



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

**“ANALISIS DINAMICO DEL COMPORTAMIENTO
DEL FLUJO ANULAR
MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DE SEÑALES”**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERIA MECANICA

PRESENTA:

M. en C. DOMITILO LIBREROS

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Florencio Sánchez Silva



México D. F. Enero del 2008



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 12:00 horas del día 28 del mes de Enero del 2008 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E. S. I. M. E. para examinar la tesis de grado titulada:

**" ANÁLISIS DINÁMICO DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO ANULAR,
MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DE SEÑALES."**

Presentada por el alumno:

LIBREROS

Apellido paterno

Apellido materno

DOMITILLO

Nombre(s)

Con registro:

B	0	2	1	4	7	5
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante al grado de:

DOCTORADO EN CIENCIAS

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

LA COMISION REVISORA

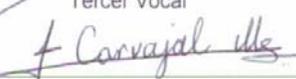
Director de tesis


DR. FLORENCIO SANCHEZ SILVA

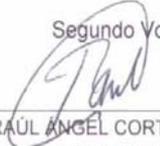
Presidente


DR. MIGUEL TOLEDO VELÁZQUEZ

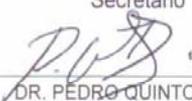
Tercer Vocal


DR. IGNACIO CARVAJAL MARISCAL

Segundo Vocal


DR. RAÚL ÁNGEL CORTÉS MATEOS

Secretario


DR. PEDRO QUINTO DIEZ

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO


DR. JAIME ROBLES GARCIA





**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO**

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D. F., el día 28 del mes de enero del año 2008 el (la) que suscribe **Domitilo Libberos** alumno (a) del Programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica, con número de registro B021475 adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la E.S.I.M.E. Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor(a) intelectual del presente Trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Florencio Sánchez Silva y cede los derechos del trabajo titulado: Análisis dinámico del comportamiento del flujo anular mediante el procesamiento de señales digitales al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines Académicos y de Investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, graficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: Edificio 4Z Primero piso Departamento de Ingeniería Eléctrica.

dlibbero@ipn.mx

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Domitilo Libberos

Nombre y Firma

*A quien más que tu que me has amado, comprendido, soportado, tolerado...
muchas cosas más.*

¿Qué sería sin ti?

Gracias por todo Gordita

A mis hijos

Christian, Vanesa y Jacqueline

Gracias por su amor

*Agradezco con todo cariño a mi alumno Luis Antonio García Paván por haber confiado en mí
y por toda su dedicación a este trabajo.*

*Sin duda alguna este trabajo está dedicado a las personas que han caminado, caminan y
caminarán conmigo, disfrutando de los momentos buenos y sobre llevando juntos los momentos
difíciles.*

ÍNDICE

Agradecimientos	
Índice	i
Índice de Figuras	iii
Índice de Tablas	vii
Nomenclatura	viii
Resumen	xi
Abstract	xii
Introducción	xiii
CAPÍTULO I GENERALIDADES SOBRE FLUJOS BIFASICOS	1
1.1 Patrones de Flujo	1
1.2 Problemas Que Ocasianan Los Flujos Bifásicos	6
1.3 Contribución Histórica.	7
1.4 Flujo Anular	9
1.5 Diferentes Tipos de Patrones de el Flujo Anular	10
1.6 Caracterización del Flujo Anular	11
1.7 Dispositivo Experimental	11
1.8 Técnica de Medición de la película del Flujo Anular	13
1.9 Distribución de las fases en régimen estático	14
CAPITULO II ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE MEDICION	17
2.1 Arquitectura del sistema de medición	17
2.2 Procesador de señales digitales DSP56F8323	19
2.3 Computadora personal	20
2.4 Programación del sistema de medición	21

2.5 Medición del flujo anular en tiempo real	26
CAPÍTULO III ANALISIS DINAMICO DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO ANULAR	33
3.1 Análisis en el tiempo	33
3.2 Análisis en la frecuencia	43
3.3 Análisis en el tiempo - frecuencia	48
CAPÍTULO IV PRUEBAS EXPERIMENTALES	55
4.1 Patrones de flujo anular en el sistema experimental	55
4.2 Calibración del sensor de proximidad en forma estática.	57
4.3 Pruebas de medición dinámica	59
4.4 Análisis estadístico de la película anular	62
4.5 Análisis de la película anular en el dominio del tiempo y la frecuencia.	64
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
5.1 Conclusiones	73
5.2 Recomendaciones.	76
REFERENCIAS	77
APENDICE A	83
APENDICE B	115
APENDICE C	125
APENDICE D	147
APENDICE E	153

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Patrones y transición de flujos bifásicos.	2
Figura 1.2	Patrones de flujos reales.	4
Figura 1.3	Mapa de los patrones de flujo de Hoogendoorn.	5
Figura 1.4	Diagrama de Baker.	6
Figura 1.5	Patrón del flujo anular.	9
Figura 1.6	Patrón del flujo anular ideal.	10
Figura 1.7	Patrón de flujo anular con tomografía de cámara digital.	10
Figura 1.8	Dispositivo experimental para generar el patrón del flujo anular.	11
Figura 1.9	Diagrama de Mandhane para patrones de flujo en tuberías horizontales.	12
Figura 1.10	Rango de operación del sistema experimental para U_{SL} .	13
Figura 1.11	Rango de operación del sistema experimental para U_{SG} .	13
Figura 1.12	Distribución de los ocho sensores de proximidad.	14
Figura 1.13	Medición no intrusiva de la película líquida del flujo anular.	14
Figura 2.1	Diagrama conceptual del sensor de proximidad.	18
Figura 2.2	Interfaz entre el circuito de proximidad y el DSP.	19
Figura 2.3	Diagrama a bloques del DSP 56F8323.	20
Figura 2.4	Filosofía del diseño de la programación del sistema de medición	21
Figura 2.5	Calibración de la película líquida en forma estática.	22
Figura 2.6	Mediciones estáticas a) vacío b) mitad c) Lleno.	22
Figura 2.7	Algoritmo para realizar la calibración.	23
Figura 2.8	Curva de calibración en forma estática.	24
Figura 2.9	Diseño estructural y física de los electrodos.	24
Figura 2.10	Diagrama de flujo para la captura y tratamiento de la señal	25
Figura 2.11	Algoritmo para determinar la naturaleza del flujo anular.	26
Figura 2.12	Interfaz gráfica en tiempo real de la película líquida.	27
Figura 2.13	Cálculo en tiempo real de las fracciones de líquido y gas.	29
Figura 2.14	Algoritmo para graficar la dinámica de la película anular.	30
Figura 2.15	Algoritmo para graficar las fracciones del área líquida y de gas.	31
Figura 2.16	Algoritmo para la transmisión y recepción de datos DSP vs. PC.	32
Figura 3.1	Series en el tiempo de los ocho sensores.	34
Figura 3.2	Histograma_1 del análisis de las señales de los electrodos.	35
Figura 3.3	Histograma_2 del análisis de las señales de los electrodos.	36
Figura 3.4	Señal obtenida de un sensor (electrodo).	37
Figura 3.5	Comparación de filtro Analógico vs. Digital (Pasabanda).	38
Figura 3.6	Comparación de filtro Analógico vs. Digital (Atenuación).	38
Figura 3.7	Comparación de filtro Analógico vs. Digital (Respuesta al escalón).	39

Figura 3.8	Espesor de la película anular filtrada a una frecuencia de 25 Hz.	40
Figura 3.9	Espesor de la película anular filtrada a una frecuencia de 100 Hz.	40
Figura 3.10	Espesor de la película filtrada a una frecuencia de 150 Hz.	41
Figura 3.11	Espesor de la película filtrada a una frecuencia de 200 Hz.	41
Figura 3.12	Señal con frecuencia de muestreo de 150 Hz.	42
Figura 3.13	Grafica de la señal de un sensor donde se observa la periodicidad.	42
Figura 3.14	Frecuencia fundamental del flujo anular para un sensor.	46
Figura 3.15	Algoritmo para medir la frecuencia fundamenta mediante la TDF.	46
Figura 3.16	Frecuencias fundamentales de los ocho sensores.	47
Figura 3.17	Gráficas de las matrices resultantes.	47
Figura 3.18	Comparación de la señal original vs la reconstruida.	51
Figura 3.19	Algoritmo de Haar para la reconstrucción de la señal.	52
Figura 3.20	Reconstrucción y comparación de la señal en un sensor.	53
Figura 3.21	Comparación del error de la señal medida vs calculada (Comparación del error del Flujo Anular).	54
Figura 4.1	Patrón de flujo anular con $R_g = 70\%$ y $U_{SG} = 20$ m/s y $R_l = 30\%$ y $U_{SL} = 1.5$ m/s.	55
Figura 4.2	Patrón de flujo anular $R_g = 80\%$ y $U_{SG} = 22$ m/s , $R_l = 20\%$ y $U_{SL} = 1.2$ m/s.	56
Figura 4.3	Patrón de flujo anular $R_g = 90\%$ y $U_{SG} = 25$ m/s y $R_l = 10\%$ y $U_{SL} = 1.0$ m/s.	56
Figura 4.4	Figura 4.4 Patrón de flujo anular $R_g = 85\%$ y $U_{SG} = 24$ m/s y $R_l = 15\%$ y $U_{SL} = 1.1$ m/s.	56
Figura 4.5	Sistema de prueba para la medición estática de la película líquida.	57
Figura 4.6	Prueba de las diferentes topología de los electrodos.	58
Figura 4.7a	Comportamiento dinámico de la película del flujo anular.	59
Figura 4.7b	Comportamiento dinámico de la película del flujo anular.	60
Figura 4.8a	Calculo del área líquida y de gas en tiempo real del flujo anular.	61
Figura 4.8b	Calculo del área líquida y de gas en tiempo real del flujo anular.	61
Figura 4.9	Histograma_1 del comportamiento del flujo anular.	62
Figura 4.10	Histograma_2 del comportamiento del flujo anular.	63
Figura 4.11	Histograma_3 del comportamiento del flujo anular.	64
Figura 4.12	Señales del fenómeno anular sin filtrado con filtrado y frecuencias correspondientes.	65
Figura 4.13	Señales sin filtrar, con filtrado y frecuencias correspondientes.	65
Figura 4.14	Señal muestreada a 100ms.	66

Figura 4.15	Señal muestreada a 200ms.	66
Figura 4.16	Señal muestreada a 500ms.	67
Figura 4.17	Señal analizada en el dominio tiempo _ frecuencia.	67
Figura 4.18	Espesor de la película filtrado a 150 Hz	68
Figura 4.19	Espesor de la película con periodo definido.	69
Figura 4.20	Frecuencias fundamentales de un sensor.	69
Figura 4.21	Frecuencias fundamentales de los ocho sensores.	70
Figura 4.22	Comparación de la señal medida vs. La señal reconstruida (Series de tiempo vs. Series de Fourier)	70
Figura 4.23	Cálculo del error de área entre la señal medida y la señal reconstruida. E=0.1857	71
Figura 4.24	Cálculo del error de área entre la señal medida y la señal reconstruida E= 0.0468	71
Figura 5.1	Diagrama a bloques del sistema de identificación del flujo anular (película líquida).	75

FIGURAS EN LOS APENDICES

Figura A.1	Mapa del patrón del flujo para un tubo de 51 mm de diámetro. Tubo horizontal mezcla agua-aire a condiciones atmosféricas. Tabla de Mandhane	85
Figura A.2	Placa de orificio utilizada	85
Figura A.3	Intervalo de valores de U_{SL} para generar el flujo anular	86
Figura A.4	Matriz de pruebas para el experimento con líquido H_2O	87
Figura A.5	Diagrama de flujo para la calibración de instrumentos de la fase líquida	89
Figura A.6	Curva de Calibración para la Placa-orificio 1 (Diámetro placa = 36.5mm, diámetro de la tubería = 50.8mm)	93
Figura A.7	Rango de valores de U_{SG} para generar el flujo anular.	94
Figura A.8	Matriz de pruebas para el experimento con gas	94
Figura A.9	Partes que componen al Tubo de pitot	95
Figura A.10	Tubo de pitot utilizado en la calibración	96
Figura A.11	Colocación correcta del tubo de pitot	96
Figura A.12	Base para el tubo de pitot: a) Vista frontal, b) Vista de lado	97
Figura A.13	Ideal vs. Real: a) Perfil de velocidad Ideal, b) Medición solo del radio pues se espera simetría, c) Perfil de velocidad real, d) Medición en todo el diámetro de la tubería	98
Figura A.14	Medición de la presión en las Tomas de la brida.	99
Figura A.15	Manómetros en U utilizados en la experimentación	99
Figura A.16	Diagrama de flujo para calibración de las placas y la obtención de la U_{SG}	100

Figura A.17	Velocidad promedio en un punto	103
Figura A.18	Explicación lineal de incrementos en. a) Incrementos en r_i circular b) incrementos en r_i lineal c) explicación lineal de incremento en \bar{V}_i	104
Figura A.19	Explicación lineal de incrementos en. a) Incrementos en r_i lineal b) Explicación lineal de incremento en \bar{V}_i	105
Figura A.20	Sección del sistema donde se llevo a cabo la calibración de las placas de orificio	108
Figura A.21	Instrumentación y tubería utilizada en el montaje experimental	110
Figura A.22	Topología de la red	110
Figura A.23	Tanque de agua y compresor	111
Figura A.24	Sistemas de suministro de los fluidos de trabajo	111
Figura A.25	Sistemas de medición y control de los fluidos	111
Figura A.26	Mezclador de fases	112
Figura A.27	Zona de experimentación	112
Figura A.28	Zona de retroalimentación	113
Figura B.1	Protótipo de acrílico	117
Figura B.2	(a) Electrodo circular de $D = 5$ mm. B.2 (b) Electrodo rectangular de 4.5 cm x 6 cm	118
Figura B.3	Diagrama a bloques empleado para la programación del 56f8300 (Medición estática)	119
Figura B.4	Lectura del sensor rectangular a) Vacío b) Lleno	119
Figura B.5	Mediciones obtenidas. a) Vacío b) Mitad c) Lleno	120
Figura B.6	Distintos electrodos a) y b) de sección circular, c) y d) de sección Rectangular	122
Figura. B.7	Diagrama a bloques empleado para la programación del 56f8300 (Medición estática)	123
Figura B.8	Medición no intrusiva	124
Figura B.9	Comparación de la sección real y la medida (polígono formado por líneas azules)	124
Figura B.10	Cableado entre Electrodos y tarjeta de demostración 56F8300	124
Figura C1	Ambiente de Matlab donde se realizó el análisis en el dominio del tiempo, frecuencia y frecuencia-tiempo así como la reconstrucción del fenómeno anular.	146

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Ejemplos de problemas de los flujos bifásicos en la industria.	7
Tabla 1.2	Cronología de la contribución histórica de varios autores y su aportación para el desarrollo de esta ciencia	8
Tabla 2.1	Valores en binario para la selección de los electrodos.	18
Tabla 2.2	Espesor de la película líquida.	24
Tabla 3.1	Matriz de valores discretizados de cada electrodo en el tiempo.	34

ÍNDICE DE TABLAS DE LOS ANEXOS

Tabla A.1	Datos obtenidos	91
Tabla A.2	Promedio de los datos obtenidos	91
Tabla A.3	Valores completos	92
Tabla A.4	Mediciones	101
Tabla A.5	Velocidades puntuales	103
Tabla A.6	Valores obtenidos en la primera medición	106
Tabla A.7	Resultado de análisis para la primera medición	107
Tabla A.8	Condiciones bajo las cuales se llevo a cabo el experimento	109

NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidades
A	Área de la tubería.	m^2
A_G	Área de la sección ocupada por el gas	m^2
A_L	Área ocupada por el líquido	m^2
A_e	Area del electrodo	m^2
a_0	Coefficiente de la pendiente de la recta	
a_1	Coefficiente de la pendiente de la recta	
cmH_2O	Centímetros columna de agua.	cm
C	Capacitancia	<i>farad</i>
C_g	Capacitancia del gas	<i>farad</i>
C_l	Capacitancia del líquido	<i>farad</i>
D	Diámetro de la tubería.	m
D_1	Diámetro a la entrada del codo	mm
D_3	Diámetro de ramificación	mm
D_{10}	Diámetro interno de la placa de orificio.	m
ε	Permeabilidad electrica compleja	siemens por metro
ε''	Factor de pérdida del materiel dieléctrico	
ε_g	Constante dielectrica del aire	
ε_l	Constante dielectrica del agua	
G	Admitancia	<i>siemens</i>
G_G	Densidad de flujo másico del gas	$\frac{kg}{m^2 s}$
G_L	Densidad de flujo másico del líquido	$\frac{kg}{m^2 s}$
g	Gravedad.	$\frac{m}{s^2}$
h_{H_2O}	Columna de agua.	cm
m_a	Masa.	kg
mmH_g	Milímetros columna de mercurio.	cm
m_p	Masa pesada.	kg
m_{real}	Masa real.	kg
P_{at}	Presión atmosférica.	<i>Pascales</i>
P_D	Presión Dinámica.	<i>Pascales</i>
P_T	Presión total.	<i>Pascales</i>
plg	Pulgadas.	plg
Q_g	Caudal del gas.	$\frac{m^3}{s}$
Q_L	Caudal del líquido.	$\frac{m^3}{s}$

R_e	Numero de Reynolds.	Adimensional
R_G	Fracción volumétrica del gas	“
R_L	Fracción Volumétrica del líquido	“
T_A	Temperatura ambiente	°C
T_D	Tiempo de duración del evento	°C
t	Tiempo.	s
$tara$	Tara, o el peso de nuestro tanque.	kg
U_g	Velocidad del gas.	$\frac{m}{s}$
U_P	Velocidad puntual.	$\frac{m}{s}$
U_{SG}	Velocidad superficial del gas.	$\frac{m}{s}$
U_{SL}	Velocidad superficial del líquido.	$\frac{m}{s}$
U_G	Velocidad media de la fase gaseosa	$\frac{m}{s}$
U_L	Velocidad media de la fase líquida	$\frac{m}{s}$
V_{ol}	Volumen.	m^3
Vol_L	Volumen del líquido.	m^3
V_G	Volumen del gas	m^3
V_K	Fracción volumétrica de la fase k	m^3
ω	Frecuencia armónica	hz
W_1	Flujo másico en la entrada del codo	$\frac{kg}{s}$
W_2	Flujo másico en la salida principal del codo	$\frac{kg}{s}$
W_3	Flujo másico en la rama del codo	$\frac{kg}{s}$
W_G	Flujo másico del gas	$\frac{kg}{s}$
W_L	Flujo másico del líquido	$\frac{kg}{s}$
W_T	Flujo másico total de la mezcla	$\frac{kg}{s}$
x	Calidad de la mezcla	
x_1	Calidad másica de la mezcla en la entrada del codo	%
x_2	Calidad másica de la mezcla en la salida principal del codo	%
x_3	Calidad másica de la mezcla en la rama del codo	%
$x_k(t)$	Función muestra o registro muestra.	adimensional
Z	Impedancia	Ω

LETRAS GRIEGAS

Símbolo	Descripción	Unidades
α_L	Fracción volumétrica de líquido	
α_G	Fracción volumétrica de gas	
β	Angulo entre líneas de corriente	°
β	Relación de diámetros (orificio/tubería)	Adimensional
δ_A	Densidad del aire.	$\frac{kg}{m^3}$
δ_{H_2O}	Densidad del Agua.	$\frac{kg}{m^3}$
δ_i	Película líquida en el electrodo correspondiente	mm
ρ	Densidad.	$\frac{kg}{m^3}$
θ_i	Angulo físico del electrodo	°
μ	Media aritmetica de la película líquida	mm(t)
σ^2	Desviación estandar de la película líquida	

SÍMBOLOS MATEMÁTICOS

ΔP	Presión diferencial de mercurio	mmHg
ΔP_{1-2}	Pérdida de presión entre la entrada y la salida principal	Pa
ΔP_{1-3}	Pérdida de presión entre la entrada y la rama del codo	Pa

RESUMEN

Este trabajo de investigación está enfocado a la medición y caracterización de la película líquida en la formación del patrón de flujo anular que ocurre en la conducción de la mezcla agua-aire en tuberías horizontales de 51 mm de diámetro. Para lo anterior se usan ocho observadores dinámicos fijos (sensores de proximidad), de tipo no intrusivo colocados en la periferia del tubo los cuales se encargan de medir dicha película.

El sistema de medición está compuesto de un procesador de señales digitales (DSP), y un circuito de proximidad basado en la tecnología embebida, también se implementa una metodología de calibración basada en las gráficas de Madhane, para medir el comportamiento del flujo anular en el sistema experimental. Ya que no existe un instrumento o patrón de medición para este proceso.

Además se muestra la potencialidad del procesador de señales digitales para la interpretación y reconstrucción de señales en función del tiempo y de la frecuencia ya que este tiene la capacidad para realizar operaciones complejas, aunado a la programación en C se convierte en una herramienta en tiempo real ideal para observar y cuantificar este fenómeno.

Otro punto importante que describe este trabajo es la interfaz Hombre-Maquina, el cual proporciona información al usuario como una herramienta virtual así también el diseño modular.

La medición y caracterización de este fenómeno se lleva a cabo mediante una cámara digital y el sistema de medición, obteniendo series en el tiempo y patrones visuales; creando con esto un banco de datos de cientos de pruebas del sistema experimental.

Las series en el tiempo de la película líquida son interpretadas mediante transformaciones lineales con series de Fourier, donde son analizadas en el dominio de la frecuencia y tiempo, posteriormente son comparadas con las señales originales para detectar la incertidumbre existente en la medición.

Finalmente se describe el prototipo de medición con todas las funciones que realiza para futuras aplicaciones en la instrumentación y control de los flujos bifásicos y multifásicos en el laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada (LABINTAPH) de la SEPI-ESIME.

ABSTRACT

This research is based on the measuring and identification of the liquid film in the formation of the annular flow pattern during the conduction of the mixture water-air in horizontal pipes of 51 mm of diameter. For the above purpose it was used eight solid dynamic observers, non-intrusive proximity sensors, placed on the pipe periphery, which are in charge of measuring the previously mentioned film thickness.

The measuring system is formed by a Digital Signal Processor (DSP) and a proximity circuit based on the embedded technology as well as the implementation of a calibration methodology based on the Madhane map to measure the behaviour of the annular flow in the experimental system due to the lack of measuring instruments or patterns for this process.

The potential of the Digital Signal Processor (DSP) is shown additionally to interpret and reconstruct the signals according to the time and frequency because of the capacity of this device to make complex operations including programming in C, as a result, it becomes an ideal real time tool to observe and quantify this phenomenon.

Another important point described in this project, is the interface Man-Machine which offers information to the user as a virtual tool as well as a modular design.

The measuring and description of this phenomenon is carried out through a digital camera, getting series in the time and visual patterns, creating a data base with hundreds of tests from the experimental system.

The series in the time of the liquid film are interpreted through lineal transformations with Fourier series, where they are analyzed controlling the frequency and time. Subsequently, they are compared with the original signals to detect the uncertainty in the measuring.

Finally, the measuring prototype is described with all its functions for future applications in the instrumentation and control of the two-phase and multiphase flows in the Applied Thermal Hydraulics Engineering Laboratory (LABINTHAP) of the SEPI-ESIME.

Introducción

Cuando fluyen simultáneamente dos fases en un ducto, las fases de los componentes se distribuyen espacialmente formando una variedad de configuraciones, denominadas patrones de flujo que representan al fenómeno de las dos fases.

En los sistemas de tuberías la presencia de estos patrones se puede resumir en flujo de burbujas, de gotas, de películas o bien una combinación de ellas. Por tal motivo es necesaria la investigación de la Reología de los flujos bifásicos para hacer posible la construcción de modelos matemáticos con el fin de predecir con precisión su comportamiento.

La uniformidad de dichos patrones de flujo nunca ocurre debido al carácter aleatorio del fenómeno. Por otra parte los patrones de flujo también dependen de los accesorios presentes en las instalaciones como son: codos para cambio de dirección, bridas en la extensión de tuberías, así como su posición la cual puede ser vertical, horizontal o inclinada es decir de la topología de la instalación.

Las variables que fijan los patrones y que describen el comportamiento de las fases son la velocidad de las fases, el flujo másico, el flujo volumétrico, las fuerzas interfaciales, los tensores originados en la interfase agua-aire y en la pared del recipiente que los contiene, el fenómeno de atomización, la calidad de la mezcla y la fracción volumétrica de las fases.

Finalmente la predicción correcta del patrón de flujo en un sistema de dos fases, es necesaria para garantizar las condiciones estables de operación y para predecir las pérdidas de presión y transferencia de calor y masa en forma adecuada.

MOTIVACION Y OBJETIVOS

El ¿Por qué? investigar este tipo de fenómeno conlleva a plantearse una serie de interrogantes y necesidades que hasta este momento no han sido contestadas con toda precisión y claridad, algunas tienen que ver con:

- La seguridad del funcionamiento de cada uno de los componentes de los procesos que se encuentran relacionados con la presencia de los flujos en dos fases.
- La creación de bancos de datos en cada una de las áreas de aplicación con la finalidad de establecer rangos de operación segura.
- La importancia de la medición de las variables tales como: La fracción volumétrica del gas y del líquido, la velocidad de cada una de las fases, el espesor de la película líquida, la

transferencia de calor, así como la formación de geometrías relevantes, fenómeno de atomización, etc.

- Observar los patrones del flujo gas-liquido en el dominio del tiempo y de la frecuencia a diferentes escalas (ondeletas).
- Estudios de intercambio de masa, momento y energía de las interfaces gas-liquido.
- Estudio de condiciones críticas para cada una de las topologías de diseño en los diferentes procesos.
- En nuestro país se puede observar la carencia de conocimiento sobre esta área aunado a un desarrollo tecnológico nulo.
- El problema de encontrar una ecuación de estado que defina su comportamiento dinámico.

El objetivo de este trabajo se enfoca al estudio y caracterización del fenómeno conocido como flujo anular que ocurre en la conducción de mezclas agua-aire en tuberías horizontales, que el presente caso experimental será de 50.8 mm de diámetro. Tomando en cuenta ocho observadores dinámicos fijos (sensores capacitivos) de tipo no intrusivo colocados en la periferia del tubo, dichos sensores se encargan de medir el espesor de la película líquida para analizar su comportamiento dinámico (tomando en cuenta la magnitud del espesor de la película líquida, en el dominio del tiempo y la frecuencia así como su escalado (ondeletas)).

También se pretende diseñar y construir un dispositivo electrónico basado en un Procesador de Señales Digitales que sea capaz de detectar en tiempo real, la fracción de área ocupada por el gas y el líquido en ductos (tubos) horizontales para reproducir los patrones de flujo en dos fases principalmente el patrón de flujo anular (geometría virtual del flujo anular en tiempo real, series en el tiempo de los ocho sensores, análisis en la frecuencia y análisis en la escala del tiempo y la frecuencia).

JUSTIFICACION

La investigación de los flujos bifásicos a nivel mundial se ha enfocado a la identificación y caracterización del fenómeno físico en los diferentes procesos que interviene, a la creación de bases de datos y a la instrumentación para medir las fracciones volumétricas de los fluidos que conforman a la mezcla bifásica, así como la medición de las velocidades de cada una de las fases, la película líquida, la transferencia de calor y la formación de geometrías relevantes. Desde el inicio de la investigación de este fenómeno, que se reporta a los años cincuenta, la instrumentación ha jugado un papel muy relevante en la identificación de este fenómeno. Por esa razón, en el presente trabajo se muestra el desarrollo de la instrumentación para medir el espesor de la película líquida que se forma en el flujo anular, el cual es un patrón que conforma a la gran gama de estudio de los flujos en dos fases en el contorno interno de un tubo horizontal considerando una mezcla de agua y aire a temperatura ambiente. En la actualidad no existe un medidor de esta naturaleza, para flujo anular, que a partir de la medición del espesor de la película se pueda calcular las fracciones de agua y aire por área en tiempo real. Desde el punto de vista de la instrumentación es la primera vez que se

utiliza un sensor de proximidad para medir películas líquidas implementado en un sistema embebido, aunado a toda la tecnología y herramientas de programación y hardware con que cuenta un procesador de señales digitales, así como al diseño de algoritmos para la medición. Otro problema fundamental que contempla este trabajo es la comprobación de que el fenómeno anular puede ser identificado y reproducido mediante series de Fourier y que a la vez puede determinarse como un fenómeno fractal mediante la transformación de ondeletas.

Por otro lado, y la más importante para el Departamento de Ingeniería Mecánica es crear un área de instrumentación y control para el estudio e investigación de los fenómenos no lineales como lo son los flujos bifásicos o multi-componentes.

El presente trabajo está conformado por cinco capítulos y cinco apéndices, los cuales contienen la siguiente información:

En el capítulo uno se proporciona un panorama de lo que son los flujos bifásicos, los patrones de flujos que se originan en ellos bajo diferentes condiciones de operación, así como de los problemas que ocasionan estos. Se presenta un breve análisis histórico en esta área, se analiza el flujo anular así como los diferentes patrones existentes con su caracterización, finalmente se describe la instalación experimental con las condiciones de operación, basadas en el diagrama de Mandhane para obtener las velocidades superficiales del gas y el agua para reproducir el fenómeno anular.

El capítulo dos se enfoca a la arquitectura del sistema de medición del flujo anular, se presenta el diseño del sistema conformado por el sensor de proximidad y el procesador de señales digitales y sus características, se resalta la importancia que juega la computadora personal como una herramienta virtual para ver e interpretar el fenómeno anular, y la parte fundamental de la calibración en estático y el diseño de los algoritmos de medición de la película líquida y de su área respectiva en tiempo real.

El capítulo tres presenta el marco de referencia del análisis dinámico del fenómeno anular en relación a la determinación de la película anular, esta se presenta como series en el tiempo, para determinar si la naturaleza es o no de tipo estocástico. Se realiza un estudio estadístico a todas las pruebas efectuadas en campo, se determina el ancho de banda del fenómeno anular y este se reconstruye mediante series de Fourier, para compararse con las señales originales y establecer el grado de incertidumbre en la medición de las áreas respectivas, finalmente se presenta el análisis en el dominio del tiempo-frecuencia mediante la transformada de ondeletas.

El capítulo cuatro contempla las pruebas realizadas en el equipo experimental para validar la existencia del flujo anular, las cuales son obtenidas mediante los diagramas de Mandhane y la calibración respectiva del equipo, también se ilustran las pruebas de los sensores de proximidad en estado estático concluyendo con las pruebas dinámicas del flujo anular relacionadas con la película de este.

El capítulo cinco presenta las observaciones y conclusiones del trabajo así como trabajos futuros en esta línea de investigación.

Los apéndices están conformados de la siguiente manera:

Apéndice A. contiene la metodología de calibración del laboratorio de pruebas.

Apéndice B. contiene la metodología de calibración del prototipo para la medición de la película líquida estática.

Apéndice C. contiene el código fuente de todos los programas del diseño del sistema de medición.

Apéndice D. contiene las especificaciones técnicas del sistema experimental.

Apéndice E. contiene resultados de las corridas experimentales.

Capítulo I

Generalidades sobre flujos bifásicos.

La combinación simultánea (mezcla) de dos fluidos inmiscibles en un medio de conducción constituye lo que se conoce como “Flujos en dos Fases” (flujos bifásicos), algunas de las mezclas que se encuentran en las aplicaciones del mundo real son: agua- aire, gas-aceite, gas-lodo, alimentos-agua, mezcla química-agua, etc.

El comportamiento de los flujos bifásicos, en tuberías ha sido ampliamente estudiado tanto para las tuberías verticales, horizontales e inclinadas específicamente para sistemas agua-aire. Esto se ha hecho con muchos fines, entre ellos el de determinar los distintos patrones de flujo que se desarrollan en base a las velocidades de gas y líquido dentro de las tuberías, y para el cálculo de la fracción volumétrica del líquido (hold-up) o retención. La fracción volumétrica del líquido o hold-up, se define como la relación de volumen ocupado por un líquido en un segmento de tubería y el volumen total del segmento de la misma. Uno de los métodos directos para el cálculo de la fracción volumétrica del líquido es a través del uso de imágenes de videos digitales. La importancia del cálculo del hold-up radica en que es necesario para determinar el promedio real de las velocidades lineales de cada fase. Una vez obtenidas estas velocidades se pueden estimar la energía cinética, número de Reynolds, densidad y viscosidad de la mezcla entre otros parámetros que están relacionadas con la transferencia de masa (Benny 1966)[8],[17],[19].

Dependiendo de las velocidades de gas y líquido en los tres tipos de topología de conducción, se pueden observar diferentes patrones de flujo entre los cuales se tiene: flujo de burbuja, flujo slug o tapón, flujo churn o espumoso y flujo anular.

1.1 PATRONES DE FLUJO

Existen principalmente 4 tipos de patrones de flujo para las diferentes topologías de conducción en dos fases, los cuales pueden observarse en la figura 1, que también ilustra ampliamente la transición que hay entre ellos. Los patrones de flujos fueron clasificados por primera vez por Alves en 1954, para el caso de tuberías Horizontales [17], [24].

Los flujos bifásicos se distinguen de los flujos monofásicos por la presencia de fuerzas interfaciales internas en movimiento, lo cual hace que el análisis sea más complicado que en los flujos monofásicos [31], [34].

El flujo bifásico en conducción adquiere diversas configuraciones que son caóticas y difíciles de clasificar. Básicamente los patrones de flujo se definen de acuerdo a la similitud de la geometría interfacial y a los mecanismos que dominan la caída de presión, así como la transferencia de calor y de masa [19].

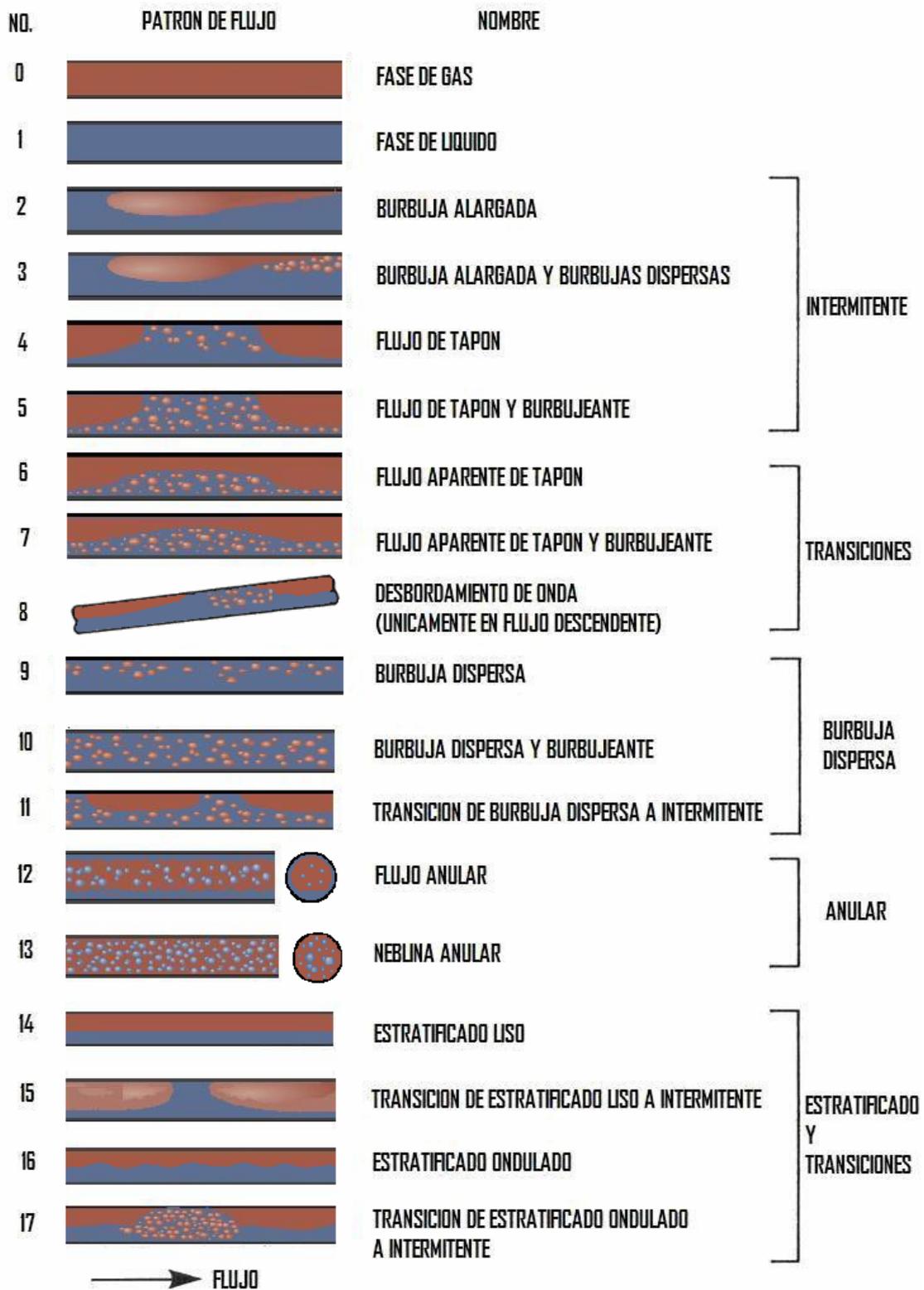


Figura 1.1 Patrones y transición de flujos bifásicos [13]

Flujos dominados por el gas

Flujo Estratificado. En este régimen de flujo, el líquido se mueve en la parte baja del tubo con el gas moviéndose en la parte superior, sin entremezclarse entre las dos fases. A velocidades bajas de gas y de líquido, la interfase es lisa y el régimen de flujo se llama estratificado liso. Con un aumento en el caudal de gas, la interfase llega a ser ondulada y el régimen de flujo se llama estratificado ondulado, la interfase tiene este aspecto debido a la ondulación en la superficie líquida viajando en la dirección del flujo.

Flujo Anular. Este régimen ocurre a caudales altos de gas, debido a que las fuerzas superficiales predominan sobre las fuerzas gravitacionales, donde el líquido forma una película delgada alrededor de la pared del tubo. Cuando el caudal del gas es relativamente bajo, la mayoría de este líquido viaja a lo largo de la parte baja del tubo, incluso a caudales más altos de gas, pequeñas gotas de líquido se desprenden de la película y se dispersan dentro de la fase de gas formando el fenómeno de atomización. Un caso especial de este flujo es aquel en donde hay una película de gas-vapor adherida a la pared y un núcleo líquido en el centro. A este patrón se le denomina Flujo Anular Inverso y aparece solo en fenómenos de ebullición en películas estables subenfriadas [1], [2], [3], [4], [5].

Flujo Intermitente. Este flujo está formado por tapones del líquido y grandes burbujas de gas que son normalmente mucho más largas que un diámetro del tubo. Los tapones del líquido se mueven a una frecuencia promedio que depende de las velocidades superficiales de líquido y del gas, las longitudes del tapón y de la burbuja varían de una manera aleatoria. El régimen de flujo intermitente se divide en cuatro regímenes distintos dependiendo de la fracción volumétrica del gas en el tapón del líquido.

