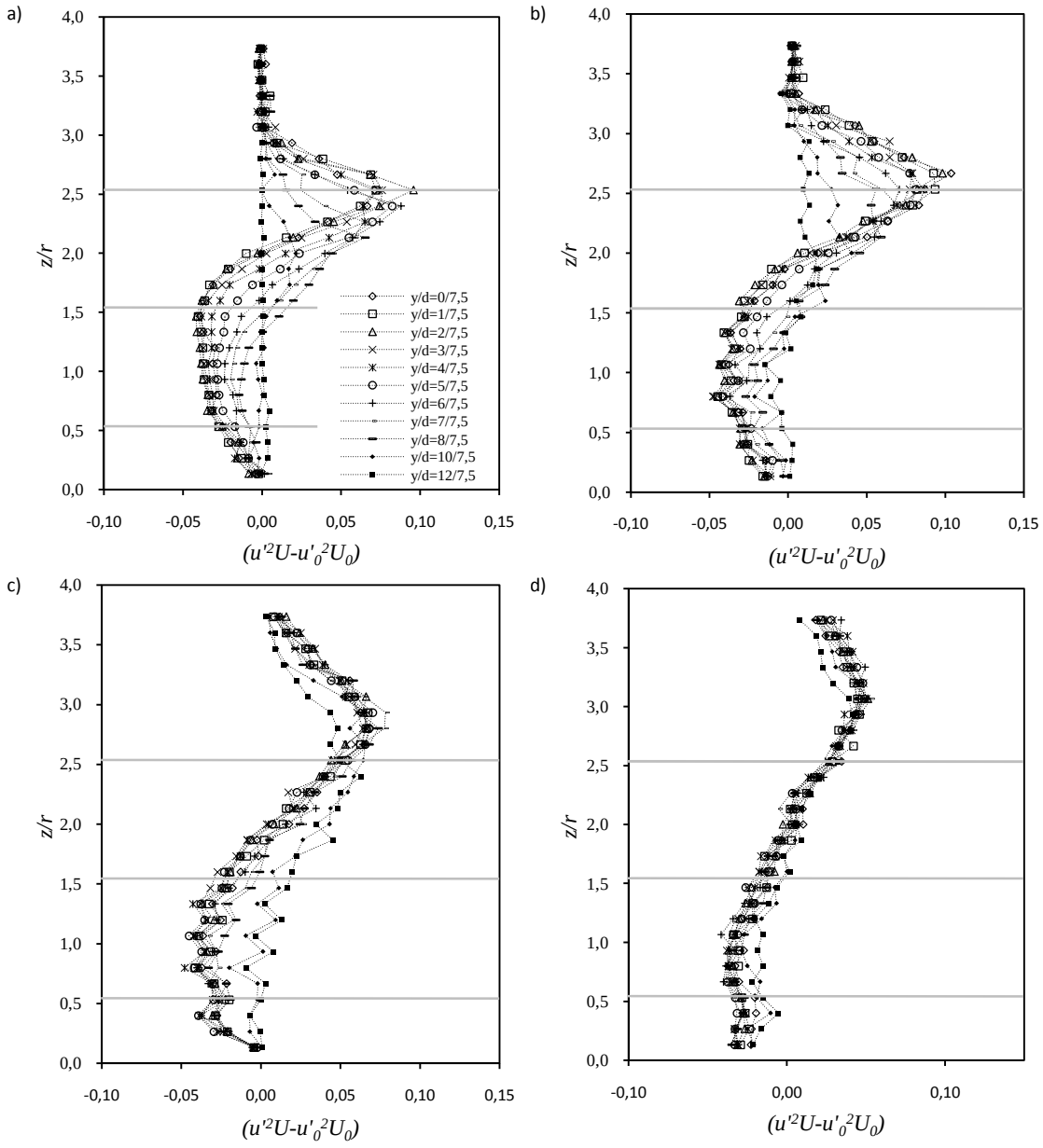


Figura 47. Perfils del flux de potència afegida a diferents distancies aigües avall pel cas rugós. a) x/d=3, b) x/d=5, c) x/d=10, d) x/d=15. Les línies horitzontals representen la part superior, central i inferior de la turbina

De forma anànloga al que hem fet amb la velocitat i amb l'intensitat de turbulència, podem calcular el dèficit de flux de potencia com $\overline{u'^2}U - \overline{u'^2_\infty}U_\infty$. Aquest nou paràmetre ens donarà una idea d'ineficiència del flux (*Figura 47*).

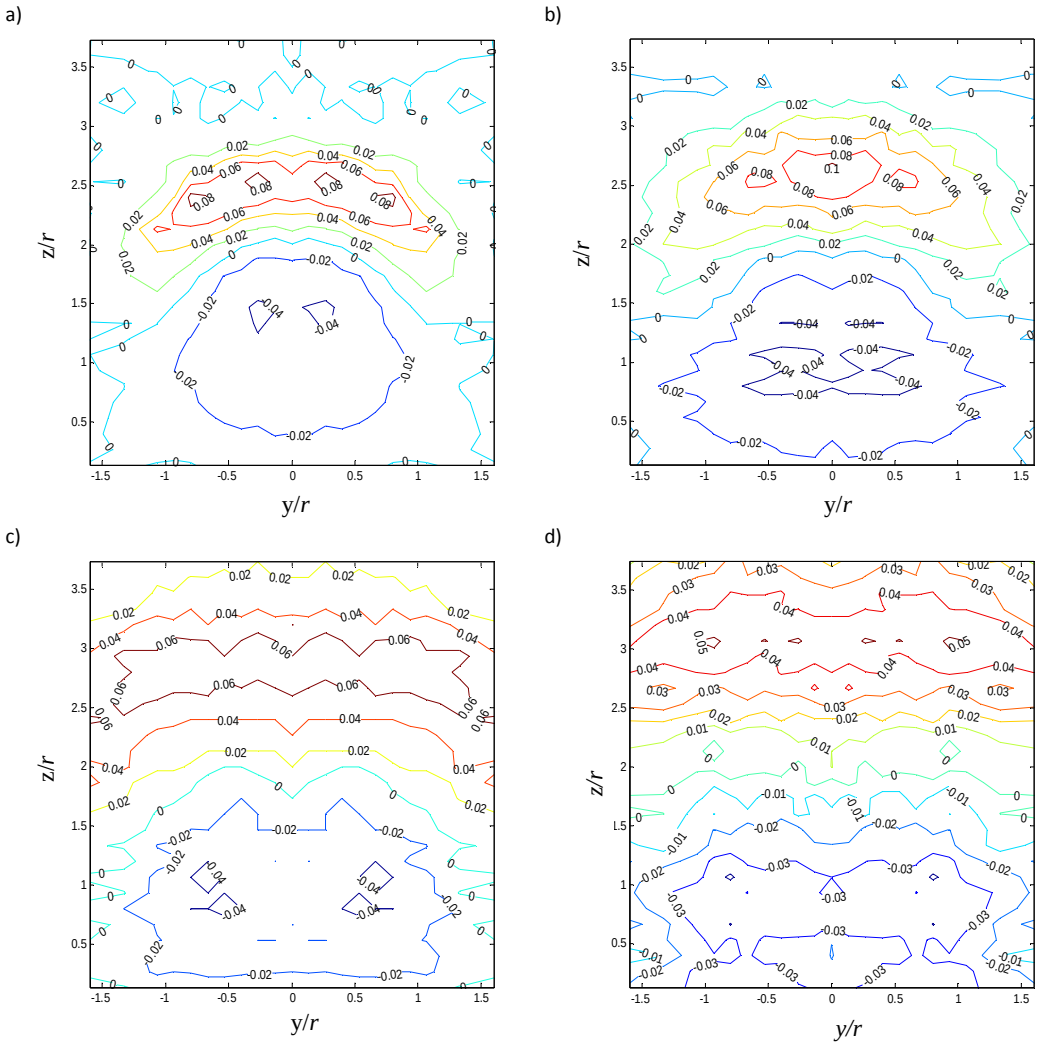


Figura 48. Intensitat de turbulència longitudinal a diferent plans transversals complerts aigües avall pel cas rugós. a) x/d=3, b) x/d=5, c) x/d=10, d) x/d=15

A la *Figura 48* es mostra el flux de potència en plans transversals complerts. S'hi pot apreciar una zona on el flux de potència pren valor màxim. En certa manera, aquesta zona segueix el contorn de la turbina encara que només a la seva part alta. Aquests són conseqüència dels vòrtexs generats pels extrems de les fulles, que incrementen els nivells de turbulència.

7.5.2. Tensions de Reynolds ($\overline{u'w'}$)

A la *Figura 49* es mostra la distribució espacial de tensions tangencials de Reynolds, ($\overline{u'w'}$), a diferents distàncies. De la figura podem extreure que la turbina introdueix tensions de Reynolds superiors a les del flux entrant. El que s'observa és que existeix una regió amb tensions negatives, a la part superior de la turbina, i una altra regió amb tensions positives, a la part inferior. A mesura que l'estela creix amb la distància, els efectes de les tensions tallants van disminuint, tot i que afecte a una major àrea transversal. A una distància de $x/d = 15$, encara es poden apreciar els efectes citats.

