



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Azcapotzalco**

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

**“Estructura del Flujo y Dinámica de los Vórtices
en el Borde de Ataque de Semillas Autorrotantes
(*Swietenia macrophylla*)”**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN TERMOFLUIDOS

PRESENTA:

ING. ERICK SALCEDO ÁLVAREZ

DIRECTOR:

DR. LORENZO ALBERTO MARTÍNEZ SUÁSTEGUI

MÉXICO D. F. MAYO DEL 2011





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D.F siendo las 13 horas del día 11 del mes de Mayo del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME- Unidad

Azcapotzalco para examinar la tesis titulada:

Estructura del Flujo y Dinámica de los Vórtices en el Borde de Ataque de Semillas Autorrotantes (Swietenia Macrophylla)

Presentada por el alumno:

Salcedo

Apellido paterno

Álvarez

Apellido materno

Erick

Nombre(s)

Con registro:

A	0	9	0	3	1	1
---	---	---	---	---	---	---

aspirante :

al Grado de Maestro en Ciencias en Termofluidos

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis

Dr. Lorenzo Alberto Martínez Suástegui

Primer vocal

Dr. Oscar Eladio Bautista Godínez

Secretario

Dr. Eric Gustavo Bautista Godínez

Segundo vocal

Dr. Abraham Medina Ovando

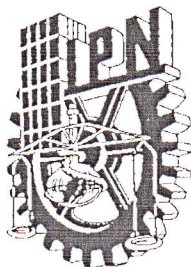
Presidente

Dr. René Osvaldo Vargas Aguilar

Tercer vocal

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Jaime Pacheco Martínez



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 14 del mes Abril del año 2011, el que suscribe **Erick Salcedo Álvarez**, alumno del programa de la **Maestría en Ciencias en Termofluidos**, con número de registro **A090311** y adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME Unidad Azcapotzalco, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección del **Dr. Lorenzo Alberto Martínez Suástegui** y cede los derechos del trabajo titulado: **“Estructura del Flujo y Dinámica de los Vórtices en el Borde de Ataque de Semillas Autorrotantes (*Swietenia macrophylla*)”** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas, o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo al siguiente correo: esalcedoalvarez@gmail.com o martinezlorenzo@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Erick Salcedo Álvarez

Índice general

Nomenclatura	VIII
Abstract	X
Resumen	XI
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Motivación	4
1.3. Objetivos	5
2. Materiales y métodos	7
2.1. Recolección y almacenamiento de las muestras	7
2.2. Diseño Experimental	7
2.2.1. Adquisición de imágenes	10
2.2.2. Procesamiento de datos	12
2.3. Geometría y cinemática de las semillas	12
3. Resultados	15
3.1. Estructura del flujo (vectores en 3D)	15
3.1.1. Perspectivas empleadas	15
3.1.2. Campos instantáneos de velocidad	16
3.1.3. Campos instantáneos de vorticidad	27
3.1.4. Líneas de corriente seccionales	29
3.1.5. Convoluciones integrales de línea	30
3.2. Estelas aguas abajo (vectores en 2D)	31
3.3. Coeficientes de fuerza vertical	32
3.3.1. Coeficientes de fuerza vertical basados en el área en planta de las muestras	32
3.3.2. Coeficientes de fuerza vertical basados en el área de disco de las muestras	36

4. Conclusiones	39
Referencias	39
A. Cálculo del número de Reynolds	47
B. Criterios de identificación de vórtices	49
B.1. Criterio de vorticidad Z	49
B.2. Criterio Lambda 2	50
B.3. Método de intensidad del remolino	51
B.4. Criterio de la segunda invariante Q	51

Índice de figuras

2.1. Diagrama esquemático del diseño experimental. 1) Generador de humo. 2) Ventilador turboaxial. 3) Reóstato. 4) Láser. 5,6) Cámara 1 y 2, respectivamente.	9
2.2. Vista superior de la sección de prueba del túnel de viento y sistema de ejes coordenados.	10
2.3. Posiciones en las cuales se realizaron mediciones a lo largo de la envergadura: a) vista inferior de la semilla, b) vista superior de la semilla	11
2.4. Geometría y cinemática de las semillas de caoba	13
3.1. Perspectivas frontales y traseras de visualización del flujo . . .	16
3.2. Vectores del flujo en la base para la perspectiva frontal y contornos de la componente instantánea de velocidad longitudinal	17
3.3. Vectores del flujo en la base para la perspectiva trasera y contornos de la componente instantánea de velocidad longitudinal	18
3.4. Vectores del flujo en $0.5R$ para la perspectiva frontal y contornos de las componentes instantáneas de velocidad U , V , y W , respectivamente	20
3.5. Vectores del flujo en $0.5R$ para la perspectiva trasera y contornos de las componentes instantáneas de velocidad U , V , y W , respectivamente	20
3.6. Vectores del flujo en $0.75R$ para la perspectiva frontal y contornos de las componentes instantáneas de velocidad U , V , y W , respectivamente	23
3.7. Vectores del flujo en $0.75R$ para la perspectiva trasera y contornos de las componentes instantáneas de velocidad U , V , y W , respectivamente	23