Burbuja alargada (EB). Este patrón de flujo es un caso de limitación del flujo intermitente, los tapones líquidos se encuentran libres de burbujas de acuerdo como se muestra en la figura 1.1. La burbuja de gas generalmente se aerodinámica, el flujo de líquido debajo de la burbuja es similar al flujo bifásico estratificado liso mientras que el flujo en el tapón líquido es básicamente laminar. La parte posterior de la burbuja a veces se desprende del cuerpo principal de la burbuja y es recogida por la burbuja siguiente.

Burbuja alargada con burbujas dispersas (EDB). Cuando se aumenta la velocidad de la mezcla, las burbujas dispersas comienzan aparecer en el borde principal del tapón. El aspecto de las burbujas dispersas en el tapón se asocia a la transición del gas en el tapón. La parte frontal del tapón se convierte en una zona pequeña de mezcla turbulenta en donde se generan las burbujas dispersas, como se puede observar en la figura 1.1.

Tapón (slug)(SL). El flujo tapón es una continuación del régimen de flujo de EDB con una fracción volumétrica de gas en el tapón líquido mayor al 10%, es decir, la transición del flujo EDB al flujo SL ocurre cuando la fracción volumétrica de gas en el tapón es del 10%. Esta condición generalmente corresponde con la velocidad $V_m = 1.5$ a 2.4 (m/s). El nivel de turbulencia en el

tapón aumenta y la capa líquida debajo de la burbuja de gas exhibe una interfase similar al flujo estratificado ondulado con pequeñas burbujas dispersas. Las longitudes del tapón y de la burbuja varían de una manera aleatoria, así como la frecuencia del tapón.

Tapón burbujeante (SLF). En este patrón de flujo, el líquido del tapón y la película son burbujeantes debido a la turbulencia, este fenómeno se observa a altos caudales de gas y líquido. El líquido en el tapón tiene características similares al régimen de flujo burbujeante. La transición del flujo de SL al flujo de SLF ocurre a una $V_m = 4$ a 5 (m/s) con una fracción volumétrica de gas en el tapón $\approx 30\%$.

Flujos dominados por el líquido

En esta región el líquido es la fase dominante con el gas dispersado en él.

Burbuja dispersa (DB). La fase de gas se encuentra dispersa en pequeñas burbujas en una fase continua líquida. A relativamente bajos caudales de gas estas burbujas están situadas cerca de la parte alta del tubo debido a la flotabilidad, pero a altos caudales de gas las burbujas se dispersan más uniformemente. El tamaño de la burbuja varía algunos milímetros de diámetro.

Burbujeante (DBF). Este régimen se observa a altos caudales de gas y de líquido que al entremezclarse es imposible detectar cual es la fase dispersa. Este régimen de flujo se asocia con altas caídas de presión y también es referido como flujo agitado (churn) por muchos observadores [17], [19], [38].

En la figura 1.2 se muestran algunos patrones reales, los cuales aparecen en los sistemas de conducción horizontal, tomando en cuenta mezclas agua – aire.

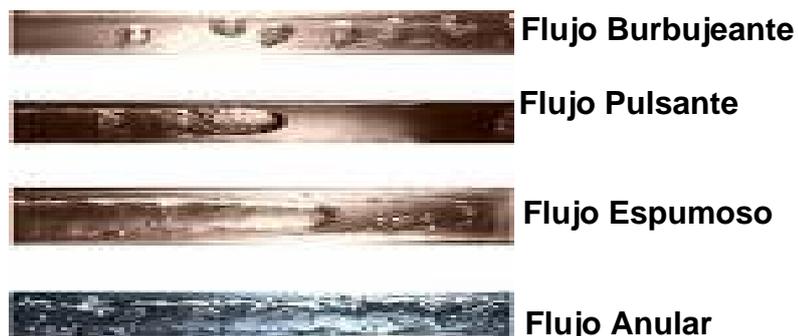


Figura 1.2. Patrones de flujo reales [19]

A continuación se proporciona algunos antecedentes relacionados con la investigación sobre los patrones de flujo bifásicos [35], [36], [38]:

Kosterin (URSS, 1949). Utilizó una mezcla de agua y aire en tuberías horizontales de 25 mm (1 pg) a 100 mm (4 pg) de diámetro interior, caracterizando por vez primera, en forma visual cada uno de los patrones de flujo.

Bergelin & Gazly (USA, 1949). Trabajaron con una mezcla de agua aire en tuberías horizontales de 25 mm (1 pg), su clasificación también fue realizada en forma visual.

Kozlov (1954). Experimentó en tuberías verticales con sistemas de dos componentes, en tuberías de 25 mm (1 pg) de diámetro, obteniendo en forma visual cada uno de los patrones de flujo, también calculó las velocidades del líquido y del gas para la formación de estos.

Hoohendoorn (1959) Propuso un modelo a partir de experimentos realizados con varios líquidos, entre ellos el agua, y empleando aire y vapor de freón 11 como fase gaseosa. Concluyó que la densidad del gas no influye significativamente en la transición de los patrones de flujo. Además propuso la construcción de un mapa o carta del comportamiento de cada uno de los patrones de flujo, el cual tiene como coordenadas a la velocidad superficial del líquido en el eje de las abscisas y a la velocidad superficial del gas en el eje de las ordenadas, la figura 1.3 muestra este mapa.

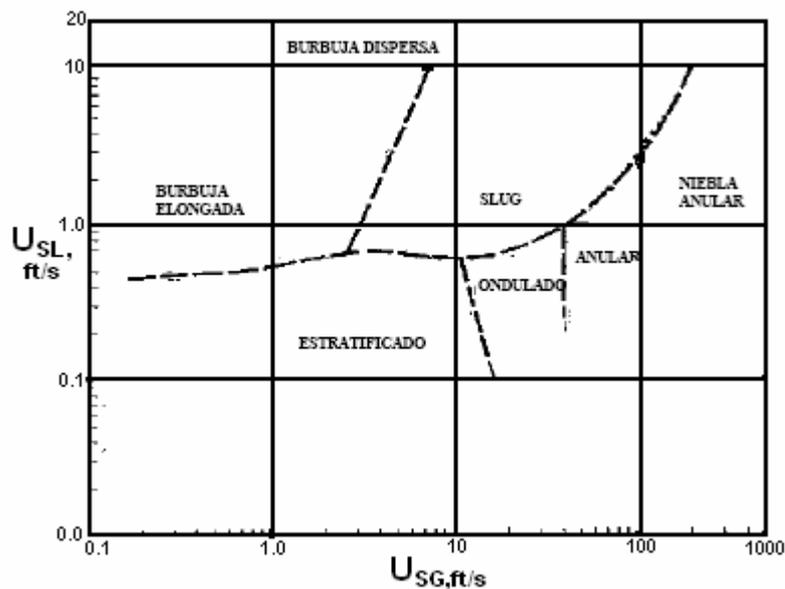


Figura 1.3. Mapa de los patrones de flujo de Hoohendoorn

Bennett et al. (1965). Reportaron experimentos en un sistema agua-vapor a presiones altas en condiciones de flujo completamente desarrollado y en estado permanente. Los regímenes de flujo se observaron con fotografías y las condiciones de flujo fueron generadas por adición de calor al agua pura, inmediatamente antes de la sección visual.

Baker (1954,1960). Buscó datos de una variedad de fuentes y realizó una carta de regímenes de flujo que ha sido largamente considerado como un diagrama muy representativo para flujo horizontal. Esta gráfica, modificada por Scott (1963) se muestra en la figura 1.4. Los parámetros utilizados son G_G y G_L . En donde G_G y G_L son los flujos másicos por unidad de área del gas-vapor y del líquido, respectivamente, basados en el área total de la sección transversal de la tubería.

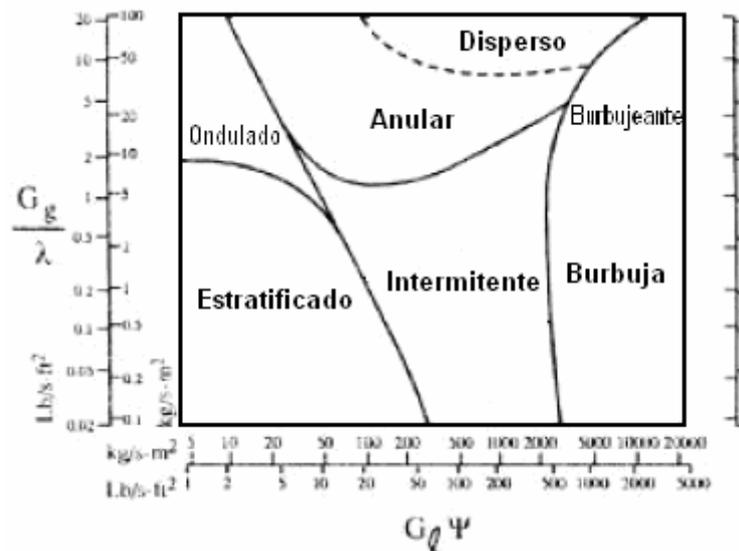


Figura 1.4. Diagrama de Baker.

En un estudio experimental Kokal en 1987 detectó varios patrones de flujo con un método que se consideró objetivo y permitió su correcta identificación. El mapa del patrón de flujo se ha dividido en tres regiones básicas de flujo: los flujos dominados por el gas, intermitentes y dominados por el líquido [19].

1.2 PROBLEMAS QUE OCASIONAN LOS FLUJOS BIFASICOS

La necesidad de contar con métodos de diseño confiables ha sido el elemento motor del gran esfuerzo que se ha venido desarrollando en la investigación en el campo de los fluidos bifásicos. Esta gran labor se ha efectuado en universidades, laboratorios privados e institutos de investigación tanto públicos como privados en muchos países del mundo; sin embargo, la información que existe actualmente aún no satisface las expectativas de los ingenieros en diseño.

La importancia de los flujos bifásicos y multifásicos se derivan de la amplia gama de problemas de la ingeniería donde se encuentra este tipo de fenómeno. Para tener una idea general, en la tabla 1 se presenta algunas de las aplicaciones y problemas con los flujos bifásicos [8], [17], [24], [30], [35].

Tabla 1.1 Ejemplos de problemas de los flujos bifásicos en la industria

Sistema	Aplicación	Problemas de diseño
Termosifón	Industria: petrolera, alimentación, química y de procesos	Pérdida de presión, transferencia de calor
Tuberías de reactores químicos	Procesos petroquímicos e industria química en general	Pérdidas de presión, distribución del tamaño y velocidad de gotas, distribución del tiempo de residencia, transferencia de masa interfacial
Calentadores de fuego directo, condensadores horizontales.	Industria petrolera, procesos industriales, plantas de energía eléctrica	Pérdida de presión, coeficiente de transferencia de calor en las paredes, estabilidad del sistema
Transporte de Petróleo y gas	Transporte de petróleo-gas de plataformas y transporte por superficie.	Pérdida de presión, resonancia, vibración, inestabilidad de flujo.
Plantas geotérmicas	Transporte de la mezcla bifásica a través de la tubería	Pérdidas de presión, vibración resonancia, inestabilidad de flujo, determinación de aguas arrastradas a las turbinas
Producción de Energía Eléctrica con reactores nucleares	Sistema de emergencia para el enfriamiento del núcleo	Pérdidas de presión, generación y arrastre de gotas, determinación y distribución del tamaño de las gotas, calentamiento crítico

Estos son sólo algunos ejemplos en los cuales se encuentran involucrados los flujos bifásicos. Se puede remarcar que el factor común es que se necesita una mejor comprensión del comportamiento de las mezclas bifásicas para mejorar los diseños y poder evitar accidentes y minimizar costos de infraestructura [17], [18].

1.3 CONTRIBUCION HISTORICA

A continuación se ilustra mediante la tabla 1.2 de manera cronológica, algunos de los investigadores que han contribuido en el estudio de los flujos en dos fases, esta tabla solo representa algunas de las contribuciones que han sido consideradas más relevantes.

Tabla 1.2 Cronología de la contribución histórica de varios autores y su aportación para el desarrollo de esta ciencia.

FECHA	AUTOR'S	CONTRIBUCIONES
1949	Lockhart & Martinelli	Determinación del ancho de los cuatro patrones
1949	Bergelin & Gazley	Discusión de los patrones de flujo con énfasis en su comportamiento ondulatorio.
1949	Kosterin	Desarrollo de la correlación de patrones de flujo.
1952	Johnson & Abou-Sabe	Presentan mapa de patrones de flujo.
1954	Alves	Clasifica ocho patrones de flujo en forma separada.
1954	Baker	Obtiene ecuaciones para siete patrones de flujo.
1955	White & Huntington	Presentan mapa de patrones de flujo
1957	Brigham, Holstein, & Huntington	Estudian patrones de flujo.
1958	Chisholm & Laird	Reportan flujo semi anular.
1958	Sobocinski & Huntington	Observan en la subida de líquido en las paredes de un tubo la formación de flujo semi anular.
1959	Hoogendoorn	Obtiene descripciones detalladas de patrones de flujo y provee ecuaciones para pérdida de presión.
1963	Al-Sheikh	Realiza estudios en computadora de patrones de flujo y deriva 25 correlaciones.
1966	Knowles	Presenta tesis sobre estudio de patrones de flujo.
1966	Knowles, et al	Clasifica 8 categorías de patrones de flujo
1968	Calderon	Estudia la confiabilidad del mapa de patrones de flujo de Baker y concluye que no es confiable.
1973	Beggs & Brill	Presentan un rango completo de patrones de flujo de estudio de laboratorio.
1972	Govier & Aziz	Edita un libro con discusiones detalladas.

1.4 FLUJO ANULAR

El flujo anular está caracterizado por una película líquida continua localizada en la pared del recipiente que lo contiene, con un núcleo de gas con brumas de gotas líquidas. El flujo anular se encuentra en muchas aplicaciones prácticas, tales como los evaporadores de película líquida y en la mayoría de los sistemas de agua-vapor a alta presión. Este fenómeno es difícil de analizar debido al gran número de fuerzas dinámicas diferentes y comparables que deben tomarse en cuenta. Los efectos viscosos e inerciales son importantes dentro de la película líquida; las fuerzas de tensión superficial controlan la estabilidad de la película líquida y su interfase, así como el arrastre del gas a lo largo de la película la cual determina su movimiento; finalmente, cerca de la transición slug-anular, la gravedad determina si el flujo se encuentra en la parte superior o inferior del recipiente que lo contiene, en la figura 1.5 se puede observar el patrón del flujo anular [1],[2],[3],[4],[5].

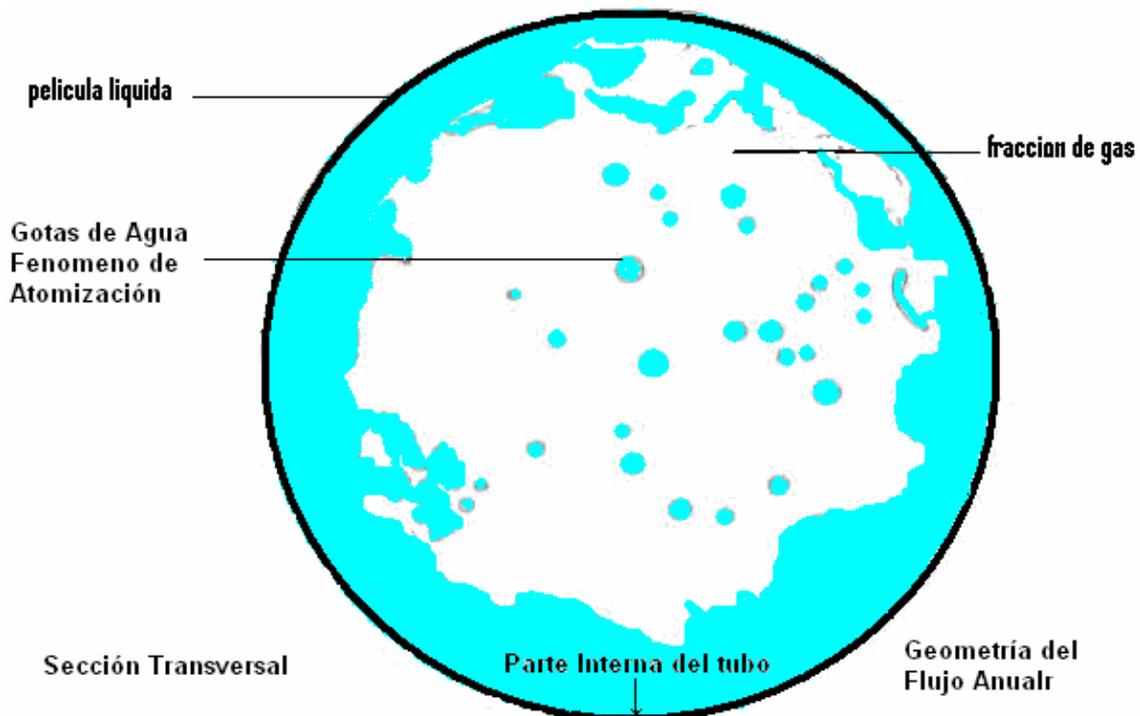


Figura 1.5 Patrón del flujo anular

1.5 DIFERENTES TIPOS DE PATRONES DE EL FLUJO ANULAR

Existen tres tipos de patrones de flujo anular y son:

- Transición de flujo slug a anular.* Este tipo de patrón consiste de una película líquida con ondas largas y de amplitud irregular, conocido como un sistema inestable o de ondas torres, la amplitud de estas ondas decrece con el incremento de la fracción volumétrica del gas.

- b. *Flujo Anular ideal* este tipo de patrón se forma cuando la fracción volumétrica del gas es muy grande en comparación con la fracción volumétrica del líquido, formando un patrón de flujo anular ideal (ver figura 1.6). Este tipo de patrón nunca ocurre en la naturaleza pues supone que la película es lisa y que no hay gotas en el núcleo, mas sin embargo ha sido utilizado ampliamente para obtener modelos de los patrones de velocidad y de las fracciones volumétricas de la parte líquida y de gas.
- c. *El tercer patrón* es muy parecido al del inciso a. solamente que en el núcleo de gas existe un fenómeno de automatización, de la película líquida formando gotas de diferente diámetro en dicho núcleo, este patrón se ilustra en la figura 1.5 [9], [11], [13], [14], [15].

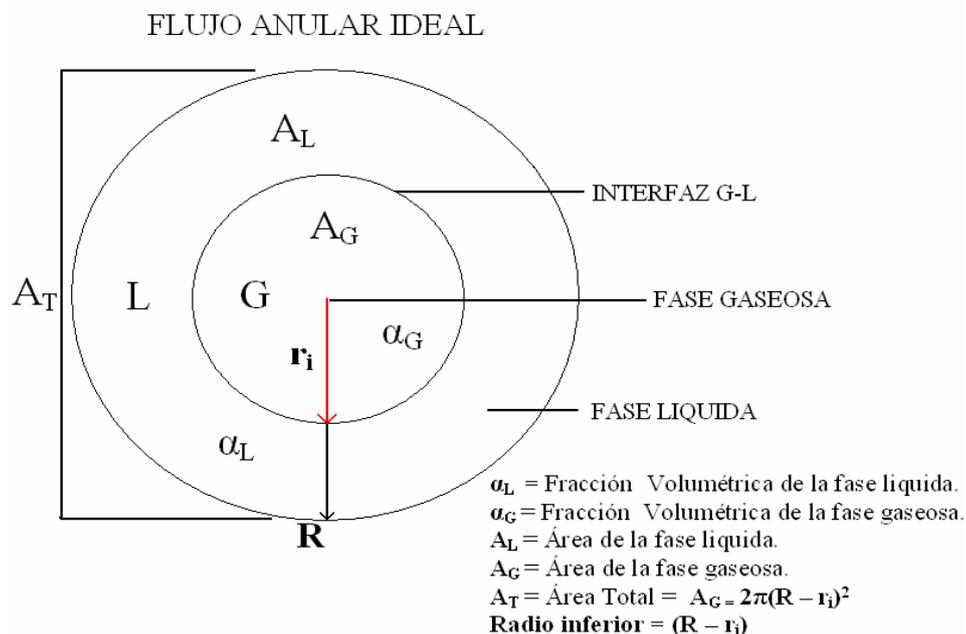


Figura 1.6 Patrón de flujo anular ideal.

Una de las aproximaciones mas exactas en la identificación del flujo anular es aquella que se ha realizado con la tomografía con cámara digital, en la cual se puede observar con gran definición la topología geométrica de este en el tiempo t_i , tal y como se ilustra en la figura 1.7



Figura 1.7 Patrón de flujo anular con tomografía de cámara digital

La limitación de este método es que no describe su desarrollo dinámico en los siguientes instantes del tiempo, es decir que el fenómeno anular varía

en cada instante de tiempo de acuerdo a todas las fuerzas y condiciones a que esta sujeto en el momento de la observación. A primera vista se puede decir que el fenómeno anular es un fenómeno no lineal con característica principal de ser aleatorio espacial y temporal [9], [11], [13].

1.6 CARACTERIZACION DEL FLUJO ANULAR

La primera parte de este trabajo está enfocado a la descripción del flujo anular considerando la mezcla utilizada para generar ha dicho patrón así como de la topología de la conducción.

La mezcla empleada es de agua-aire la cual es la más común de manejarse en forma experimental en un tubo horizontal de diámetro de 51 mm. Así como de los dispositivos para mantener durante un cierto tiempo el patrón del flujo anular, con la finalidad de diseñar e implementar un prototipo que permita caracterizar al patrón de flujo anular [13], [14], [15].

1.7 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El diagrama del dispositivo experimental que se utiliza en este estudio se muestra en la figura 1.8, está compuesto por un tubo de acrílico de 51 mm de diámetro, de 3 m. de longitud (zona de experimentación), por dos tanques de almacenamiento de agua con una capacidad de 550 litros y de 1050 litros de agua respectivamente, el compresor de aire proporciona una presión de 2 bars constantes durante 2 minutos aproximadamente, con la finalidad de mantener el patrón del flujo anular, en ese tiempo.

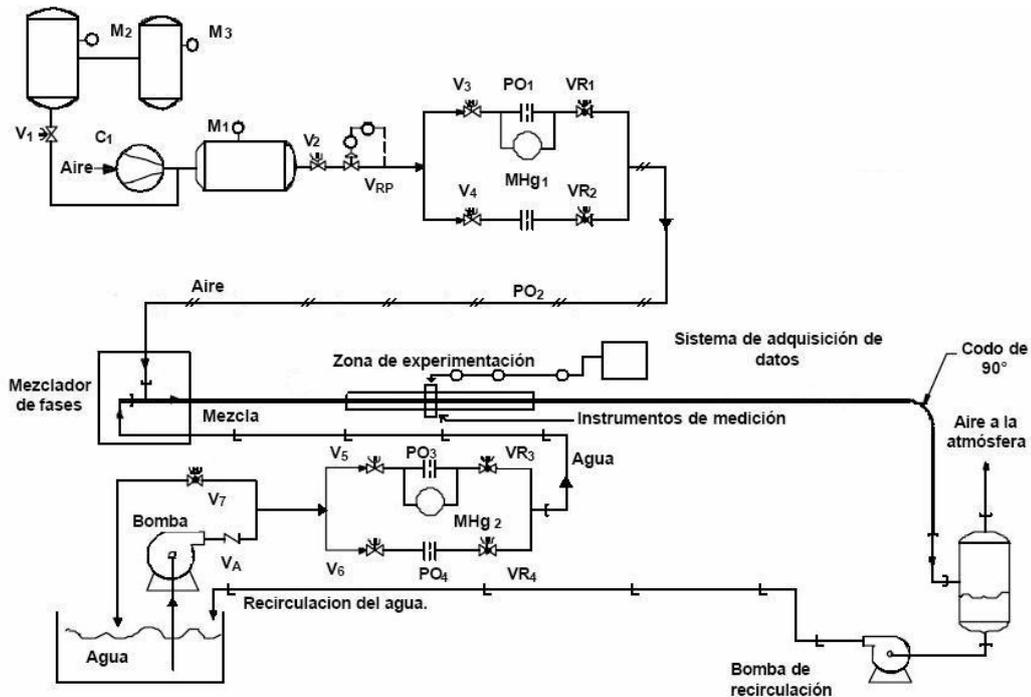


Figura 1.8 Dispositivo Experimental para generar el patrón del flujo anular

La calibración así como la descripción técnica de cada uno de los componentes se proporciona en el apéndice A. Para generar el patrón del flujo anular en una tubería horizontal de las características mencionadas anteriormente se basa en el diagrama de Madhane el cual se muestra en la figura 1.9, este diagrama ilustra claramente los intervalos de valores de la velocidad superficial del gas (U_{SG}) y de la velocidad superficial del liquido (U_{SL}), los cuales constituyen la parte medular para producir el patrón de flujo anular [18], [19].

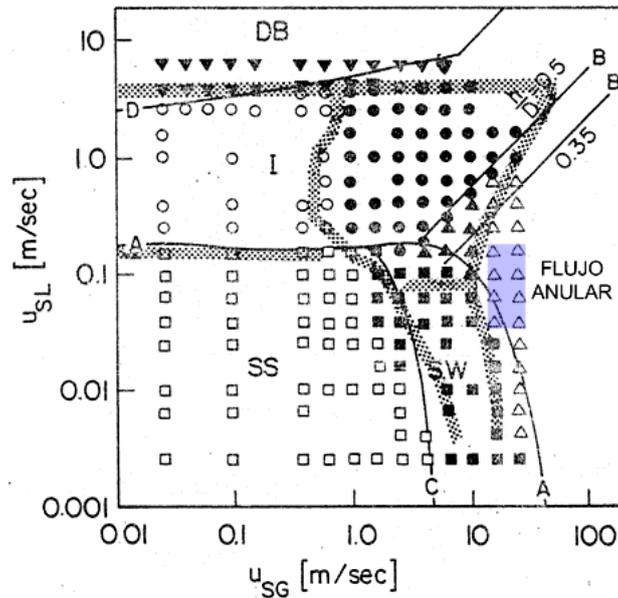


Figura 1.9 Diagrama de Madhane para patrones de flujo en tuberías horizontales.

Como se puede observar en dicha figura los rangos de operación del patrón de flujo anular están comprendidos por:

$$10 \text{ [m/s]} \leq U_{SG} \leq 150 \text{ [m/s]}; \text{ para la velocidad superficial del gas}$$

$$0.001 \text{ [m/s]} \leq U_{SL} \leq 7 \text{ [m/s]}; \text{ para la velocidad superficial del líquido}$$

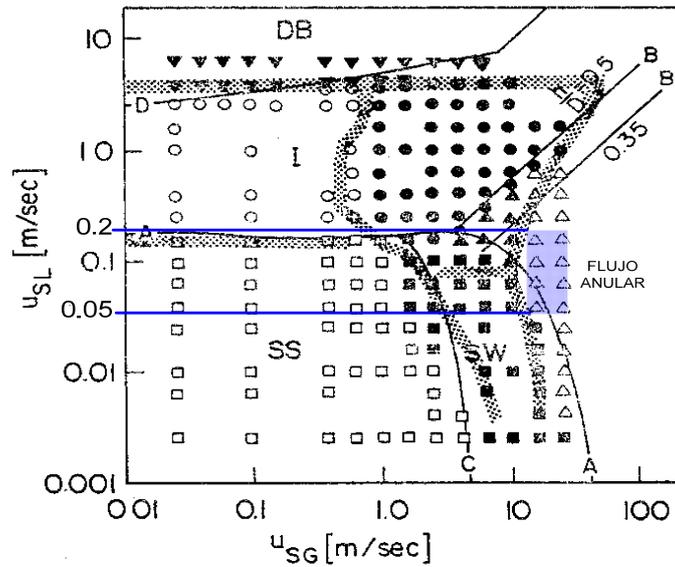
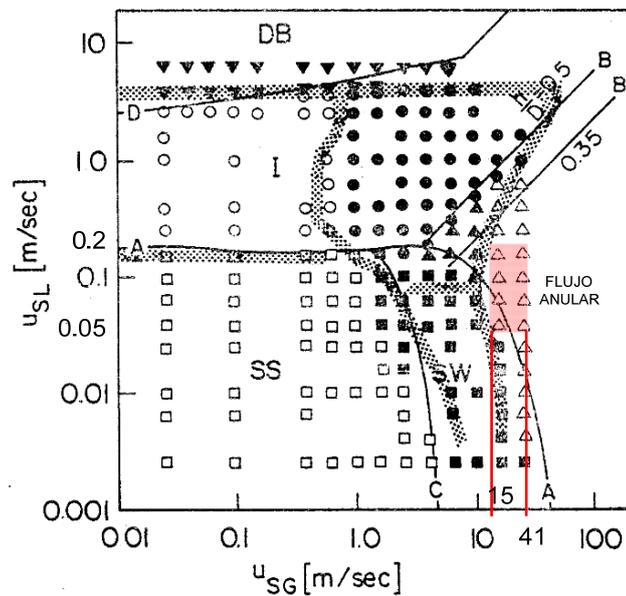
Para el sistema experimental que nos ocupa, los rangos de operación obtenidos se ilustran en las figuras 1.10 y 1.11. Y están comprendidos por:

$$0.05 \text{ [m/s]} \leq U_{SL} \leq 0.2 \text{ [m/s]}; \text{ para la velocidad superficial del líquido}$$

$$10 \text{ [m/s]} \leq U_{SG} \leq 41 \text{ [m/s]}; \text{ para la velocidad superficial del gas}$$

Por otro lado, la temperatura a la cual son realizadas las pruebas experimentales varían de:

Rango de temperatura [°C]: [19°C a 21°C] temperatura ambiente.

Figura 1.10 Rango de operación del sistema experimental para U_{SL} Figura 1.11 Rango de operación del sistema experimental para U_{SG}

1.8 TÉCNICA DE MEDICIÓN DE LA PELÍCULA DEL FLUJO ANULAR

La técnica de medición de la película líquida del patrón de flujo anular en el sistema experimental descrito en el inciso anterior, es de tipo no intrusivo y está compuesta por ocho sensores de proximidad los cuales se encuentran distribuidos en la periferia del tubo tal y como se ilustra en la figura 1.12 [60], [61], [62], [63], [64], [65], [66].

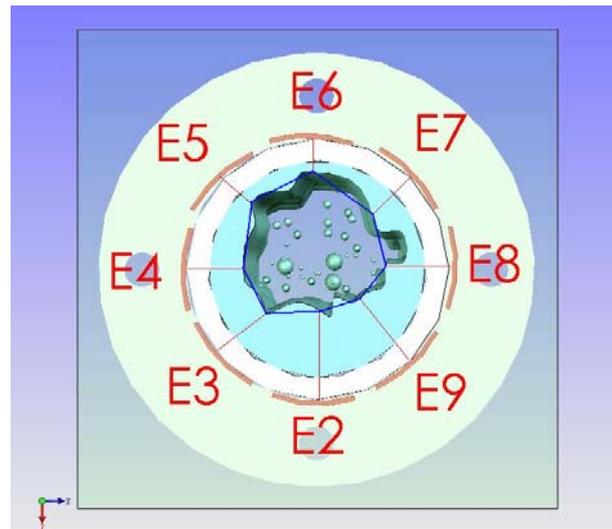


Figura 1.12 Distribución de los ocho sensores de proximidad

Cada uno de estos sensores mide la película líquida en dicho punto los cuales son integrados para la reconstrucción de la sección transversal de la película tal y como se muestra en la figura 1.13.

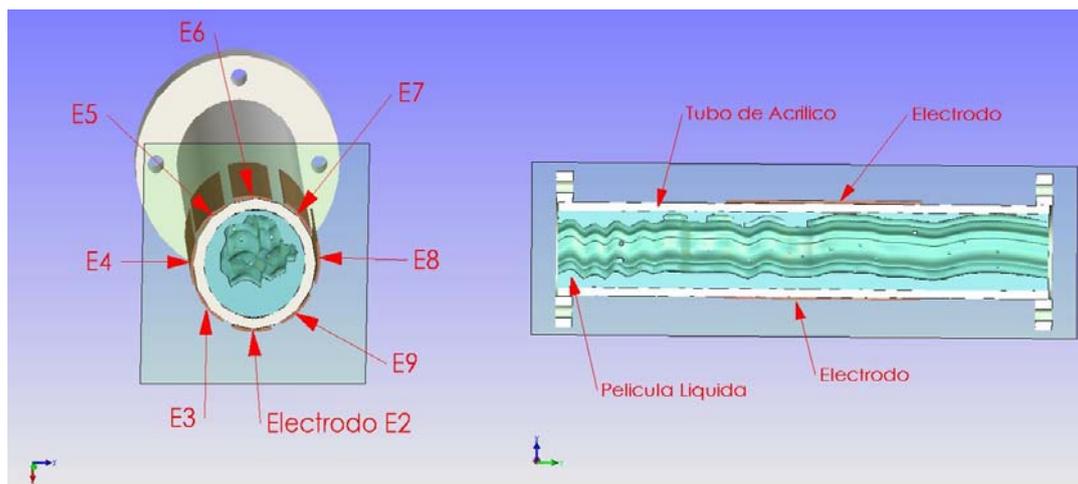


Figura 1.13 Medición no intrusiva de la película líquida del flujo anular

Para medir este fenómeno en tiempo real hay que tomar en cuenta las siguientes características a saber:

- Que el sensor tenga la suficiente sensibilidad para poder medir el fenómeno.
- Y que su respuesta sea tal que permita medir y calcular los parámetros de interés a dicho régimen.

1.9 DISTRIBUCION DE LAS FASES EN REGIMEN ESTATICO

Recordar que en física básica la relación entre la capacitancia y la permitividad de un material situado entre las placas de un capacitor de placas paralelas esta dado por:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (1.1)$$

En donde C es la capacitancia, ε es la permitividad del material, A es el área de los electrodos y d es la separación entre ellos, los valores para este sistema experimental son:

$d = 50.1$ mm; distancia entre los electrodos

$\varepsilon_g = 1$; constante dieléctrica del aire

$\varepsilon_l = 80$; constante dieléctrica del agua

$A_e =$ Área del electrodo, ésta depende de la forma geométrica

Para un campo eléctrico que oscila armónicamente a una frecuencia ω se introduce el concepto de permitividad dieléctrica¹ compleja, permitiendo que en la ecuación 1.1 ε se convierta en compleja es decir se tiene que:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1.2)$$

Con lo que se transforma en

$$C = \varepsilon' \frac{A_e}{d} - j\varepsilon'' \frac{A_e}{d} \quad (1.3)$$

La parte real corresponde a la permitividad del campo constante a que se refiere la ecuación (1.1), y el término imaginario se debe al factor ε'' conocido como factor de pérdida del material dieléctrico, porque representa la pérdida de energía que los dipolos eléctricos presentan por fricción al tratar de alinearse con la dirección cambiante del campo eléctrico. Ahora bien, la impedancia de un capacitor está dada por:

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \quad (1.4)$$

O alternativamente, la admitancia por:

$$G = \frac{1}{Z} = j\omega C \quad (1.5)$$

Sustituyendo (1.3) en (1.5) se obtiene

$$G = \omega \frac{A}{d} \varepsilon'' + j\omega \frac{A}{d} \varepsilon' \quad (1.6)$$

O también

(1) Capacidad de polarización de un medio en presencia de un campo eléctrico externo. Constante de proporcionalidad entre el campo eléctrico externo aplicado y el desplazamiento eléctrico.

$$G = w \frac{A}{d} \varepsilon'' + jwC \quad (1.7)$$

Lo que se interpreta que la admitancia de un capacitor con permitividad compleja está formada por dos términos: una parte imaginaria que corresponde a un capacitor con dieléctrico “perfecto”, es decir sin pérdidas; y una parte real que representa las pérdidas dentro del dieléctrico.

Entonces las capacitancias medidas con cada flujo en forma independiente están dadas por:

$$C_l = \varepsilon_l K \quad y \quad C_g = \varepsilon_g K \quad (1.8)$$

Donde K es una constante que depende de la geometría de los electrodos y de la separación entre ellos así como de la permitividad correspondiente. Cuando ambos fluidos se mezclan en un medio de conducción, provocan que se lea una capacitancia con un valor correspondiente a dicha mezcla, la cual depende del área de cada fase. La fracción de área de cada fase está definida por:

$$\alpha_l = \frac{A_l}{A_l + A_g} \quad \alpha_g = \frac{A_g}{A_l + A_g} = 1 - \alpha_l \quad (1.9)$$

Como se puede observar, la capacitancia varia linealmente con el contenido de área de alguno de los componentes, para este trabajo el componente considerado es el agua. La curva de calibración mediante esta técnica de medición corresponde a:

$$C = f(\varepsilon_l, \alpha_l) \quad (1.10)$$

Como se puede observar de esta ecuación, la medición de la capacitancia depende no solamente de la ubicación del electrodo si no que también de la distribución de la fase líquida. La calibración mediante esta técnica se describe en el apéndice B [67].

La figura 1.13 presenta el marco de referencia del sistema de medición el cual plantea una serie de interrogantes que se resuelven en este trabajo y son:

- De que tamaño son las amplitudes de la película líquida según la ubicación del electrodo.
- Que la película líquida tiene un comportamiento ondulatorio, y está compuesta por muchos sub armónicos.
- Que las longitudes de onda parecen ser mayores que las amplitudes de las películas.
- Que los espacios entre las ondas no son uniformes.
- Que el espacio entre las ondas decrece conforme el flujo del líquido se incrementa y el flujo del gas se decrementa.
- Cual es el rango de frecuencias que constituyen al flujo anular.

Capítulo II

Arquitectura del sistema de medición

Este capítulo está dirigido al diseño y análisis de la Arquitectura del sistema de medición del flujo anular, la parte medular de este sistema lo constituye el procesador de señales digitales cuyas siglas en inglés son DSP, este es una de las tecnologías más poderosas de principios del siglo XXI, se han realizado cambios revolucionarios con el uso de esta herramienta en áreas como la espacial, telecomunicaciones, medicina, comercial, telefónica, militar, industrial y científica donde ha desempeñado un papel de gran importancia. El único tipo de dato que manejan estos son las señales, las cuales son originadas por diferentes tipos de sensores del mundo real, en este caso son señales eléctricas que provienen de los sensores de proximidad, el poder de estos radica en las matemáticas, los algoritmos y las técnicas computacionales usadas para manipular las señales una vez que estas son convertidas a la forma digital [54], [55], [56].