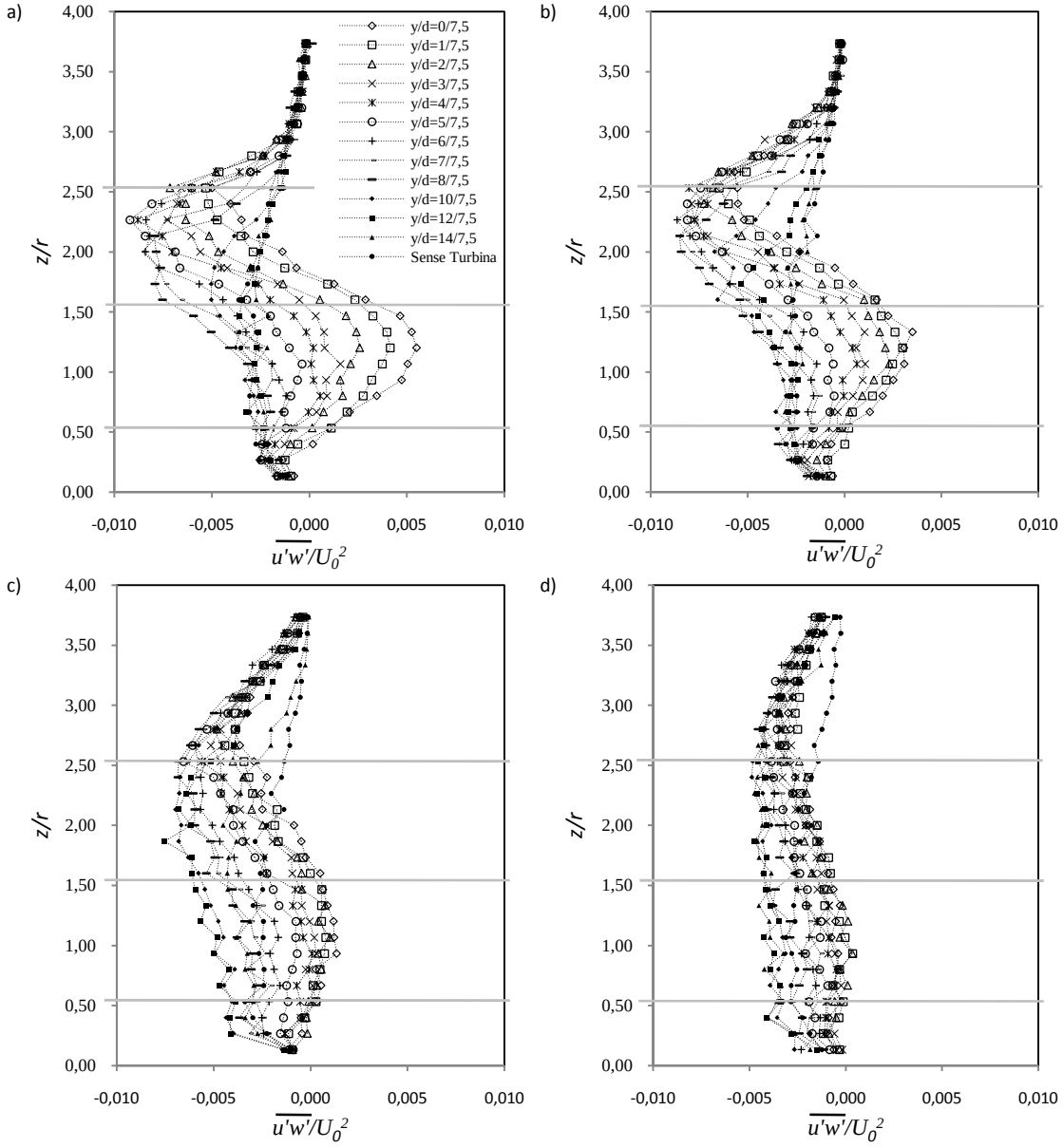


Figura 49. Perfils de tensions tangencials a diferents distancies aigües avall per al cas llis. a) x/d=3, b) x/d=5, c) x/d=10, d) x/d=15. Les línies horitzontals representen la part superior, central i inferior de la turbina

Si ens fixem en la pendent que tenen aquestes gràfiques, podem intentar treure alguna deducció. Per exemple, a una altura pròxima al terreny la pendent és positiva i per tant, les partícules tendeixen a xocar amb el terra. En canvi, a la part superior de la turbina, tenim una zona on la pendent canvia de negativa a positiva, cosa que pot produir una concentració de partícules, i possiblement generar major nivells de turbulència.

A la *Figura 50* s'hi representen les velocitats u' en funció de w' per a diferents punts. Amb aquestes representacions es pretén mostrar com són les intensitats de turbulència i les tensions tallants en aquests punts. Per una banda, si els punts tendeixen a aproximar-se a una recta, el valor de tensió tallant de Reynolds serà alt. Si la pendent és positiva les tensions són negatives i a l'inrevés. Per altre banda, com més disperses es trobin les mesures, la intensitat de turbulència serà major.

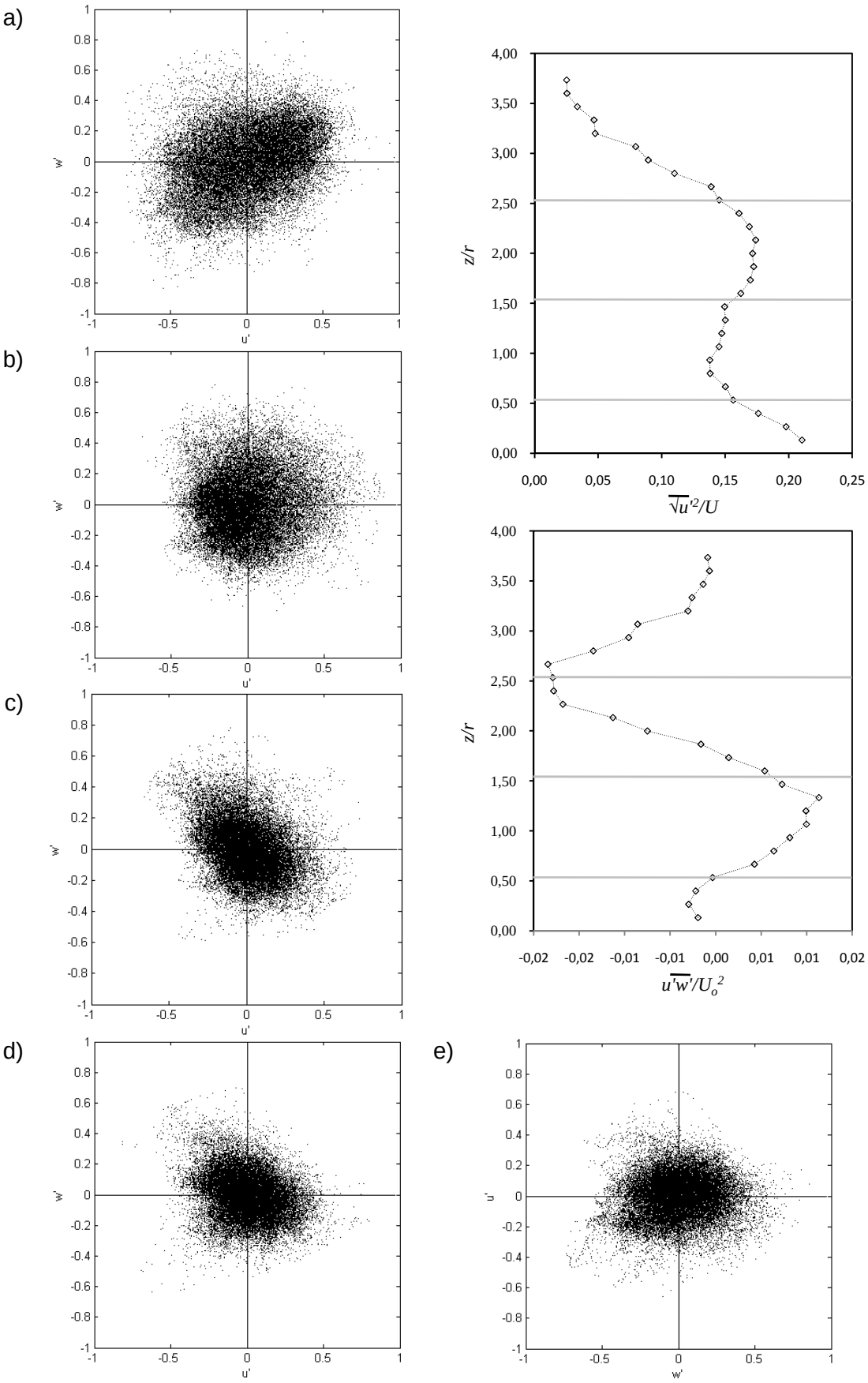


Figura 50. Representació de w' en funció de u' per a diferents punts situats a y=0, i a una altura de a)z/r=2.5 , b)z/r=2 , c)z/r=1.5 , d)z/r=1 , e)z/r=0.5. Cas llis, a 5 diàmetres de distància respecte la turbina

Per il·lustrar la manca de simetria respecte el pla $y = 0$ de la distribució, tal com es comentava anteriorment, a la *Figura 51* es mostra la distribució de tensions tangencials en un pla transversal complet. En aquesta mateixa figura es pot veure que la tensió màxima negativa es troba en el primer quadrant i la tensió màxima positiva es situa en el tercer.

