



UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER  
BIBLIOTECA EDUARDO COTE LAMUS



## RESUMEN - TESIS DE GRADO

**AUTOR:** YESID ARMANDO PEÑARANDA ARÉVALO

**FACULTAD:** INGENIERÍA

**PLAN DE ESTUDIOS:** INGENIERÍA MECÁNICA

**DIRECTOR:** ALBERTO FALLA ARIAS

**TÍTULO DE LA TESIS:** DISEÑO DE UN SOFTWARE PARA EL CÁLCULO Y ANÁLISIS DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN EMITIDOS POR FUENTES FIJAS, PARA EL EQUIPO DE MUESTREO ISOCINÉTICO DE LA UFPS.

### RESUMEN

Este trabajo de grado hace referencia al desarrollo de un software para la determinación de parámetros de muestreo y emisión de contaminantes para fuentes fijas (chimeneas o ductos industriales). Este software está fundamentado en los lineamientos de los Métodos EPA, y en la legislación ambiental colombiana (Decreto 02 del 11 de enero de 1982). Puede ser instalado siguiendo el procedimiento descrito en el Anexo D.

Este libro contiene los procedimientos más importantes del Método 1, 2,3 y 4 de la EPA, los cuales hacen alusión en la determinación de puntos de muestreo, velocidad de los gases de chimenea, peso molecular de los gases, y contenidos de humedad, respectivamente, parámetros de mayor importancia en la determinación de emisión de contaminantes (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, material particulado, neblina ácida, entre otros). El Método 5 y 8 de la EPA describen los procedimientos para la determinación de emisión de partículas y neblina ácida respectivamente.

**PÁGINAS:** 140    **ILUSTRACIONES:** 43    **PLANOS:** 0    **CD-ROM:** 1

**DISEÑO DE UN SOFTWARE PARA EL CÁLCULO Y ANÁLISIS DE LOS  
GASES DE LA COMBUSTIÓN EMITIDOS POR FUENTES FIJAS, APLICADO  
AL EQUIPO DE MUESTREO ISOCINÉTICO DE LA U.F.P.S.**

**YESID ARMANDO PEÑARANDA ARÉVALO**

**UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA  
SAN JOSÉ DE CÚCUTA  
2004**

**DISEÑO DE UN SOFTWARE PARA EL CÁLCULO Y ANÁLISIS DE LOS  
GASES DE LA COMBUSTIÓN EMITIDOS POR FUENTES FIJAS, APLICADO  
AL EQUIPO DE MUESTREO ISOCINÉTICO DE LA U.F.P.S.**

**YESID ARMANDO PEÑARANDA ARÉVALO**

**Proyecto de grado presentado para optar al título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director  
ALBERTO FALLA ARIAS  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA  
SAN JOSÉ DE CÚCUTA  
2004**



UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIA



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

FECHA: Cúcuta, 2 de agosto de 2004  
HORA: 10:00  
LUGAR: Laboratorio de fluidos y térmicas  
Plan de estudio: INGENIERÍA MECÁNICA

Título de la tesis: "DISEÑO DE UN SOFTWARE PARA EL CÁLCULO Y ANÁLISIS DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN EMITIDOS POR FUENTES FIJAS PARA EL EQUIPO DE MUESTREO ISOCINÉTICO DE LA UFPS"

Jurados: CARMEN LEONOR BARAJAS FORERO  
LUIS EMILIO VERA DUARTE

Director: ALBERTO FALLA ARIAS

Nombre de los estudiantes	Código	Calificación	
		Letra	Número
YESID ARMANDO PEÑARANDA ARÉVALO	122111	Cuatro, tres	4,3

A P R O B A D A

CARMEN LEONOR BARAJAS FORERO

LUIS EMILIO VERA DUARTE

Vo.Bo. ORLANDO GUTIERREZ LÓPEZ  
Coordinador Comité Curricular

Jeannette C.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de grado lo dedico principalmente a *DIOS*, por haberme dado la vida y por darme la inteligencia y la fortaleza para superar los obstáculos que se presentaron durante la etapa de preparación.

A mis padres, *María Cecilia Arévalo de Peñaranda* y *Ciro Alfonso Peñaranda*, por haberme dado la vida, y por apoyarme siempre y en todo momento moral y económicamente.