2.1 ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE MEDICION

El sistema de medición está compuesto de los siguientes elementos:

- Circuito Integrado MC 33794
- El procesador de señales digitales 56F8300
- Computadora Personal

El circuito MC 33794, es el dispositivo que se encarga de medir la película líquida, cuenta con ocho sensores de proximidad a los cuales se les conectan sus respectivos electrodos, para generar los campos eléctricos, este circuito genera una onda senoidal de baja frecuencia, la cual es ajustada mediante un resistor externo a un valor optimizado de 120 kHz., presenta un contenido bajo de armónicos lo cual reduce las interferencias electromagnéticas. En la figura 2.1 se ilustra un diagrama conceptual del sensor de campo eléctrico, la intensidad del campo eléctrico depende del área del electrodo así como de la distancia de separación, -este análisis se encuentra en el capítulo anterior-, el rango de la capacitancia para el sistema es de 10 pF a 100 pF, la señal generada es rectificadora y filtrada con un filtro pasa bajos de 150 Hz, después pasa a un regulador de voltaje el cual proporciona un rango de voltaje de corriente directa de 0 a 5 V_{CD} , el cual es leído por el convertidor analógico a digital. El voltaje V_{CD} , representa físicamente a:

$$V_{CD} \equiv \delta_i \equiv \text{película líquida en el electrodo correspondiente}$$

Donde $i \equiv 1, 2, 3, \dots, 8$

Este es el tamaño de la película líquida medida en el sensor i en el tiempo t , con la siguiente relación de rango lineal:

$$0 V_{CD} \equiv 0 \text{ cm.} \quad \text{Y} \quad 5 V_{CD} \equiv \frac{D}{2} \equiv \frac{5.01}{2} \equiv 2.5 \text{ cm.}$$

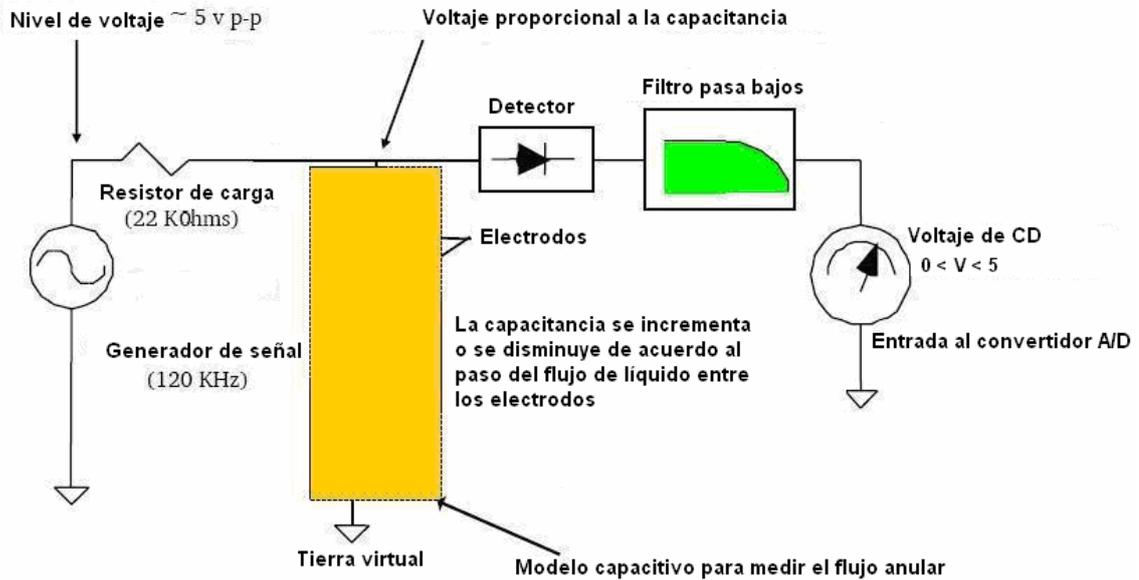


Figura 2.1 Diagrama conceptual del sensor de proximidad

Este método nos permite tener una precisión del orden de 1.22×10^{-3} cm. ($5/4095=2^{12}$ bits), en la medición de la película líquida, este tipo de sensor es prácticamente inmune al ruido producido por radiofrecuencia, es de bajo costo, y para su operación puede realizarse mediante lenguaje ensamblador, lenguaje C o mediante una combinación de ambos. La selección de cada uno de los canales se realiza mediante la lógica combinatoria de la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Valores en binario para la selección de los electrodos

ELECTRODE SELECTION

Table 5. Electrode Selection

TERMINAL/SIGNAL	D	C	B	A
Source (internal)	0	0	0	0
E1	0	0	0	1
E2	0	0	1	0
E3	0	0	1	1
E4	0	1	0	0
E5	0	1	0	1
E6	0	1	1	0
E7	0	1	1	1

Table 5. Electrode Selection (continued)

TERMINAL/SIGNAL	D	C	B	A
E8	1	0	0	0
E9	1	0	0	1
REF_A	1	0	1	0
REF_B	1	0	1	1
Internal OSC	1	1	0	0
Internal OSC after 22 kΩ	1	1	0	1
Internal Ground	1	1	1	0
Reserved	1	1	1	1

La amplitud de la película es una función $f(\delta_i, \theta_i, t_i)$, la cual toma valores entre 0 mm y 25 mm., este circuito es interfazado con el Procesador de Señales Digitales MC56F8323 tal y como se ilustra en la figura 2.2. La

calibración en estado estático para la medición de esta película, se presenta en el apéndice B [54].

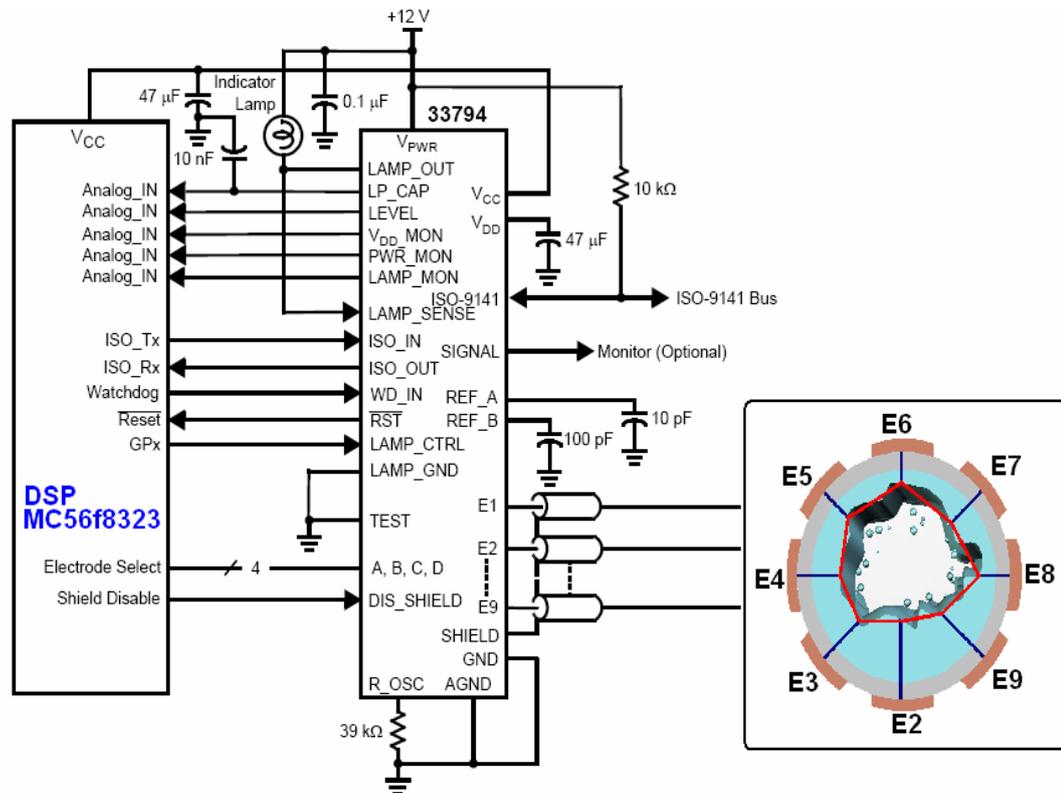


Figura 2.2 Interfaz entre el circuito de proximidad y el DSP

2.2 PROCESADOR DE SEÑALES DIGITALES DSP56F8323

El DSP es un sistema embebido, el cual cuenta con las siguientes características:

- Funciona con una frecuencia de 60 MHz, o sea que ejecuta 60 Millones de instrucciones por segundo.
- Emplea una tecnología de Microcontrolador/DSP.
- Cuenta con una memoria para programación tipo Flash de 32 KB.
- Memoria RAM de 4 KB.
- Memoria de Datos de 8 KB tipo FLASH.
- Memoria de Datos de 8 KB de RAM.
- Memoria de 8 KB para acceso tipo FLASH.
- 6 canales de PWM (modulación por ancho de pulso).
- 8 canales de conversión analógico a digital de 12 bits de resolución.
- Sensor de temperatura.
- Modulo de FLEXcan. (comunicación en red).
- Interfase de comunicación serie modo síncrono (SPI)
- Interfase de comunicación serie modo asíncrono (SCI)
- Dos temporizadores de propósito general.

- Sistema vigilante (watchdog).
- Emulación en el propio circuito integrado.
- 27 líneas de entrada o salida digitales.

En la figura 2.3 se muestra el diagrama a bloques de la arquitectura interna del procesador de señales digitales, así como de cada uno de los bloques mencionados anteriormente [54], [55], [56].

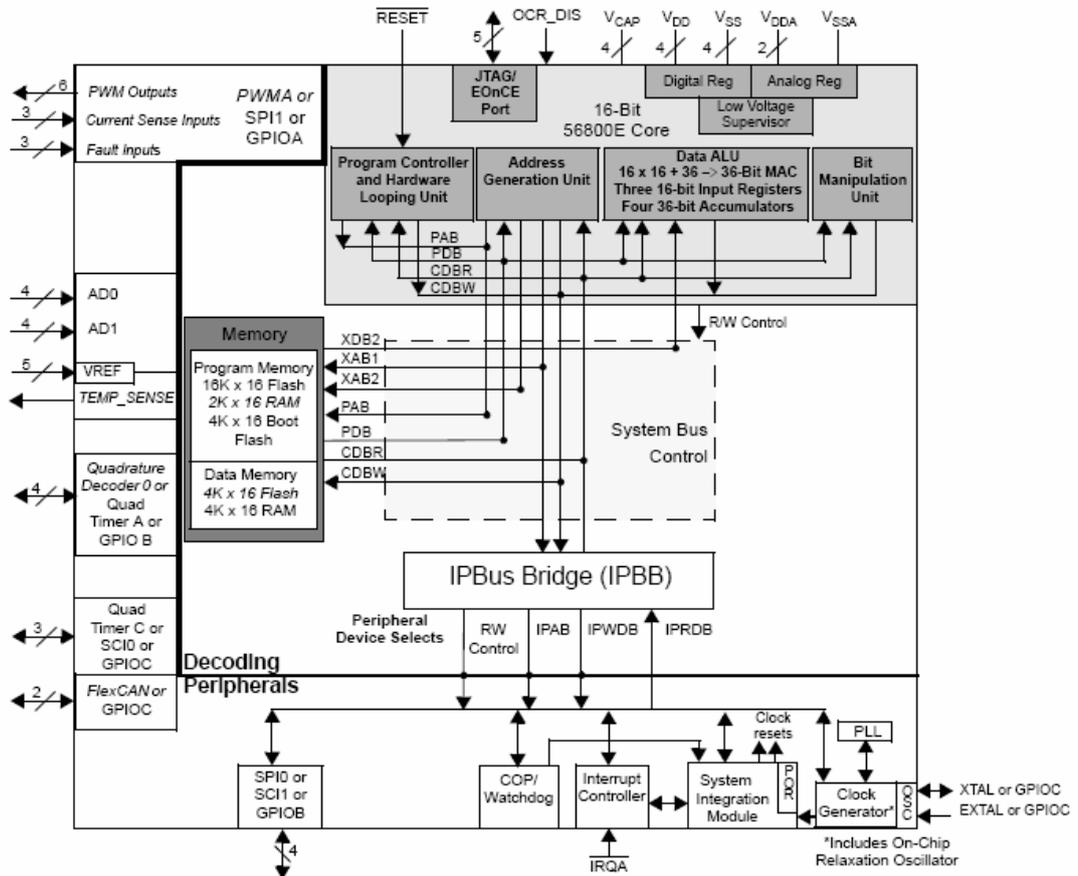


Figura 2.3 Diagrama a bloques del DSP 56F8323

2.3 COMPUTADORA PERSONAL

La computadora personal sirve como la herramienta general de diseño así como la herramienta gráfica para el análisis de las señales que provienen de cada sensor en tiempo real. La metodología de diseño está dividida en tres módulos y son:

- Módulo de la programación del sensor de campo electrostático para medir la película líquida en cada sensor durante el desarrollo del flujo anular así como de la programación del procesador de señales digitales para leer las series en el tiempo ($\delta_1(t)$, $\delta_2(t)$, $\delta_3(t)$, $\delta_4(t)$, $\delta_5(t)$, $\delta_6(t)$, $\delta_7(t)$, $\delta_8(t)$). Generar la base de datos en 8 columnas por el número de muestras, donde el número de muestras es el conjunto formado por $N = (16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048)$. Este a su vez es interfazado con

la separación entre ellos es de $d = 50.1$ mm., y la segunda rectangular cuya área es: $A = a \times L$ la separación entre ellos también es igual $d = 50.1$ mm., en la figura 2.5 se muestra la configuración de la calibración.

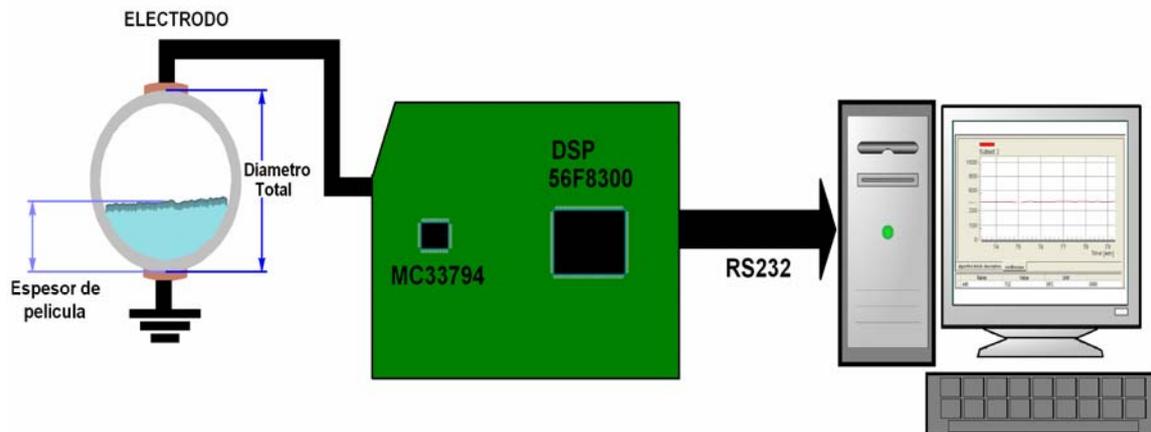


Figura 2.5 Calibración de la película líquida en forma estática

Esta calibración consiste en obtener una función $F(\delta(cm), \delta(V_{CD}))$, las gráficas obtenidas son lineales, las cuales toman los siguientes valores:

0 cm.	0000 Hex	0 V_{CD}
5.01 cm.	0FFF Hex	5 V_{CD}

En la figura 2.6 se muestran algunos de estos resultados.

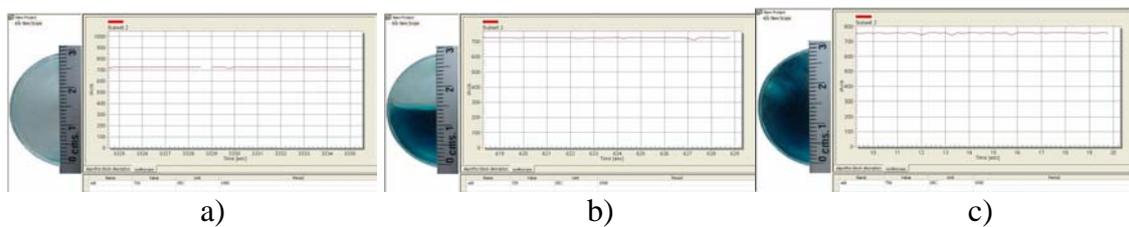


Figura 2.6 Mediciones estáticas a) vacío b) mitad c) Lleno

El algoritmo que realiza esta función se ilustra en la figura 2.7 en el se pueden ver cada uno de los pasos que realiza el DSP para llevar a cabo esta calibración.

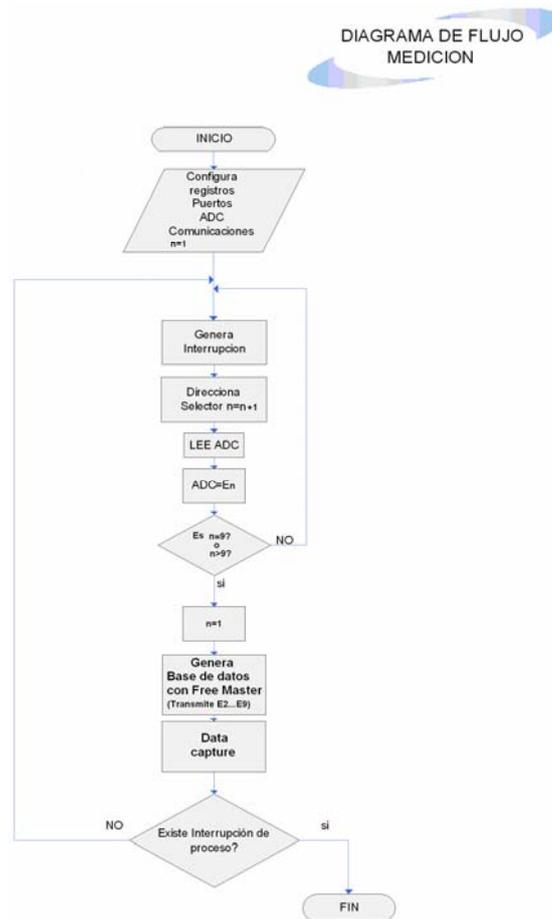


Figura 2.7 Algoritmo para realizar la calibración

El DSP se programa para leer N número de muestras, para el caso de la calibración son tomadas en cuenta 2048 muestras y en seguida se aplica la técnica de ajuste por mínimos cuadrados mediante las siguientes formulas:

$$m = a_0 + a_1 v \quad (2.1)$$

Donde

$$a_0 = \frac{(\sum x)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (2.2)$$

$$a_1 = \frac{N(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (2.3)$$

Los valores obtenidos se muestran tanto en la figura 2.8 así como en la tabla 2.1 siguiente y en el apéndice B, se puede ver toda la metodología de esta prueba. Todo este proceso se realiza fuera de línea a partir de la base de datos

capturada por FreeMaster en un archivo txt previamente definido. Y las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3 son realizadas mediante Matlab.

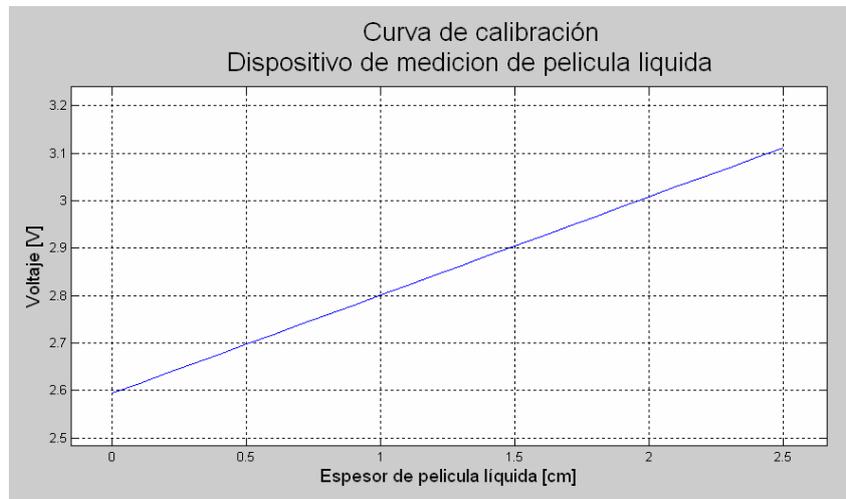


Figura 2.8 Curva de calibración en forma estática

Tabla 2.2 Espesor de la película líquida

Voltaje CD	Valor Binario	Valor Decimal	Espesor de película
5	11 1111 1111 1111	16383	
3.113	10 0111 1101 1000	10200	2.5
2.594	10 0001 0011 0100	8500	0
0	00 0000 0000 0000	0	

Una vez calibrado en forma estática, se colocan los ocho sensores, separados a una distancia angular de 45°, tal y como se ilustra en la figura 2.9.

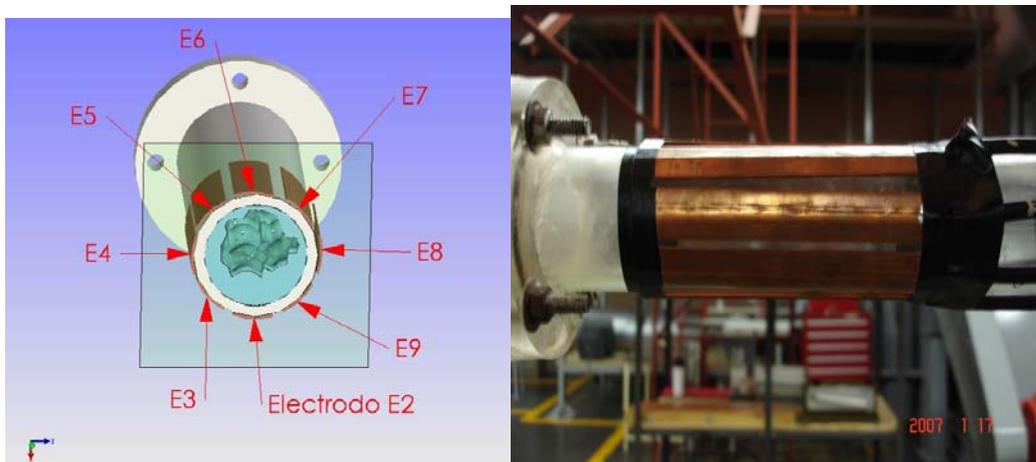


Figura 2.9 Diseño estructural y física de los electrodos

Posteriormente se desarroya el flujo anular, se leen los ocho sensores y se selecciona el número de muestras $N = 2048$ por cada sensor teniéndose una matriz de $2048 \times 8 = 16384$ muestras en total mediante FreeMaster, las cuales son guardadas en un archivo con extensión .txt (fuera de línea), esto se muestra en la figura 2.10

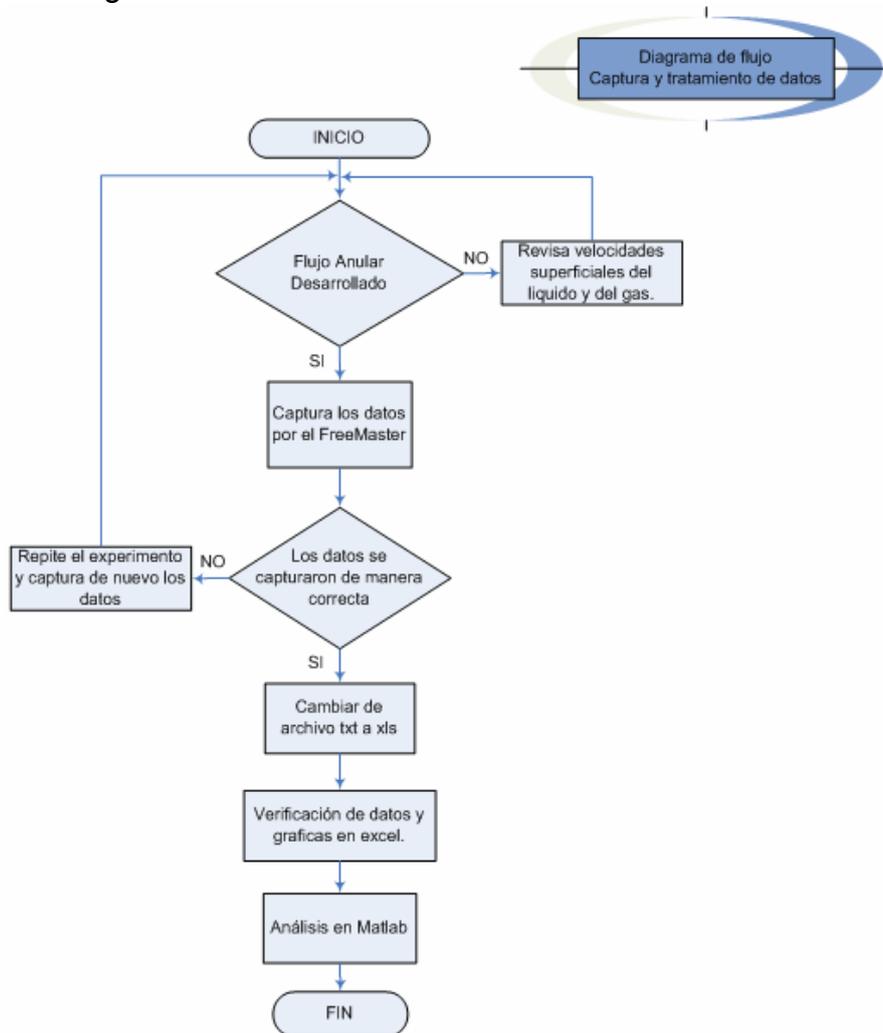


Figura 2.10 Diagrama de flujo para la captura y tratamiento de la señal.

La función resultante de la película en la periferia del tubo es de la siguiente forma:

$$\delta_i = f(A_i, \theta_i, t_i) \quad (2.4)$$

O sea que la película depende de su amplitud, de la posición angular del electrodo y del tiempo. A partir de este archivo se calculan las siguientes variables, tomando como marco de referencia a la estadística ya que estas permiten realizar un análisis fundamental a la naturaleza del flujo anular, las variables a calcular son la media, la desviación estándar y la raíz cuadrada media mediante las siguientes formulas:

$$\text{Media} \quad \mu = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_N}{N} \quad (2.5)$$

Desviación estándar
$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} (\delta_i - \mu)^2 \quad (2.6)$$

Raíz cuadrada media
$$R.M.S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \delta_i^2}{N}} \quad (2.7)$$

El algoritmo que plantea cada uno de estos cálculos se proporciona en la figura 2.11.

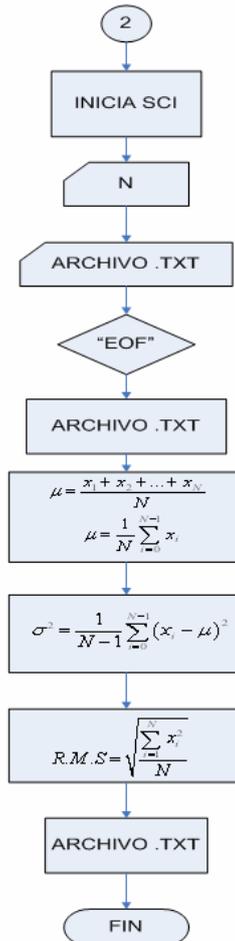


Figura 2.11 Algoritmo para determinar la naturaleza del flujo anular

2.5 MEDICION DEL FLUJO ANULAR EN TIEMPO REAL

Para la determinación en tiempo real de la película anular, primero es tomada en cuenta la subrutina de adquisición de datos donde se programa la frecuencia de muestreo cuyo rango de operación es de 1000 Hz a 10,000 Hz y se toman 128 muestras por electrodo, los cuales son almacenados en un buffer de 1024 localidades, una vez que está lleno, estas son enviadas por el puerto de comunicación serial a la computadora personal donde son arreglados en forma matricial. En este momento se pregunta la forma gráfica que desee el usuario, este sistema cuenta con dos formas de representación la primer es mediante el sistema cartesiano (x, y), donde el eje de las abscisas representa

al tiempo el cual esta dado en segundos, y la ordenada representa al tamaño de la película líquida, tal como se muestra en la figura 2.12. Si por el contrario se elije el cálculo del área líquida y del área del gas, ésta es mostrada en tiempo real en la pantalla de la computadora personal de acuerdo a la figura 2.13.



Figura 2.12 Interfaz gráfica en tiempo real de la película líquida.

El envío de estos datos es en forma continua, un punto importante en este procedimiento es que la frecuencia de muestreo se puede cambiar para cada prueba experimental. En la figura 2.14 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo de envío de datos. El algoritmo empleado para obtener las gráficas de la figura 2.12, está basada en la interpolación de Lagrange. El polinomio más simple que se puede usar para este caso es un polinomio de grado uno, el cual produce una línea quebrada que consta de los segmentos rectilíneos que unen los puntos consecutivamente. La interpolación lineal –también conocida como la regla de tres- utiliza un segmento rectilíneo que pasa por dos puntos que se conocen. La pendiente de la recta que pasa por dos puntos (x_0, y_0) , y (x_1, y_1) viene dada por:

$$m = \frac{(y_1 - y_0)}{(x_1 - x_0)} \quad (2.8)$$

Y la ecuación de la recta correspondiente se describe por: $y = m(x - x_0) + y_0$ si se sustituye la ecuación de la pendiente en esta ecuación se obtiene:

$$y = P(x) = y_0 + (y_1 - y_0) \frac{(x - x_0)}{(x_1 - x_0)} \quad (2.9)$$

Desarrollando esta formula, el resultado es un polinomio de grado menor o igual que uno y la evaluación de $P(x)$ en x_0 y x_1 produce y_0 y y_1 respectivamente:

$$\begin{aligned} P(x_0) &= y_0 + (y_1 - y_0)(0) = y_0 \\ P(x_1) &= y_0 + (y_1 - y_0)(1) = y_1 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Si se hace un ligero cambio en las ecuaciones anteriores, se pueden escribir de la siguiente manera.

$$y = P_1(x) = y_0 \frac{x - x_1}{x_0 - x_1} + y_1 \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad (2.11)$$

Se puede observar que cada uno de los sumandos del miembro derecho de esta relación es un término lineal, por lo que su suma será un polinomio de grado menor o igual a uno. Si los cocientes de la ecuación anterior se describen por:

$$L_{1,0}(x) = \frac{x - x_1}{x_0 - x_1} \quad \text{y} \quad L_{1,1}(x) = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad (2.12)$$

Los términos $L_{1,0}(x)$ y $L_{1,1}(x)$ definidos en el párrafo anterior se llaman coeficientes del polinomio de Lagrange para los nodos x_0, x_1 . Usando esta notación se puede escribir como una suma:

$$P_1(x) = \sum_{k=0}^1 y_k L_{1,k}(x) \quad (2.13)$$

Extrapolando esta ecuación para N puntos, la ecuación se describe en forma genérica como:

$$S_k(x) = y_k \frac{x - x_{k+1}}{x_k - x_{k+1}} + y_{k+1} \frac{x - x_k}{x_{k+1} - x_k} \quad \text{para} \quad x_k \leq x \leq x_{k+1} \quad (2.14)$$

Esta ecuación se representa en la figura 2.14 como una representación geométrica en el espacio de la interpolación lineal a trozos y físicamente se puede ver en la figura 2.12



Figura 2.13 Cálculo en tiempo real de las fracciones de líquido y gas

Para diseñar las gráficas del área líquida y de gas del patrón del flujo anular se emplea el método conocido como –Curvas de Bezier simple– cuando un polinomio arbitrario de grado menor o igual que n se expresa como combinación lineal de los polinomios de Bernstein, suele llamarse Curva de Bezier simple o de un tramo [39]. Se representa en forma paramétrica, dado que algunas propiedades de estas curvas tienen una representación geométrica más fácil de visualizar que en el caso no paramétrico y se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$C(t) = \sum_{k=0}^n P_k B_k \quad \text{Para } 0 \leq t \leq 1 \quad (2.15)$$

Este algoritmo se basa en el cálculo de las líneas que componen al polígono interno que simula el comportamiento de la película del flujo anular, el cual corresponde a la medición de la película en el píxel correspondiente dado por (X_i, Y_i) , para posteriormente integrar el área interna de dicho polígono. Si un segmento de línea está dado por.

L_{12} por los puntos $P(x_1, y_1)$ y $Q(x_2, y_2)$ entonces $P' = [x'_1, y'_1] = [x_1, y_1] \begin{bmatrix} ab \\ de \end{bmatrix}$

$Q' = [x'_2, y'_2] = [x_2, y_2] \begin{bmatrix} ab \\ de \end{bmatrix}$ Finalmente el valor correspondiente es:

$$L_{12} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ab \\ de \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Este arreglo de matrices se realiza para cada uno de los electrodos los cuales constituyen los vértices del polígono de la figura 2.13, posteriormente se integran todos los vértices para formar la figura geométrica en tiempo real, la cual describe el comportamiento del flujo anular.

El algoritmo completo se muestra en la figura 2.15, y su listado se proporciona en el apéndice C, correspondiente a toda la programación de este trabajo.

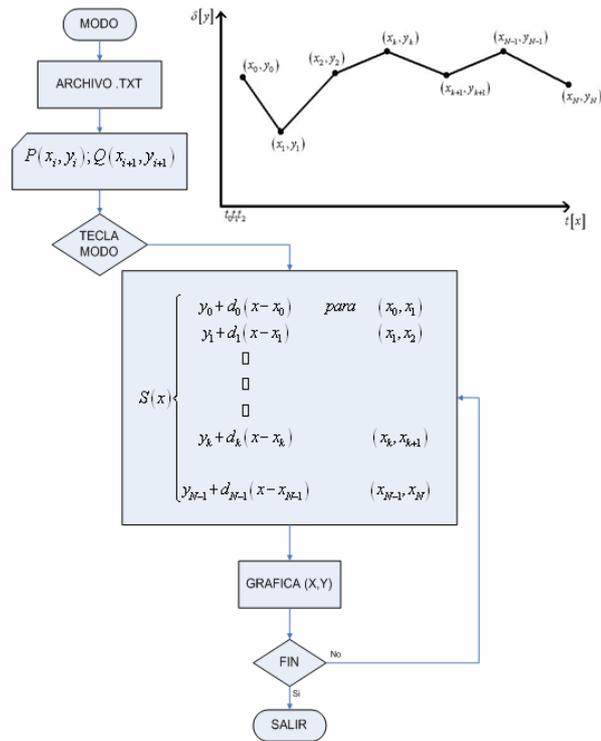


Figura 2.14 Algoritmo para graficar la dinámica de la película anular

Como se puede observar de las figuras 2.11, 2.14, 2.15 y 2.16 el programa completo está construido en forma modular el cual puede ser cambiado o modificado para cualquier aplicación. La figura 2.16 ilustra como se sincroniza la información para la transmisión y recepción de datos entre el procesador de señales digitales y la computadora personal. [54], [55], [56], [57].

Una vez diseñado el sistema de medición, es necesario sincronizarlo con el fenómeno anular el cual se lleva a cabo en el sistema experimental, para esta acción hay que realizar los siguientes los siguientes pasos:

1. Correr el programa de adquisición de datos a la frecuencia de muestreo correspondiente en el DSP en modo continuo, como este programa cuenta con una rutina de envío de datos, siempre está mandando los datos leídos de los ocho electrodos. Si se desea que opere en forma local para ver el comportamiento de cada uno de los electrodos se combina con el programa "freemaster", el cual permite ver la película en un sistema de referencia (x, y), donde x es el tiempo e y es la amplitud de la película líquida, virtualmente es como si se estuviese viendo un osciloscopio, adicionado a esta información crea un archivo texto, para un análisis fuera de línea del proceso.

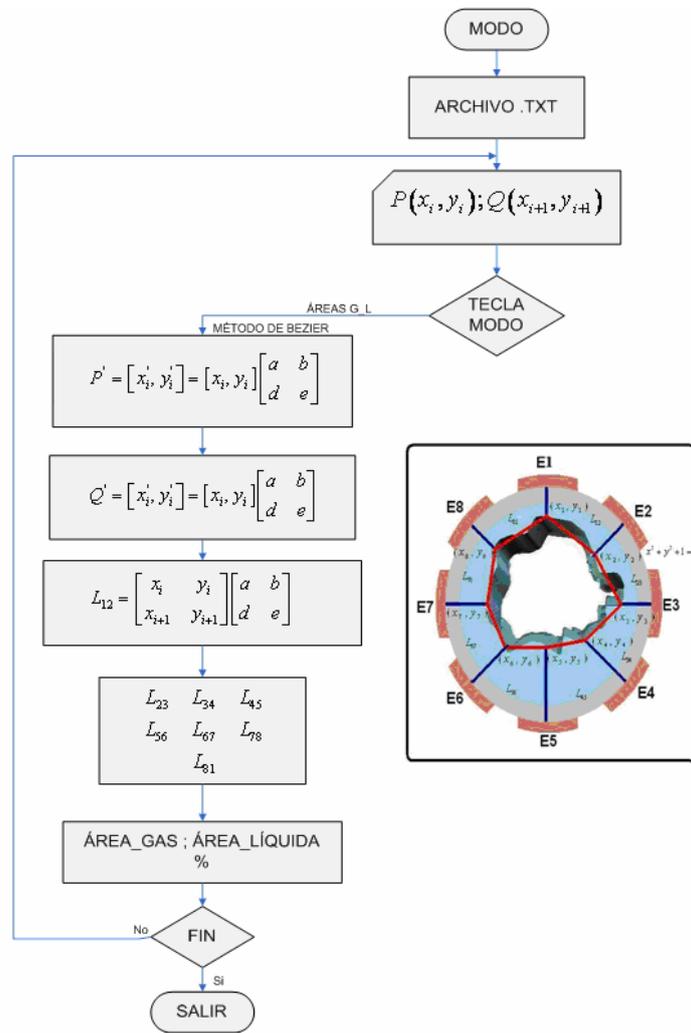


Figura 2.15 Algoritmo para graficar las fracciones del área líquida y de gas

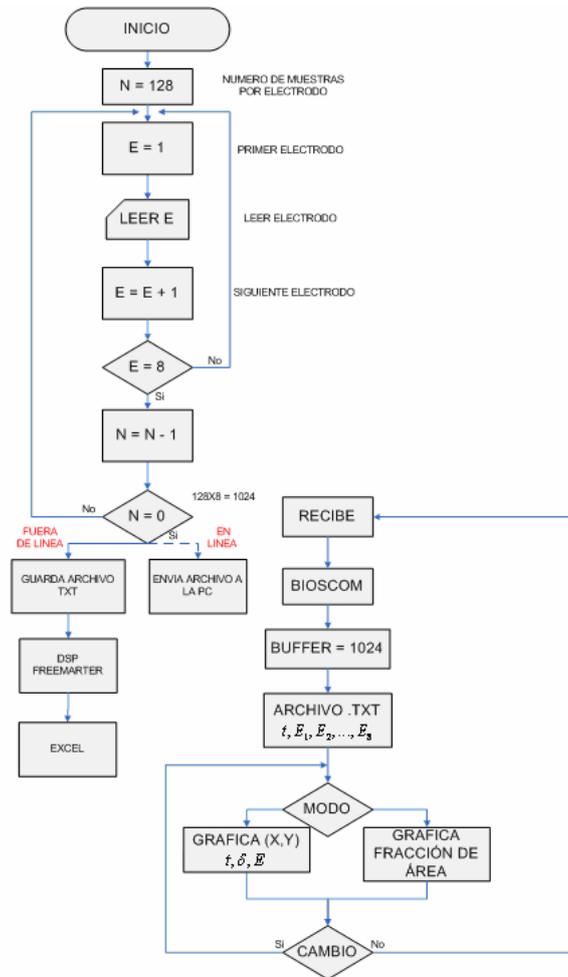


Figura 2.16 Algoritmo para la transmisión y recepción de datos DSP vs. PC

2. Se debe ajustar el flujo por medio de la válvula y medirlo así como el del aire... hasta lograr el flujo anular deseado.
3. Enseguida se corre el programa "flujo" en la computadora personal donde se puede elegir cualquiera de las dos opciones siguientes ver la amplitud de la película de los electrodos en tiempo real tal y como se observan en la figura 2.12, y si se quiere ver el cálculo del área de la parte líquida y de gas en tiempo real se selecciona la configuración de área tal y como se ilustra en la figura 2.13. Las dos opciones parten del análisis de un archivo que es guardado con extensión "txt". Este archivo permite crear una base de datos, para realizar análisis fuera de línea del fenómeno anular.
4. A partir de la base de datos, se realiza el análisis de la señal en el dominio de la frecuencia y del tiempo-frecuencia, mediante el paquete de "Matlab".