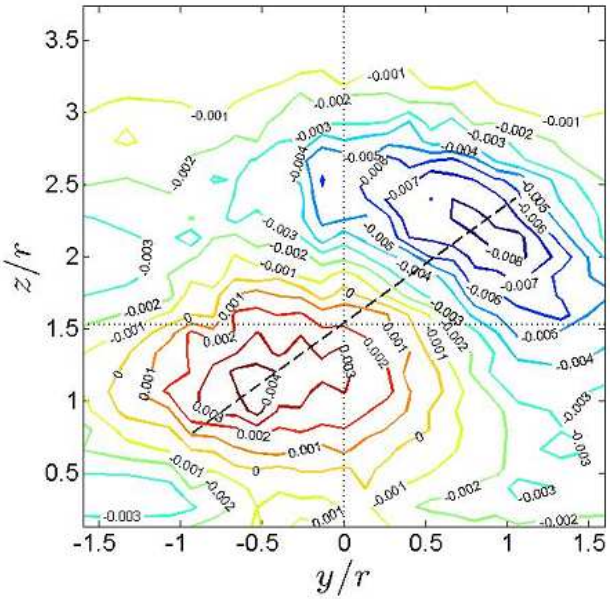


Figura 51. Pla transversal complert del camp de tensions tangencials a una distància de 5d respecte la turbina. Cas rugós

7.5.3. Curtosis

Segons *Carlin et al (2005)*, la curtosis té certa influència en la quantitat de potència disponible en el flux. De fet, la potència mitja generada es pot escriure de forma discreta de la següent manera:

$$\bar{P} = \frac{1}{2}\rho A\overline{U^3} = \frac{1}{2}\rho A\bar{U}^3 K_e \tag{72}$$

on

$$K_e = \frac{1}{N\bar{U}^3}\sum_{i=1}^{N} U_i^3$$

Si expandim $\overline{U^3}$ mitjançant la descomposició de Reynolds es pot deduir:

$$K_e = 1 + 3I_u^2 + \gamma I_u^3 \tag{73}$$

I_u i γ són la intensitat turbulenta i el coeficient de curtosis, respectivament. Aquestes expressions ens diuen que la curtosis pot incrementar o reduir la potència mitja generada.
Les propietats turbulentes de l'estela revelen que la turbina elimina curtosis del flux entrant. Veien la *Figura 52*, deduïm que la curtosis de l'estela, a diferents distàncies

aigües avall de la turbina, tendeix a aproximar-se a zero, o fins i tot, arriba a prendre valors positius. Recordem que la curtosis en el flux entrant és negativa en tot moment.

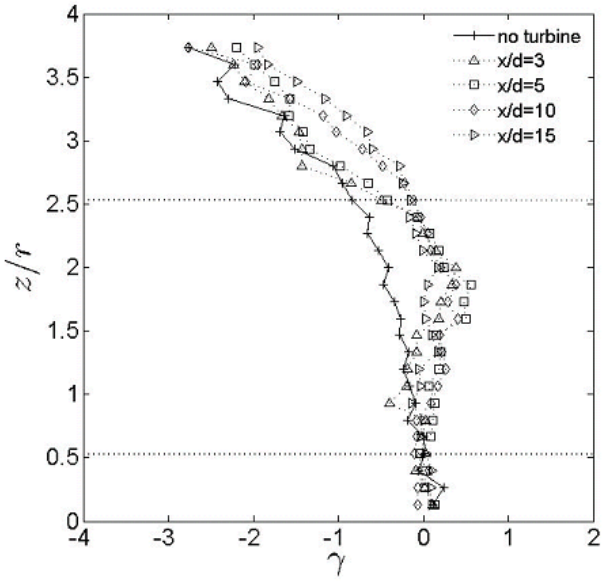


Figura 52. Distribució del coeficient de Curtosis γ per la component longitudinal de la velocitat, per a y=0, a diferents distàncies aigües avall de la turbina. Cas Rugós

Per tant, podem dir que, el flux a l'interior de l'estela, presenta un efecte positiu, en el sentit que les mesures de curtosis no són tant negatives. Això, incrementaria la potència que podria generar la turbina següent. Aquest fet, però, té un paper minoritari en comparació amb el dèficit de velocitat i la intensitat de turbulència mitja.

7.5.4. Espectre d'energia

Comparant l'espectre de potències a diferents distàncies s'observen altres propietats importants de l'estela. En particular, si comparem els senyals del punt superior, el punt inferior i el punt central de la turbina, a diferents distàncies, es pot observar que les variacions d'intensitat de turbulència (augment a la part superior, i disminució a la inferior) s'associen a les escales més grans de turbulència.

S'observa que el sub-rang inercial creix a mesura que ens allunyem de la turbina. A més, presenta una energia similar per a cadascun dels tres punts mesurats. A una distàncies molt llunyana de la turbina, $x/d = 15$, el contingut d'energia és el mateix, no només en el sub-rang inercial, sinó també a totes les escales. D'això es dedueix que, a 15 diàmetres, l'estela s'ha barrejat amb l'entorn.

Si superposem l'espectre a 15 diàmetres, on en els tres punts mesurats són iguals, amb l'espectre del punt central sense turbina, s'observa que són equivalents. Aquest resultat ens diu que el perfil d'intensitats de turbulència a 15 diàmetres és pràcticament uniforme. També concorda amb el què s'ha vist a les gràfiques d'intensitat de turbulència.

Un altre aspecte a destacar és que a una distància molt propera a la turbina (x/d=1) s'aprecia una concentració d'energia. Aquesta equival a la freqüència de gir de l'aspa.

Aquest fenomen només es dóna al punt corresponent a la part superior de la turbina. En els altres punts no s'aprecia ja que es barreja amb la turbulència de la superfície.

