



UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER  
BIBLIOTECA EDUARDO COTE LAMUS



## RESUMEN - TESIS DE GRADO

**AUTORES:** RINA CASANDRO CABRALES  
JADID MAURICIO PEREIRA PABÓN

**FACULTAD:** INGENIERÍA

**PLAN DE ESTUDIOS:** INGENIERÍA MECÁNICA

**DIRECTOR:** JESÚS BETHSAID PEDROZA ROJAS

**TÍTULO DE LA TESIS:** SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA VENTILACIÓN NATURAL EN INVERNADEROS, UBICADOS EN LA REGIÓN DE ISCALÁ, CHINÁCOTA, NORTE DE SANTANDER, MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

### RESUMEN

Se simuló a partir de un modelo bidimensional, el flujo de aire a través de la sección transversal de dos tipos de invernaderos, cercha y arco, bajo las condiciones climáticas de Iscalá, Chinácota, Norte de Santander, obteniendo resultados gráficos y numéricos de distribuciones de velocidad y temperatura desarrolladas al interior de las construcciones originales. Posteriormente se realizó un proceso de optimización geométrica de los invernaderos con base en los resultados de setenta simulaciones realizadas para diferentes variaciones en las ventanas laterales y cenitales, altura de las paredes, ancho y número de naves y por último para diferentes velocidades de entrada del aire.

### CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS: 214 ILUSTRACIONES:    PLANOS:    CD-ROM: 1

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA VENTILACIÓN NATURAL EN  
INVERNADEROS, UBICADOS EN LA REGIÓN DE ISCALÁ, CHINÁCOTA,  
NORTE DE SANTANDER, MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS  
ELEMENTOS FINITOS.

RINA CASANDRO CABRALES.

JADID MAURICIO PEREIRA PABON.

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA  
SAN JOSÉ DE CÚCUTA  
2006

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA VENTILACIÓN NATURAL EN  
INVERNADEROS, UBICADOS EN LA REGIÓN DE ISCALÁ, CHINÁCOTA,  
NORTE DE SANTANDER, MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS  
ELEMENTOS FINITOS

RINA CASANDRO CABRALES

JADID MAURICIO PEREIRA PABON

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero  
Mecánico.

Director  
JESÚS BETHSAID PEDROZA ROJAS  
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA  
SAN JOSÉ DE CÚCUTA  
2006



UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA



## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

FECHA: *Cúcuta, 6 de octubre de 2006*

HORA: *15:00*

LUGAR: *CREAD SALA DE PROYECCION 3*

Plan de Estudios: *INGENIERIA MECANICA*

Título de la tesis: *"SIMULACION NUMERICA DE LA VENTILACION NATURAL EN INVERNADEROS UBICADOS EN LA REGION DE ISCALA, CHINÁCOTA, NORTE DE SANTANDER, MEDIANTE LA APLICACION DEL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS"*

Jurados: *Ing. LUIS EMILIO VERA DUARTE*  
*Ing. MEIMER PEÑARANDA CARRILLO*

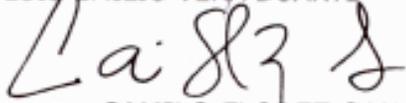
Director: *Ing. JESUS BETHSAID PEDROZA ROJAS*

Nombre de los estudiantes	Código	Calificación	
		Letra	Número
<i>RINA CASANDRO CABRALES</i>	<i>122522</i>	<i>Cinco,Cero</i>	<i>5,0</i>
<i>JADID MAURICIO PEREIRA PABON</i>	<i>122520</i>	<i>Cinco,Cero</i>	<i>5,0</i>

## LAUREADA

  
LUIS EMILIO VERA DUARTE

  
MEIMER PEÑARANDA CARRILLO

  
Vo.Bo. CAMILO FLOREZ SANABRIA  
Coordinador Comité Curricular  
Ingeniería Mecánica

*Martha A*

A mi nona Miryam, a mi mamá Miryam Magdalena y a mi hermana Silvana, por ser mi familia, mi soporte y mis mejores amigas, quienes me enseñaron lo mas importante, ser una persona ética y moral y de las cuales siempre he recibido mucho amor y un enorme apoyo incondicional.