Como se puede observar en este capítulo se describe la medición de la película líquida del flujo anular así como de las fracciones de área de la mezcla de agua-aire. En el siguiente capítulo se analiza la película líquida para determinar su naturaleza estocástica u ondulatoria, con herramientas matemáticas de Estadística, series de Fourier y transformaciones de ondeletas (transformaciones de Haar).

Capítulo III

Análisis dinámico del comportamiento del flujo anular

Una señal es una descripción de cómo un parámetro está relacionado con otro parámetro. Tal es el caso presentado en este trabajo, las señales provenientes de los ocho sensores son señales analógicas representadas como voltaje de corriente directa que varían con el tiempo, estos a su vez representan físicamente el espesor de la película líquida en el punto de observación correspondiente a dicho tiempo. Posteriormente estas señales son discretizadas con la finalidad de que sean tratadas por el Procesador de Señales Digitales en el dominio del tiempo, frecuencia y tiempo-frecuencia a diferentes escalas (dominio fractal=ondeletas), para su análisis dinámico [49], [55], [56].

3.1 ANALISIS EN EL TIEMPO

Se dice que el flujo anular presenta una naturaleza de tipo estocástica, de acuerdo a las fuerzas dinámicas que intervienen en la formación de dichos patrones, por tal motivo es necesario como primer paso de la identificación, comprobar si este fenómeno es de esta naturaleza.

Las series de tiempo que provienen de los ocho sensores están formadas matemáticamente por las siguientes series:

$$\begin{aligned}\delta_{1,i} &= (\delta_1(t_1), \delta_2(t_2), \delta_3(t_3) \cdots \delta_n(t_n)) \\ \delta_{2,i} &= (\delta_1(t_1), \delta_2(t_2), \delta_3(t_3) \cdots \delta_n(t_n)) \\ \delta_{3,i} &= (\delta_1(t_1), \delta_2(t_2), \delta_3(t_3) \cdots \delta_n(t_n)) \\ \delta_{4,i} &= (\delta_1(t_1), \delta_2(t_2), \delta_3(t_3) \cdots \delta_n(t_n)) \\ \delta_{5,i} &= (\delta_1(t_1), \delta_2(t_2), \delta_3(t_3) \cdots \delta_n(t_n)) \\ \delta_{6,i} &= (\delta_1(t_1), \delta_2(t_2), \delta_3(t_3) \cdots \delta_n(t_n)) \\ \delta_{7,i} &= (\delta_1(t_1), \delta_2(t_2), \delta_3(t_3) \cdots \delta_n(t_n)) \\ \delta_{8,i} &= (\delta_1(t_1), \delta_2(t_2), \delta_3(t_3) \cdots \delta_n(t_n))\end{aligned}\tag{3.1}$$

Cuyos valores están asociados biunivocamente a puntos consecutivos y equiespaciados por la siguiente ecuación: $t_k = k\Delta t$, la variable dominio en este caso es la amplitud de la película provocada por la interacción de las fuerzas

Dinámicas que provocan el patrón anular en el tiempo k. Una vez que estas son procesadas se guardan en una matriz de la siguiente forma:

Tabla 3.1 Matriz de valores discretizados de cada electrodo en el tiempo

# Time [sec]	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5	δ_6	δ_7	δ_8	δ_9
T ₁	3432	3432	3600	3200	3472	3576	3536	3304
T ₂	3432	3432	3600	3200	3472	3576	3536	3264
T ₃	3432	3416	3600	3200	3472	3576	3536	3264
T ₄	3440	3416	3600	3200	3472	3576	3536	3264
T ₅	3440	3416	3600	3200	3472	3576	3536	3264
T ₆	3440	3416	3616	3200	3472	3576	3536	3264
T ₇	3440	3416	3616	3208	3472	3576	3536	3264
T ₈	3440	3416	3616	3208	3456	3576	3536	3264
T ₉	3440	3416	3616	3208	3456	3576	3536	3264
T ₁₀	3440	3416	3616	3208	3456	3576	3536	3264
T ₁₁	3440	3416	3616	3208	3456	3576	3536	3288
T ₁₂	3440	3480	3616	3208	3456	3576	3536	3288
T ₁₃	3448	3480	3616	3208	3456	3576	3536	3288
T ₁₄	3448	3480	3632	3208	3456	3576	3536	3288
T ₁₅	3448	3480	3632	3208	3480	3576	3536	3288
T ₁₆	3448	3480	3632	3208	3480	3568	3536	3288

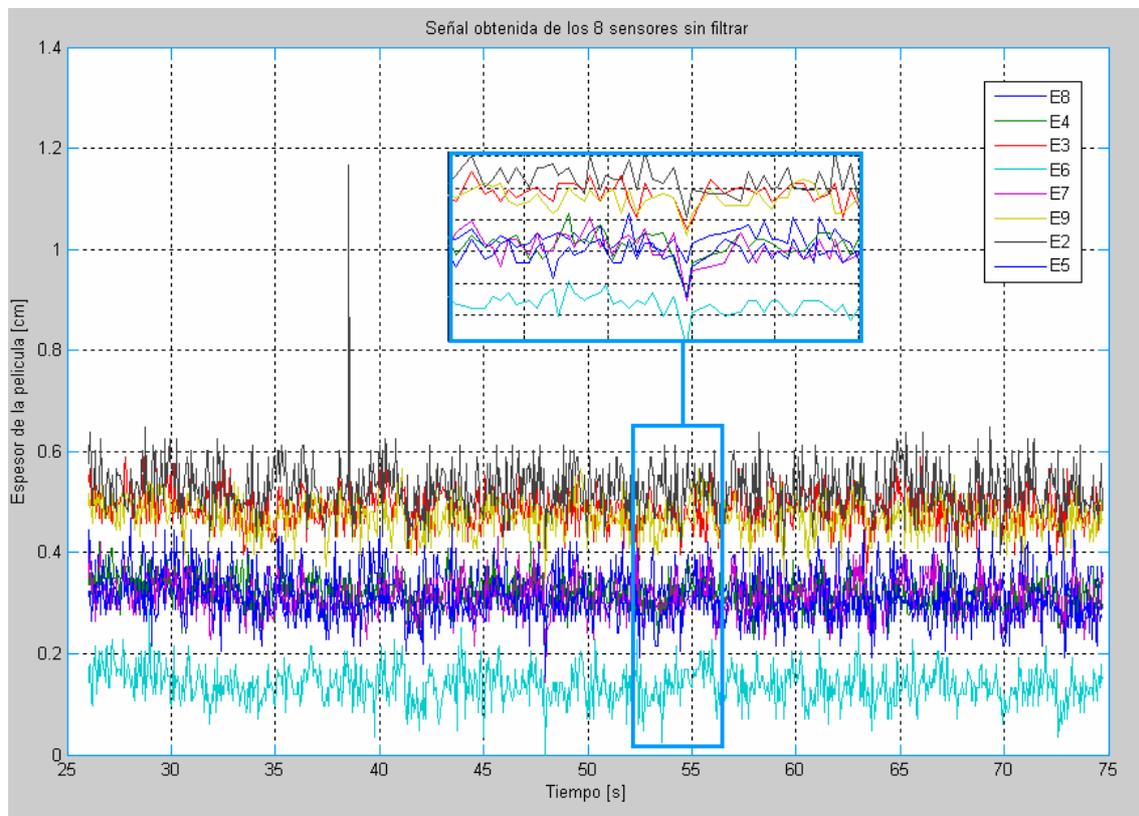


Figura 3.1 Series en el tiempo de los ocho sensores

En la tabla 3.1 y en la figura 3.1 se observan las señales discretizadas, como series en el tiempo los cuales describen funciones de las siguientes características:

$$f(t) = \delta_{E,i}(t) + n(t) \quad (3.2)$$

Donde dichas funciones están compuestas por la señal propia emitida por el fenómeno y por ruido inherente, en este momento es difícil apreciar y deducir si la señal tiene naturaleza estocástica, estas pruebas se realizan a diferentes frecuencias de muestreo tales como: $f_m = 50 \text{ ms}$, 100 ms , 140 ms , $5 \mu\text{s}$, $50 \mu\text{s}$, $500 \mu\text{s}$.

Para determinar si el fenómeno anular es de naturaleza estocástica es necesario realizar un análisis estadístico más completo. El primer paso es calcular la media y la desviación estándar de la señal, la cual permite calcular el valor promedio de una señal y está definido por la ecuación 2.5 y 2.6 así como por el algoritmo 2.8. La media de una señal es comúnmente llamada como el valor de la componente directa de la señal, y se deriva de la fluctuación de la componente alterna alrededor del valor medio. La desviación estándar permite saber que tan lejos se encuentra la muestra actual de la media. Finalmente se aplica el cálculo del valor rms (raíz-cuadrático-medio), el cual se encarga de medir los valores de las componentes de DC y de AC de la señal. En la figura 3.2 y 3.3 se ven los resultados de este análisis.

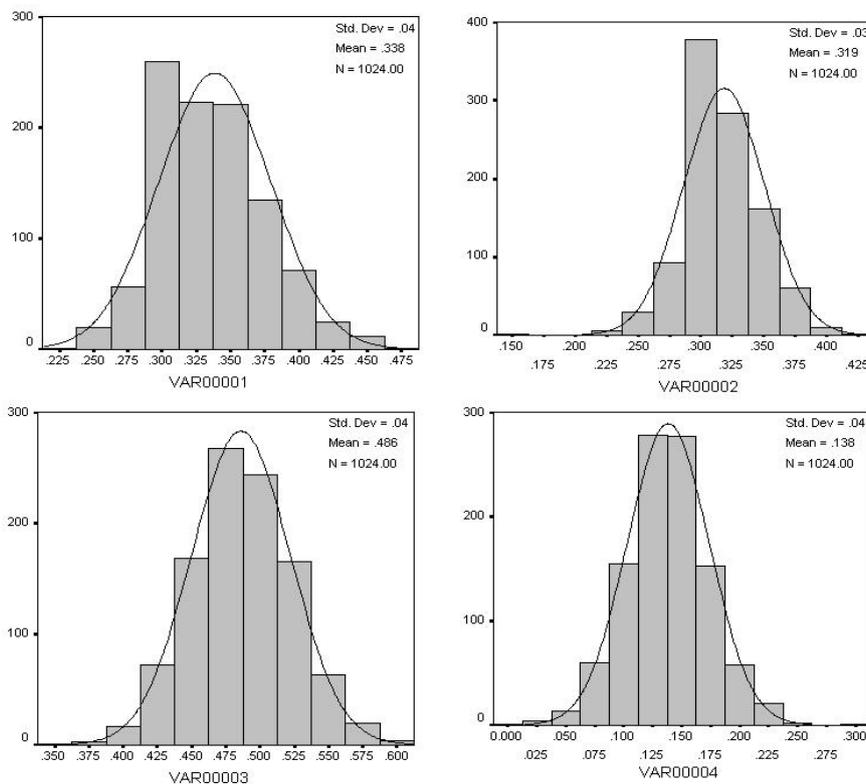


Figura 3.2 Histograma_1 del análisis de las señales de los electrodos

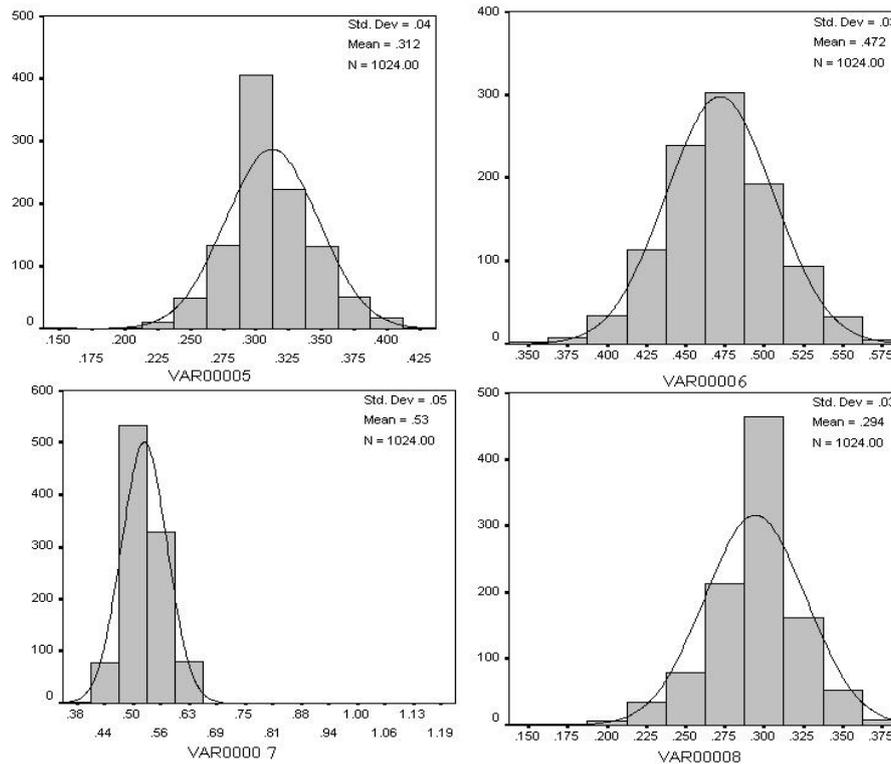


Figura 3.3 Histograma_2 del análisis de las señales de los electrodos

En ambas figuras se puede observar una desviación estándar $\leq .05$, y una media $\leq .53$ en $N = 1024$ muestras, estas observaciones son parte de un gran conjunto de datos y pruebas, la gran mayoría se encuentra entre este rango, por lo que se puede afirmar que el flujo anular no presenta naturaleza estocástica, más bien es un fenómeno ondulatorio con ruido, tal y como se describe en la ecuación 3.2. En la figura 3.4 se muestra una de las señales originales proveniente de uno de los electrodos, en un lapso de tiempo de 1 minuto que es el tiempo en el cual se desarrolla el flujo anular, de acuerdo a las características del sistema experimental y al número de pruebas, además se aprecian los estados que se producen al desarrollarse el flujo anular.

El primer estado observado es el desplazamiento de los fluidos, el cual es causado por la apertura del ducto del aire y en seguida por la apertura del ducto de agua, los cuales provocan a continuación un tapón de agua-aire, creando a su vez una turbulencia como un estado transitorio antes del desarrollo del flujo anular.

Para caracterizar el fenómeno anular como si este fuese un fenómeno ondulatorio es necesario conocer tres parámetros importantes los cuales son: amplitud, frecuencia o periodo o longitud de onda y fase una vez conocidos estos parámetros el fenómeno anular se puede representar como una combinación lineal de funciones senoidales.

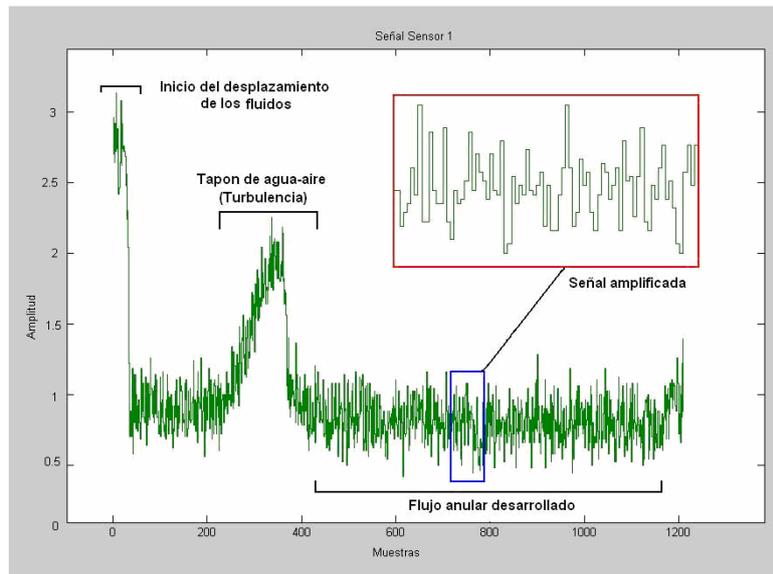


Figura 3.4 Señal obtenida de un sensor (electrodo)

Entonces el patrón del flujo anular (película líquida) se puede representar mediante la superposición de n armónicas con frecuencias múltiples de la fundamental mediante la siguiente expresión:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + a_n \cos n\omega t + \dots + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + \dots + b_n \sin n\omega t + \dots \quad (3.3)$$

Donde ω es la frecuencia fundamental y las frecuencias $2\omega, 3\omega, \dots, n\omega$ son las armónicas de la señal. Las amplitudes de estas señales en relación de la señal del flujo anular, varían de la siguiente manera:

$$0 < a_n \leq 2.5 \text{ cm} \quad \text{y} \quad 0 < b_n \leq 2.5 \text{ cm}$$

Además como es conocido el rango de la velocidad de la mezcla del flujo anular, el cual fue determinado por el mapa de Madhane en el sistema experimental, en base a este conocimiento el siguiente paso a realizar en este análisis es filtrar la señal de la película con la finalidad de conocer los parámetros restantes para el análisis como un fenómeno ondulatorio.

La figura 3.4 también muestra claramente que el sensor detecta una gran cantidad de ruido tal y como lo describe la ecuación 3.2. Para poder observar el fenómeno anular sin ruido es necesario filtrar la señal, siendo esta acción una de las herramientas más importantes que se pueden realizar con los procesadores de señales digitales (DSP).

Si una señal necesita ser filtrada se debe decidir entre usar un filtro analógico antes de la digitalización o un filtro digital después de ella. Los filtros digitales son usados principalmente para dos propósitos generales:

1. Para separar señales que han sido combinadas.
2. o bien para la restauración de señales que han sido distorsionadas por alguna acción inherente al fenómeno o por una acción externa al fenómeno.

Los filtros analógicos pueden ser usados para los mismos propósitos, sin embargo los filtros digitales se desempeñan más eficientemente.

El criterio seleccionado para el diseño del filtro digital, en lugar del analógico en este trabajo esta basado en tres factores: El primero de ellos es que el filtro digital es mejor filtro pasabandas, tal y como se muestra en la figura 3.5, el filtro analógico permite un pasabanda del orden de un 6 %, mientras que el filtro digital es perfectamente horizontal (dentro de un rango del 0.02 %), esto es debido a que el filtro analógico depende de la exactitud de sus resistencias y sus capacitores.

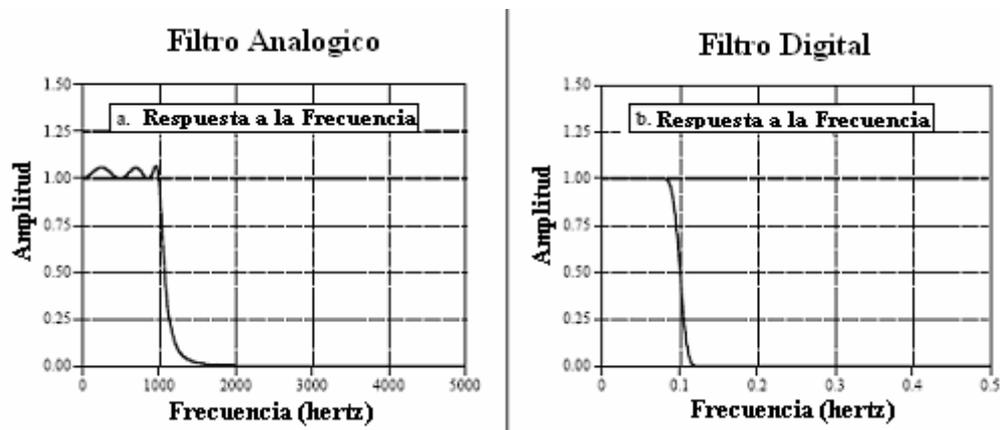


Figura 3.5 Comparación de filtro Analógico vs. Digital (Pasabanda)

La segunda razón es que si se mira la respuesta de la frecuencia en una escala larga como se muestra en la figura 3.6, de nuevo el filtro digital es claramente mejor en la reducción y bloqueo de bandas atenuadas. Incluso si el desempeño del analógico es mejorado agregando etapas adicionales, este no se puede comparar con el filtro digital.

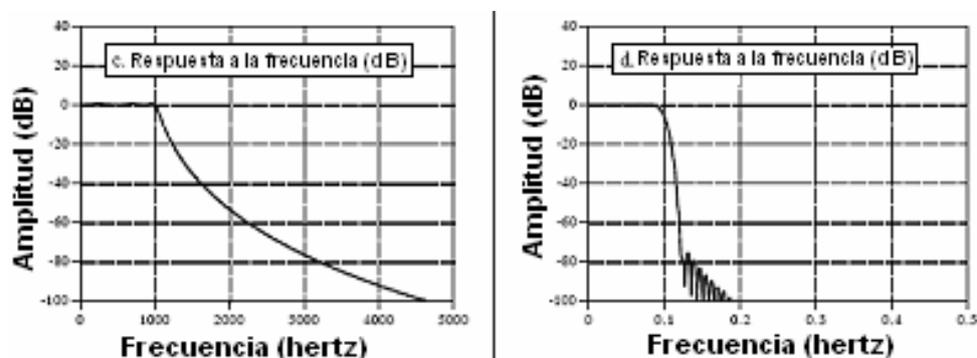


Figura 3.6 Comparación de filtro Analógico vs. Digital (Atenuación)

La respuesta a una señal escalón de estos dos filtros se muestra en la figura 3.7 el filtro digital responde al escalón de manera simétrica entre las posiciones mas bajas y altas del escalón, es decir tiene una fase lineal. El filtro analógico responde al escalón de una manera no simétrica es decir tiene una fase no lineal.

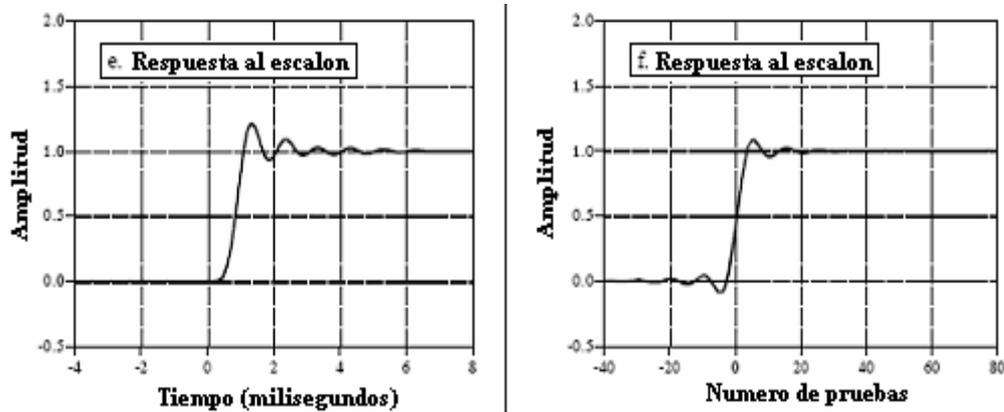


Figura 3.7 Comparación de filtro Analógico vs. Digital (Respuesta al escalón)

Los filtros digitales son una parte muy importante en el análisis de las señales en el dominio del tiempo, ya que permiten eliminar el ruido de cualquier señal y son necesarios para eliminar el fenómeno de aliasing.

Como se puede observar de este primer análisis las señales no son conocidas exactamente así como la frecuencia de corte ideal del fenómeno anular, por lo cual hay que filtrar la señal del fenómeno anular para determinar la frecuencia que permita analizar la información separando las armónicas y dando la certeza de que la señal analizada contiene solamente la información de utilidad. El filtro seleccionado es un filtro pasa bajos el cual está definido por la ecuación 3.4.

$$y[n] = \frac{x[n] + x[n - 1]}{2} \quad (3.4)$$

En la figura 3.8 se muestran los ocho sensores con su señal original y después en su señal filtrada a una frecuencia de 25 Hz.

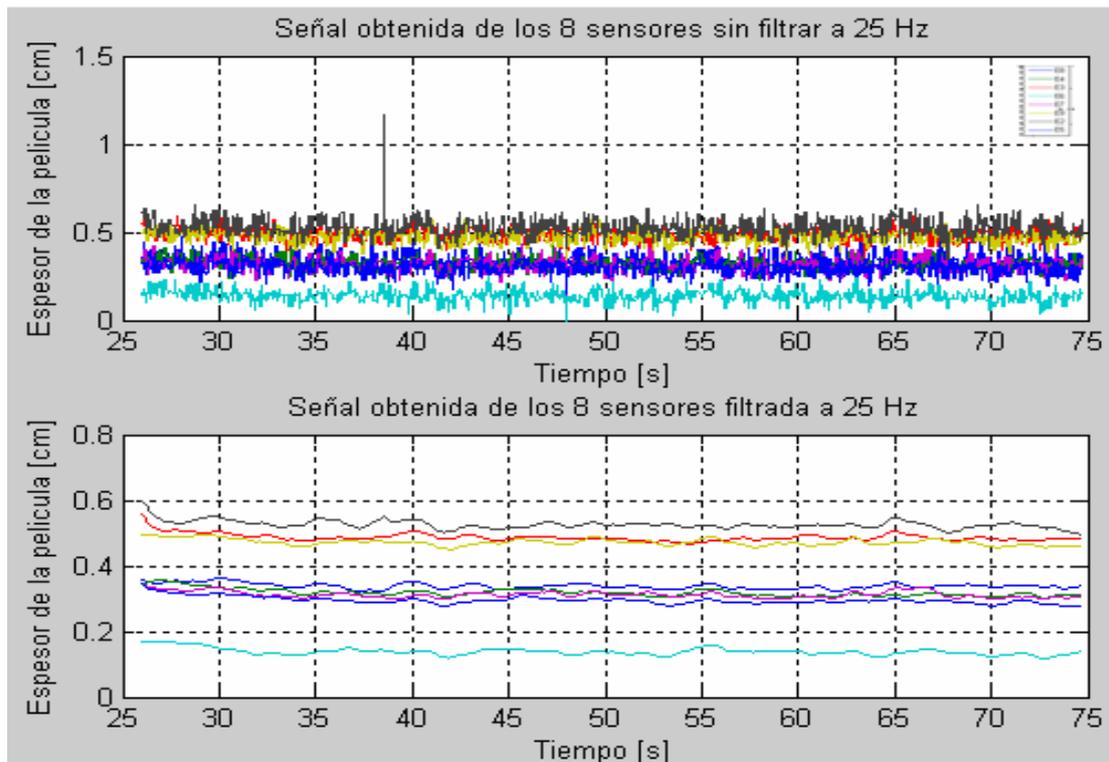


Figura 3.8 Espesor de la película anular filtrada a una frecuencia de 25 Hz.

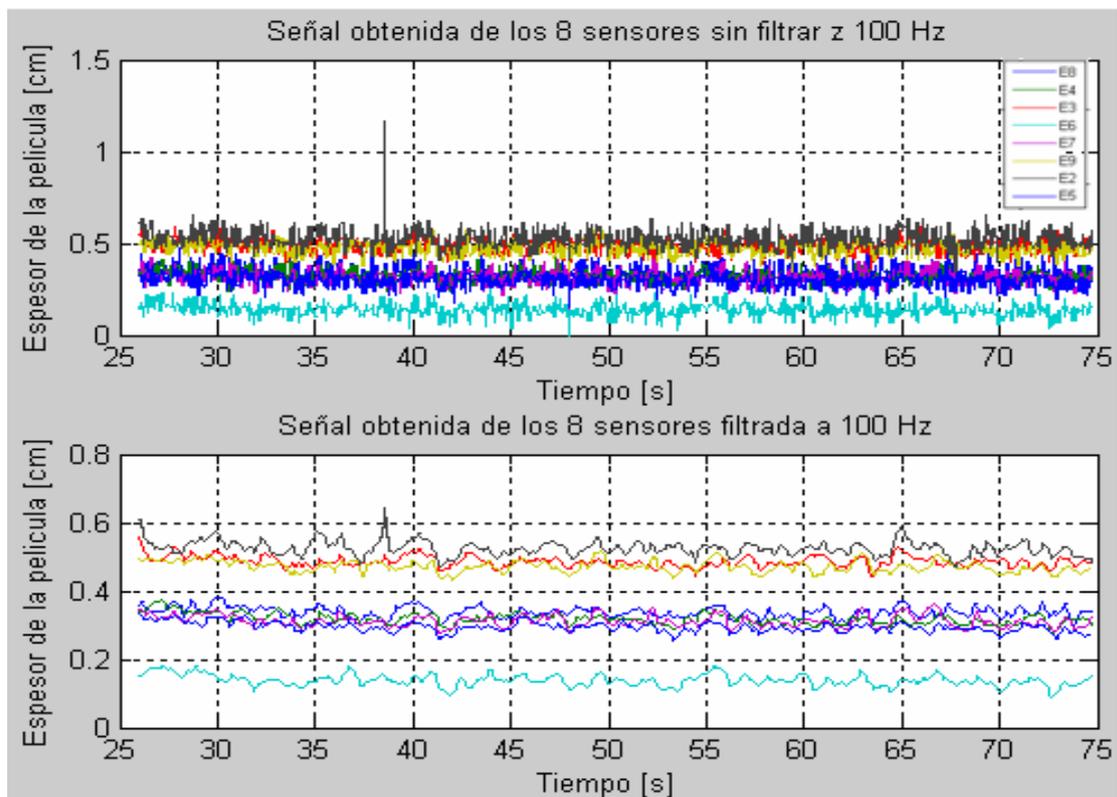


Figura 3.9 Espesor de la película anular filtrada a una frecuencia de 100 Hz

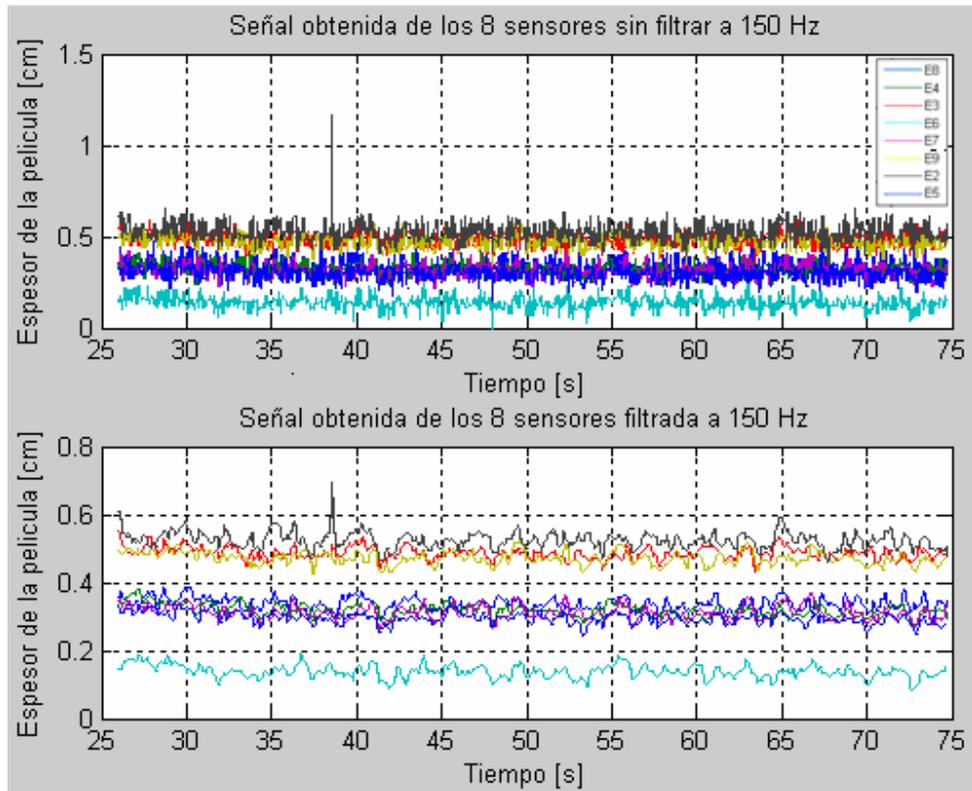


Figura 3.10 Espesor de la película filtrada a una frecuencia de 150 Hz.

La figura 3.9 muestra las señales de los ocho electrodos filtrada a una frecuencia de 100 Hz. Y la figura 3.10 muestra las mismas señales filtradas a una frecuencia de 150 Hz. Finalmente en la figura 3.11 se muestra la señal filtrada a una frecuencia de 200 Hz.

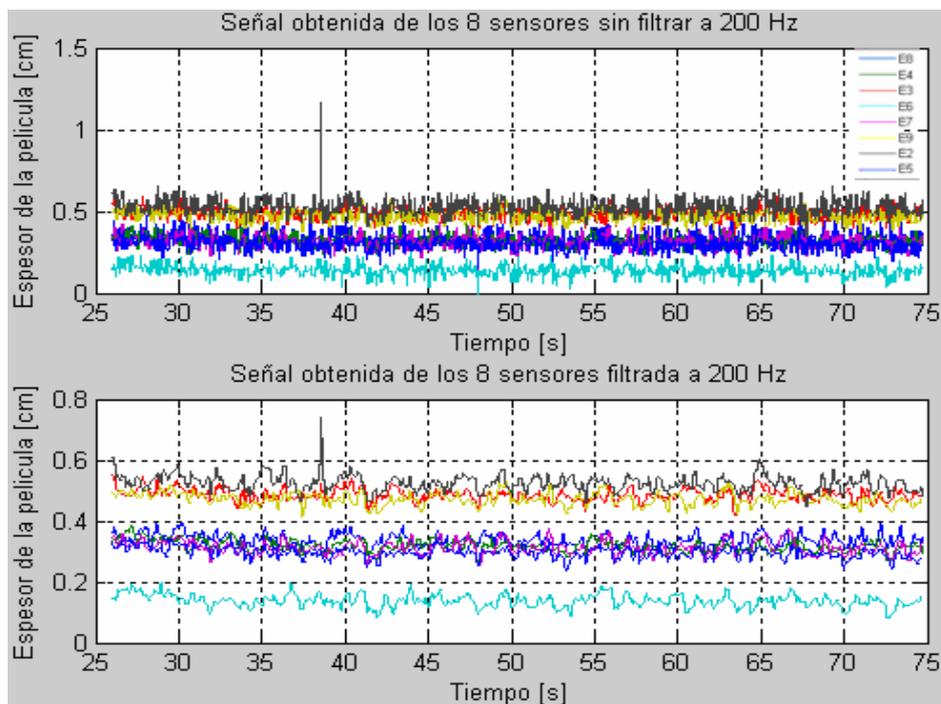


Figura 3.11 Espesor de la película filtrada a una frecuencia de 200 Hz

Después de haber aplicado el filtro digital, a las señales provenientes de cada uno de los sensores se puede afirmar que el fenómeno anular tiene un ancho de banda que va desde los 0 Hz hasta los 150 Hz aproximadamente.

Una vez determinado el ancho de banda del fenómeno anular, el siguiente paso que se tiene que determinar es la periodicidad del fenómeno, por lo consiguiente hay que muestrear al flujo anular a una frecuencia de 150 Hz. El patrón obtenido con esta frecuencia de muestreo se muestra en la figura 3.12.

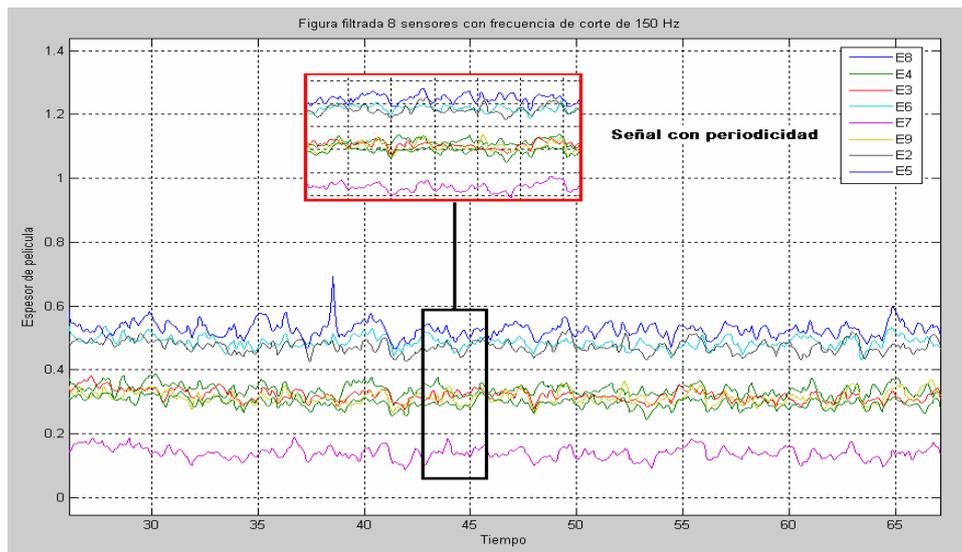


Figura 3.12 Señal con frecuencia de muestreo de 150 Hz

En la figura 3.13 es posible observar una sección de tiempo previamente almacenada en la computadora, esta señal se ha filtrado previamente, en la sección seleccionada se visualiza su patrón de periodicidad, cabe destacar, que la señal, no presenta una simetría perfecta, ya que evidentemente existe una diferencia entre los periodos T1 y T2 además, de existir también una ligera diferencia en la amplitud, localizada en los picos de la señal.