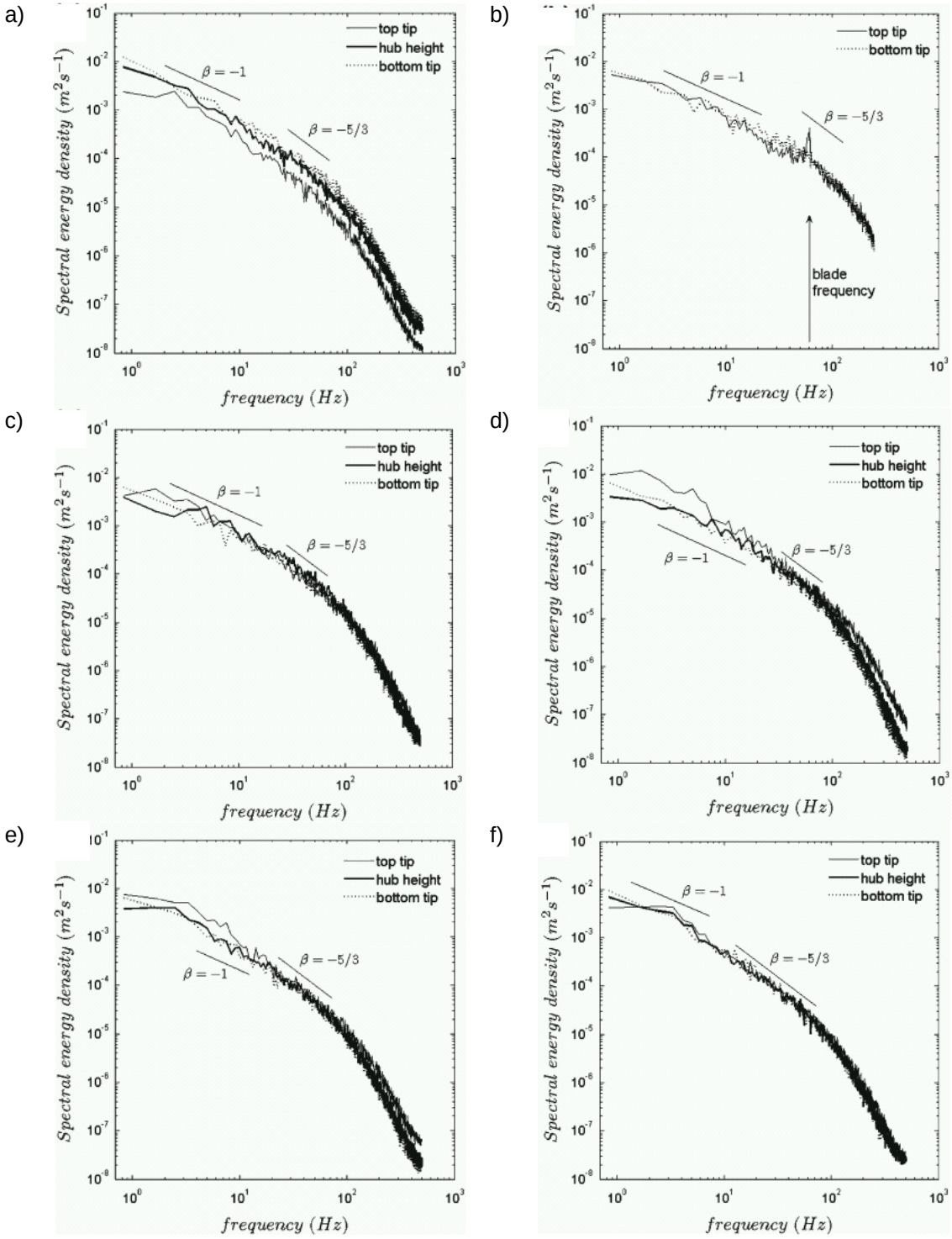


Figura 53. Espectres de potència de la component longitudinal de la velocitat (a la punta superior, al centre i a punta inferior de la turbina) a diferents distancies aigües avall. a) Sense turbina, b) x/d=1, c) x/d=3, d) x/d=5, e) x/d=10, f) x/d=15

7.6. RESULTATS EN CONDICIONS DE SUPERFÍCIE LLISA

A continuació es presenten els resultats de l'estudi quan la turbina es troba situada a l'interior d'una capa límit generada per una superfície llisa. En particular, la *Figura 54* i *Figura 55* mostren els perfils de velocitats i velocitats afegides i la *Figura 56* i *Figura 58* la intensitat de turbulència i intensitat de turbulència afegida. De forma anàloga al cas rugós, les gràfiques representen plans transversals situats a diferents distàncies aigües avall de la turbina ($x/d = 3, 5, 10\ i\ 15$).

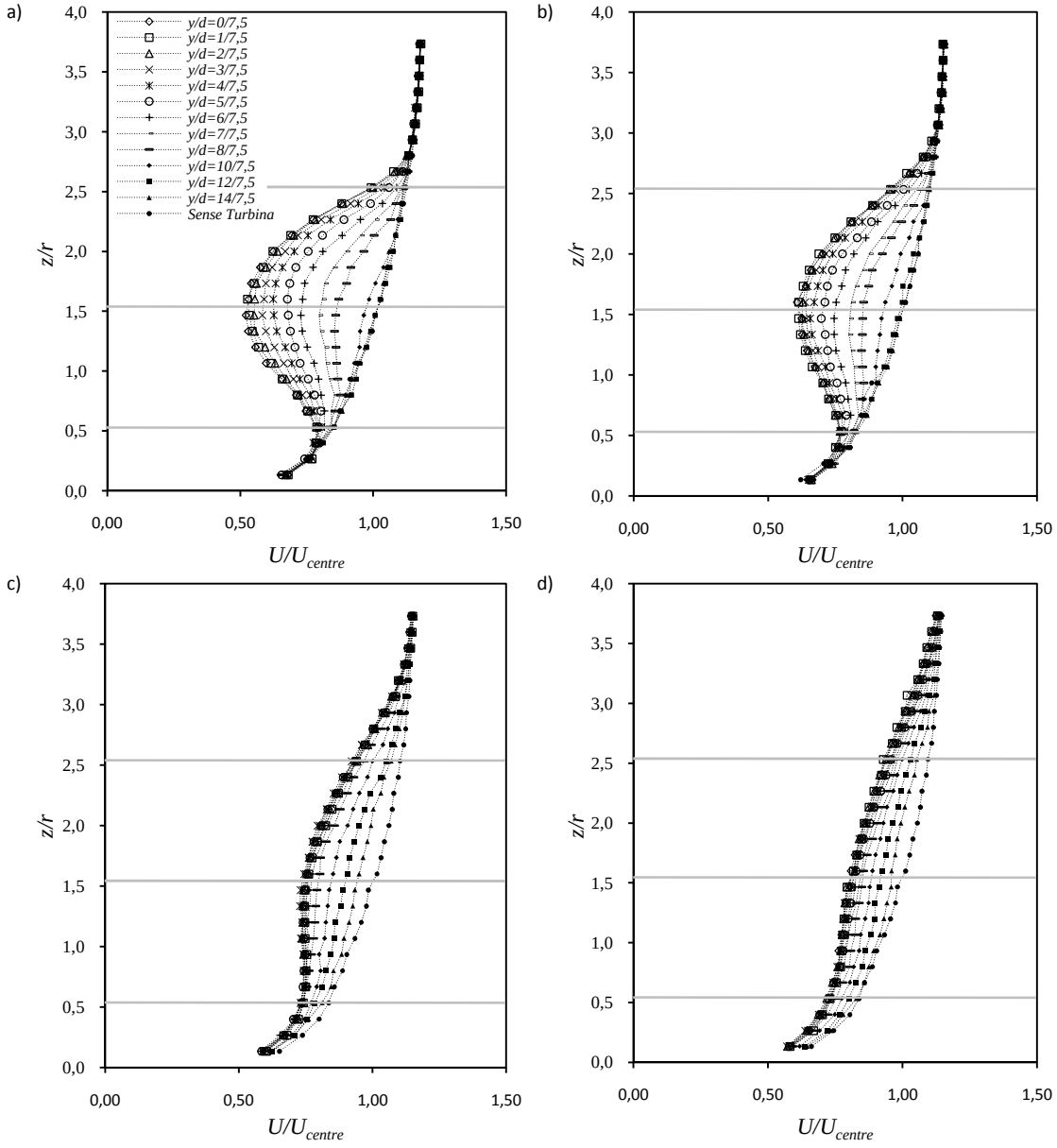


Figura 54. Perfils de velocitat mitja a diferents distancies aigües avall pel cas llis.
a) x/d=3, b) x/d=5, c) x/d=10, d) x/d=15. Les línies horitzontals representen la part superior, central i inferior de la turbina

Comparant aquestes figures amb les homologues pel cas rugós, s'observa que la rugositat de la superfície té un efecte directe en el desenvolupament de les esteles a l'interior de la capa límit. En el cas llis s'observa una simetria axial més marcada i no es distorsiona tant, inclús quan ja ha contactat amb la superfície del terreny. Aquest és un resultat que segueixen certa lògica, ja que el flux entrant és més uniforme que en el

cas rugós. Com més uniforme sigui la distribució, l'estela també tendirà a tenir més axisimetria. Fins a l'extrem del flux uniforme en règim lliure, on el perfil es completament simètric, *Vermeer et al (2003)* i *Medici et al (2006).*

7.6.1. Velocitat

El dèficit de velocitat (ΔU_x), mostrat a la *Figura 55*, revela que l'estela entre en contacte amb la superfície del terreny a una distancia compresa entre 5 i 10 diàmetres. Aquesta, és superior a la del cas rugós on el xoc es produïa a una distància de $x/d < 5$. Aquest fet il·lustra que l'expansió de l'àrea transversal de l'estela depèn clarament de la rugositat de la superfície, on a major rugositat s'ha vist que és més expansiva.