3.8. Vectores del flujo en $0.875R$ para la perspectiva frontal y contornos de la componente instantánea de velocidad longitudinal	24
3.9. Vectores del flujo en $0.875R$ para la perspectiva trasera y contornos de la componente instantánea de velocidad transversal	25
3.10. Vectores del flujo en R para la perspectiva frontal y trasera junto con los contornos de las componentes instantáneas de velocidad U , V , y W , respectivamente	26
3.11. Vectores de flujo y contornos de los campos de vorticidad en la base de la semilla, en $0.25R$ y en $0.5R$	28
3.12. Vectores de flujo y contornos de los campos de vorticidad para $0.75R$, $0.875R$ y para la punta de la semilla	28
3.13. Líneas de corriente seccionales para diferentes regiones de la envergadura	29
3.14. Convoluciones integrales de línea para diferentes regiones de la envergadura	30
3.15. Estelas aguas abajo y contornos de velocidad y vorticidad	31
3.16. Componentes de velocidad que actúan sobre el aspa	32
3.17. Coeficientes de fuerza vertical en función del número de Reynolds	35
3.18. Coeficientes de fuerza vertical en función de la carga alar	35
3.19. Velocidad de corriente libre en función de la carga alar	36
3.20. Coeficientes de fuerza vertical en función del número de Reynolds	37
3.21. Coeficientes de fuerza vertical en función de la carga alar	37
3.22. Velocidad de la corriente libre en función de la carga alar	38

Índice de cuadros

2.1. Dimensiones y características aerodinámicas de las semillas de caoba (<i>Swietenia macrophylla</i>)	14
A.1. Densidad del aire a diferentes alturas	48

Nomenclatura

AR	relación de aspecto (ℓ/c)
c	cuerda media (m)
C_D	coeficiente de arrastre
C_T	coeficiente de fuerza vertical
C_{TP}	coeficiente de fuerza vertical para área en planta
C_{TD}	coeficiente de fuerza vertical para área de disco
D	fuerza de arrastre (N)
g	magnitud de la aceleración gravitacional (m/s^2)
ℓ	longitud total de la semilla (m)
L	fuerza de sustentación (N)
LE	borde de ataque
LEV	vórtice en el borde de ataque
m	masa (kg_m)
PIV	velocimetría por imágenes de partículas
Q	segunda invariante de $\nabla\bar{v}$
R	longitud de la base de la semilla a su punta (m) (ver Fig. 2.3)
R_D	distancia del centro de gravedad de la semilla a su punta (m) (ver Fig. 2.4)
Re	número de Reynolds basado en la cuerda media, $Re = U_\infty c/\nu$
rps	revoluciones por segundo
S	área proyectada de la semilla (m^2)
S_D	área proyectada de la semilla en rotación (m^2)
t	tiempo (s)
T	fuerza vertical (N)
TE	borde de salida
TEV	vórtice en el borde de salida
U	componente de velocidad longitudinal (m/s) (ver Fig. 2.2)
U_T	velocidad relativa o velocidad total (m/s) (ver Eq. 3.1)
U_∞	velocidad de la corriente libre o velocidad terminal de la semilla (m/s)
\bar{v}	vector velocidad
V	componente de velocidad transversal (m/s) (ver Fig. 2.2)
w	peso de la semilla (kg_f)
W	componente de velocidad normal al plano x, y (m/s) (ver Fig. 2.2)
W_L	carga alar (N/m^2)
W_{LD}	carga de disco (N/m^2)
x, y, z	coordenadas rectangulares Cartesianas (ver Fig. 2.2)

Letras Griegas

α	ángulo en el borde de ataque en la punta (ver Fig. 2.4)
β	ángulo de conicidad (ver Fig. 2.4)
γ	ángulo en el borde de ataque en la base (ver Fig. 2.4)
μ	viscosidad dinámica
ν	viscosidad cinemática
∇	operador gradiente
ρ	densidad del aire
σ	solidez (S/S_D)
ϕ	ángulo de la velocidad total con respecto a la horizontal (ver Fig. 3.16)
ω	vector vorticidad ($\nabla \times \bar{v}$)
Ω	velocidad angular en revoluciones por segundo

Subíndices

i, j, k	coordenadas espaciales
-----------	------------------------

Abstract

An experimental investigation of near and far field aerodynamics of wind dispersed seeds has been performed using digital stereoscopic particle image velocimetry (DSPIV). As they fall, the spinning seeds generate a prominent leading-edge vortex (LEV) which is responsible for augmenting lift forces. In this work, the three-dimensional (3D) flow structures around free falling autorotating Mahogany seeds in a vertical wind tunnel are revealed for the first time. The results show that the LEV system is comprised of two vortical elements: one primary vortex at the leading edge and one minor vortex at the trailing edge. Thrust coefficients of the seeds were obtained using the measured lift and drag coefficients, and terminal velocities were calculated as a function of the Reynolds number and wing loading. Our experimental findings indicate that the size of the LEV is larger than predicted in previous two-dimensional (2D) studies. It is pointed out that studying pronounced 3D flow using 2D approximations is prone to errors.

Resumen

En este trabajo se realizó un estudio experimental de la aerodinámica de semillas dispersadas por el viento empleando velocimetría estereoscópica digital por imágenes de partículas (DSPIV, por sus siglas en inglés). Al caer, las semillas autorrotantes generan un prominente vórtice en el borde de ataque (LEV, por sus siglas en inglés), el cual es responsable de que éstas generen altos coeficientes de sustentación. En este trabajo se reporta por primera vez la estructura del flujo alrededor de semillas autorrotantes de caoba en caída libre, empleando un túnel de viento vertical. Los resultados muestran que el sistema del LEV está conformado por dos vórtices: uno primario en el borde de ataque y otro secundario en el borde de salida. Se calcularon coeficientes de sustentación y velocidades terminales de las semillas en función del número de Reynolds y de la carga alar. Las mediciones experimentales indican que el tamaño del LEV es mayor que el predicho en estudios previos en dos dimensiones (2D) y se concluye que estudiar flujos tridimensionales empleando aproximaciones en 2D puede ocasionar que se subestimen las dimensiones del LEV.