A mis hermanos, y a mi novia, por el apoyo moral e incondicional que me brindaron durante la etapa de preparación de la carrera.

## **AGRADECIMIENTOS**

Ingeniero Mecánico y director del departamento de fluidos y térmicas, ALBERTO FALLA ARIAS, por ser guía constante durante la etapa de desarrollo del proyecto.

Ingeniero Mecánico, EMILIO VERA, por colaborarme en la etapa de investigación del proyecto.

Ingeniera Química, CARMEN LEONOR BARAJAS, por explicarme algunos conceptos sobre análisis de laboratorio.

Ingeniero de Sistemas y asesor del proyecto, MANUEL ACEVEDO, por ayudarme a interconectar al programa con otras aplicaciones.

Ingenieros de Sistemas, MILTON VERA Y MABEL HERNÁNDEZ, por algunos consejos sobre programación, base de datos y depuración del software.

Funcionario de CORPONOR, SANTOS OMAR MONSALVE, por explicarme varios artículos del DECRETO 02 DE 1982.

Estudiante de Ingeniería Mecánica, MARCOS LEONARDO CHACÓN, por ayudarme a mejorar la presentación de la interfaz del programa, y por la realización de animaciones (GIFS) para el software y la sustentación del proyecto.

Estudiante de Ingeniería Mecánica, EDWIN CONTRERAS, por realizar los esquemas en SOLID EDGE, para la presentación del programa.

Ingeniero Mecánico, JOSE ORLANDO CAÑAS, por guiarme en la realización del Manual de Usuario y Ayudas.

Profesora, TERESA TENJO, por su gran ayuda en la obtención de los materiales y reactivos necesarios para el análisis de las muestras. Además por prestarme asesoría sobre los procedimientos de laboratorio.

Jefe de los laboratorios de química, ASCENSIÓN ACEVEDO, por facilitarme los elementos necesarios, para el análisis de las muestras recolectadas en las pruebas realizadas con el Equipo Isocinético.

Asistente de laboratorio de química, YOLANDA MEJÍA, por colaborarme en la realización de los análisis de laboratorio.

Tecnólogo Químico, RUBÉN CAMARGO, por colaborarme en el montaje del Tren de Muestreo Isocinético, y en los análisis de laboratorio.

A los Ingenieros Mecánicos, JAVIER PEÑARANDA, CESAR CARRILLO, Y CARLOS TARAZONA, por colaborarme en el montaje de la estructura soporte del tren de muestreo.

## CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>21</b>
<b>1. DISEÑO DE UN SOFTWARE PARA EL CÁLCULO Y ANÁLISIS DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN EMITIDOS POR FUENTES FIJAS, PARA EL EQUIPO DE MUESTREO ISOCINÉTICO DE LA UFPS.</b>	<b>22</b>
<b>1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>22</b>
<b>1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA</b>	<b>22</b>
<b>1.3 OBJETIVOS</b>	<b>23</b>
<b>1.3.1 Objetivo general</b>	<b>23</b>
<b>1.3.2 Objetivos específicos</b>	<b>23</b>
<b>1.4 JUSTIFICACIÓN</b>	<b>23</b>
<b>1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES</b>	<b>24</b>
<b>1.5.1 Alcances</b>	<b>24</b>
<b>1.5.2 Limitaciones</b>	<b>24</b>
<b>2. MARCO REFERENCIAL</b>	<b>25</b>



<b>2.1 ANTECEDENTES</b>	<b>25</b>
<b>2.2 MARCO CONCEPTUAL</b>	<b>25</b>
<b>2.2.1 Aire</b>	<b>25</b>
<b>2.2.2 Área fuente</b>	<b>25</b>
<b>2.2.3 Boquilla de muestreo</b>	<b>25</b>
<b>2.2.4 Condiciones de referencia</b>	<b>25</b>
<b>2.2.5 Contaminantes</b>	<b>25</b>
<b>2.2.6 Emisión</b>	<b>26</b>
<b>2.2.7 Fuente de emisión</b>	<b>26</b>
<b>2.2.8 Fuente fija</b>	<b>26</b>
<b>2.2.9 Impactores</b>	<b>26</b>
<b>2.2.10 Inmisión</b>	<b>26</b>
<b>2.2.11 Muestreo isocinético</b>	<b>26</b>
<b>2.2.12 Norma de calidad del aire</b>	<b>26</b>
<b>2.2.14 Punto de descarga</b>	<b>26</b>