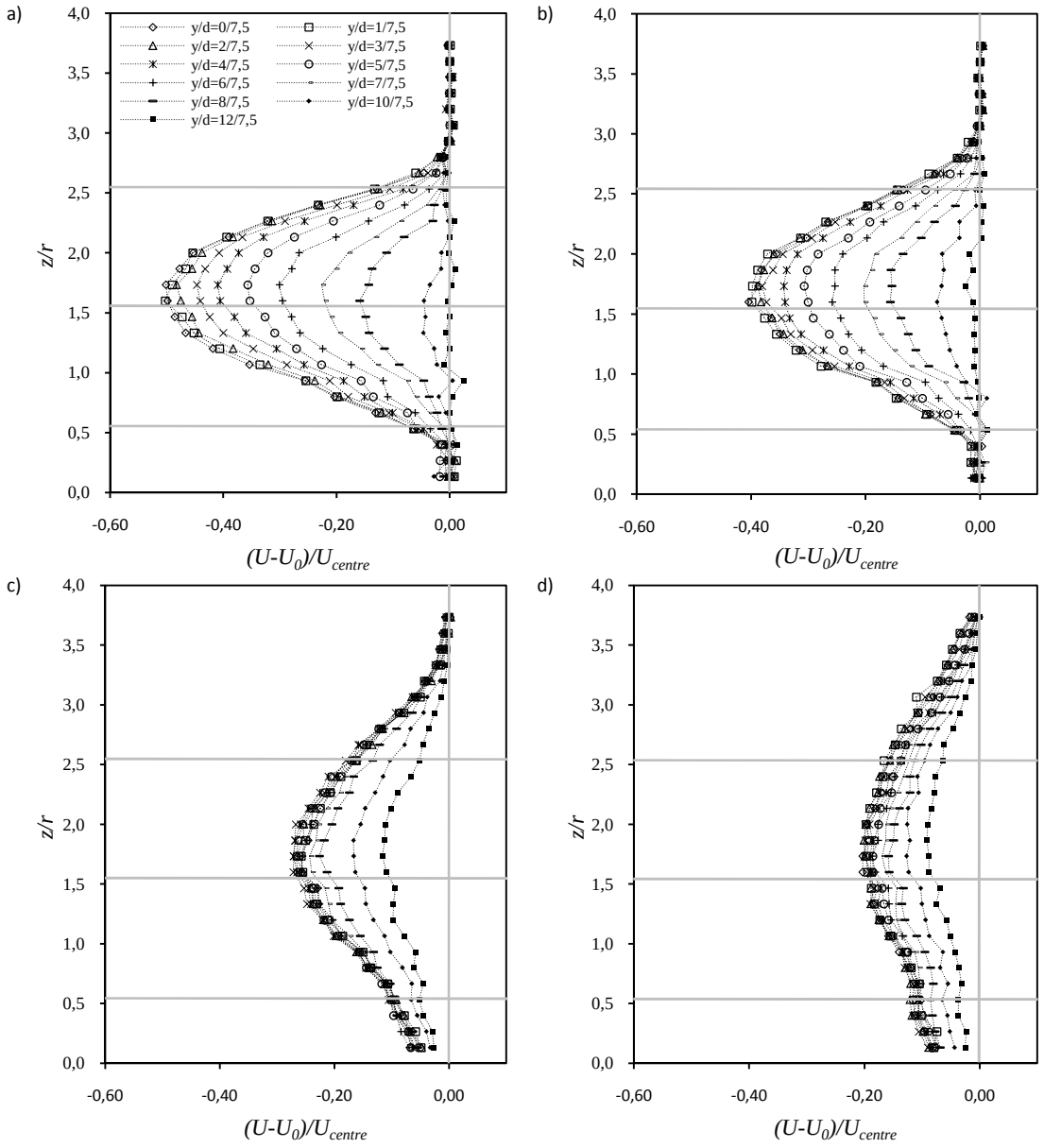


Figura 55. Perfils de dèficit de velocitat a diferents distancies aigües avall per al cas llis. a) x/d=3, b) x/d=5, c) x/d=10, d) x/d=15. Les línies horitzontals representen la part superior, central i inferior de la turbina

Un altre fet que s'aprecia, en comparació amb el cas rugós, és que la magnitud del dèficit de velocitat és superior. És a dir, en el cas llis, al flux li costa més recuperar la velocitat d'abans de passar per la turbina. Aquest fenomen és consistent amb el fenomen d'expansió de l'estela. En el cas rugós, per exemple, on l'estela és més expansiva, també les turbulències són majors. Per aquet motiu, el flux intercanviarà més energia amb l'entorn, fent que es recuperin les propietats del fluid inicial, de forma més ràpida.

A la *Taula 4 es mostra* l'evolució la velocitat relativa del vent a l'altura del centre de la turbina, a diferents distàncies aigües avall de la turbina. Com que el dèficit de velocitat és axisimètric, s'ha considerat que el punt corresponent al centre de la turbina pot ser representatiu de la velocitat de la secció. Amb aquests resultats, es pot tenir una idea de la potència disponible del vent en funció de la distància i de la rugositat.

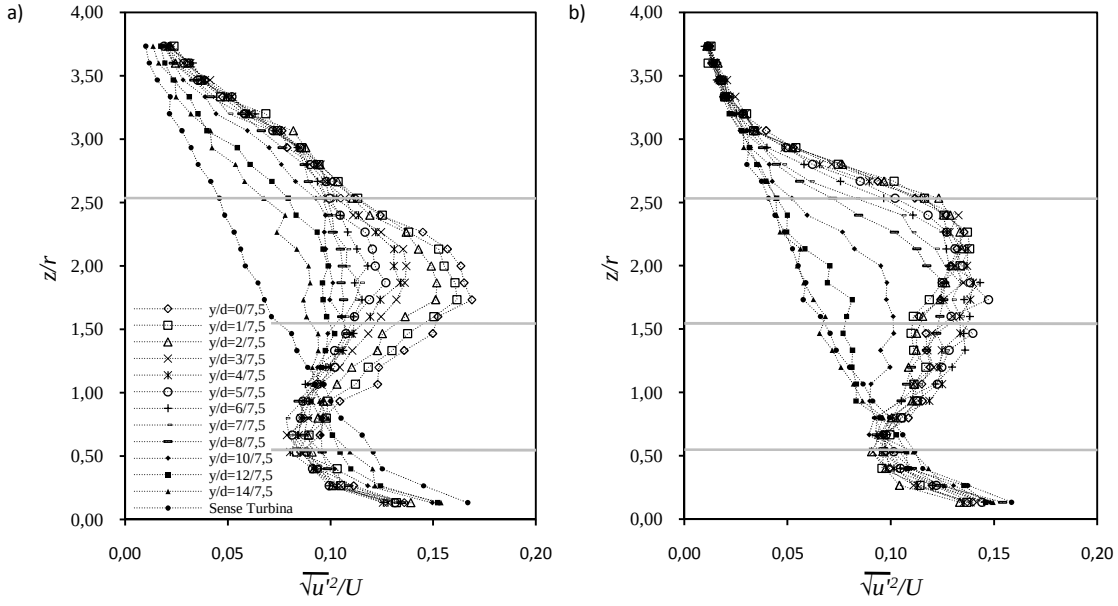
Els resultats són els que ja havíem comentat, és a dir, que la velocitat és recupera més fàcilment en el cas rugós.

Taula 4. Velocitat relatives del vent del punt que correspon al centre de la turbina al llarg de l'estela. La velocitat s'ha dividit per la velocitat d'entrada.

	3d	5d	10d	15d
Cas llis	*0,52*	0,62	0,75	0,81
Cas rugós	*0,53*	0,65	0,82	0,90

7.6.2. Intensitat de turbulència

A la *Figura 56* es mostra la distribució espacial de la intensitat de turbulència pel cas llis, i en la *Figura 58* la intensitat de turbulència afegida per la turbina. Ambdues distribucions mostren diferències importants respecte el cas rugós. Encara que en els dos casos la no uniformitat del flux entrant condueixi cap a distribucions no simètriques axialment, la no simetria es fa més evident pel cas rugós.



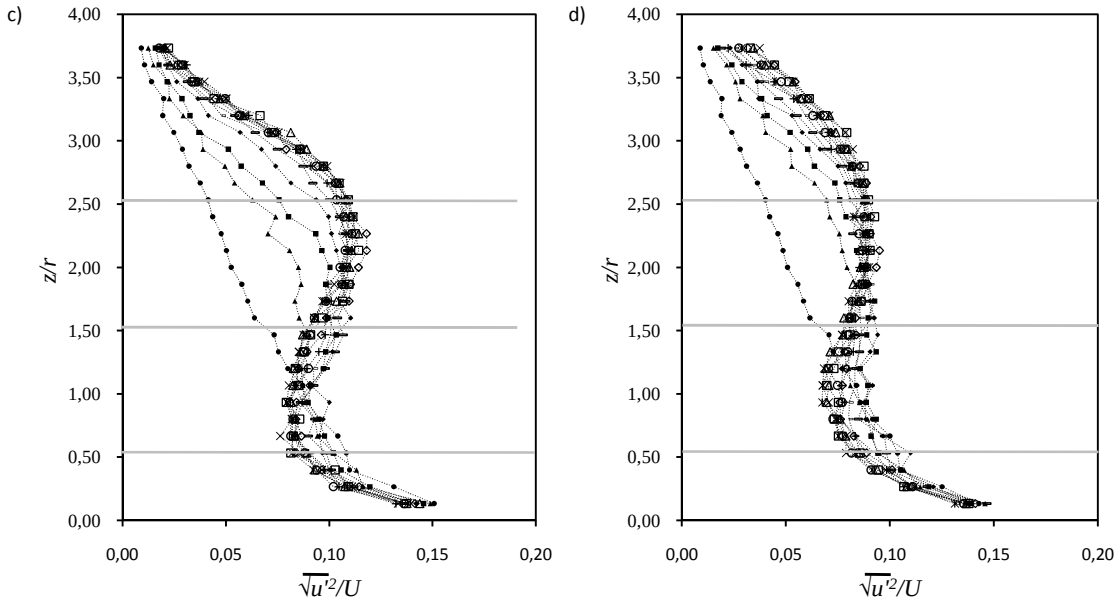


Figura 56. Perfils d'intensitat de turbulència a diferents distancies aigües avall pel cas llis, a) x/d=3, b) x/d=5, c) x/d=10, d) x/d=15. Les línies horitzontals representen la part superior, central i inferior de la turbina

A la *Figura 57* es mostren els valors de les parts positiva $\overline{I_+^+}$ i negativa $\overline{I_+^-}$ de la intensitat turbulenta mitja afegida. La distància es normalitza amb el diàmetre de la turbina i la intensitat turbulenta amb la que pren valor màxim, és a dir, a distància $x/d = 5$.