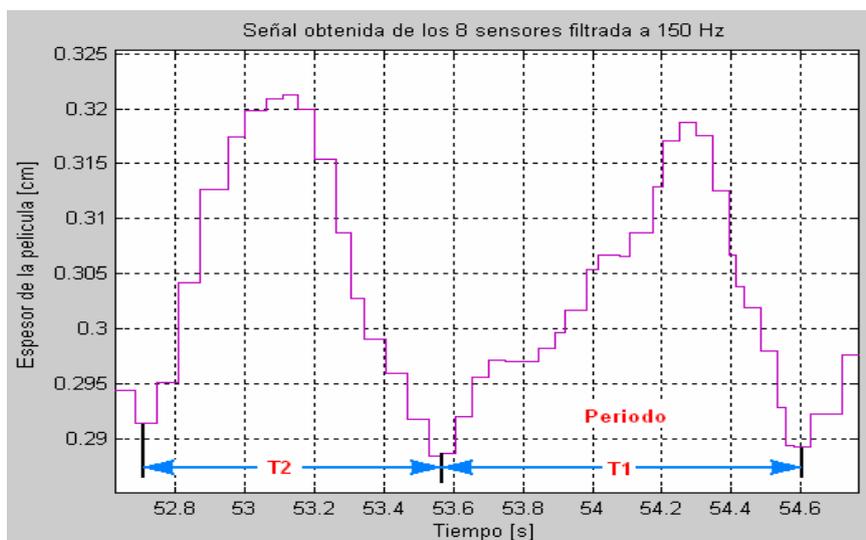


Figura 3.13 Gráfica de la señal de un sensor donde se observa la periodicidad

3.2 ANÁLISIS EN LA FRECUENCIA

El análisis en el dominio de la frecuencia de una señal implica su descomposición en sus componentes espectrales, tanto en magnitud como ángulo de fase, el espectro es una característica única de una señal y proporciona la información suficiente para poder definirla completamente, ejemplos de esta información son; frecuencia fundamental, magnitud a la frecuencia fundamental, magnitud de sus componentes armónicas, ángulos de fase, además de indicar la presencia de otras señales o simplemente ruido, el análisis de Fourier es una herramienta útil para obtener y analizar el espectro de una señal.

La serie de Fourier establece que una señal periódica se puede expresar como una suma ponderada de funciones seno y coseno relacionadas armónicamente entre si tal y como se muestra en la ecuación 3.3 o bien en forma discreta como se describe en la ecuación 3.5

$$\begin{aligned} R_e X[k] &= \sum_{i=0}^{N-1} x[i] \cos(2\pi ki / N) \\ \text{Im } X[k] &= -\sum_{i=0}^{N-1} x[i] \text{sen}(2\pi ki / N) \end{aligned} \quad (3.5)$$

O sea que una señal está conformada por la siguiente relación:

$$A \cos(x) + B \text{sen}(x) = M \cos(x + \theta) \quad \text{Donde } M = (A^2 + B^2)^{1/2} \text{ y } \theta = \arctan(B / A)$$

Es necesario conocer el periodo fundamental de la señal T y los coeficientes $x[i]$, para poder representar a la señal $x[t]$, donde i es un número entero y representa el índice de frecuencia discreta, el inverso de T proporciona la frecuencia fundamental f_0 .

Hasta este punto se ha definido la serie y la transformada de Fourier para señales continuas, resultados importantes pero no prácticos para ser implementados en una aplicación real por medio de un procesador de señales digitales.

De acuerdo con la teoría de Fourier una señal periódica continua se puede representar por medio de la ecuación 3.6, si se toman muestras equidistantes de esta señal a un intervalo de tiempo ΔT equivalente a una frecuencia de muestreo $f_s = \frac{1}{\Delta T}$, teniendo cuidado al hacer la distinción entre intervalo de muestreo ΔT y periodo de la señal T, la versión muestreada $x(n)$ de la señal continua queda definida por medio de la ecuación 3.7 la cual representa la serie de Fourier para una señal discreta.

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{j2\pi k f_0 t} \quad (3.6)$$

$$x(n) = x(n\Delta T) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi k f_0 n \Delta T} = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi k f_D n} \quad (3.7)$$

Donde $f_D = \frac{f_0}{f_s}$

Para el caso discreto el concepto de señal periódica se establece si se verifica la ecuación 3.8 donde N es un número entero y se conoce como periodo fundamental y su inverso proporciona el mismo valor que el de la frecuencia digital.

$$x[n] = x[n + N] \quad (3.8)$$

Puesto que N es un número entero al igual que el índice n por ser x(n) una señal discreta, la serie de Fourier únicamente utiliza N funciones para representar a x(n) ya que posteriormente se repiten. Los coeficientes de la serie de Fourier para una señal discreta se calculan por medio de la ecuación 3.9, la cual se evalúa sobre un periodo de la señal discreta x(n).

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_N x(n) e^{-j2\pi k f_D n} \quad (3.9)$$

Por medio de esta transformación se puede conocer la frecuencia fundamental de una señal x(t). Como ya se mencionó anteriormente, la frecuencia digital f_D es la relación entre la frecuencia analógica f_0 con la frecuencia de muestreo f_s , también es igual al inverso del periodo que en este caso es N_1 en el tiempo discreto, el cual debe ser mayor o igual al número de muestras L que se desean analizar de la señal.

O sea que la frecuencia digital está definida por las ecuaciones 3.10 y 3.11 igualando estas se obtiene la ecuación 3.12, y multiplicando a esta por una constante entera k a ambos miembros y definiendo al nuevo periodo discreto $N = kN_1$, se obtiene una expresión para estimar la frecuencia fundamental analógica de una señal en función de la frecuencia de muestreo, periodo discreto de la señal e índice k-ésimo de frecuencia discreta tal como se muestra en la ecuación 3.13.

$$f_D = \frac{f_0}{f_s} \quad (3.10)$$

$$f_D = \frac{1}{N_1} \quad (3.11)$$

$$f_0 = \frac{f_s}{N_1} \quad (3.12)$$

$$f_0 = \frac{f_s}{N} k \quad (3.13)$$

La resolución en la estimación de la frecuencia analógica, depende de la relación $\frac{f_s}{N}$, si se desea una resolución de una décima de Hertz, N debe ser diez veces el valor de f_s , para tener una resolución mas pequeña se debe incrementar N o disminuir f_s tomando en cuenta el limite establecido por el teorema de muestreo de Nyquist [56],[73].

Si se supone una señal discreta coseno $x(n)$ de amplitud unitaria, de la cual se toman L muestras y se supone que el periodo es N, la TDF analiza la secuencia acotada $x(n)$ la cual se define con la ecuación 3.14, donde $w(n)$ se llama señal ventana y en un caso general se define con la ecuación 3.15.

$$x'(n) = x(n)w(n) \quad (3.14)$$

$$w(n) = \begin{cases} 1 & \text{Si pertenece a } 0 \leq n \leq L-1 \\ 0 & \text{si no pertenece} \end{cases} \quad (3.15)$$

Al multiplicar las señales $x(n)$ y $w(n)$ en el dominio del tiempo discreto, equivale a convolucionar sus respectivos espectros en el dominio de la frecuencia, debido a que el espectro de la señal $x(n)$, está formado por dos impulsos, el resultado de la convolución equivale a desplazar y centrar el espectro de $w(n)$ en cada uno de estos impulsos. Este resultado indica que para una señal coseno pura, la TDF obtiene el espectro de $w(n)$ cuyo máximo está posicionado en el índice de la frecuencia discreta más cercano a la frecuencia fundamental de la señal coseno, determinado este índice y aplicando la ecuación 3.13 se puede estimar la frecuencia de la señal mediante la TDF [56], [72].

Existen dos razones fundamentales para realizar la TDF de $L \times N$, la primera es que el número de cálculos se reduce significativamente con respecto a la de $N \times N$, la segunda razón es que si se aplicara una TDF de $N \times N$, equivaldría a convolucionar un par de impulsos discretos, y es difícil que el resultado de esta operación resulte en un impulso posicionado en un índice de frecuencia digital que corresponda a la frecuencia fundamental de la señal, el algoritmo que permite medir la frecuencia mediante la TDF se muestra en la figura 3.15.

Para determinar el valor de N se tienen que tomar en cuenta tanto las especificaciones de diseño así como los recursos disponibles en hardware.

En primer lugar se especifica que el sistema debe medir frecuencias en un rango de 0 a 150 Hz, por razones prácticas el rango considerado es de 0 a 120 Hz, para tal efecto la frecuencia de muestreo f_s mínima se establece en 240 Hz, en segundo lugar el procesador de señales digitales utilizado para la implementación, únicamente contiene 4096 localidades de memoria aunque puede ser utilizada la memoria Flash, y con objeto de implementar el algoritmo

de manera eficiente N no debe ser superior a este valor, por estas razones se establece un valor de 2400 para el parámetro N , con lo cual quedan disponibles 1696 localidades de memoria flash para otras aplicaciones, además con este valor se tendrá una resolución de décimas de Hertz en la estimación de la frecuencia fundamental. En la figura 3.14 se ilustra las frecuencias del flujo anular en un sensor.

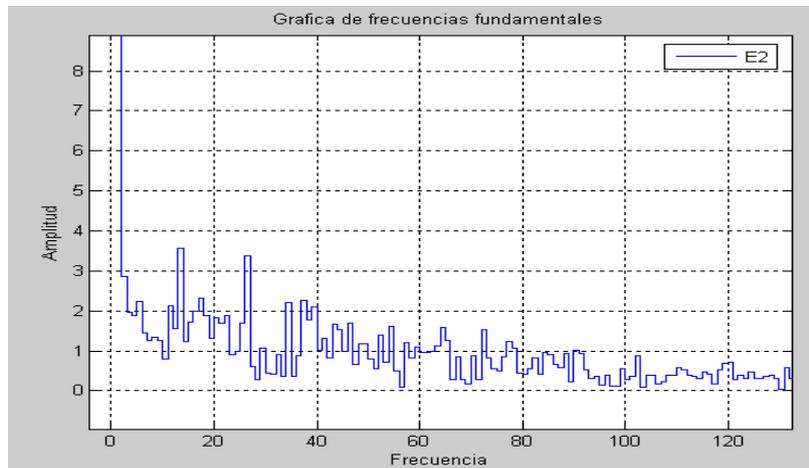


Figura 3.14 Frecuencia fundamental del flujo anular para un sensor.

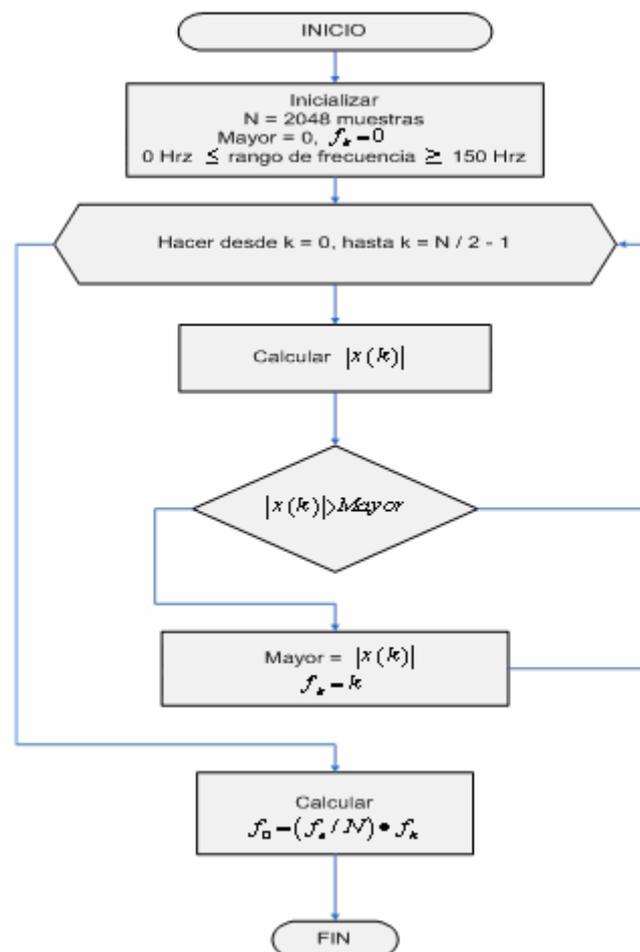


Figura 3.15 Algoritmo para medir la frecuencia fundamental mediante la TDF

En la figura 3.16 se muestran las frecuencias fundamentales de un arreglo completo (8 sensores), aquí se observa que los ocho sensores comparten las frecuencias fundamentales, también se observan diferencias en las amplitudes dado que se encuentran en diferentes posiciones de observación.

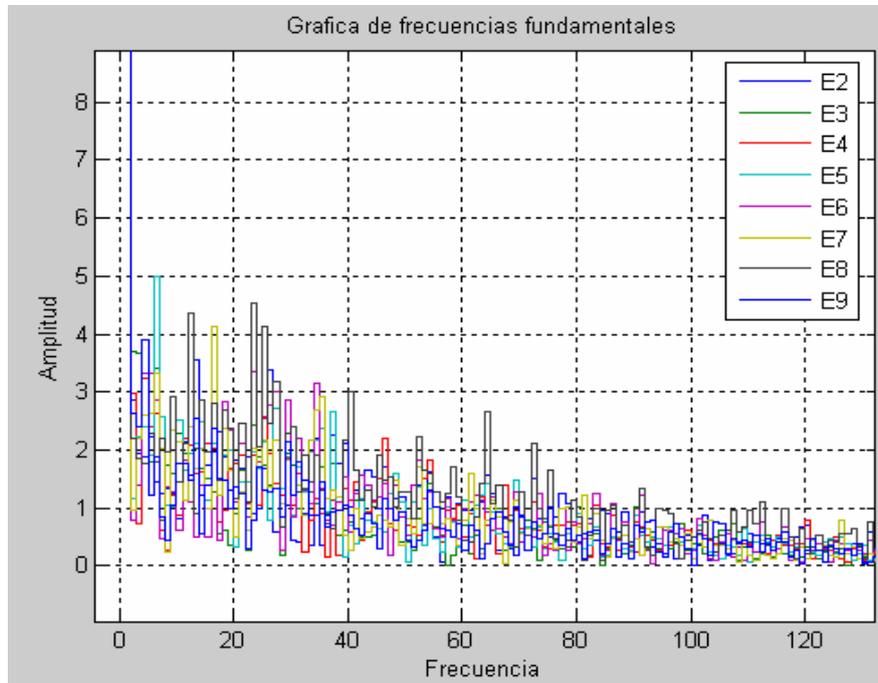


Figura 3.16 Frecuencias fundamentales de los ocho sensores

Integrando los pasos realizados, a partir de la matriz original en el tiempo se obtienen los resultados que se ilustran en la figura 3.17.

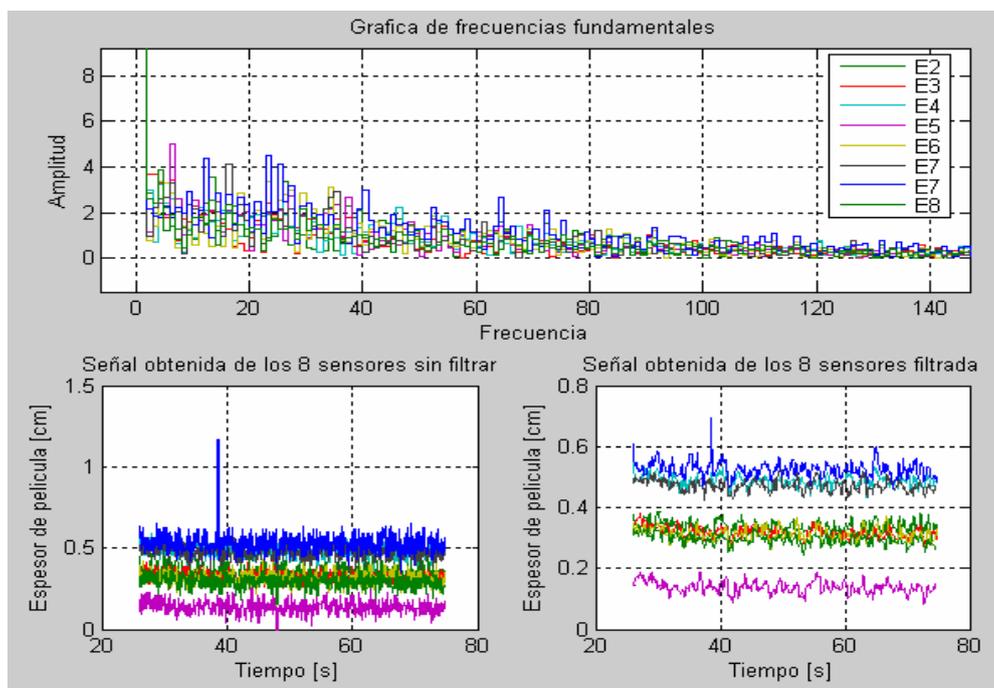


Figura 3.17 Gráficas de las matrices resultantes

3.3 ANÁLISIS EN EL TIEMPO - FRECUENCIA

En los dos incisos anteriores se muestra los análisis en el tiempo y la frecuencia del fenómeno anular proveniente del sistema experimental ilustrado en el capítulo II, en el primero de ellos se obtiene la matriz digital de los valores de la película líquida en el tiempo como una señal compuesta de la señal propia y de ruido, en el segundo análisis se determinan las amplitudes, frecuencias fundamentales y el ancho de banda en que opera el flujo anular con las características físicas del diseño del sistema experimental.

Este inciso está enfocado al análisis de la señal en el dominio de la frecuencia - tiempo como un conjunto formado de dos elementos. A través de los tiempos, se ha buscado una manera eficaz de representar distinto tipo de señales. Hasta hace poco, para analizar señales complejas se utilizaban principalmente métodos de series de tiempo, en particular, análisis espectrales de las potencias, como es el caso del conocido análisis de Fourier. En general, todos los análisis espectrales descomponen una forma de onda compleja en una suma lineal de componentes de onda más elementales; en el caso particular del análisis de Fourier, las ondas elementales son seno y coseno. Al aplicar la transformación lineal, la señal que está en el dominio del tiempo cambia a otra función en el dominio de las frecuencias. Sin embargo, estos análisis se basan en supuestos que muchas veces las señales no satisfacen. La Transformada de Fourier presupone que la señal tenga ciertas características, entre ellas, la estacionalidad. Habitualmente, este supuesto es violado, es decir, se aplica la transformación de Fourier a señales que no son estacionarias, de modo que el resultado pudiera no representar la realidad. Problemas de este tipo son los que han motivado la búsqueda de otras formas de análisis de señales, como las llamadas ondeletas [72].

Las ondeletas son un descubrimiento relativamente nuevo en las matemáticas aplicadas. Deben su nombre a los trabajos de Morlet, Arens, Fourgeau y Giard (1982), Morlet (1983), Grossman y Morlet (1984), Daubechies (2004). El interés por las ondeletas ha crecido en las últimas dos décadas por diferentes razones. Por un lado, el concepto de ondeletas puede verse como una síntesis de ideas que se originaron en los últimos treinta años en el área de la ingeniería, de la física y de las matemáticas puras, por otro lado, las ondeletas proveen una herramienta matemática muy sencilla con una gran variedad de aplicaciones. Por ejemplo, en el análisis de señales de sonido e imagen se pueden encontrar en Daubechies (2004) a Kronland–Martinet, Morlet y Grossmann (1987), Mallat (1989); y en análisis numérico a Beylkin, Coifman y Rokhlin (1991). La transformada de ondeleta aparece, entonces, como una necesidad de analizar funciones no estacionarias en su escala de frecuencia–tiempo.

Las ondeletas se utilizan fundamentalmente para analizar funciones, de acuerdo al método de escalamiento. La transformada de ondeleta es una función que satisface ciertos requerimientos matemáticos que se utilizan para representar datos o funciones.

En la transformada de ondeleta, la escala juega un papel muy importante, dicho proceso analiza los datos en diferentes escalas o resoluciones. Es decir, si se

toma una "ventana" de los datos, notaríamos el mismo comportamiento que si se toma una ventana más pequeña, y así sucesivamente.

La transformada de ondeleta provee una representación en frecuencia–tiempo simultáneamente, corta la señal de interés en varias partes y analiza cada una de ellas por separado. Las frecuencias altas o contraídas pueden ser mejor localizadas en el tiempo y las frecuencias bajas o dilatadas en la frecuencia.

La transformada de ondeleta, al igual que la transformada de Fourier, es una transformación reversible, que permite ir de la señal original a la transformada y viceversa, cuando se requiera.

La transformada de ondeleta trabaja en el espacio fase, lo que significa que se usa un espacio conformado simultáneamente por coordenadas de tiempo y frecuencia. Esto nos permite hacer operaciones mediante desplazamientos en coordenadas, en vez de trabajar con ecuaciones diferenciales o ecuaciones algebraicas.

La transformada de ondeleta es una función matemática que permite seccionar los datos en pequeños componentes en escala frecuencia–tiempo y analizarlos cada uno por separado. Su mayor ventaja sobre la transformada de Fourier es que las ondeletas permiten trabajar con datos que presentan discontinuidades o picos.

La transformada de ondeleta, vista como un proceso matemático, es una operación lineal que descompone una señal compleja en bloques elementales que aparecen en diferentes escalas o resoluciones. Dichos bloques pueden ser generados de una forma muy sencilla, lo cual simplifica su análisis, permitiendo a su vez, limpiar la señal de interferencia externa.

La selección de la mejor ondeleta depende de las características propias de la señal de estudio; entonces, el punto clave es encontrar la mejor función base. A esta función se le conoce como ondeleta madre.

La función base seleccionada contiene información sustancial acerca de la señal. Si esta función base describe bien a la señal en términos de que está dada la eficiencia, entonces sólo serán necesarios algunos términos en la expansión para representar la señal completa. Es importante mencionar que sólo aquellas funciones que satisfagan las dos condiciones siguientes pueden ser consideradas como ondeleta madre:

1. Ser oscilatorio (área total igual a cero)
2. Decaer a cero rápidamente

La transformada de ondeleta de una señal continua está definida por:

$$CWT_{\Psi} x(a,b) = W_x(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi_{a,b}^*(t) dt \quad (3.16)$$

$$\text{Donde } \Psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.17)$$

La señal $x(t)$ es transformada por la ondeleta madre. La función $\psi(t)$ se dice que es una ondeleta si y sólo si su transformada de Fourier $\Psi(w)$ satisface:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(w)|^2}{|w|} C_{\Psi} < \infty \quad (3.18)$$

La condición de admisibilidad implica que

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (3.19)$$

Lo que significa que $\psi(t)$ es oscilatoria y su área efectiva es cero. El factor:

$$|a|^{-1/2}$$

Es utilizado para normalizar la energía. El parámetro a controla la dilatación o la contracción de la función en la escala del tiempo y amplitud, y el parámetro b controla la traslación de la función en el tiempo.

El procedimiento consiste en adoptar la función prototipo de ondeleta y por dilatación descomponer la señal en escalas diferentes con distintos niveles de resolución. Como la transformación es alcanzada a partir de dilatar y trasladar la ondeleta madre continuamente sobre los números reales, se genera información redundante. Por lo tanto, para quitar dicha información, la ondeleta madre puede ser dilatada y trasladada de manera discreta haciendo $a = a_0^m$ y $b = nb_0 a_0^m$, donde a_0 y b_0 son constantes fijas con $a_0 > 1$, $b_0 > 0$, $m, n \in \mathbf{Z}$ (\mathbf{Z} en el conjunto de enteros positivos). Entonces, la ondeleta madre discreta y su correspondiente transformada de ondeleta se convierten en:

$$DWT_{\psi} x(m, n) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{m,n}^*(t) dt \quad (3.20)$$

y

$$\psi_{m,n}(t) = |a_0|^{-m/2} \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (3.21)$$

Sea $x(t)$ una secuencia discreta, entonces la ecuación (3.18) se convierte en

$$DWT[m, n] = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k x[k] \psi[a_0^{-m} n - k] \quad (3.22)$$

Una vez determinada la matriz frecuencia-tiempo de la onda madre se determinan las componentes en diferentes escalas de frecuencia y tiempo con la finalidad de que se pueda reconstruir la señal original del área de la película líquida de la sección transversal del tubo que constituye el fenómeno anular.

Para determinar el proceso anterior se parte de la matriz 3.1 y se aplica la transformada de Haar [50],[72], mediante el algoritmo que se describe en la figura 3.19, este algoritmo descompone a la señal original en dos subseñales, la primera de ellas denominada señal de tendencia y la segunda denominada señal de fluctuación. Una vez que son determinadas estas se procede a comparar la señal de tendencia con la señal original para determinar la similitud o igualdad de la señal original proveniente de cada uno de los electrodos con la señal calculada para comparar sus patrones, en la figura 3.18 se ilustra esta comparación en uno de los electrodos.

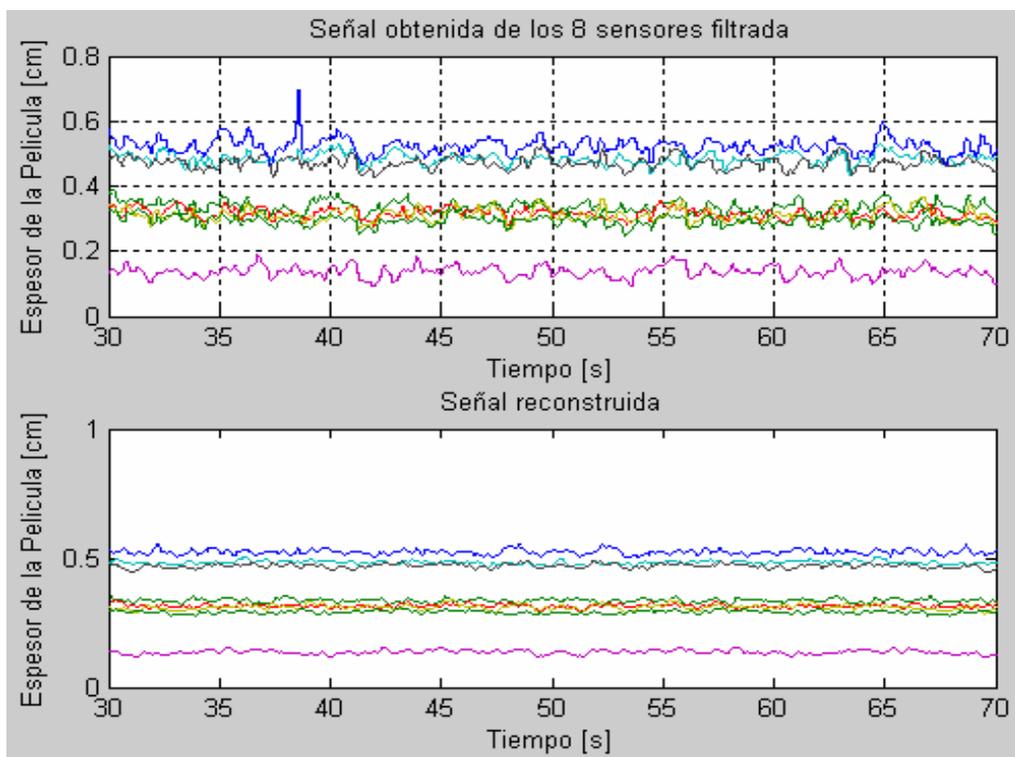


Figura 3.18 Comparación de la señal original vs la reconstruida

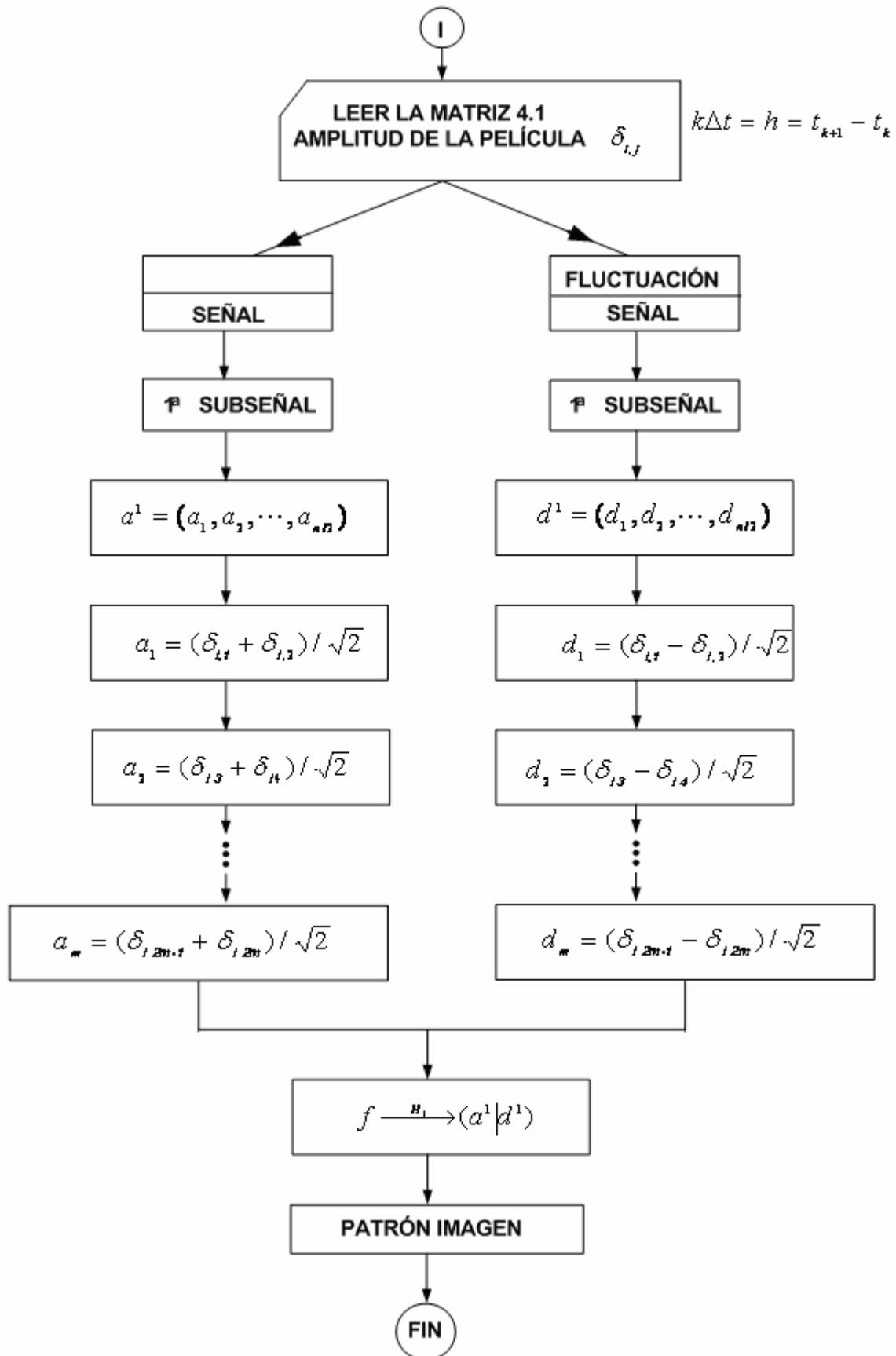


Figura 3.19 Algoritmo de Haar para la reconstrucción de la señal

Para una mejor visualización en la figura 3.20 se muestra la reconstrucción de la señal en un sensor, nótese que la señal reconstruida no es en su totalidad igual a la señal de entrada pero si hay una similitud, esto es debido a que para su reconstrucción se toman un número finito de coeficientes de frecuencia, si se tomaran todas las frecuencias que arroja el programa se encontraría una mayor similitud entre ambas.

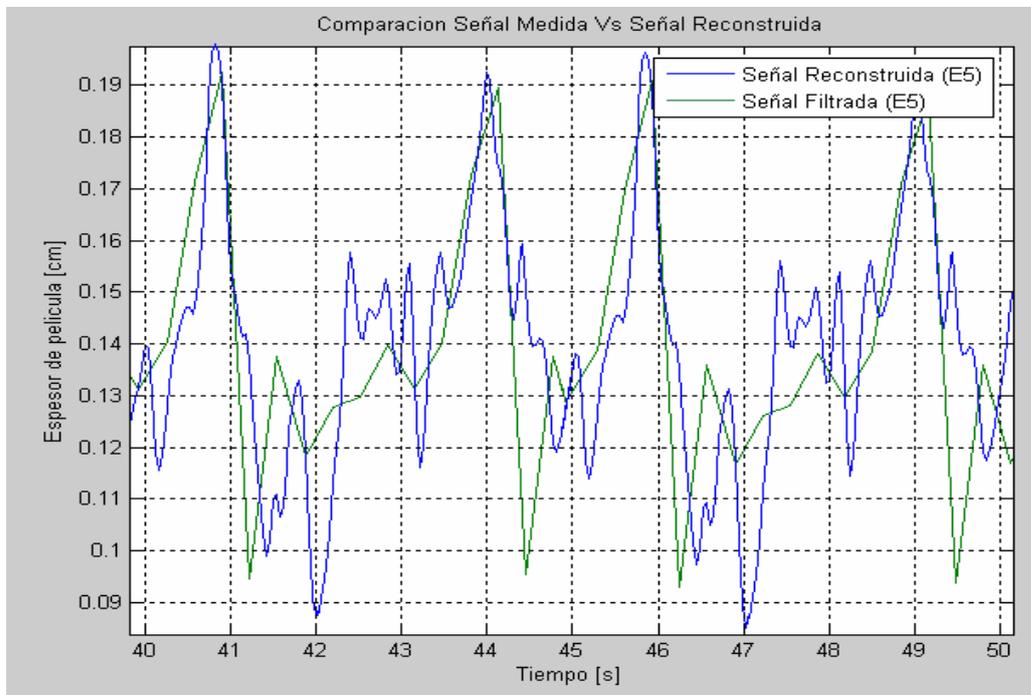


Figura 3.20 Reconstrucción y comparación de la señal en un sensor

Una vez que se ha obtenido la reconstrucción de la señal de entrada en base a los coeficientes de las frecuencias fundamentales sustituidos en las series de Fourier son almacenados en una matriz de datos como un patrón base.

Después de validar la señal obtenida para cada electrodo se integran los resultados de los 8 sensores, con la finalidad de reconstruir la sección transversal del ducto, y así construir finalmente la tomografía del flujo anular en un instante de tiempo t_i .

En la figura 3.21 se muestra una comparación de la sección transversal, elaborada a partir de los datos obtenidos directamente de los electrodos, la otra ilustración corresponde a la sección transversal calculada por la descripción en series de Fourier, ambas imágenes corresponden al mismo instante de tiempo, y se muestra, la diferencia entre lecturas, esta diferencia, representa el error en la obtención de la tomografía, el error total, se estima a partir de una serie de comparaciones.

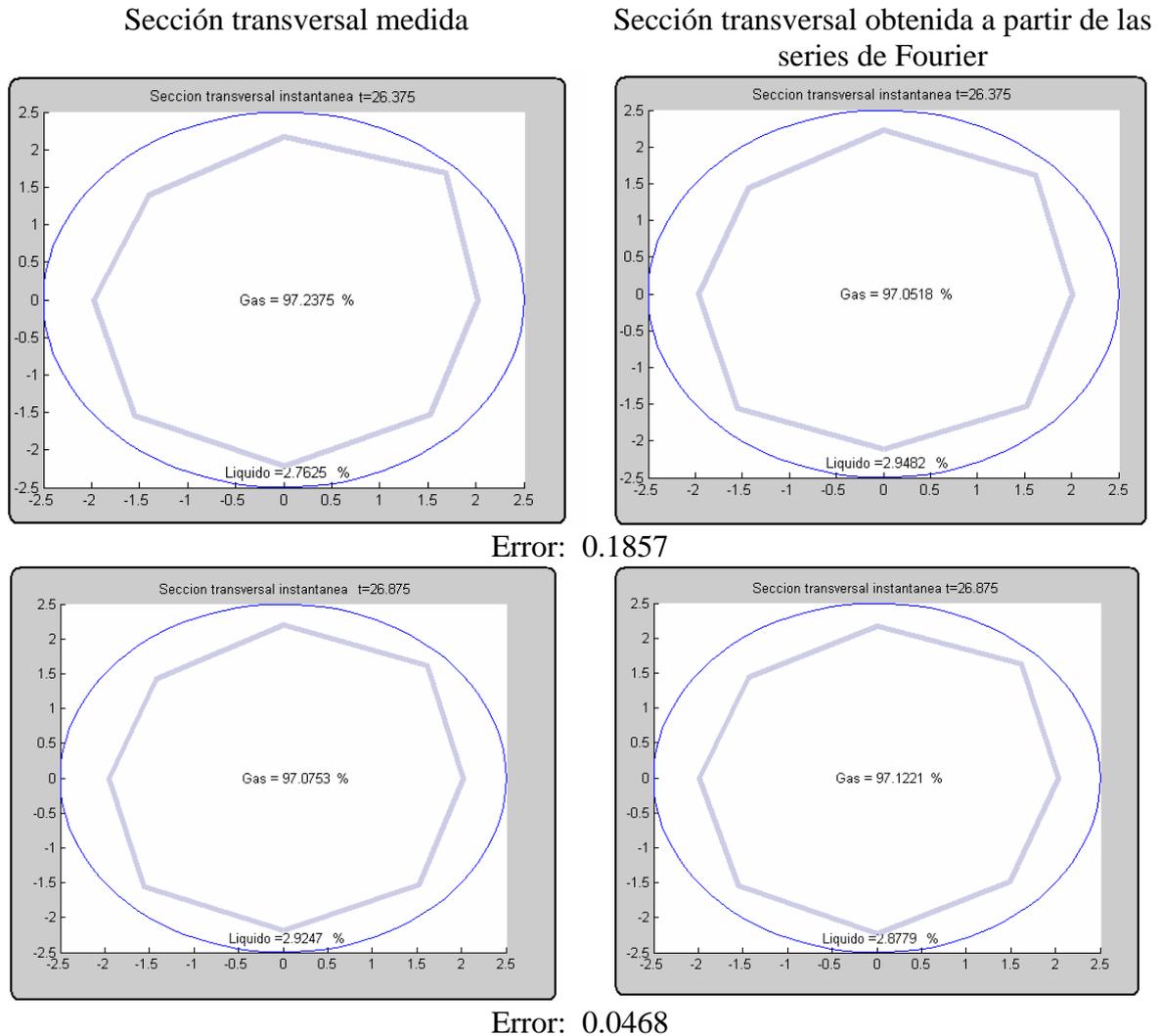


Figura 3.21 Comparación del error instantáneo de la señal medida vs calculada (Comparación del error del Flujo Anular)

Como se puede observar de las mediciones obtenidas, esta posee una gran similitud con la medición original, ya que en una comparación entre 1024 muestras de secciones transversales capturadas por los electrodos y las correspondientes tomografías, arrojan errores inferiores al 1 %. Estas graficas no tienen ninguna relación con la tomografía digital de los electrodos ni con las señales, solamente se usa para ilustrar el error existente entre las áreas de la señal medida y la señal reconstruida por medio de la transformada de Fourier.

Todo este análisis es realizado fuera de línea del sistema experimental, con las herramientas de programación de procesamiento de señales digitales y de las ondeletas con que cuenta Matlab. Para esta aplicación es suficiente con el análisis realizado ya que determina el comportamiento de la película líquida del fenómeno anular en el dominio del tiempo y la frecuencia.

Capítulo IV

Pruebas experimentales.