<b>2.2.15 Tubo pitot</b>	<b>27</b>
<b>2.2.16 Válvula de control</b>	<b>27</b>
<b>2.3 MARCO LEGAL</b>	<b>27</b>
<b>2.4 BASES TEÓRICAS</b>	<b>28</b>
<b>2.4.1 Marco teórico</b>	<b>28</b>
<b>3. PROCEDIMIENTOS PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE MUESTREO</b>	<b>39</b>
<b>3.1 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE PUNTOS DE MUESTREO Y UBICACIÓN EN EL ÁREA TRANSVERSAL DE LA CHIMENEA O DUCTO.</b>	<b>39</b>
<b>3.1.1 Localización de los puertos de muestreo en la chimenea o ducto.</b>	<b>40</b>
<b>3.1.2 Determinación de la cantidad mínima de puntos de muestreo.</b>	<b>42</b>
<b>3.1.3 Ubicación de los puntos de muestreo en el área transversal de la chimenea</b>	<b>44</b>
<b>3.2 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD Y FLUJO DE GASES DE CHIMENEA O DUCTOS.</b>	<b>46</b>
<b>3.2.1 Determinaciones preliminares</b>	<b>46</b>
<b>3.2.2 Determinación de la presión estática de la chimenea</b>	<b>47</b>
<b>3.2.3 Ejecución del transverso de velocidades</b>	<b>48</b>

<b>3.3 DETERMINACIÓN DEL PESO MOLECULAR DE LOS GASES DE CHIMENEA O DUCTOS.</b>	<b>51</b>
3.3.1 Determinaciones preliminares	51
3.3.2 Consideraciones para la determinación del peso molecular de los gases.	51
3.3.3 Cálculo del peso molecular seco y húmedo de los gases de chimenea	52
<b>3.4 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS GASES DE CHIEMENA O DUCTOS</b>	<b>53</b>
3.4.1 Determinaciones preliminares	53
3.4.2 Condiciones para la extracción de la muestra de gas	53
3.4.3 Preparación del equipo de muestreo	53
3.4.4 Chequeo de fugas antes del muestreo	54
3.4.5 Operación del tren de muestreo	55
3.4.6 Preparación de los impactores para el pesaje	56
3.4.7 Cálculo del contenido de humedad de los gases	56
<b>3.5 DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO ÓPTIMO DE LA BOQUILLA DE MUESTREO.</b>	<b>59</b>
3.5.1 Determinaciones preliminares	59

<b>3.5.2 Cálculo del diámetro óptimo de la boquilla</b>	<b>60</b>
<b>4. PROCEDIMIENTOS PARA LA DETERMINACIÓN DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES EN FUENTES FIJAS</b>	<b>61</b>
<b>4.1 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y EMISIÓN DE PARTÍCULAS EN CHIMENEAS O DUCTOS</b>	<b>61</b>
<b>4.1.1 Determinaciones preliminares</b>	<b>61</b>
<b>4.1.2 Equipos y componentes necesarios para el muestreo en el campo</b>	<b>62</b>
<b>4.1.3 Condiciones para la realización del muestreo</b>	<b>63</b>
<b>4.1.4 Elementos necesarios para la recolección y recuperación de la muestra</b>	<b>63</b>
<b>4.1.5 Elementos necesarios para el análisis de la muestra</b>	<b>64</b>
<b>4.1.6 Preparación del equipo y elementos necesarios para la recolección de la muestra</b>	<b>64</b>
<b>4.1.7 Chequeo de infiltraciones previo al muestreo isocinético</b>	<b>65</b>
<b>4.1.8 Operación del tren de muestreo</b>	<b>66</b>
<b>4.1.9 Chequeo de fugas después del muestreo</b>	<b>67</b>
<b>4.1.10 Recuperación de la muestra para determinar el total de partículas</b>	<b>68</b>
<b>4.1.11 Almacenamiento del filtro en el contenedor N°1</b>	<b>69</b>