Si analitzem la variació d'aquestes funcions amb la distància, podem observar que entre $5 < x/d < 15$, s'obté de forma aproximada: $\overline{I_+^+} \propto \mathrm{x}^{-0.47}$, $\overline{I_+^-} \propto \mathrm{x}^{-0.08}$ i $\overline{I_{+centre}} \propto \mathrm{x}^{-0.53}$.

Comparant els resultats amb el cas rugós s'observa una clara disminució dels exponents.

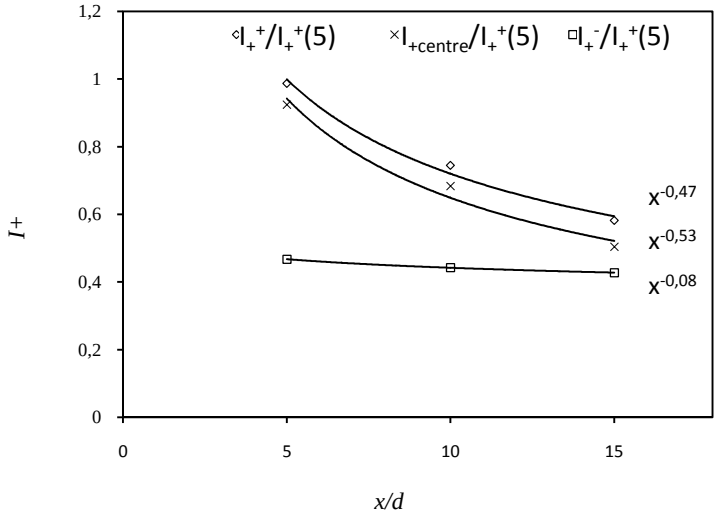


Figura 57. Representació de les parts positiva $\overline{I_+^+}$ i negativa $\overline{I_+^-}$ de la intensitat turbulenta mitja afegida en funció de la distancia, així com també de la del centre de la turbina $\overline{I_{+centre}}$ i de la intensitat global $\overline{I_{+global}}$, pel cas de superfície rugos

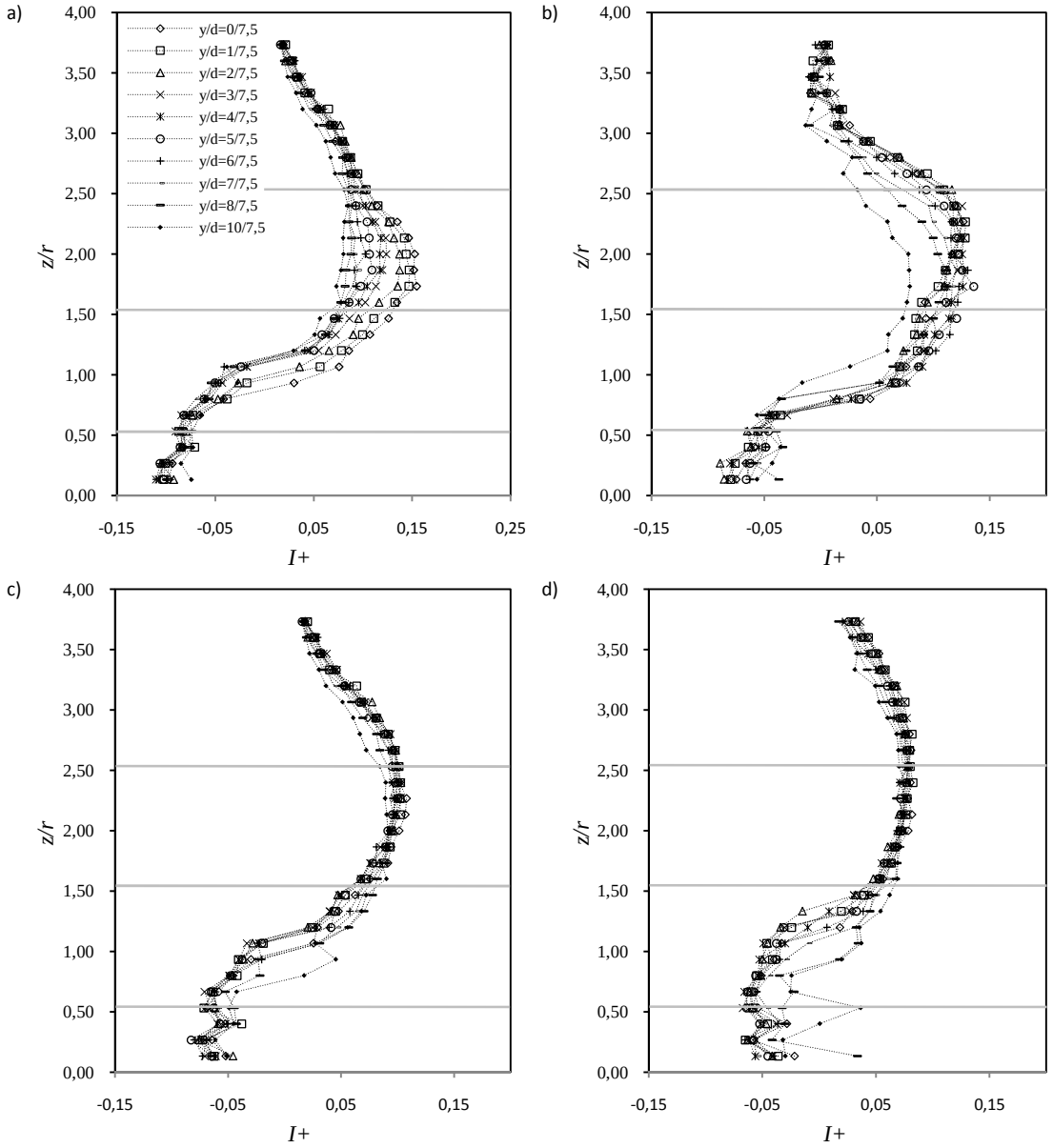


Figura 58. Perfils d'intensitat de turbulència afegida a diferents distancies aigües avall pel cas llis. a) x/d=3, b) x/d=5, c) x/d=10, d) x/d=15. Les línies horitzontals representen la part superior, central i inferior de la turbina

7.6.1. Flux de potència

A la *Figura 59* es mostra el flux de potència per a diferents plans transversals aigües avall de la turbina. En aquest cas, el comportament del flux de potència presenta un comportament semblant al cas rugós, però amb la particularitat que a 15 diàmetres de distancia els efectes de la turbina són més evidents.