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación están relacionados con la siguiente metodología de pruebas:

- Creación del patrón anular en el sistema experimental.
- Medición estática de la película líquida en el interior de un tubo de acrílico de 30 mm. de diámetro.
- Medición dinámica de la película líquida del flujo anular en un tubo de acrílico de 51 mm. de diámetro del sistema experimental.
- Cálculo de la película líquida del flujo anular en tiempo real.
- Cálculo del área de la película líquida del fenómeno anular en tiempo real.
- Análisis en el tiempo, frecuencia y tiempo-frecuencia de la película líquida del flujo anular.

La creación del patrón de flujo anular en el sistema experimental, está basada en el Diagrama de Mandhane, el cual considera la velocidad superficial del líquido y la velocidad superficial del aire en forma independiente, la metodología de calibración se describe en el apéndice A, por medio de esta metodología se comprueba la formación de los patrones del flujo anular en el sistema experimental, para la comprobación de la formación de estos patrones se hicieron varias tomas con una cámara digital de 7.1 Mpixeles y algunas de estas pruebas se muestran a continuación:

4.1 PATRONES DE FLUJO ANULAR EN EL SISTEMA EXPERIMENTAL



Figura 4.1 Patrón de flujo anular con $R_g = 70 \%$ y $U_{SG} = 20 \text{ m/s}$ y $R_l = 30 \%$ y $U_{SL} = 1.5 \text{ m/s}$



Figura 4.2 Patrón de flujo anular $R_g = 80\%$ y $U_{SG} = 22$ m/s , $R_l = 20\%$ y $U_{SL} = 1.2$ m/s



Figura 4.3 Patrón de flujo anular $R_g = 90\%$ y $U_{SG} = 25$ m/s y $R_l = 10\%$ y $U_{SL} = 1.0$ m/s



Figura 4.4 Patrón de flujo anular $R_g = 85\%$ y $U_{SG} = 24$ m/s y $R_l = 15\%$ y $U_{SL} = 1.1$ m/s

4.2 CALIBRACION DEL SENSOR DE PROXIMIDAD EN FORMA ESTATICA

En la medición estática de la película se prueba la topología del electrodo y la generación del campo electrostático, mediante el sensor de proximidad el cual se encuentra en el interior del sistema embebido, con toda la circuitería interna vista en el diseño presentada en el capítulo II y en el apéndice B, de este trabajo.

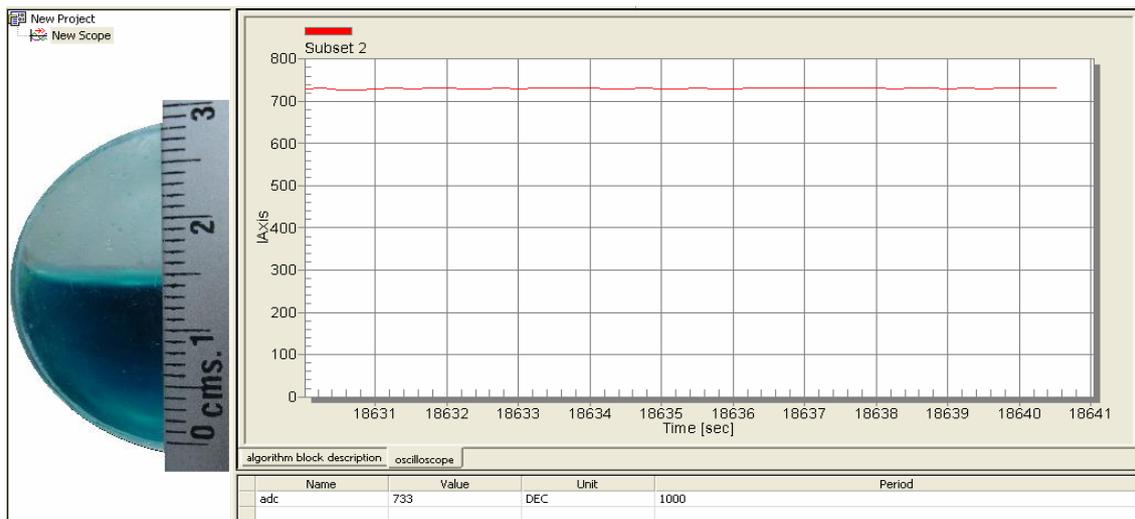


Figura 4.5 Sistema de prueba para la medición estática de la película líquida

En la figura 4.5 se puede observar la arquitectura del sistema, el cual está compuesto por un tubo de acrílico de 30 mm, y el sistema de adquisición de datos basado en un procesador de señales digitales (DSP) y la computadora personal, el tubo se llena gradualmente de agua para medir el voltaje en forma proporcional al diámetro del tubo, en la figura 2.4 se ve la curva de calibración, con esta prueba se conoce si la magnitud del campo electrostático es capaz de medir la película líquida dentro de la tubería.

La topología de los diferentes electrodos a prueba se pueden observar en la figura 4.6. Los electrodos circulares presentan un campo electrostático más débil que los electrodos rectangulares debido a que el área que ocupan los primeros es más pequeña en comparación a la rectangular, ya que deben tener una área menor a 6 mm^2 , mientras que los electrodos rectangulares pueden ocupar una área mucho mayor que los circulares debido a la dimensión longitudinal.

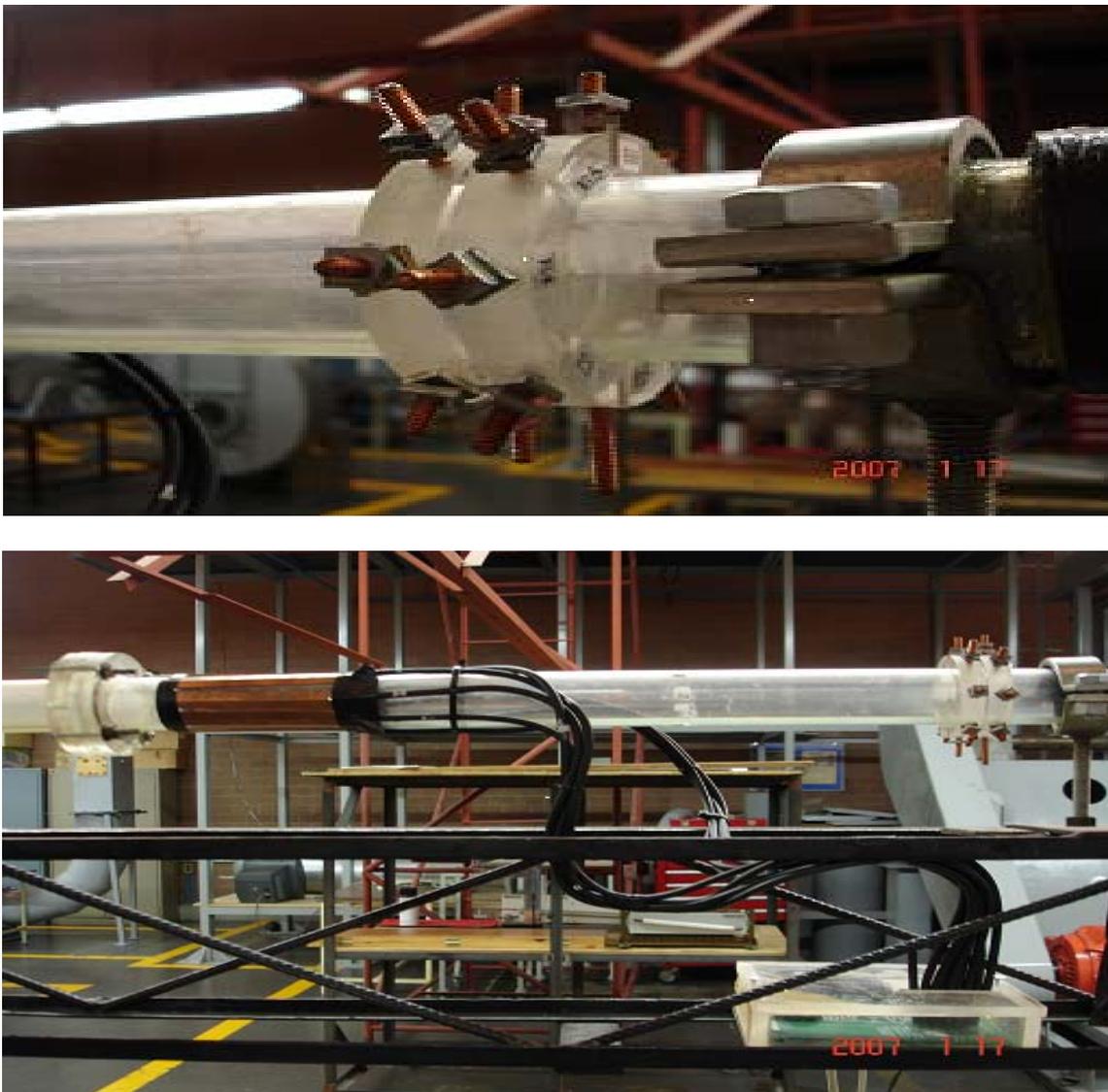


Figura 4.6 Prueba de las diferentes topología de los electrodos

4.3 PRUEBAS DE MEDICION DINAMICA

En este punto el interés está enfocado en las pruebas del fenómeno dinámico del flujo anular y tratar de resolver algunas interrogantes, el primero de ellos es determinar la película líquida en el espacio amplitud – tiempo, es decir cómo se observa y cuanto mide la película en los diferentes electrodos de la periferia del tubo, el segundo problema seleccionado es ver si este tipo de sensor es capaz de detectar al fenómeno de atomización que ocurre al desarrollarse el fenómeno anular, en la figura 4.7a y 4.7b, se puede ver el comportamiento de los ocho sensores en diferentes tiempos. La película observada es calculada en tiempo real.



Figura 4.7 a. Comportamiento dinámico de la película líquida del flujo anular



Figura 4.7 b. Comportamiento dinámico de la película líquida del flujo anular

La prueba final está dirigida al cálculo del área de la película líquida del flujo anular así como del porcentaje de masa promedio por área de la parte líquida y de gas en tiempo real, como se conoce el área total del tubo la cual está definida de la siguiente manera:

$$A_T = A_{pg} + A_{pl} = \pi r^2 \quad \text{y como el área promedio del líquido es igual a}$$

$$A_{pl} = \int_0^{2\pi} \delta_{i,t}(r_i, \theta_i, t_i) \text{ entonces } A_{pg} = A_T - A_{pl} \text{ donde } \delta_{i,t}(r_i, \theta_i, t_i) \text{ es el espesor de la}$$

película en el electrodo correspondiente en el tiempo en el cual se está desarrollando el flujo anular, en la figura 4.8a y 4.8b se puede observar, el área ocupada por la película líquida en un cierto instante de tiempo.



Figura 4.8 a. Cálculo del área líquida y de gas en tiempo real del flujo anular

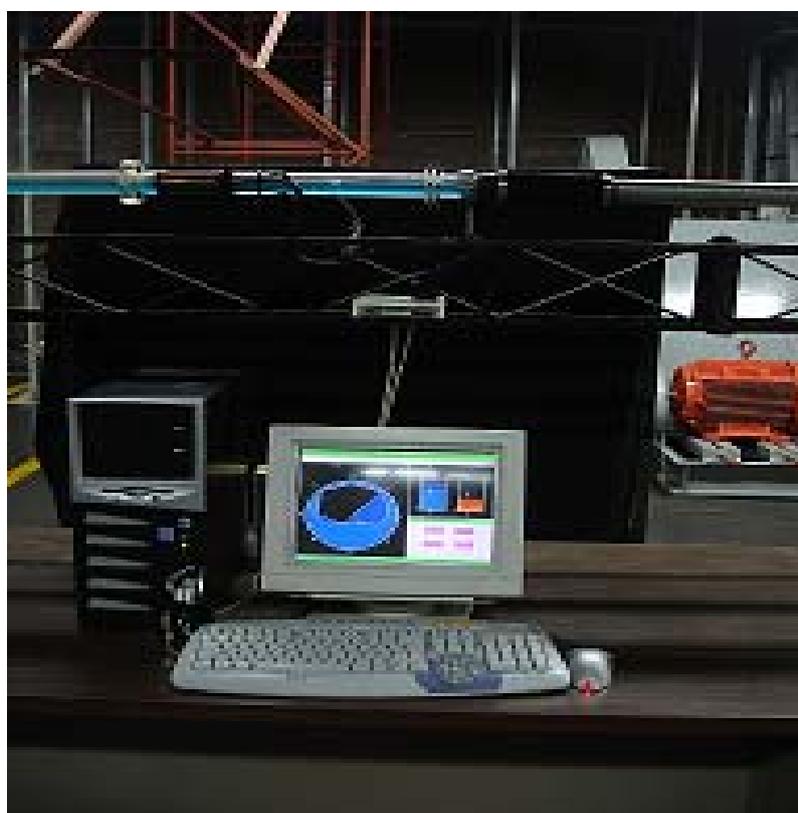


Figura 4.8 b. Cálculo del área líquida y de gas en tiempo real del flujo anular

Así como las áreas líquida y gaseosa también se ilustran sus porcentajes por área. Estas son calculadas en tiempo real y las matrices de datos generados son almacenadas en el disco duro en archivos tipo texto para cada prueba realizada.

4.4 ANALISIS ESTADISTICO DE LA PELICULA ANULAR

Para comprobar la naturaleza del fenómeno anular (película líquida) se realizan pruebas estadísticas en las cuales se mide la moda, la mediana, la media y la desviación estándar a continuación se proporciona una serie de pruebas de esta naturaleza, estas pruebas son realizadas con los valores obtenidos de la película líquida en forma digital.

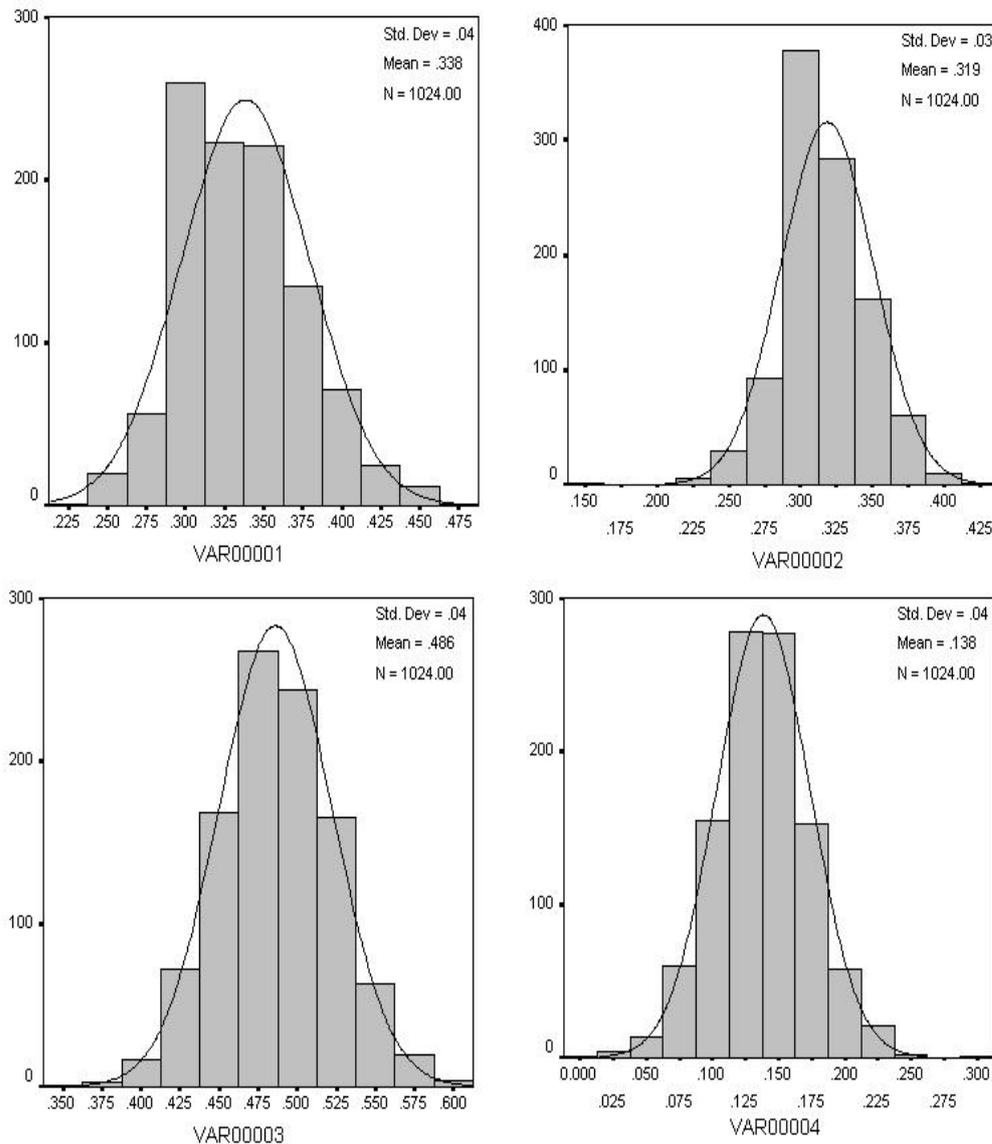


Figura 4.9 Histograma_1 del comportamiento del flujo anular

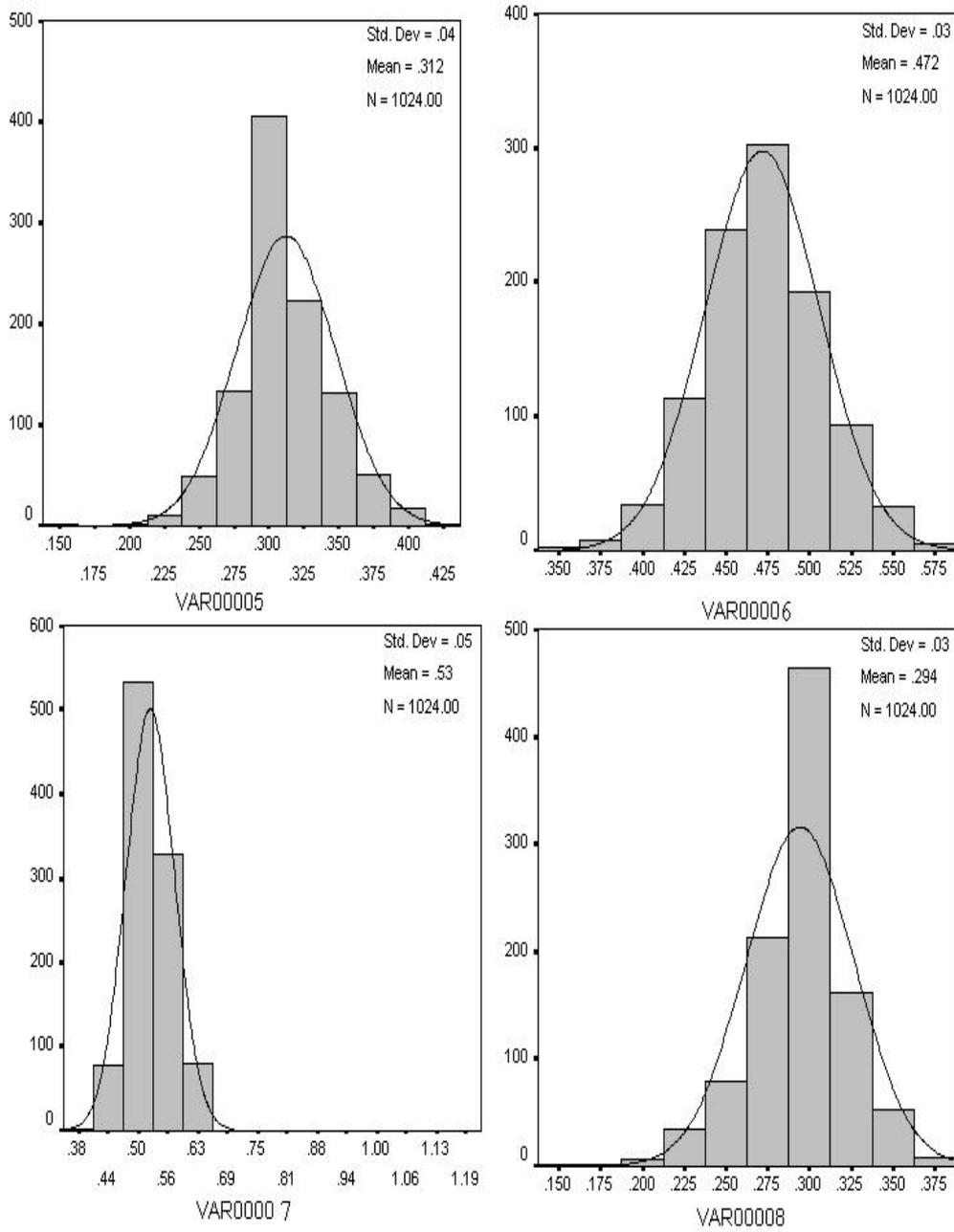


Figura 4.10 Histograma_2 del comportamiento del flujo anular

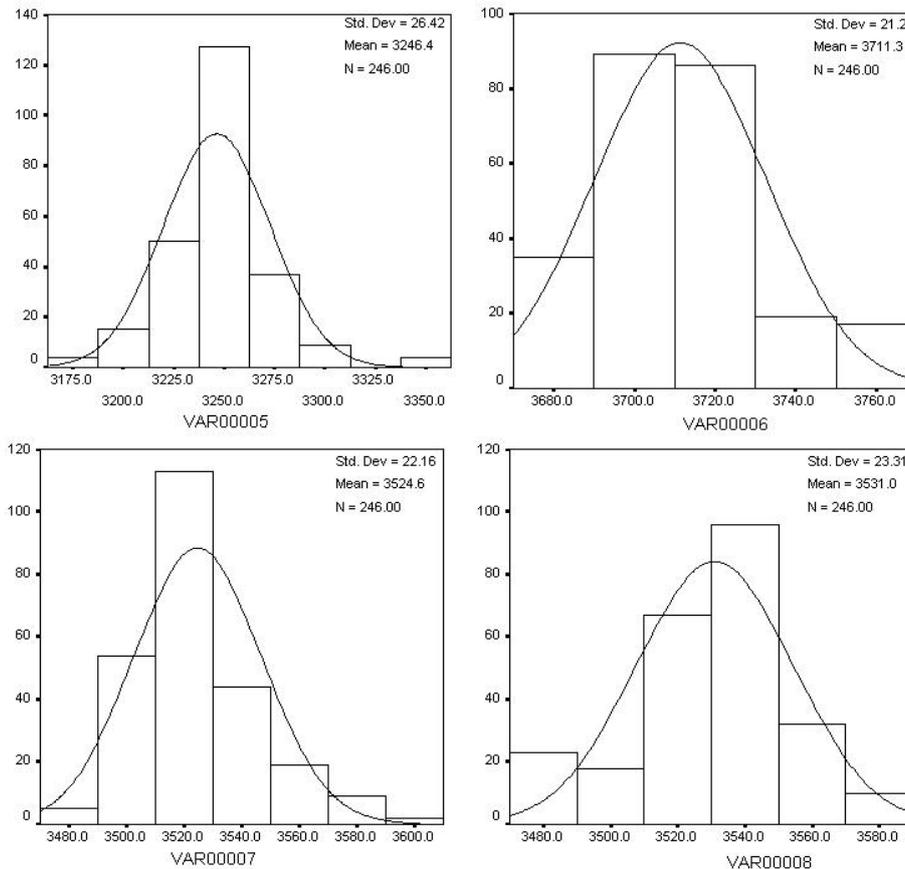


Figura 4.11 Histograma_3 del comportamiento del flujo anular

Las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 están basadas en la magnitud de la película en el tiempo en forma digital, el cual se indica por el número de muestras N y el valor a cada electrodo corresponde la grafica VAR0000X, es decir al electrodo 1 le corresponde VAR00001 y así sucesivamente hasta el electrodo 8, las graficas muestran que la película anular no se comporta en forma estocástica y que hay que descomponerla en el dominio de la frecuencia para afirmar que se comporta como un fenómeno ondulatorio.

4.5 ANALISIS DE LA PELICULA ANULAR EN EL DOMINIO DEL TIEMPO Y LA FRECUENCIA

Las pruebas finales que se realizan a este trabajo de investigación corresponden al análisis dinámico del comportamiento del flujo anular, las cuales están basados en las herramientas matemáticas expuestas ampliamente en el capítulo III. Una vez obtenido las bases de datos, de cada una de las pruebas, se realiza el análisis en el dominio del tiempo el cual corresponde a la frecuencia de muestreo en que se observa el fenómeno. Estas pruebas permiten observar a las señales propias de cada uno de los sensores en el dominio del tiempo sin filtrado y con filtrado, permiten ver al fenómeno anular como series en el tiempo, posteriormente se presenta en el dominio de la frecuencia y tiempo _ frecuencia. Terminado con las pruebas de

comparación entre la señal original y la señal reconstruida mediante la transformación de Fourier.

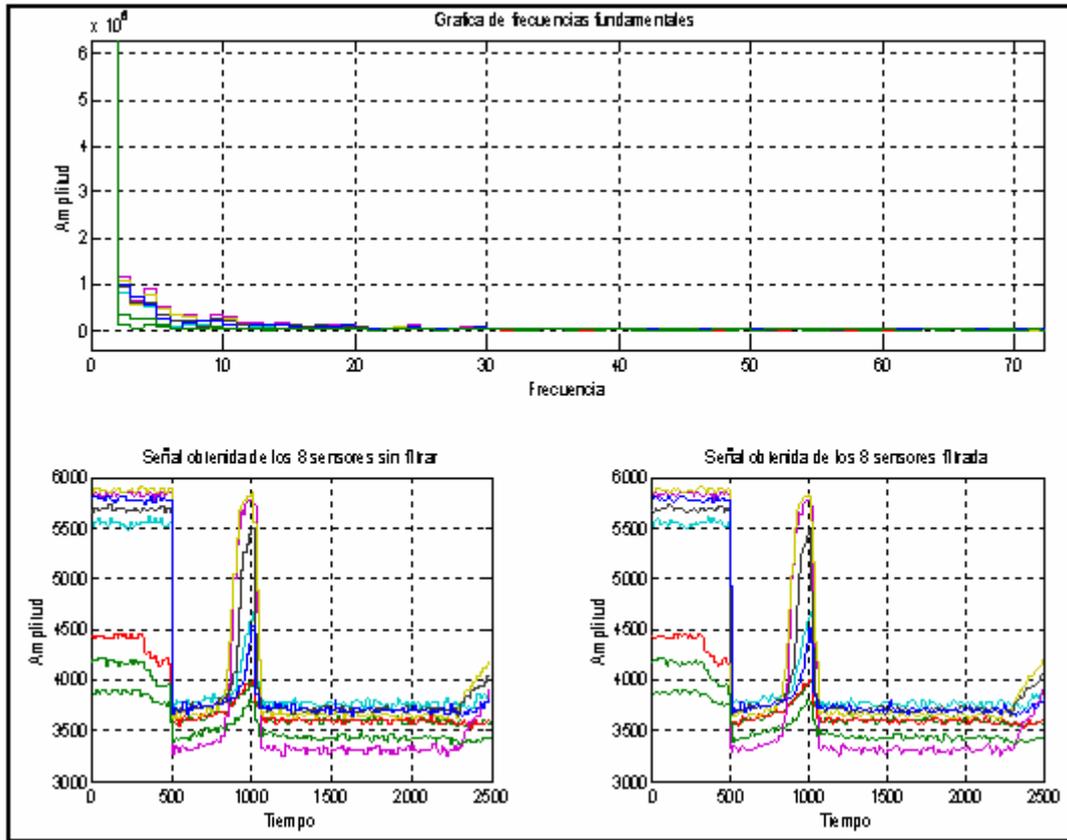


Figura 4.12 Señales del fenómeno anular sin filtrado con filtrado y frecuencias correspondientes

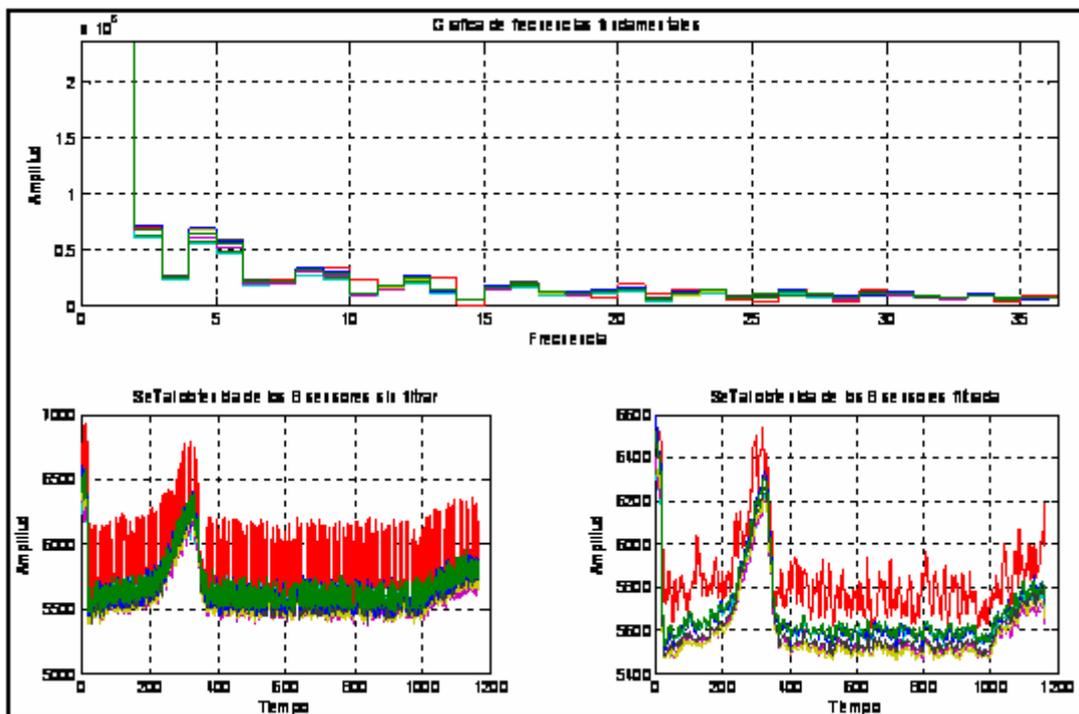


Figura 4.13 Señales sin filtrar, con filtrado y frecuencias correspondientes

La figura 4.12 y 4.13 ilustra el comportamiento de la película líquida sin filtrar y con filtrado en el dominio del tiempo así como las frecuencias que constituyen a dicha película.

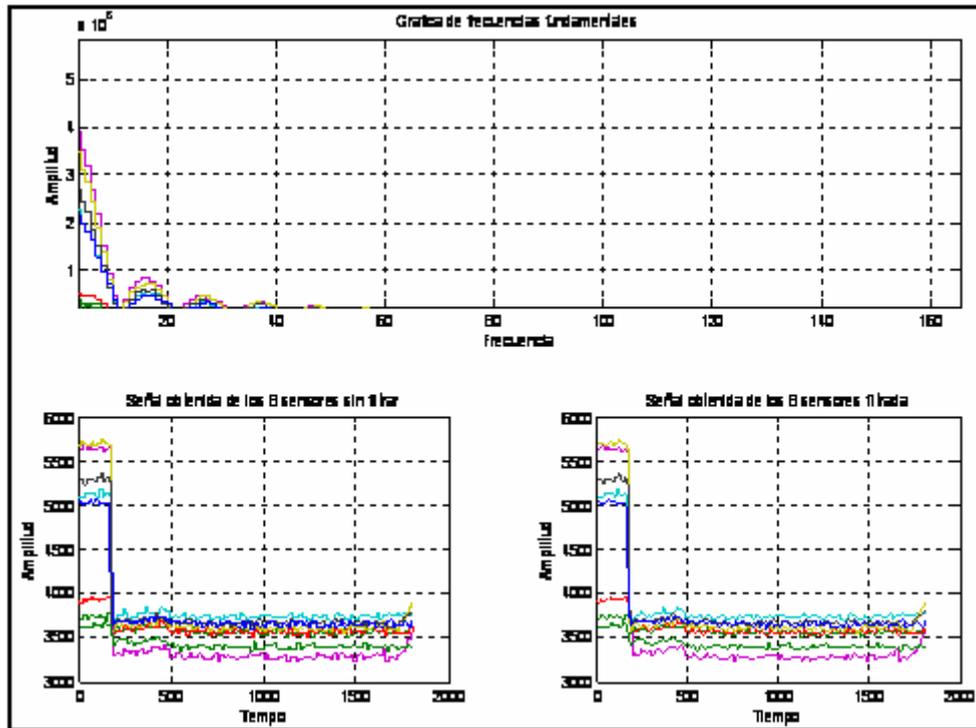


Figura 4.14 Señal muestreada a 100ms

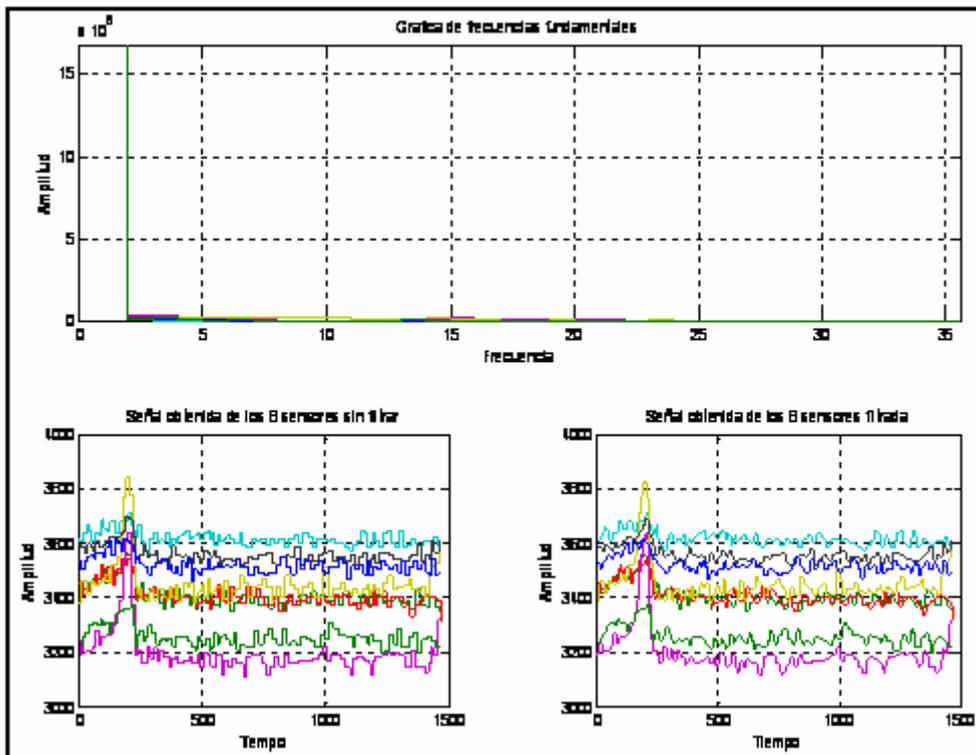


Figura 4.15 Señal muestreada a 200 ms

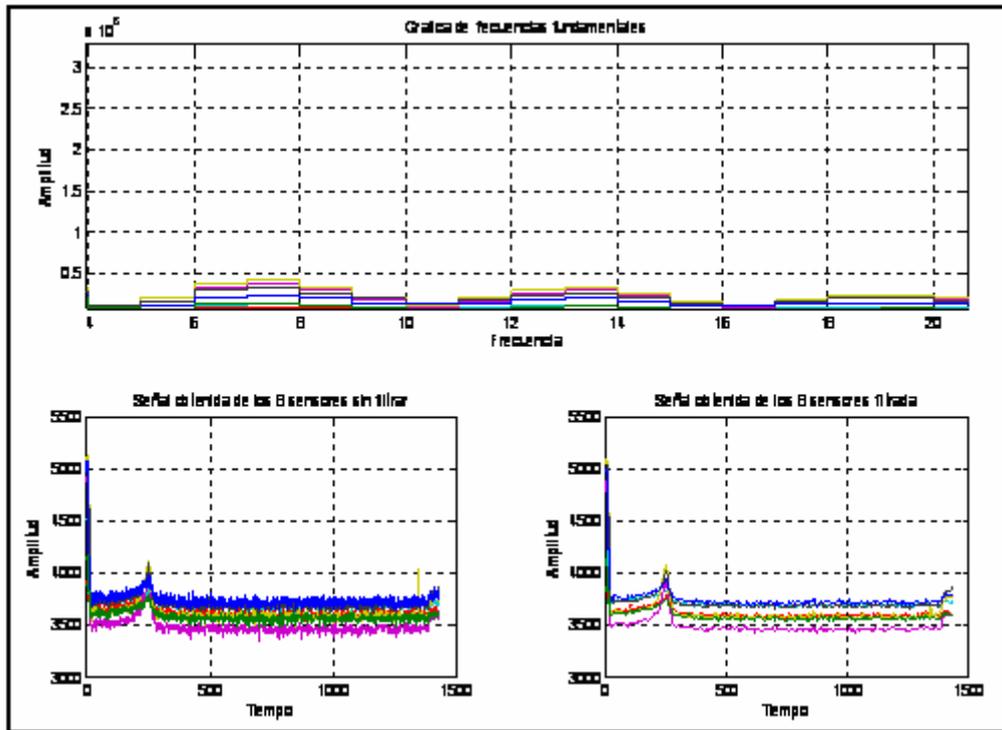


Figura 4.16 Señal muestreada a 500ms

Las figuras 4.14, 4.15 y 4.16 muestran a la película líquida muestreada a 100ms, 200ms y 500 ms, esto indica que el fenómeno anular es el mismo no importando que se cambie la frecuencia de muestreo por lo que se asegura que este presenta una naturaleza ondulatoria.

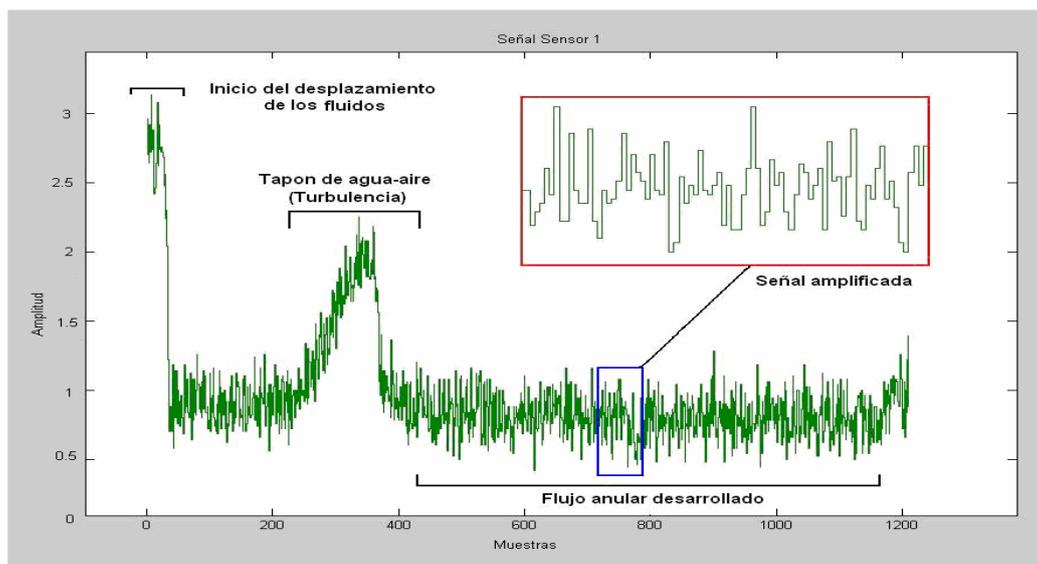


Figura 4.17 Señal analizada en el dominio tiempo _ frecuencia

En la figura 4.17 y 4. 18 se observa a la película líquida en el dominio del tiempo-frecuencia, esta grafica es obtenida con la transformación de Haar, la cual permite saber que en cualquier tiempo y frecuencia la señal obtenida esta constituida por los mismo componentes que la señal original.