A Mauricio, por ser mi compañero durante todo este tiempo, por ser la fuerza motora que me impulsa a salir adelante, por su paciencia, por enseñarme todo lo que sabe, por quererme y ayudarme tanto, por creer en mí.

A Fernando Carvajalino Cabrales por ser una gran inspiración de amor por la vida, alegría, valentía, rectitud y generosidad.

***RINA CASANDRO CABRALES.***

A mis padres Eddy Aurora Pabón y Balmor Eliseo Pereira, por estar siempre a mi lado apoyándome en todas mis decisiones, a mi familia y a la familia de Rina Casandro por su cariño constante durante estos 6 años universitarios.

A Rina Casandro Cabrales, por su apoyo, paciencia, amor, alegría, por transmitirme algo de su gran inteligencia durante todos estos años, sin su compañía no hubiese sido posible realizar tantas cosas importantes durante nuestra carrera.

A mi gran amigo Ing. Civil, Elkin Angárta quien me enseñó a programar y a estudiar matemáticas; por indicarme el camino desde el primer semestre de mi carrera, dándome el apoyo necesario para aprovechar todas las posibilidades de aprendizaje que brinda la Ingeniería Mecánica.

A la Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla” y a mis compañeros mercantes MC42, por que me enseñaron el valor de las cosas y con ellos adquirí la disciplina que se necesita para alcanzar las metas de manera exitosa.

***JADID MAURICIO PEREIRA PABÓN.***

## **AGRADECIMIENTOS**

A Jesús Pedroza Rojas, Ingeniero Mecánico por su enorme colaboración e invaluable aporte como director del proyecto, por ser un excelente profesor, ingeniero y persona, por introducirnos al maravilloso mundo de los Elementos Finitos desde la parte mas importante, la matemática, por todas sus enseñanzas y consejos.

Al Doctor Carlos Acevedo Peñaloza, especialmente por creer en nosotros, demostrarnos su confianza y amistad durante todo este tiempo y permitirnos trabajar con él y con GIDIMA, su grupo de investigación. Por darnos la oportunidad de aprender sobre simulación numérica ofreciéndonos el 100% de disponibilidad del software y de los equipos de cómputo.

A Jesús Alberto Ortiz, Ingeniero Mecánico por su gran aporte y colaboración en la realización de este proyecto, por su amistad y energía para trabajar.

A Esteban Baeza, Ingeniero Agrónomo, investigador del Departamento de Horticultura de la Estación Experimental de Cajamar Las Palmerillas, Almería, España, encargado de las simulaciones CFD para mejora del diseño de invernaderos, por su tiempo y valiosísimo aporte para el correcto desarrollo de las simulaciones.

A los Ingenieros Luis Emilio vera Duarte y Meimer Peñaranda Carrillo, jurado calificador por valorar nuestro trabajo de investigación y estimar el aporte que éste hace a la Universidad.

A Alberto Falla Arias, por su colaboración y valiosas asesorías durante la ejecución de este proyecto.

A la señora M.Sc. Eddy Aurora Pabón, por su importantísima asesoría metodológica, durante este proyecto y a través de toda la carrera.

A Orlando Gutiérrez Ingeniero Mecánico, por ser un excelente profesor y persona ejemplar, por su amistad y valiosos consejos en el campo profesional.

Al señor Humberto Patiño, por permitirnos estudiar sus invernaderos y tomarlos como referencia para este estudio, por entregarnos parte de sus conocimientos y aportarnos parte importante de la bibliografía.

Al Ingeniero Yesid Castro, Director del departamento de Geotecnia y Minería, a la laborista Clara Luz Gómez, y al plan de estudios de Ingeniería de Minas por facilitarnos los equipos necesarios para la recolección de los datos en el campo.

A Mery y a los ingenieros del Departamento de Diseño Mecánico, Materiales y Procesos, por la paciencia y por la compañía durante el desarrollo del proyecto.