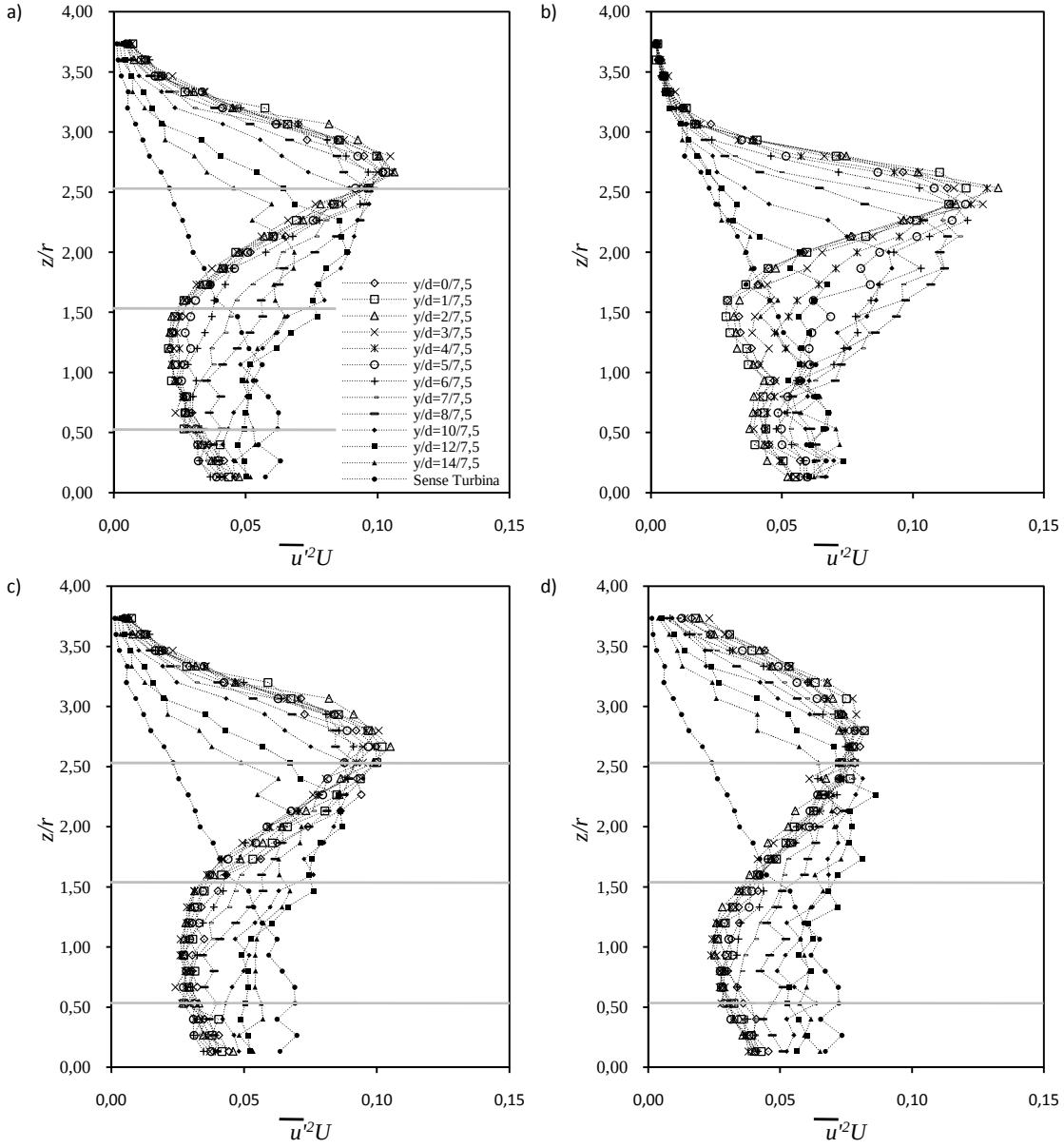


Figura 59. Perfils del flux de potència a diferents distancies aigües avall per al cas llis. a) x/d=3, b) x/d=5, c) x/d=10, d) x/d=15. Les línies horitzontals representen la part superior, central i inferior de la turbina

7.6.2. Tensions de Reynolds ($\overline{u'w'}$)

La distribució de tensions de Reynolds (*Figura 60*) també es comparable amb la del cas rugós. La distribució en un pla transversal complet continua essent antisimètric respecte un eix girat aproximadament $45°$. Cal remarcar però que la magnitud de les tensions és inferior. Aquest és un resultat que ens explica perquè l'estela no s'expandeix tan en el cas llis ja que les tensions de Reynolds ens indiquen com s'intercanvien partícules de diferents línies de corrent.

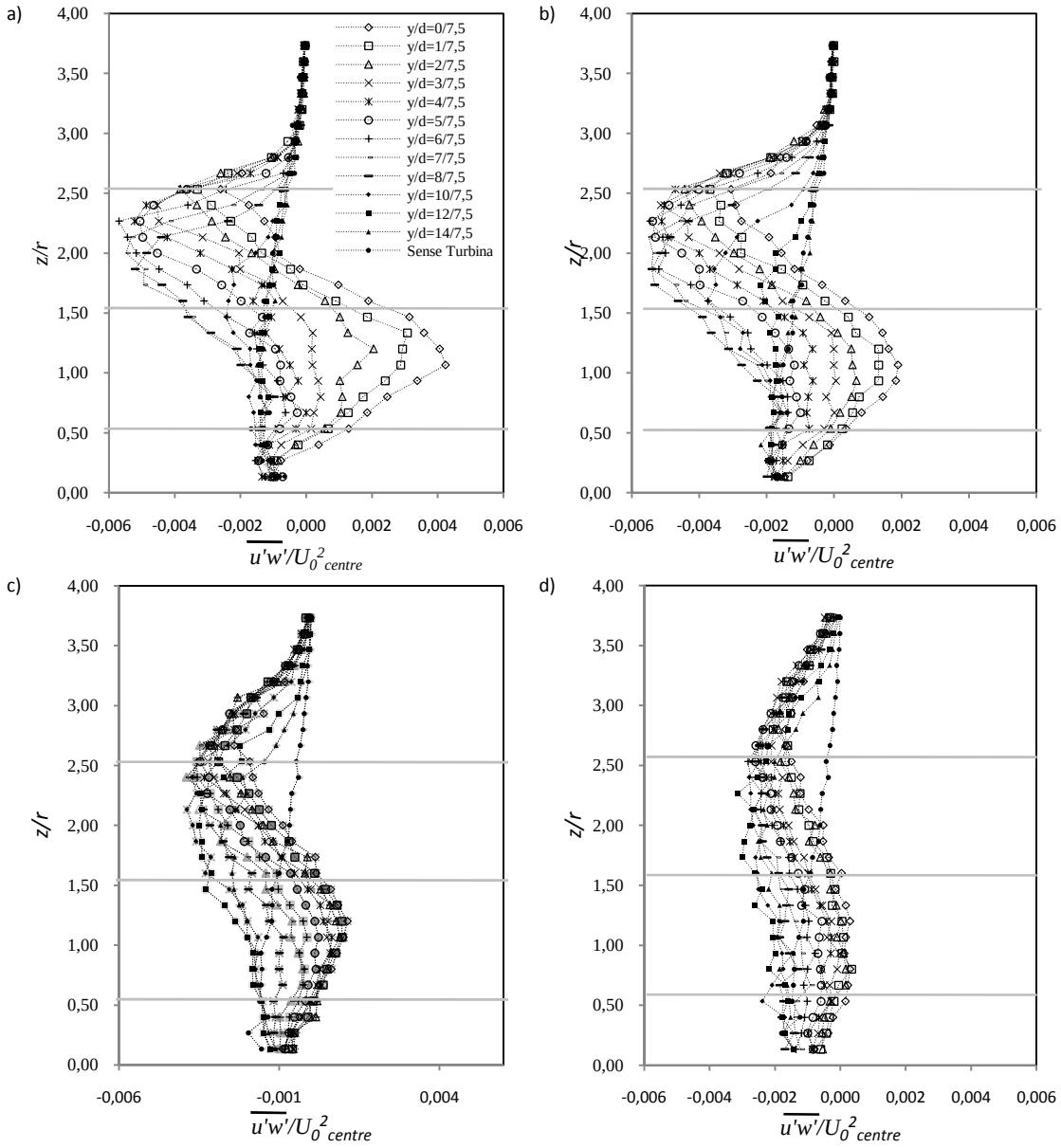


Figura 60. Perfils de tensions tangencials a diferents distancies aigües avall per al cas llis. a) x/d=3, b) x/d=5, c) x/d=10, d) x/d=15. Les línies horitzontals representen la part superior, central i inferior de la turbina

7.6.3. Espectre d'energia

L'espectre de potències en aquest cas, presenta un comportament molt semblant al del cas rugós. La diferència més destacable és que el pic que es forma a la punta superior de la turbina per a una distància de $x/d = 1$, és encara major que en el cas rugós (*Figura 61*). Això passa perquè els nivells de turbulència generals són inferiors.

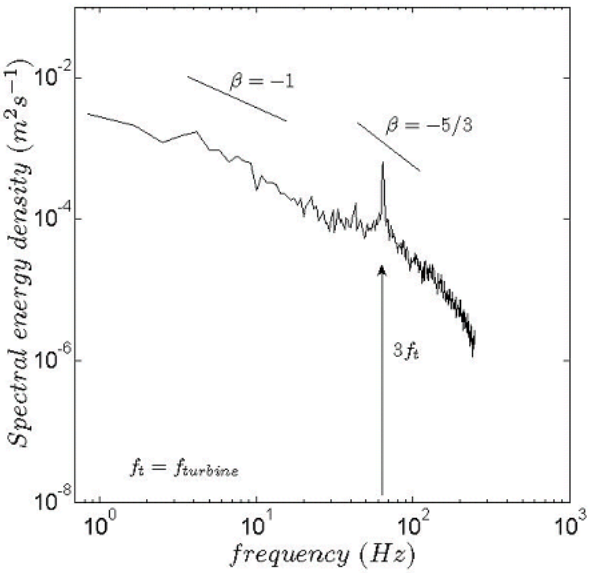


Figura 61. Espectre de potència de la component longitudinal de la velocitat. Mesurat en un punt situat a 1 diàmetre de distància respecte la turbina i a una altura corresponent a l'altura màxima de la turbina.

8. CONCLUSIONS

En la present tesina ens plantejàvem el repte de caracteritzar l'estela que es genera a la sortida d'un aerogenerador d'eix horitzontal. S'ha dut a terme mitjançant un estudi experiment en un túnel de vent, on s'han simulat les condicions de la capa límit atmosfèrica. A més, també s'ha tingut en compte l'efecte de la rugositat del terreny, utilitzant una superfície llisa i una de rugosa. Les mesures s'han realitzat amb un anemòmetre de fil calent. Aquest ha permès mesurar les components longitudinal i vertical de la velocitat del vent.

Un cop vistos els resultats, arribem a certes conclusions que poden ser d'interès en el disseny de parcs eòlics. Més concretament, en decidir quina és la separació òptima entre la primera i la segona turbina.

1. Tot i que el flux que arriba a la turbina no sigui uniforme, s'ha comprovat que el dèficit de velocitat és pràcticament axisimètric. Aquest resultat té implicacions molt importants en la predicció del camp de velocitats darrere una turbina, ja que permet la possibilitat de generalitzar les formulacions existents en règim lliure, en independència del flux entrant.