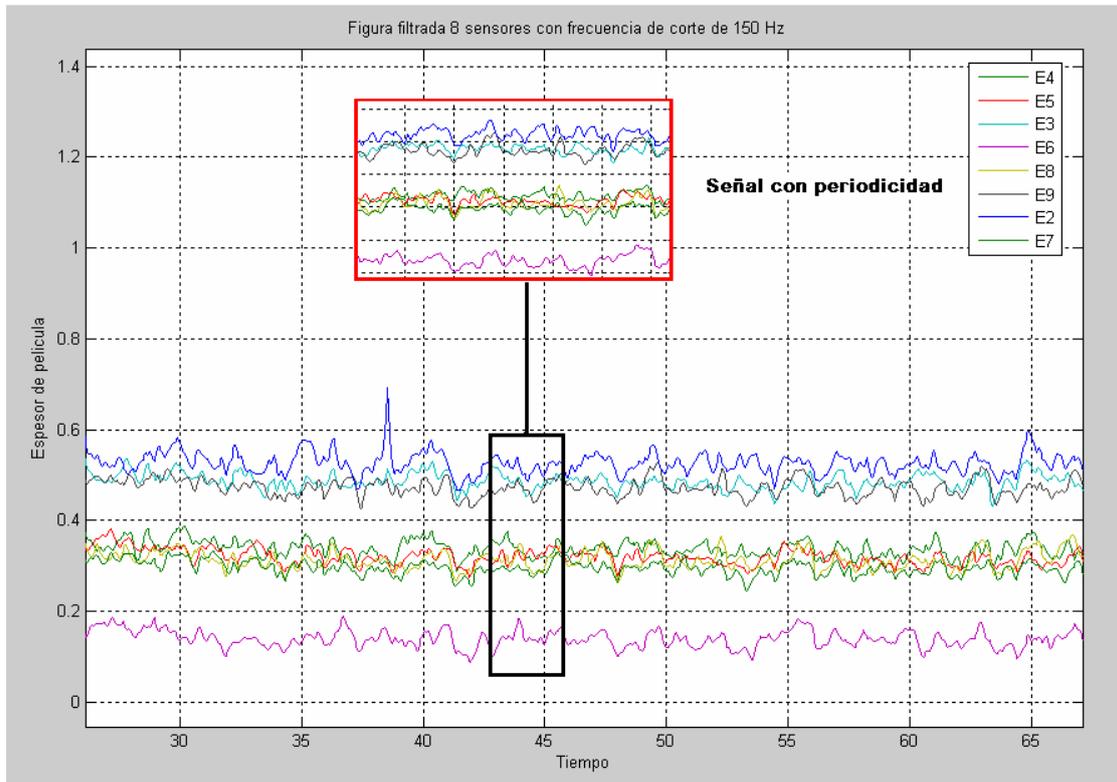


Figura 4.18 Espesor de la película filtrado a 150 Hz

La figura 4.19 muestra el espesor de la película dimensionado donde se obtiene el periodo de esta señal, la cual es filtrada a 150 Hz, como se puede observar este periodo no es simétrico pero sirve para identificar al fenómeno anular como un movimiento ondulatorio.

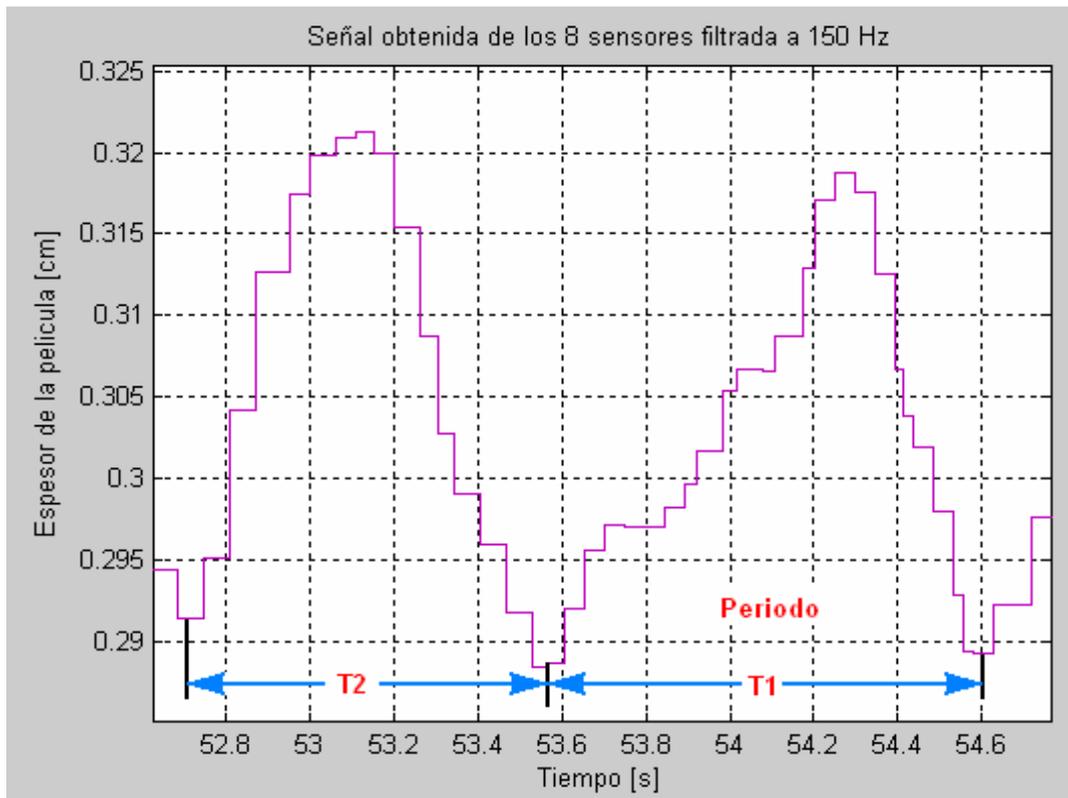


Figura 4.19 Espesor de la película con periodo definido

En la figura 4.20 se muestra el cálculo de las frecuencias de uno de los electrodos mediante la transformada discreta de Fourier, esta figura muestra claramente las frecuencias fundamentales y sus armónicos los cuales son almacenadas en un archivo de texto. Para posteriormente sustituirlas en las series de Fourier para su modelado y simulación. En la figura 4.21 se obtienen las frecuencias de los ocho electrodos.

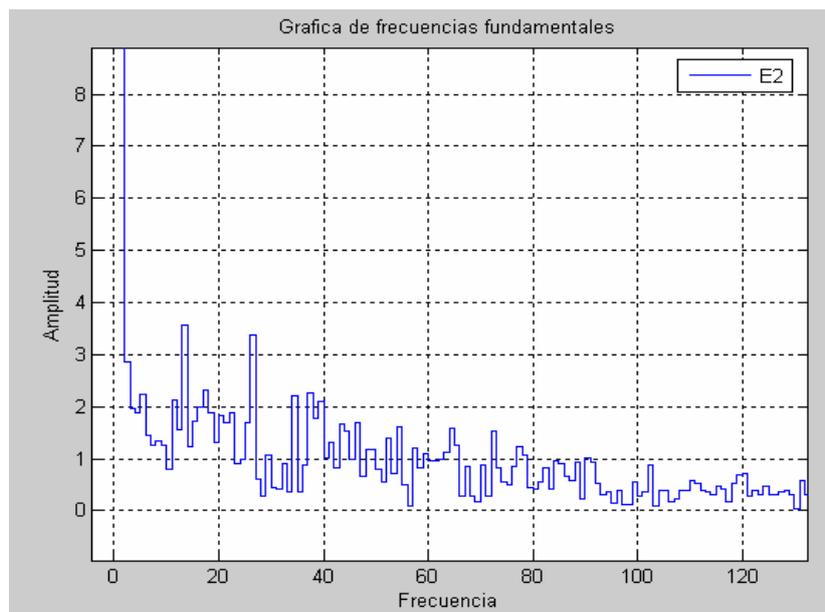


Figura 4.20 Frecuencias fundamentales de un sensor

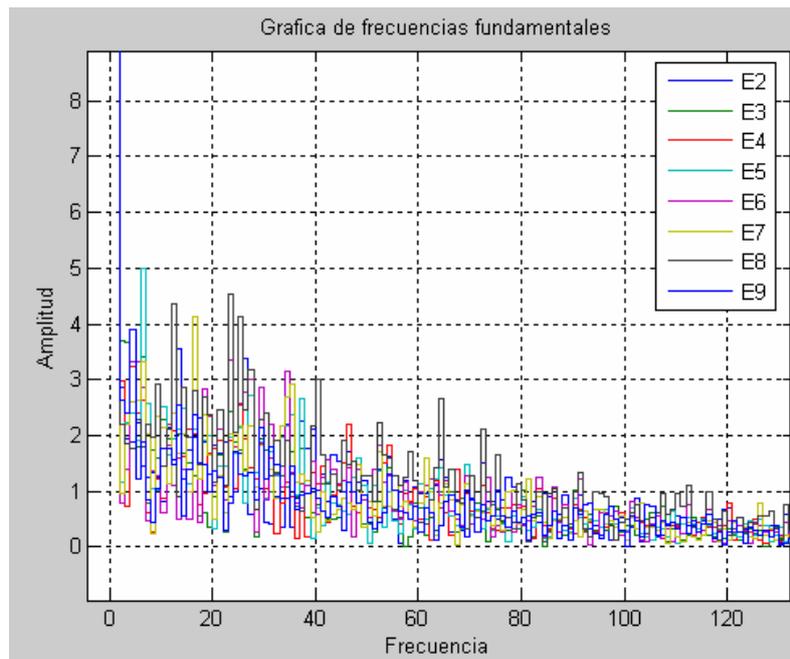


Figura 4.21 Frecuencias fundamentales de los ocho sensores

Una vez que es obtenida la señal reconstruida a partir de las series de Fourier se compara con la señal obtenida del electrodo correspondiente y se comparan para ver su similitud, la figura 4.24 ilustra este procedimiento en el cual se puede ver la similitud existente entre las señales.

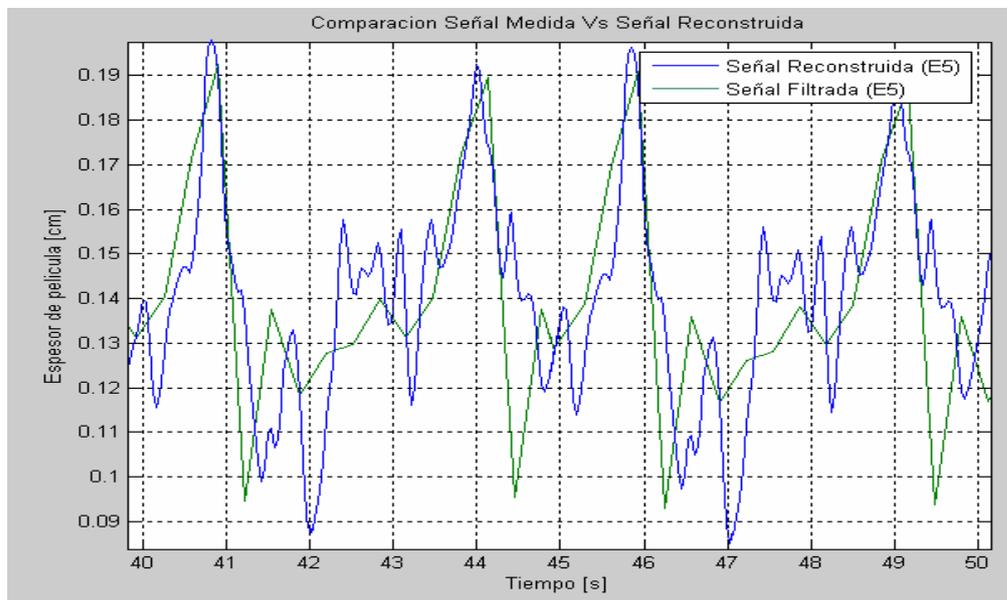


Figura 4.22 Comparación de la señal medida vs. La señal reconstruida (Series de tiempo vs. Series de Fourier)

Con los valores instantáneos de los ocho sensores así como el de los reconstruidos se calcula el porcentaje de error de área entre la señal medida y la señal reconstruida, como se puede ver el error no es mayor a 0.1%, lo cual

indica que el fenómeno anular se puede modelar con series de Fourier para este tipo de aplicación.

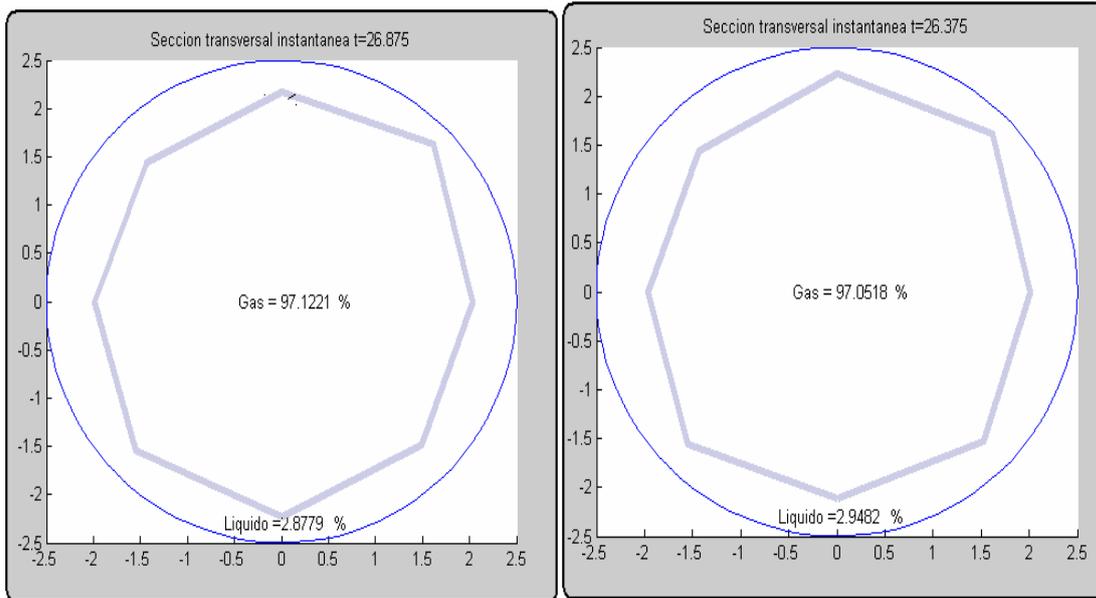


Figura 4.23 Cálculo del error de área entre la señal medida y la señal reconstruida. $E=0.1857$

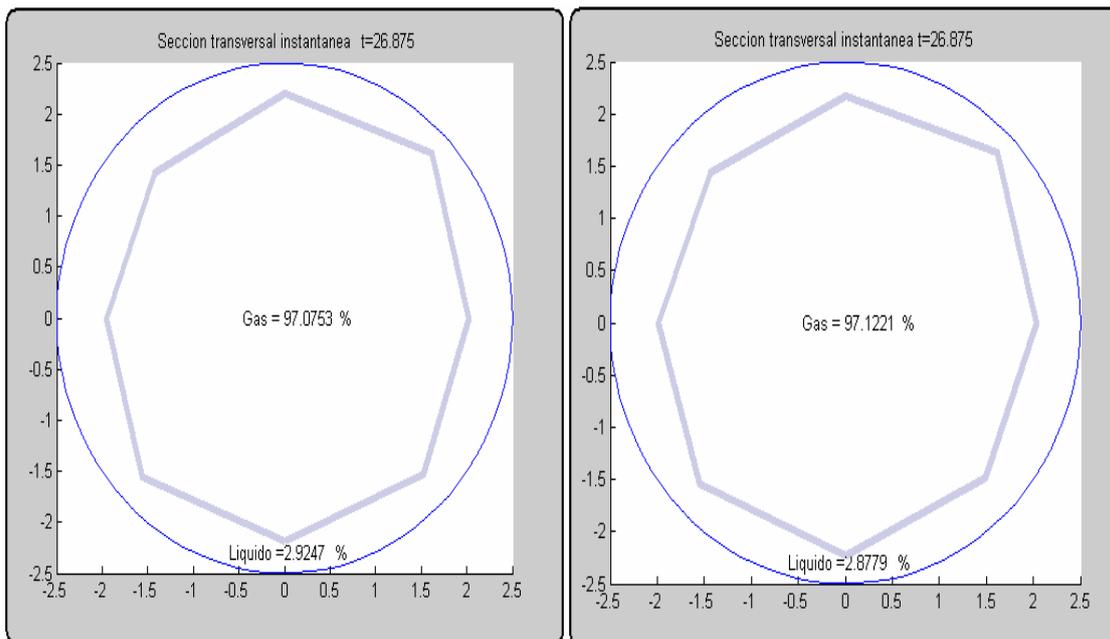


Figura 4.24 Cálculo del error de área entre la señal medida y la señal reconstruida $E= 0.0468$

Estas pruebas son realizadas fuera de línea del proceso a partir de las bases de datos obtenida en la fase experimental, empleando la paquetería de Matlab. Todo este análisis permite conocer la naturaleza de la película líquida en el patrón anular del sistema experimental con las condiciones de operación definidos en el capítulo II y se puede ver que es de naturaleza ondulatoria.

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones del trabajo

Este trabajo presenta una metodología de experimentación en la cual se desarrollan cientos de patrones de flujos anulares.

Las herramientas computacionales empleadas permiten crear modelos geométricos del fenómeno real a herramienta virtual en una computadora personal.

Se requiere construir instrumentos más sofisticados para detectar los parámetros que aun son desconocidos y con eso construir modelos que se aproximen más al fenómeno real.

Este trabajo arroja conclusiones desde dos puntos de vista, el primero es desde el punto de vista de ingeniería y el segundo desde el punto de vista teórico de la comprensión del fenómeno anular.

Desde el punto de vista de Ingeniería se resaltan los siguientes puntos:

- Los sensores de proximidad, basados en campos electrostáticos es una herramienta no intrusiva, la cual permite medir con la suficiente precisión, la película líquida en el contorno de un tubo (precisión de 0.01 mm para esta aplicación).
- Los sistemas contenidos en un circuito integrado, son herramientas muy poderosas, ya que todo el diseño de la circuitería se controla por programación, eliminado con esto ruido inducido por conexiones físicas, tal como lo es el circuito MC 33794 (sensor de proximidad) y el Procesador de Señales Digitales (DSP)(ver el capítulo II y las figuras 2.2 y 4.5).
- Los Procesadores de Señales Digitales, son la herramienta más poderosa que existe actualmente para la reconstrucción de señales

- Mediante la Transformada Discreta de Fourier (en este caso el patrón anular en base a la película líquida), además permite calcular las frecuencias que constituyen a la película líquida del flujo anular con sus respectivos coeficientes (ver las pruebas del capítulo III).
- El diseño del sistema de medición de la película líquida del fenómeno anular basado en la arquitectura sensor de proximidad (MC 33794)-Procesador de Señales Digitales-Computadora Personal, se realiza con programación C, el cual ofrece ventajas debido a su modularidad.
- La técnica de medición empleada con los sensores de proximidad, no permite detectar ni medir el fenómeno de atomización que se presenta en el patrón de flujo anular.
- Esta técnica nos permite medir el campo del flujo, por medio del conocimiento de las áreas mediante las siguientes ecuaciones: $\alpha = \frac{A_{pl}}{A_T}$

$$; (1 - \alpha) = \frac{A_{pg}}{A_T} \quad ; \quad \frac{A_{pl}}{A_{pg}} = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} \quad (\text{ver figura 4.8 a y b})$$

- El conocimiento de las fracciones de área en el tiempo de la parte líquida y de gas, permite conocer la fracción de masa de cada una de las fases por área con una incertidumbre del 10% pues solamente se cuenta con ocho sensores de medición (ver figuras 4.7 a y b así como las figuras 4.8 a y b).
- Este sistema, es capaz de detectar la resonancia, vibración e inestabilidad del flujo en sistemas de transporte de gas-líquido, mediante el análisis en la frecuencia.
- Como una sugerencia el sistema puede leer la presión y temperatura de entrada y salida a cualquier sistema de transporte de flujos bifásicos, mediante dispositivos externos con norma ANSI, para realizar el control en forma automática de la estabilidad en plantas nucleares.
- Se determinan diferentes patrones de flujo anular y se almacenaron en bases de datos para su reconstrucción. Tales como los de las figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 donde se aprecian las diferentes fracciones de líquido y gas mediante la técnica expuesta en el capítulo II.

Desde el punto de vista teórico

- Se determinan las formas de onda mediante series de tiempo de la película líquida (flujo anular)(ver figuras 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17).
- Se determina el ancho de banda de operación de la película líquida del flujo anular (ver figuras 4.19, 4.20, 4.21).
- Se obtiene el análisis en el dominio de la frecuencia del flujo anular (ver figura 4.20 y 4.21).
- Y finalmente se realiza el análisis del fenómeno anular en el dominio frecuencia-tiempo en la reconstrucción del patrón anular (ver figuras 4.22, 4.23, 4.24).

Como se puede observar de la figura 5.1, los objetivos se cumplieron ampliamente, creando con esto una herramienta experimental la cual se puede expandir para continuar desarrollando herramientas experimentales que permitan medir más parámetros para la identificación y caracterización del flujo anular.

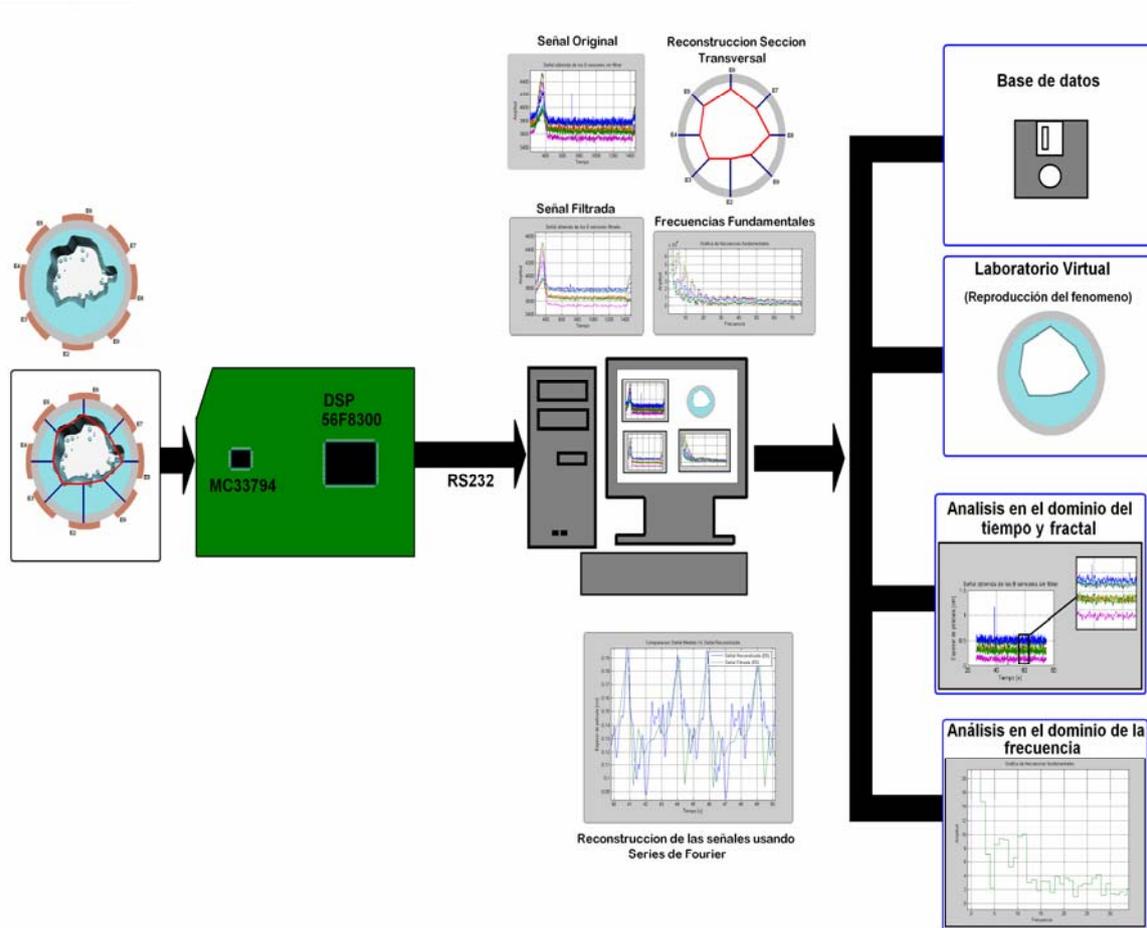


Figura 5.1 Diagrama a bloques del sistema de identificación del flujo anular (película líquida)

5.2 Recomendaciones

Las recomendaciones para trabajos futuros en esta línea de investigación están enfocadas en tres direcciones a mencionar:

Plantear todos los tipos de problemas que presenta la industria nacional donde esté involucrado el fenómeno de los flujos bifásicos y analizar cuales son sus necesidades específicas, con la finalidad de crear una infraestructura tecnológica de necesidades y de esta manera adecuar el laboratorio a esta problemática.

Automatizar el laboratorio de pruebas con la finalidad de controlar y estandarizar las pruebas que se realicen en el.

Esta última se enfoca a la problemática del fenómeno anular en la creación de sensores de tipo no intrusivo, que puedan observar al fenómeno en 2D y 3D, con la finalidad de que se puedan cuantificar sus volúmenes en forma independiente de la mezcla, y que permitan calcular sus velocidades respectivas así como tratar de interpretar las fuerzas que están interrelacionadas con la mezcla de flujo agua-aire, es decir hay que trabajar en la construcción del tubo inteligente.

Con las bases de datos obtenidos de la parte experimental se debe entrenar a redes neuronales para que puedan reconstruir en forma automática cualquier patrón del flujo anular. Montar una plataforma en tiempo real con toda la paquetería que cuenta Matlab (con las cajas de herramientas de adquisición de datos, diseño de filtros, procesamiento de imágenes, lógica difusa, procesamiento de señales, redes neuronales y transformadas de ondeletas).

Es recomendable estudiar al flujo anular desde el punto de vista fractal con la finalidad de tener un conocimiento de acuerdo a la escala en que se manifiesta dicho fenómeno.

REFERENCIAS

- [1] D. Joseph, R. Bai, K. Chen, and Y. Y. Renardy. "Core-annular Flows." *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 29:65-90, 1997.
- [2] R. Bai, K. Chen, and D. D. Joseph. "Lubricated pipelining: stability of core-annular flow, part 5. experiments and comparison with theory." *J. Fluid Mech.*, 240:97-142, 1992.
- [3] R. Bai, K. Kelkar, and D. D. Joseph. "Direct simulation of interfacial waves in a high-viscosity-ratio and axisymmetric core-annular flow." *J. Fluid Mech.*, 327:1-34, 1996.
- [4] M. Renardy. "A possible explanation of bamboo waves in core-annular flow of two liquids." *Theor. Comp. Fluid Dyn.*, 4:95-99, 1992.
- [5] H. Hu and N. Patankar. "Non-axisymmetric instability of core-annular flow." *J. Fluid Mech.*, 290:213-234, 1995.
- [6] J. Li, Y. Renardy, and M. Renardy. "A numerical study of periodic disturbances on two-Layer Couette flow, 1998.
- [7] J. U. Brackbill, D. B. Kothe, and C. Zemach. "A continuum method for modelling surface tension." *J. Comp. Phys.*, 100:335-354, 1992.
- [8] Bird, R.B., Stewart, W. E., and Lightfoot, E. N., "Transport Phenomena", John Wiley and Sons, New York, 1960.
- [9]. Chin, W.C., "Advances in Annular Borehole Flow Modeling", *Offshore Magazine*, February 1990, pp. 31-37.
- [10]. Chin, W.C., "Exact Cuttings Transport Correlations Developed for High Angle Wells", *Offshore Magazine*, May 1990, pp. 67-70.
- [11]. Chin, W.C., "Annular Flow Model Explains Conoco's Borehole Cleaning Success", *Offshore Magazine*, October 1990, pp. 41-42.
- [12]. Chin, W. C., "Model Offers Insight into Spotting Fluid Performance", *Offshore Magazine*, February 1991, pp. 32-33.
- [13]. Chin, W. C., "Borehole Flow Modeling in Horizontal, Deviated, and Vertical Wells, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1992.
- [14]. Chin, W. C., "Eccentric Annular Flow Modeling for Highly Deviated Borehole", *Offshore Magazine*, Aug. 1993.
- [15]. Chin, W. C., "Formation Invasion, with Applications to Measurement-While-Drilling, Time Lapse Analysis, and Formation Damage", Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1995.

- [16]. Crochet, M. J., Davies, A. R., and Walters, K., "Numerical Simulation of Non-Newtonian Flow", Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 1984.
- [17]. Davis, C. V., and Sorensen, K. E., "Handbook of Applied Hydraulics", McGraw-Hill, New York, 1969.
- [18]. Fredrickson, A. G., and Bird, R. B., "Non-Newtonian Flow in Annuli", *Ind. Eng. Chem.*, Vol. 50, 1958, p. 347.
- [19]. Gobier, G.W., and Aziz, K., "The Flow of Complex Mixtures in Pipes", Robert Krieger Publishing, New York, 1977.
- [20]. Gray, G.R., and Darly, H.C.H., "Composition and Properties of Oil Well Drilling Fluids", Gulf Publishing Company, Houston, 1980.
- [21]. Hacıislamoglu, M., and Langlinais, J., "Non-Newtonian Fluid Flow in Eccentric Annuli", 1990 ASME Energy Resources Conference and Exhibition, New Orleans, January 14-18, 1990.
- [22]. Hacıislamoglu, M., and Langlinais, J., "Discussin of Flow of a Power-Law Fluid in an Eccentric Annulus", *SPE Drilling Engineering*, March 1990, p. 95.
- [23]. Iyoho, A.W., and Azar, J.J., "An Accurate Slot-Flow Model for Non-Newtonian Fluid Flow Through Eccentric Annuli", *Society of Petroleum Engineers Journal*, October 1981, pp. 565-572.
- [24]. King, R.C., and Crocker, S., "Piping Handbook", McGraw-Hill, New York, 1973.
- [25]. Langlinais, J.P., Bourgoyne, A. T., and Holden, W. R., "Frictional Pressure Losses for the Flow of Drilling Mud and Mud/Gas Mixtures", *SPE Paper No. 11993*, 58th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, San Francisco, October 5-8, 1983.
- [26]. Lapidus, L., and Pinder, G., "Numerical Solution of Partial Differential Equations in Science and Engineering", John Wiley and Sons, New York, 1982.
- [27]. Luo, Y., and Peden, J.M., "Flow of Drilling Fluids Through Eccentric Annuli", Paper No. 16692, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas, September 27-3, 1987.
- [28]. Luo, Y., and Peden, J.M., "Laminar Annular Helical Flow of Power Law Fluids, Part I: Various Profiles and Axial Flow Rates", *SPE Paper No. 020304*, December 1989.
- [29]. Luo, Y., and Peden, J.M., "Reduction of Annular Friction Pressure Drop Caused by Drillpipe Rotation", *SPE Paper 020305*, December 1989.

- [30]. Moore, P.L., "Drilling Practices Manual", PennWell Books, Tulsa, 1974.
- [31]. Perry, R.H., and Sifferman, T.R., "Unit Provides Dynamic Evaluation of Drilling Fluid Properties", World Oil, January 1990, pp. 43-48.
- [32]. Quigly, M.S., and Sifferman, T.R., "Unit Provides Dynamic Evaluation of Drilling Fluid Properties", World Oil, January 1990, pp. 43-48.
- [33]. Savins, J.G., "Generalized Newtonian (Pseudoplastic) Flow in Stationary Pipes and Annuli", Petroleum Transactions, AIME, Vol. 213, 1958, pp. 325-332.
- [34]. Savins, J.G., and Wallick, G.C., "Viscosity Profiles, Discharge Rates, Pressures, and Torques for a Rheologically Complex Fluid in a Helical Flow", A.I.Ch.E. Journal, Vol. 12, No. 2, March 1966, pp. 357-363.
- [35]. Schlichting, H., "Boundary Layer Theory", McGraw-Hill, New York, 1968.
- [36]. Skelland, A. H. P., "Non-Newtonian Flow and Heat Transfer, John Wiley & Sons, New York, 1967.
- [37]. Slattery, J.C., "Momentum, Energy, and Mass Transfer in Continua", Robert E. Krieger Publishing Company, New York, 1981.
- [38]. Streeter, V.L., "Handbook of Fluid Mechanics", McGraw-Hill, New York, 1961.
- [39]. Thompson, J.F., Warsi, Z.U.A., and Mastin, C.W., "Numerical Grid Generation", Elsevier Science Publishing, New York, 1985.
- [40]. Uner, D., Ozgen, C., and Tosun, I., "Flow of a Power Law Fluid in an Eccentric Annulus", SPE Drilling Engineering, September 1989, pp. 269-272.
- [41]. Vaughn, R.D., "Axial Laminar Flow of Non-Newtonian Fluids in Narrow Eccentric Annuli", Society of Petroleum Engineers Journal, December 1965, pp. 277-280.
- [42]. Whittaker, A., "Theory and Application of Drilling Fluid hydraulics", IHRDC Press, Boston, 1985.
- [43]. Yih, C.S., "Fluid Mechanics", McGraw Hill, New York, 1969.
- [44]. Zamora, M., and Lord, D.L., "Practical Analysis of Drilling Mud Flow in Pipes and Annuli", SPE Paper No. 4976, 49th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Houston, October 6-9, 1974.
- [45]. Falconer, K., "Fractal Geometry Mathematical Foundations and Applications", Second Edition, John Wiley, 2005.
- [46]. Barnsley, M. F., "Fractals Everywhere, Second Edition, Morgan Kaufmann/Academic Press, 1993.

- [47]. Nabney, I. T., "Netlab Algorithms for Pattern Recognition", Springer, 2003.
- [48]. Looney, C. G., "Pattern Recognition using Neural Networks Theory and Algorithms for Engineers and Scientists", Oxford University Press, 1997.
- [49]. Infeld E., and Rowlands G., "Nonlinear Waves, Solutons and Chaos", 2 th. Edition, Cambridge University Press, 2000.
- [50]. Teolis, A., "Computational Signal Processing with Wavelets", Birkhauser, 1998.
- [51]. Daubechies, I., "Ten Lectures on Wavelets", SIAM, 1992.
- [52]. Gasson, P. C., "Geometry of Spatial Forms, Analysis, Synthesis, Concept Formulation and Space Vision for CAD", Ellis Horwood Limited/John Wiley & Sons, 1983.
- [53]. Sominskii, I. S., "The Method of Mathematical Induction", The University of Chicago Press, 1962.
- [54]. DSP56800E 16-bit DSP Core, Reference Manual, Staff de Motorola, 2002.
- [55]. Qing Li, Caroline Yao, "Real Time Concepts for Embedded System", CMPBooks, 2003.
- [56]. Steven W. Smith, "Digital Signal Processing", 2a Edition , California Technical Publishing San Diego, California, 1999.
- [57]. Thompson F. Joe, Warsi A. U. Z., and Mastin Wayne C., " Numerical Grid Generation", Elsevier Science Publishing, 1985.
- [58]. Looney G. Carl, "Pattern Recognition Using Neural Networks Theory and Algorithms for Engineers and Scientists", Oxford University Press, 1997.
- [59]. *Zhiyao Huang; Baoliang Wang; Haiqing Li*, " Application of electrical capacitance tomography to the void fraction measurement of two-phase flow", Dept. of Control Sci. & Eng., Zhejiang Univ., Hangzhou, China.
- [60]. *Blackledge, J.M.*, "B-scan imaging of two-phase flows", Appl. Math. & Comput. Group, Cranfield Univ., UK
- [61] *Jen-Shih Chang*, " Modelling of EHD gas-liquid two-phase pipe flow", Dept. of Eng. Phys., McMaster Univ., Hamilton, Ont., Canada
- [62]. *Li-Jun Xu; Ling-An Xu*, "Ultrasound tomography system used for monitoring bubbly gas/liquid two-phase flow", Dept. of Electr. Eng. & Autom., Tianjin Univ., China

- [63]. *Krafft, R.; Hemp, J.; Sanderson, M.L.* "Investigation into the use of the electromagnetic flowmeter for two-phase flow measurements", T&N Technol. Ltd., Rugby, UK
- [64]. *Mennell, J.; Byrne, B.; Yan, Y.*, "Non-invasive two phase flow measurement using soft X-ray attenuation", Teesside Univ., UK
- [65]. *Hayes, D.G.; Gregory, I.A.; Beck, M.S.*, "Velocity profile measurement in oil/gas flows [using capacitance tomography]", Sondex Geophysical Equipment, Hook, UK
- [66]. *Salkeld, J.A.; Hunt, A.; Beck, M.S.*, "Real time process tomography of oil based two phase flows using transputer based parallel processing", Dept. of Electr. Eng. & Electron., Univ. of Manchester Inst. of Sci. & Technol., UK
- [67]. *Strizzolo, C.N.; Converti, J.*, "Capacitance sensors for measurement of phase volume fraction in two-phase pipelines", Comision Nacional de Energia Atomica, Bariloche, Argentina
- [68]. *Hori, K.; Fujimoto, T.; Kawanishi, K.*, "Development of ultra-fast X-ray computed tomography scanner system", Editor(s): Nalcioglu, O. Res. & Dev. Center, Mitsubishi Heavy Ind. Ltd., Takasago, Japan
- [69]. *Gajewski, J.B.; Gload, B.; Kala, W.*, "Electrostatic method for measuring the two-phase pipe flow parameters", Tech. Univ. of Wroclaw, Poland
- [70]. *Tao Sun; Hongjian Zhang; Chiyong Hu.*, "Identification of gas-liquid two-phase flow regime and quality", Dept. of Control Sci. & Eng., Zhejiang Univ., Hangzhou, China.
- [71]. *Nooralahiyan, A.Y.; Hoyle, B.S.; Bailey, N.J.*, "Neural network for pattern association in electrical capacitance tomography", Dept. of Electron. & Electr. Eng., Leeds Univ., UK.
- [72]. Wornell W. Gregory. "Signal Processing with Fractals a wavelet – based Approach", Prentice Hall, 1995.
- [73]. Charles L. Phillips and H. Troy Nagle. "Digital Control System Analysis and Design", Third Edition, Prentice Hall 1995.