<b>4.1.12 Almacenamiento del lavado con acetona en el contenedor N°2</b>	<b>69</b>
<b>4.1.13 Almacenamiento de la sílica gel en el contenedor N°3</b>	<b>71</b>
<b>4.1.14 Procedimiento de análisis de las muestras</b>	<b>71</b>
<b>4.1.15 Cálculo de la concentración de partículas</b>	<b>72</b>
<b>4.1.16 Cálculo de la emisión de partículas</b>	<b>74</b>
<b>4.2 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y EMISIÓN DE DIÓXIDO DE AZUFRE <math>SO_2</math> Y NEBLINA ÁCIDA (<math>H_2SO_4</math> Y <math>SO_3</math>) EN CHIMENEAS O DUCTOS</b>	<b>75</b>
<b>4.2.1 Determinaciones preliminares</b>	<b>75</b>
<b>4.2.2 Equipos y componentes necesarios</b>	<b>76</b>
<b>4.2.3 Materiales para la recolección de la muestra</b>	<b>77</b>
<b>4.2.4 Materiales para el análisis de las muestras</b>	<b>78</b>
<b>4.2.5 Reactivos y elementos para la recolección y recuperación de la muestra</b>	<b>78</b>
<b>4.2.6 Preparación del tren de muestreo</b>	<b>78</b>
<b>4.2.7 Procedimiento preliminar de chequeo de fugas</b>	<b>79</b>
<b>4.2.8 Operación del tren de muestreo</b>	<b>79</b>

<b>4.2.9 Recuperación de la muestra en el contenedor N°1</b>	<b>81</b>
<b>4.2.10 Recuperación de la muestra de los impactores 2 y 3 en el contenedor N°2</b>	<b>82</b>
<b>4.2.11 Procedimiento de análisis de las muestras</b>	<b>82</b>
<b>4.2.12 Cálculo de la concentración de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y neblina ácida (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y SO<sub>3</sub>)</b>	<b>83</b>
<b>4.2.13 Cálculo de la emisión de SO<sub>2</sub> y neblina ácida</b>	<b>85</b>
<b>5. ESTRUCTURA DEL SOFTWARE</b>	<b>86</b>
<b>5.1 DIAGRAMAS DE FLUJO PARA CADA UNO DE LOS PROCEDIMIENTOS</b>	<b>86</b>
<b>5.1.1 Cantidad y ubicación de los puntos de muestreo</b>	<b>87</b>
<b>5.1.2 Velocidad y flujo de gases de chimenea</b>	<b>91</b>
<b>5.1.3 Peso molecular de los gases de chimenea</b>	<b>92</b>
<b>5.1.4 Contenido de humedad de los gases de chimenea</b>	<b>94</b>
<b>5.1.5 Emisión y concentración de partículas</b>	<b>96</b>
<b>5.1.6 Emisión y concentración de SO<sub>2</sub> y neblina ácida</b>	<b>100</b>
<b>5.1.7 Diámetro óptimo de la boquilla</b>	<b>102</b>

<b>5.2 SEUDOCÓDIGOS PARA CADA UNO DE LOS PROCEDIMIENTOS</b>	<b>103</b>
<b>5.2.1 Cantidad y ubicación de los puntos de muestreo</b>	<b>103</b>
<b>5.2.2 Velocidad y flujo de gases de chimenea</b>	<b>105</b>
<b>5.2.3 Peso molecular de los gases de chimenea</b>	<b>105</b>
<b>5.2.4 Contenido de humedad de los gases de chimenea</b>	<b>106</b>
<b>5.2.5 Emisión y concentración de partículas</b>	<b>107</b>
<b>5.2.6 Emisión y concentración de SO<sub>2</sub> y neblina ácida</b>	<b>109</b>
<b>5.2.7 Diámetro óptimo de la boquilla</b>	<b>110</b>
<b>6. DISEÑO METODOLÓGICO</b>	<b>111</b>
<b>6.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>111</b>
<b>6.2 RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN</b>	<b>111</b>
<b>6.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	<b>112</b>
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>113</b>
<b>8. RECOMENDACIONES</b>	<b>114</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>115</b>