2. Fixant-nos en els perfils d'intensitat de turbulència i de flux de potència diferenciem entre dues zones de l'estela: la primera amb altura superior al centre de la turbina, i una segona amb altura inferior. A la part superior és on es concentren els nivells més alts de turbulència, en canvi, a la part inferior, la turbulència ha disminuït respecte el flux entrant. Aquest resultat té un interès pràctic ja que ens indica on es produiran les majors càrregues de fatiga. Com que no coneixem totes les components del tensor de Reynolds no podem assegurar el motiu de perquè aquest fet succeeix. Tot i així, podríem intentar buscar l'explicació a la distribució de tensions tallants $\overline{u'w'}$, on si observa que les partícules tenen tendència concentrar-se a la part superior de la turbina.

3. En els perfils de flux de potència s'observa un màxim molt marcat just a l'altura que correspon a l'extrem superior de la turbina. Aquest resultats ens diu que es produeixen vòrtexs generats per les puntes de les aspes. Aquests vòrtexs només s'aprecien a la part superior de la turbina ja que és on la velocitat és més gran.

4. Un dels objectius que ens marcàvem era el de millorar algunes formulacions que actualment estan en us i que intenten predir la intensitat de turbulència que afegeix la turbina. Totes elles estan fetes en condicions de flux uniforme i només representen el punt del centre de la turbina. Ens diuen que la intensitat de turbulència afegida decau amb una potència que va de l'ordre de -0,32 segons *Quarton et al (1989),* fins a -0,96 segons *Crespo et al (1996).*

   En aquest estudi es proposa que, en comptes de basar-nos en el centre de la turbina, es diferencií entre les dues zones de l'estela clarament marcades. Com que els resultats depenen de la rugositat de la superfície, també proposem variar l'exponent en funció de la rugositat. Pel cas rugós tenim que, a la part superior, l'exponent és de -0,72 i a la part inferior -0,21. En el cas llis aquest exponents són menors, -0,47 en la part superior i -0,08 en la part inferior. En ambdós casos l'exponent de la part superior s'aproxima a la del centre de la turbina, pel que podríem dir que el punt d'altura com el centre de la turbina pot ser representatiu de la turbulència afegida a la part superior. En canvi, en la part inferior on la turbina resta turbulència al fluid, podem dir que es recupera molt lentament.

Taula 5. Comparació entre els diferents models existents i els proposats

	Centre turbina	Part superior	Part inferior
Quarton et al (1989)	*-0,57*		
Crespo et al (1996)	*-0,32*		
Hassan (1992)	*-0,96*		
Cas Rugós	-0,72	-0,58	-0,21
Cas llis	-0,47	-0,53	-0,08

5. Com s'ha vist, la rugositat juga un paper molt important en el comportament de l'estela. En el cas on la rugositat és major, els nivells de turbulència generals també són majors, i per tant l'estela és barreja més fàcilment amb l'entorn, o en altres paraules, és més expansiva. Com a conseqüència, el flux recupera les seves condicions inicials més ràpidament. Per exemple, a la següent taula es mostra la velocitat en relació a la velocitat d'entrada de diferents punts aigües avall de la turbina.

Taula 6. Velocitat del vent del punt que correspon al centre de la turbina a diferents distàncies aigües avall. La velocitat s'ha dividit per la velocitat d'entrada

	3d	5d	10d	15d
Cas llis	*0,52*	0,62	0,75	0,81
Cas rugós	*0,53*	0,65	0,82	0,90

6. Tot i que els efectes del dèficit de velocitat i de la turbulència es van apaivagant a mesura que ens allunyem de la turbina, a una distància de 15 diàmetres, encara s'observen els efectes ocasionats per la turbina. Així que si volguéssim que el segon aerogenerador rendís al màxim de les seves possibilitats, aquest hauria d'estar separat, respecte el primer, una distància superior a 15 diàmetres.

7. Una pràctica habitual en el disseny dels parcs eòlics és col·locar les turbines amb una separació longitudinal de 5 diàmetres. Segons el que s'ha vist, aquesta no seria la millor solució, ja que el dèficit de velocitat és molt gran. A més, és la posició on la turbulència ha arribat a desenvolupar-se al complert i assoleix el valor màxim. La distància de 5 diàmetres es fa més negativa amb a l'augmentar la rugositat del terreny, ja que els nivells de turbulència assolits són majors. Val a dir que, si es col·loquen els aerogeneradors amb tan poca separació és per motius econòmics. Encara que, el rendiment unitari de cada turbina sigui inferior al de les seves possibilitats, analitzant tot un conjunt de condicionants com l'orografia, l'extensió de terreny disponible o el cost de la xarxa elèctrica, aquesta separació pot resultar rentable.

8. L'experiència ens diu que la segona turbina és la que sofreix més avaries, ja que és la que es troba sotmesa a majors nivells de turbulència. Després de veure els resultats que s'han presentat, plantegem la possibilitat d'analitzar què

passaria si aquesta segona turbina tingués menors dimensions. A priori, podria resultar interessat, ja que s'evitaria aquella zona on els valors del flux de potència són màxims.

8.1. FUTURES LÍNIES D'INVESTIGACIÓ

El següent pas, un cop acabat aquest projecte, és la realització del model numèric per tal de comparar els resultats. També està previst contrastar-ho amb mesures experimentals a escala real.

A més, aquest estudi es pot complementar amb més mesures experimentals amb el sistema de mesura PIV. Aquest mètode consisteix en realitzar una successió de fotografies, i determinar la trajectòria de totes les partícules del flux. D'aquesta manera obtindríem el moviment complet a de tots els punts.

Addicionalment, també resultaria interessant realitzar més mesures de la mateixa turbina afegint nous condicionants. Per exemple, simular els efectes del gradient vertical de temperatura, efectes del relleu o l'efecte de múltiples turbines.

El túnel de vent utilitzat permet simular el gradient vertical de temperatures gràcies a un sistema hidràulic instal·lat recentment. Això permetrà simular els efectes que es donen a l'atmosfera, tant de terra fred i aire calent com a l'inrevés.

9. REFERÈNCIES

Ainslie J (1988) Calculating the flowfield in the wake of wind turbines. JWind Eng Ind Aerodyn 27:213–224

Binh L, Ishihara T, Van Phuc P, Fujino Y (2008) A peak factor for non-Gaussian response analysis of wind turbine tower. J Wind Eng Ind Aerodyn 96:2217–2227

Bruun HH (1995) Hotwire anemometry, principles and signal analysis. Oxford Univ Press, UK, 507 pp

Burton T, Sharpe D, Jenkins N, Bossanyi E (1995) Wind energy handbook, 1st edn.Wiley, Chichester, 617 pp

Carlin P (2005) A suggested modification to a common expression for the energy content of a wind data sample. Wind Energy 8:477–480

Carper M, Porté-Agel F (2008) Subfilter-scale fluxes over a surface roughness transition, Part I: measured fluxes and energy transfer rates. Boundary-Layer Meteorol 126:157–179

Crespo A, Hernandez J (1996) Turbulence characteristics in wind turbine wakes. J Wind Eng Ind Aerodyn 61:71–85

Crespo A, Hernandez J, Frandsen S (1999) Survey of modelling methods for wind turbine wakes and wind farms. Wind Energy 2:1–24

Frandsen S (2003) Turbulence and turbulence-generated fatigue loading inwind turbine clusters.Wind Energy Department, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark

Frandsen S, Thogersen M (1999) Integrated fatigue loading for wind turbines in wind farms by combining ambient turbulence and wakes. J Wind Eng 23:327–339

Hahm T,Wubow S (2006) Turbulent wakes in wind farm configuration. Paper presented at the European Wind Energy conference & exhibition, Athens, Greece, 27 February–2 March 2006

Hassan U (1992) A wind tunnel investigation of the wake structure within small wind turbine farms. E/5A/CON/5113/1890. UK Department of Energy, ETSU

Medici D, Alfredsson P (2006) Measurement on a wind turbine wake: 3D effects and bluff body vortex shedding. Wind Energy 9:219–236

Ohya Y (2001) Wind-tunnel study of atmospheric stable boundary layers over a rough surface. Boundary-Layer Meteorol 98:57–82

Quarton D, Ainslie J (1989) Turbulence in wind turbine wakes. J Wind Eng 14:15–23

Sathyajith Mathew (2006) Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics. Springer

Rosen A, Sheinman Y (1996) The power fluctuations of a wind turbine. J Wind Eng Ind Aerodyn 59:51–68

Sheinman Y, Rosen A (1992) A dynamic model of the influence of turbulence on the power output of a wind turbine. J Wind Eng Ind Aerodyn 39:329–341

Vermeer L, Sorensen J, Crespo A (2003) Wind turbine wake aerodynamics. Prog Aerospace Sci 39:467–510

Vermeulen P (1980) An experimental analysis of wind turbine wakes. In: Third international symposium on wind energy systems, BHRA