Al Ingeniero Mecánico Adolfo Toloza Chaparro, por su valiosa amistad y colaboración permanente durante el desarrollo de este trabajo y a lo largo de toda la carrera.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN.	28
1. MODELO MATEMÁTICO.	31
1.1 LEY DE LA CONSERVACIÓN DE LA MASA.	31
1.1.1 Deducción de la ecuación diferencial de la conservación de masa.	32
1.2 LEY DE CONSERVACIÓN DEL MOMENTO.	35
1.2.1 Deducción de la ecuación diferencial de conservación de momento.	36
1.2.2 Ecuaciones De Navier-Stokes.	40
1.3 LEY DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA.	45
1.3.1 Deducción de la ecuación diferencial de la conservación de la energía.	45
2. EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.	50
2.1 SIMULACIÓN NUMÉRICA.	51
2.2 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD).	51
3. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN.	53

3.1	CONVECCIÓN NATURAL EN PLACAS HORIZONTALES.	54
4.	LA TECNOLGÍA DE INVERNADERO.	55
4.1	DEFINICIÓN DE INVERNADERO.	55
4.2	TIPOS DE INVERNADEROS.	56
4.3	CONTROL CLIMÁTICO DE INVERNADEROS.	64
4.3.1	Temperatura.	64
4.3.2	Humedad relativa.	65
4.3.3	Iluminación.	66
4.3.4	Concentración de dióxido de carbono CO <sub>2</sub> .	67
4.4	LA VENTILACIÓN EN INVERNADEROS.	68
4.4.1	Ventilación natural.	68
4.4.2	Ventilación Cenital.	69
5.	INSTRUMENTOS Y RECOLECCIÓN DE DATOS	70
6.	PROCESAMIENTO DE DATOS	88
6.1	MODELADO DEL DOMINIO	89

6.2 DISCRETIZACIÓN EN ELEMENTOS FINITOS.	92
6.2.1 Selección del tipo de elemento.	92
6.2.2 Geometría del elemento.	93
6.2.3 Número de nodos y elementos.	96
6.3 CONDICIONES DE FRONTERA.	100
6.4 CONDICIONES DE REFERENCIA.	105
6.5 CONDICIONES DE FRONTERA.	106
6.5.1 Temperatura ambiente.	109
6.5.2 Velocidad del viento.	110
6.5.3 Presión y simetría.	111
6.5.4 Convección.	112
6.5.5 Aceleración de la gravedad.	122
6.6 SOLUCIÓN.	123
6.6.1 Modelo de turbulencia.	124
6.6.2 Número de iteraciones globales.	125

6.7 RESULTADOS.	126
7. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN GEOMÉTRICA.	129
7.1 CÁLCULO DE LAS RENOVACIONES DE AIRE.	132
7.1.1 Cálculo de las renovaciones de aire para el invernadero tipo cercha.	132
7.1.2 Cálculo de las renovaciones de aire para el invernadero tipo arco.	134
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	140
8.1 INVERNADERO TIPO CERCHA.	140
8.1.1 Variación de la abertura cenital.	140
8.1.2 Variación de la altura de las paredes laterales.	143
8.1.3 Variación del ancho de nave.	146
8.1.4 Variación del número de naves.	150
8.1.5 Alargamiento de la ventana cenital.	151
8.1.6 Variación de las ventanas laterales.	152
8.1.7 Variación de la velocidad de entrada del aire.	154
8.2 INVERNADERO TIPO ARCO.	158

8.2.1 Variación de la abertura cenital.	158
8.2.2 Variación del ancho de nave.	161
8.2.3 Variación de la altura de las paredes laterales.	163
8.2.4 Variación del número de naves.	164
8.2.5 Variación de las ventanas laterales.	166
8.2.6 Variación de la velocidad de entrada del aire.	168
9. CONCLUSIONES.	173
10. RECOMENDACIONES.	178
BIBLIOGRAFÍA.	180
ANEXOS	183