APENDICE A

**METODOLOGIA DE CALIBRACION
DEL
LABORATORIO DE PRUEBAS**

Para generar el patrón del flujo anular en una tubería horizontal, de acuerdo al diagrama de Mandhane (A.1), se necesitan ciertos intervalos de valores de la velocidad superficial del gas (U_{SG}) y de la velocidad superficial del líquido (U_{SL}). Por otro lado, para poder asegurar la obtención de estos valores se deben calibrar los instrumentos que nos proporcionaran estas velocidades. El sistema cuenta con dos placas de orificio para controlar el flujo de agua y el flujo de aire, ya que el sistema no es automático.

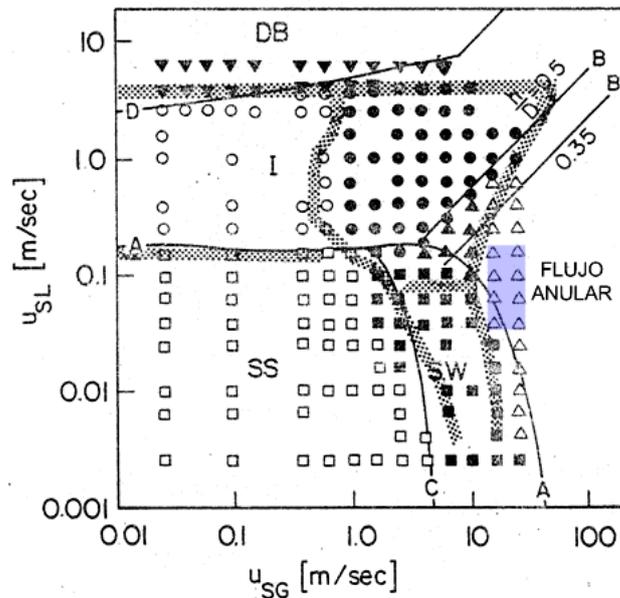


Figura A.1 Mapa del patrón del flujo para un tubo de 51 mm de diámetro. Tubo horizontal mezcla agua-aire a condiciones atmosféricas. Tabla de Mandhane

A.1 Calibración de la placa de orificio en la tubería de agua.

En este apéndice se describe la metodología de la calibración de la placa de orificio para medir el flujo del líquido y la solución técnica que se le da.

La placa de orificio (que se muestra en la figura A.2) de la tubería de agua es el elemento primario de medición, por medio del cual se controla al flujo de agua para obtener el patrón de flujo anular.



Figura A.2 Placa de orificio utilizada

En vista de que se desconoce su diámetro interno, se procede a desmontarla de su brida para medirla. Después se reinstala y se procede a su calibración

siguiendo los pasos que se describen a continuación. El objetivo es conocer el intervalo de flujos de líquido a los cuales se presenta el flujo anular. Este intervalo de valores se muestra en la figura A.3.

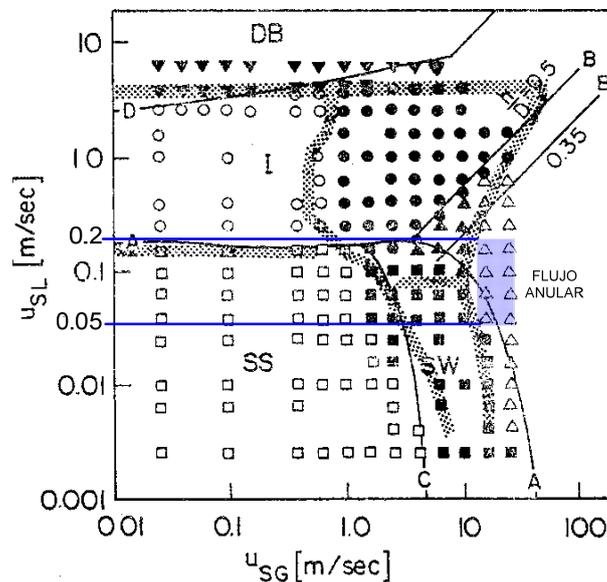


Figura A.3 Intervalo de valores de U_{SL} para generar el flujo anular.

A.1.1 Características del suministro del líquido.

Las características de la instalación son las siguientes:

1. Placa de orificio con $\beta=0.7$
2. Diámetro de la tubería 50.8 mm
3. 1 Válvula de esfera.
4. 1 Válvula de globo.

Los dispositivos de medición utilizados son los siguientes:

1. Manómetro en U
2. Báscula
3. Cronómetro
4. Recipiente contenedor.

Las especificaciones de estos dispositivos se encuentran al final de este inciso.

En la figura A.4, se muestra la matriz de pruebas que se emplea para este experimento, en el cual el flujo utilizado es agua.

Abertura de la válvula	Tiempo	Masa	Caudal Q	Velocidad en la tubería
a_{b0}				
a_{b1}				
a_{b2}				
a_{b3}				
a_{b4}				
a_{b5}				
a_{b6}				
a_{b7}				
a_{b8}				
a_{b9}				
a_{b10}				
a_{b11}				
a_{b12}				
a_{b13}				
a_{b14}				
a_{b15}				
a_{b16}				
a_{b17}				

Figura A.4 Matriz de pruebas para el experimento con líquido H_2O

Donde $t_0 = 30$ segundos, a_{b0} = Abertura de la válvula a 1/6 de vuelta, y así sucesivamente.

Partiendo de la ecuación A.1 se describen los pasos necesarios para llegar a conocer la U_{SL} , y se describe la forma de obtener cada componente de la ecuación.

$$U_{SL} = \frac{Q_L}{A} \tag{A.1}$$

Donde el área de la tubería se calcula de la siguiente manera:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \tag{A.2}$$

Debido a que el valor del diámetro del tubo es de 50.8 *mm* o 0.0508 *m*, se substituye en la ecuación (A.2) y el valor del área obtenida es de 0.002026 *m*².

Para determinar Q_L se aplica siguiente ecuación:

$$Q_L = \frac{Vol_L}{t} \quad [A.3]$$

El tiempo utilizado en la ecuación anterior es de $t = 30$ segundos y en este tiempo se deposita el flujo volumétrico que pasa por la placa de orificio en un tanque tipo cisterna, esto es realizado con el fin de obtener un flujo másico el cual es pesado en una báscula, para así obtener la masa en ese periodo de tiempo.

Ya que se obtiene el valor de la masa, es posible encontrar el volumen mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m_a}{V_{ol}} \quad [A.4]$$

Una vez conocido el valor de la masa y en vista de que la densidad es un valor constante para cada fluido, se tiene lo siguiente:

$$V_{ol} = \frac{m_a}{\rho} \quad [A.5]$$

En la figura A.5 se muestra el diagrama de flujo que describe la metodología empleada para calibrar las placas de orificio usadas en el sistema.

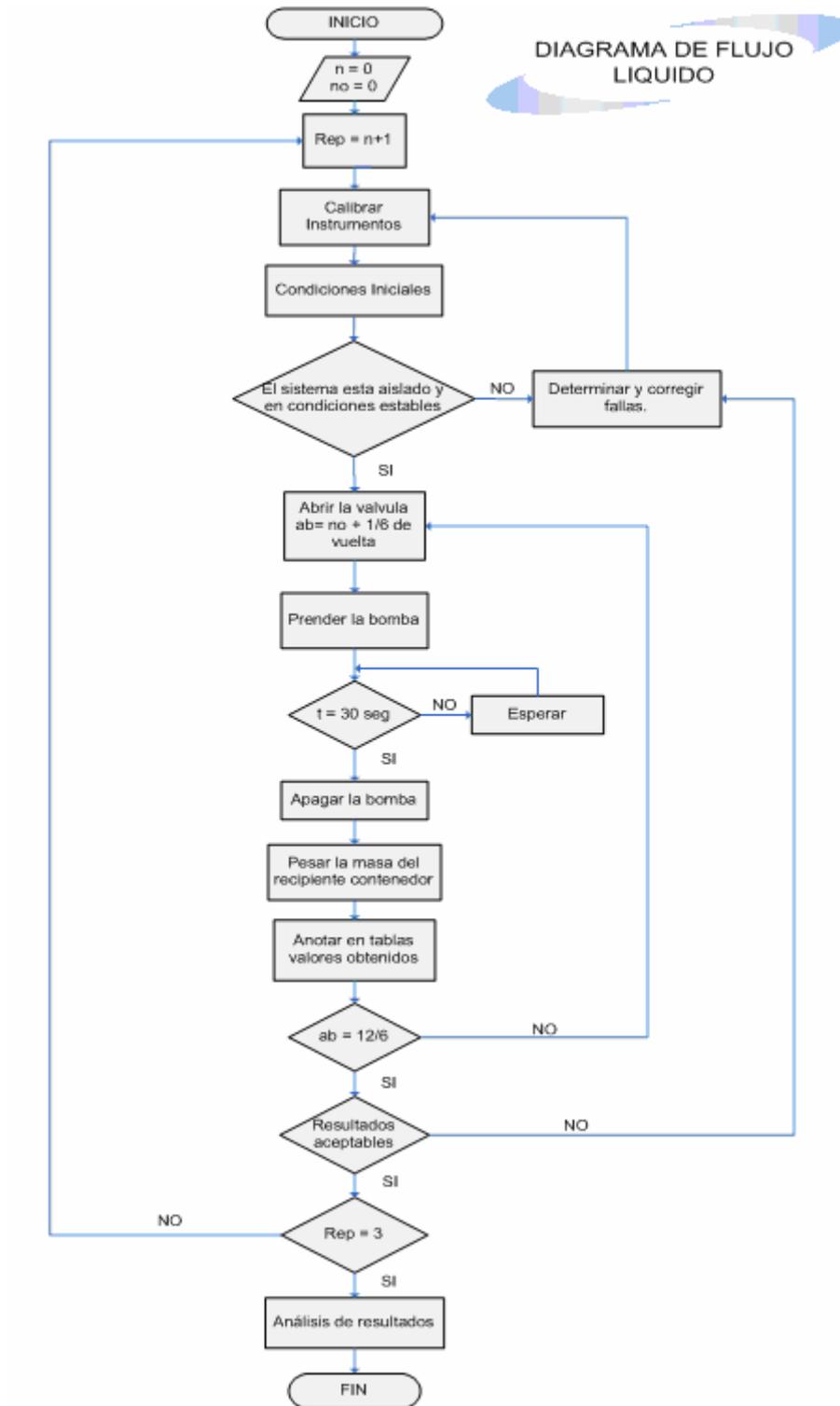


Figura A.5 Diagrama de flujo para la calibración de instrumentos de la fase liquida.

A.1.2 Pasos de la calibración

1. Debido a que la instalación con la que se cuenta es una instalación compartida entendiéndose por compartida que varios sistemas utilizan el mismo compresor, la misma bomba de agua, los mismos tanques de almacenamiento de aire, y el mismo tinaco de agua. Lo primordial es aislar los otros sistemas de estos elementos ya que estos trabajan con características distintas al sistema para la generación del flujo anular.
2. Una vez que el tinaco está a un nivel medio de agua, la bomba es energizada y se abre la válvula de esfera, para permitir el flujo de agua a través de la placa de orificio.
3. La válvula de globo utilizada es de 4 vueltas $5/6$ de vuelta, así que cada $1/6$ de vuelta se pesa la masa del flujo volumétrico que pasa por la tubería, para posteriormente convertir esta masa a volumen como se expresa en la ecuación (A.5). Así que la válvula se abre $1/6$ para realizar la primera medición.
4. Se introduce la manguera previamente conectada a la salida de la tubería a nuestro recipiente que contendrá el agua, el cual se encuentra sobre la báscula.

Como se utiliza el sistema métrico decimal, la masa debe ser convertida a *kg*, y se debe recordar que se debe pesar la masa real, entendiéndose como masa real lo siguiente.

$$m_{real} = m_p - tara \quad [A.6]$$

La tara es el peso del recipiente en el cual está contenida el agua que paso a través de la tubería. Para explicar esto se proporciona un ejemplo y éste se seguirá hasta llegar a la U_{SL} .

5. Desde el momento en que la bomba del agua es energizada, se toma un tiempo de 30 segundos y al llegar a este la bomba es desenergizada. Posteriormente se procede a pesar la m_{real} contenida en el recipiente de medición.

Ejemplo:

$$m_p = 33.11 \text{ kg.}$$

$$tara = 9.53 \text{ kg.}$$

Aplicando la ecuación A.6 se obtiene el siguiente valor:

$$m_{real} = 23.59 \text{ kg.}$$

- Una vez conocida la m_{real} , se toman los valores de la presión diferencial existente en la placa de orificio y los valores que se proporcionan en la siguiente tabla:

Tabla A.1 Datos obtenidos

			DATOS Y CALCULOS PARA LA PLACA DE ORIFICIO 1								
	Tiempo	Presión	Masa	Abertura	Diámetro	Diámetro	Area Tuberia	Area Placa	Flujo o Caudal	Velocidad	Velocidad
	seg.	diferencial	lb	válvula	tubería	placa de	m ²	de orificio	(Q)Tuberia	Tuberia	Placa-Orificio
		mmHg		vueeltas	mm	orificio mm		m ²	kg/s	V = Q/A m/s	V = Q/A m/s
1	30	14	52	1/6	50.8	36.5	2.03E-03	1.05E-03	7.86E-04	3.88E-01	0.751400022

Es necesario medir la presión diferencial ya que ésta es indispensable para graficar la curva de calibración de la tubería.

- Para realizar las siguientes mediciones, se repiten los pasos a partir del tercero, sólo que en estas mediciones se incrementará la abertura de la válvula 1/6, y así se hará el incremento sucesivamente hasta tener la abertura deseada.
- Los pasos anteriores se repiten dos veces más para poder sacar un promedio de los valores medidos y tener la certeza de que estos tienen un margen de error pequeño.

A.1.3 Análisis de los datos obtenidos

Una vez que se han realizado los pasos anteriores, se obtiene la tabla A.2 como se muestra a continuación:

Tabla A.2 Promedio de los datos obtenidos

	Tiempo	Presión	Masa	Abertura
	seg.	diferencial	lb	válvula
		mmHg		vueeltas
1	30	14	52	1/6
2	30	22	81	2/6
3	30	30	104	3/6
4	30	42	127	4/6
5	30	51	141	5/6
6	30	60	155	1
7	30	69	171	1/6 + 1
8	30	79	188	2/6 + 1
9	30	87	192	3/6 + 1
10	30	96	210	4/6 + 1
11	30	102	210	5/6 + 1
12	30	106	215	2
13	30	123	240	1/6 + 2
14	30	126	233	2/6 + 2
15	30	127	242	3/6 + 2
16	30	127	245	4/6 + 2
17	30	128	245	5/6 + 2
18	30	129	246	3

Teniendo m_{real} en kg ya que se conocen todas las variables, y dado que la ρ del agua tiene un valor de $1000 \frac{kg}{m^3}$ Se emplea la ecuación [A.5] para realizar los siguientes cálculos.

Continuando con el ejemplo se tiene lo siguiente:

$$V_{ol} = \frac{23.58}{1000} = 0.02358 m^3$$

Una vez que es conocido V_{ol} se aplica la formula [A.3], obteniéndose el siguiente resultado:

$$Q_L = \frac{0.02358 m^3}{30 s} = 0.000786 m^3/s$$

Este valor de Q_L es el valor que en un principio se buscaba para poder aplicar la formula [A.1] y poder conocer la U_{SL} , finalmente se obtiene el siguiente resultado:

$$U_{SL} = \frac{0.000786 m^3/s}{0.002026 m^2} = 0.3879 m/s$$

Una vez obtenida la U_{SL} para todos los puntos, se representan estos en forma tabular, como se indica a continuación.

Tabla A.3 Valores completos

Numero de Reynolds	Tuberia	Presion	GRAFICAS	PARA LA	PLACA DE	ORIFICIO 1	Flujo o Caudal (Q)Tuberia
	Velocidad	Diferencial	Placa orificio	Presion	Flujo o Caudal (Q)Tuberia	Presion	
R_e	m/s	mmHg	Velocidad	Diferencial	g/s	mmHg	kg/s
22042.23872	0.388	14	0.751	1.4	0.786	1.4	7.86E-04
34335.02569	0.604	22	1.170	2.2	1.225	2.2	1.22E-03
44084.47743	0.776	33	1.503	3	1.572	3	1.57E-03
53833.92917	0.947	42	1.835	4.2	1.920	4.2	1.92E-03
59768.37806	1.052	51	2.037	5.1	2.132	5.1	2.13E-03
65702.82694	1.156	60	2.240	6	2.344	6	2.34E-03
72485.05424	1.276	69	2.471	6.9	2.585	6.9	2.59E-03
79691.17074	1.402	79	2.717	7.9	2.843	7.9	2.84E-03
81386.72757	1.432	87	2.774	8.7	2.903	8.7	2.90E-03
89016.73328	1.567	96	3.035	9.6	3.175	9.6	3.18E-03
89016.73328	1.567	102	3.035	10.2	3.175	10.2	3.18E-03
91136.17931	1.604	106	3.107	10.6	3.251	10.6	3.25E-03
101733.4095	1.790	123	3.468	12.3	3.629	12.3	3.63E-03
102175.581	1.798	126	3.367	12.6	0.268	12.6	3.52E-03
102581.1879	1.805	127	3.497	12.7	3.659	12.7	3.66E-03
103852.8555	1.828	127	3.540	12.7	3.704	12.7	3.70E-03
103852.8555	1.828	128	3.540	12.8	3.704	12.8	3.70E-03
104276.7447	1.835	129	3.555	12.9	3.719	12.9	3.72E-03

Mediante la tabla anterior se obtiene la curva de calibración la cual muestra el comportamiento de la U_{SL} y su comportamiento ante el incremento de la presión diferencial. Esto se observa en la figura A.6:

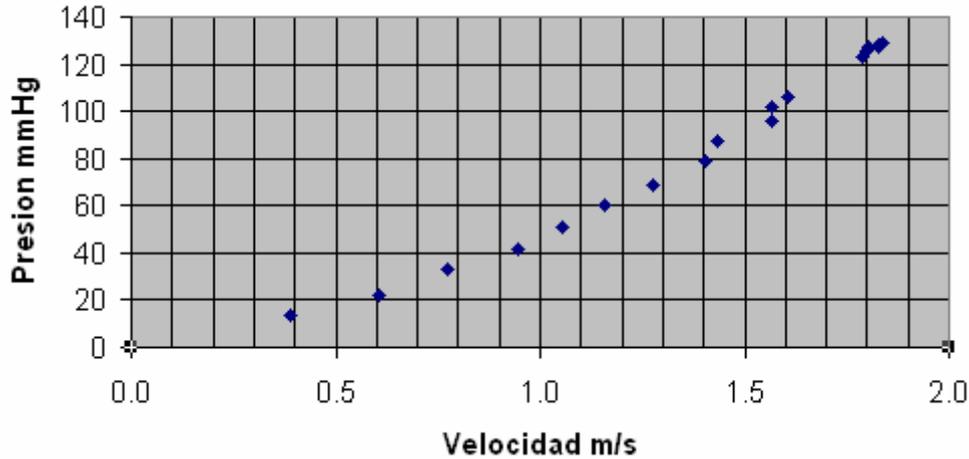


Figura A.6 Curva de Calibración para la Placa-orificio 1 (Diámetro placa = 36.5mm, diámetro de la tubería = 50.8mm)

A.2 Calibración de la placa de orificio en la tubería de aire

Se retira la placa de orificio de la brida para limpiar y medir su diámetro, posteriormente se debe conocer los elementos faltantes en la ecuación A.7 con el fin de encontrar la U_{SG} :

$$U_{SG} = \frac{Q_g}{A} \tag{A.7}$$

La curva de calibración para la placa del orificio determina si las velocidades alcanzadas son las requeridas para generar el flujo anular, el rango de U_{SG} necesario se muestran en la figura A.7.

El objetivo es analizar los perfiles de velocidad en las mediciones de cada flujo que se obtienen al realizar diferentes aberturas de la válvula para observar la velocidad promedio en cada una de ellas.

A.2.1 Características del suministro del gas.

Las características del sistema son las siguientes:

1. Placa de orificio con $\beta=0.4$
2. Diámetro de la tubería 58 mm.
3. 1 Válvula de esfera.
4. 1 Válvula de globo.

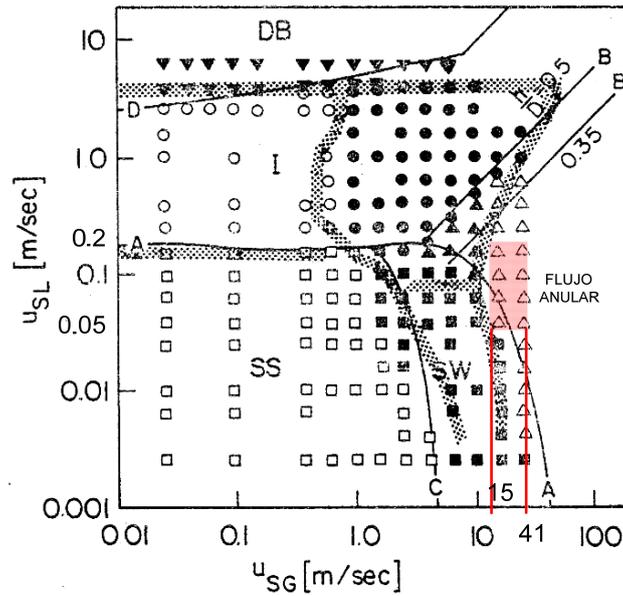


Figura A.7 Rango de valores de U_{SG} para generar el flujo anular.

Los dispositivos de medición utilizados son los siguientes:

- 5. Manómetro en U
- 6. Manómetro inclinado
- 7. Tubo de pitot tipo L

En la figura A.8, se muestra la matriz de pruebas que se emplea para este experimento, en el cual se utiliza únicamente flujo de aire.

No de lectura	Presión diferencial	Presión dinámica	Abertura de la válvula	Velocidad puntual	Barrido	Velocidad superficial del gas superior	Velocidad superficial del gas inferior
no			a_b		d_0		
n1			a_b		d_1	Velocidad superficial promedio del gas	
n2			a_b		d_2		
n3			a_b		d_3		
n4			a_b		d_4		
n5			a_b		d_5		
n6			a_b		d_6		
n7			a_b		d_7		
n8			a_b		d_8		
n9			a_b		d_9		
n10			a_b		d_{10}		

Figura A.8 Matriz de pruebas para el experimento con gas

La obtención de la U_{SG} será más complicada que la obtención de la U_{SL} esto debido a que el aire no se puede pesar así que se debe utilizar el tubo de pitot y partiendo de la siguiente ecuación:

$$U_g = \sqrt{\frac{2 * \delta_{H_2O} * g * h_{H_2O}}{\delta_A}} \quad [A.8]$$

Se deben de obtener los valores necesarios para substituirlos y así obtener la U_g en un punto, la cual es conocida como velocidad puntual (U_p). Esta fórmula se describe más adelante.

A.2.2 Colocación del tubo de pitot

Para determinar la velocidad de una corriente de flujo, el tubo estático del pitot se debe alinear en forma paralela al mismo, con la nariz apuntando contra la dirección del flujo. Tal como se muestra en la figura A.9.

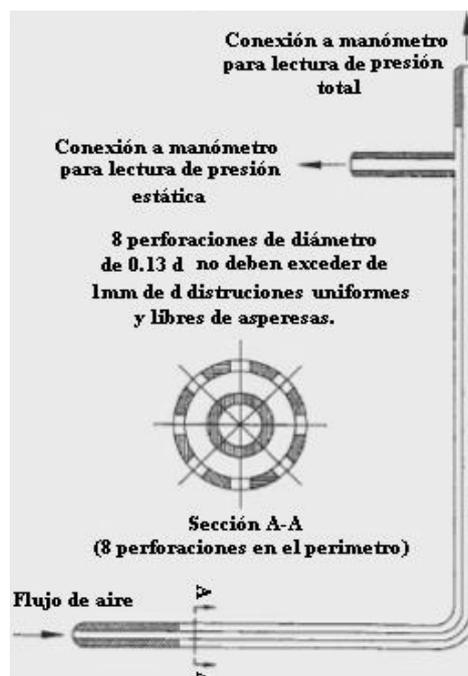


Figura A.9 Partes que componen al Tubo de pitot.

Existen varias innovaciones del tubo estático de pitot como son el tubo estático de pitot tipo L, el cual puede ser de nariz esférica o elipsoidal. El tubo de pitot utilizado para este experimento es tipo L con nariz esférica como se muestra en la figura A.10:



Figura A.10 Tubo de pitot utilizado en la calibración

Las ventajas de esta variación del tubo estático de pitot son las siguientes:

- Requiere solo una perforación pequeña en el ducto que contiene el fluido.
- Es compatible con cualquier tipo de manómetro.
- No requiere calibración

Este instrumento se emplea en líquidos y gases limpios, eso significa que está en condiciones para el experimento pues se utiliza para la calibración de un gas limpio como lo es el aire que proviene del compresor.

El tubo de pitot se coloca en la salida de la tubería, no se introduce en ella, esto significa que está en el labio de la tubería en la descarga del gas ya que el flujo es subsónico y la presión estática en el labio es la presión atmosférica tal como se muestra en la figura A.11:



Figura A.11 Colocación correcta del tubo de pitot.

Como se explicó anteriormente el tubo de pitot debe de bajar por el centro de la tubería y hacer su recorrido de manera perpendicular a la misma, la figura A.12 muestra la base implementada para mantener al tubo de pitot en una posición adecuada, para poder conocer en que parte de la tubería se encuentra haciendo el recorrido y cual será la siguiente medición:



Figura A.12 Base para el tubo de pitot: a) Vista frontal, b) Vista de lado

De acuerdo con la siguiente ecuación:

$$P_T = P_D + P_E \tag{A.9}$$

Debido a que el tubo de pitot estará en el labio de la tubería como se muestra en la figura A.11, su toma de presión estática registrará la presión atmosférica, así que la ecuación A.9 se representa de la siguiente manera:

$$P_T = P_D \tag{A.10}$$

A.2.3 Comparación del perfil ideal contra el perfil real.

Considerando que el diámetro de la tubería es de 2 pulgadas, aproximadamente 50.8 mm., se toman mediciones cada 5 mm. Empezando de 0 hasta 50 mm teniendo un total de 11 mediciones, se realiza de esta manera con el fin de obtener el perfil de velocidad en la tubería, posteriormente el valor de estas 11 mediciones serán de utilidad ya que por medio de la integración en el área de estas U_p se obtendrá un valor promedio el cual será la U_{SG} en ese punto.

En el experimento se demuestra que los valores obtenidos en los extremos no son iguales a cero (aunque si son valores pequeños en comparación con las otras mediciones que se obtienen) deberían de ser cero pero no se puede medir correctamente debido a la dimensión de la sonda, también se observa que no es simétrico el perfil de velocidad obtenido a lo largo del diámetro de la tubería.

En la figura A.13 se muestra la diferencia entre los perfiles de velocidad ideales y los obtenidos.

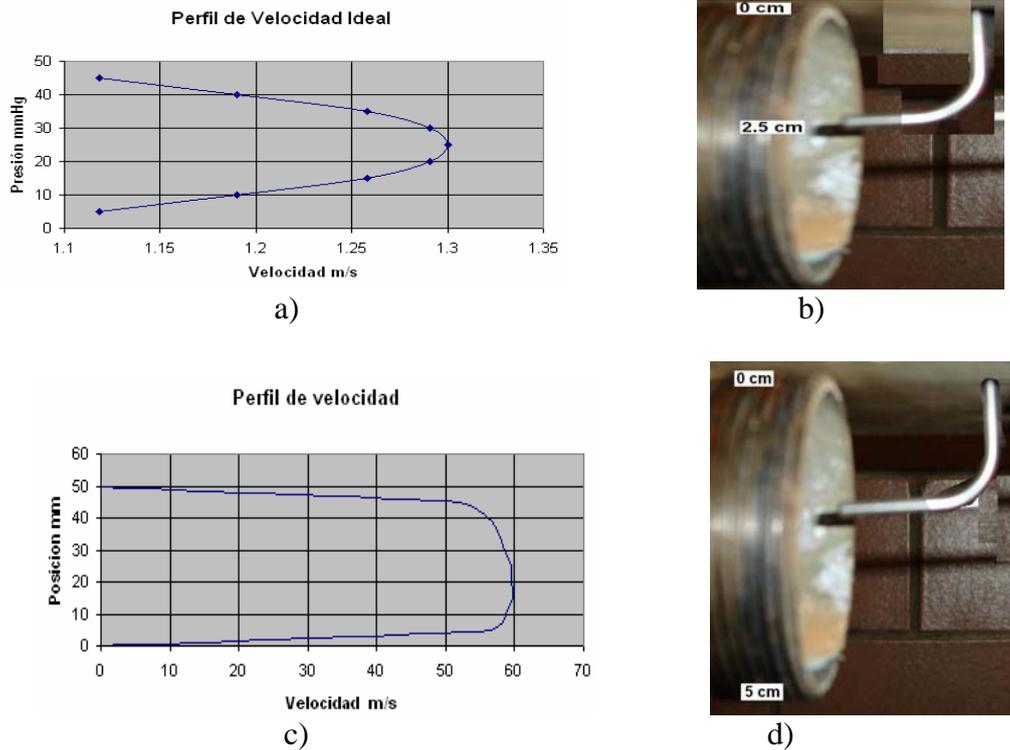


Figura A.13 Ideal vs. Real: a) Perfil de velocidad Ideal, b) Medición solo del radio pues se espera simetría, c) Perfil de velocidad real, d) Medición en todo el diámetro de la tubería.

El experimento se realiza bajo condiciones normales, esto es, a temperatura ambiente (21 °C), presión atmosférica, un $R_e = 98,951$ y una presión en la tubería de 2 bars, esta presión es suministrada por un compresor, cuyas especificaciones se encuentran al final del apéndice.

A.2.4 Acondicionamiento y lectura de las mediciones.

La medición de la presión dinámica del tubo de pitot se conecta a un manómetro en U utilizando agua como fluido manométrico, esto debido a que las presiones que se obtienen del tubo de presión dinámica del pitot son pequeñas, y por lo tanto se deben de medir en cmH_2O .

Para la medición de la presión diferencial existente en la placa de orificio utilizada ($D_{io} = 2.04cm$) se considera necesario medir en mmH_g debido a las altas presiones que se obtienen.

La medición de la presión se realiza en las tomas de la brida, este tipo de medición es la más empleada en la industria y se logran practicando en las bridas porta placa unas perforaciones de 12.7 mm ($1/2plg$), el centro de cada perforación deberá tener 25.4 mm ($1plg$) de distancia a la cara de la placa, tal como se muestra en la figura A.14:

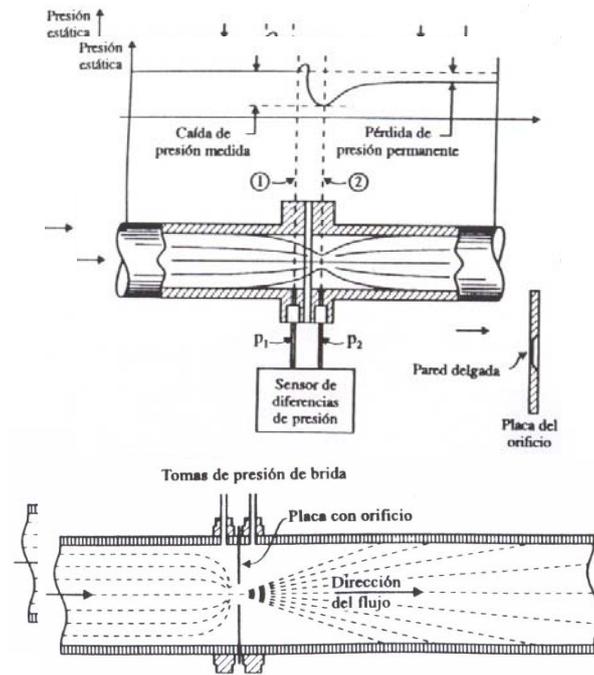


Figura A.14. Medición de la presión en las Tomas de la brida.

Los manómetros en U se encuentran uno al lado del otro como se muestra en la figura A.15:



Figura A.15 Manómetros en U utilizados en la experimentación

A.2.5 Pasos para la calibración.

1. Verificar que el tanque del compresor este lleno, por dos motivos, el primero para que se logre mantener la presión de 2 bar a la descarga de nuestra tubería, el segundo es para dar tiempo a la medición.
2. La válvula de globo utilizada da 3 vueltas $3/6$ de vuelta, así que cada $1/6$ de vuelta se hará pasar presión de gas a 2 bar, se fija a esta presión para mantener la estabilidad del flujo de gas, Así que la válvula se abre $1/6$ para realizar la primera medición, finalizando la primer medición se seguirá abriendo $1/6$ más.

Una vez que la válvula está abierta, el tubo de pitot hace su recorrido a través del diámetro de la tubería, y en cada medición del tubo de pitot se toma una fotografía a los manómetros.

3. Después de realizar la primera medición se da tiempo a que el compresor nuevamente se llene por los motivos explicados en el paso 2. Una vez lleno se continúa con la siguiente medición desde el paso 3 hasta llegar a 12 aberturas de válvula pues se espera que con eso sea suficiente para generar grandes valores de U_{SG} .
4. Ya que a se ha cumplido el paso 4, se procede a realizar el análisis de las fotografías para obtener los valores medidos tanto en mmH_g como en cmH_2O .

En la figura A.16 se muestra la metodología seguida para la calibración de las placas de orificio con flujo de gas.

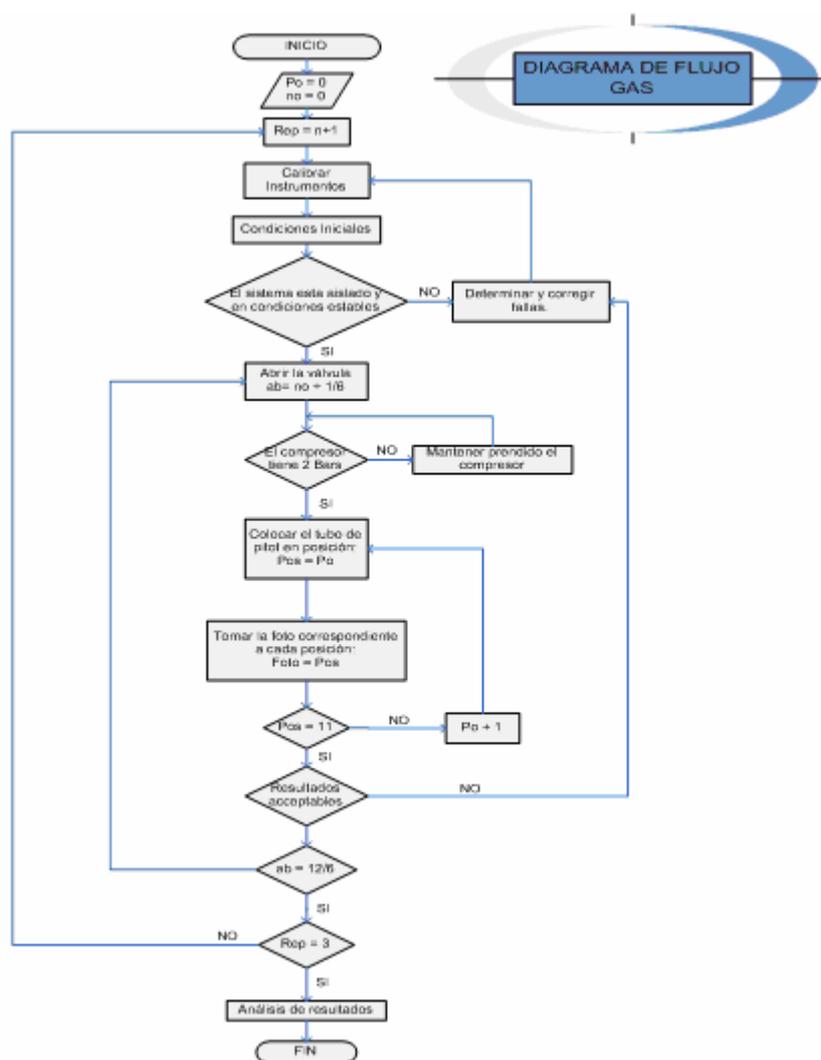


Figura A.16 Diagrama de flujo para calibración de las placas y la obtención de la U_{SG}

El primero contiene graduación en mmH_g y el otro en mmH_2O , esto con la finalidad de que se le tome una fotografía por cada medición del tubo de pitot, en donde se realizan 11 fotografías por cada abertura de la válvula. Después se analizan estas fotografías en la computadora y estos valores se colocan en sus tablas correspondientes.

A.2.6 Análisis de los datos obtenidos.

Una vez realizada todas las mediciones, se analizan los resultados de la siguiente manera:

Los datos son obtenidos a partir de las 11 fotografías correspondientes a la primera lectura con los que se crea una hoja de cálculo en la cual se anotan los valores de presión en la placa de orificio en mmH_g y los valores de presión dinámica del tubo de pitot en mmH_2O , quedando la tabla A.4 como se muestra a continuación:

Tabla A.4 Mediciones

PRUEBAS CON EL DE VUELTA Y	REALIZADAS TUBO DE PITOT MANOMETRO	PARA PARA INCLINADO	OBTENER LA ABERTURAS PARA	VELOCIDAD DE MEDICIONES	SUPERFICIAL VALVULA EN	DEL AIRE DESDE 1/6 cmH20
	PLACA DE	ORIFICIO	1	B = 0.4		
		Presión diferencial	Presion Dinamica	Abertura válvula		
		mmHg	Tubo pitot	vuelatas		
		mmHg	mmH20	vuelatas		
	1	15	40	1/6		
	2	15	50	1/6		
	3	15	52	1/6		
	4	15	54	1/6		
	5	15	54	1/6		
	6	15	52	1/6		
	7	15	52	1/6		
	8	15	52	1/6		
	9	15	54	1/6		
	10	15	50	1/6		
	11	15	36	1/6		

Se convierte la presión del tubo de pitot de mm a m de mercurio, se convierte solamente esta presión porque con ella se obtendrá la U_{SG} , para ejemplificar este proceso de conversiones primero se convertirán los mmH_2O a pascales (Pa) mediante la ecuación que se muestra a continuación:

$$\delta_{H_2O} * g * h_{H_2O} = Pa \tag{A.11}$$

Donde:

$$\delta_{H_2O} = 1000 \frac{kg}{m^3}$$

$$g = 9.81 \frac{m}{s}$$

$$h_{H_2O} = \text{valor medido}$$

Dado que se cuenta con todos los datos necesarios, para ejemplificar se toma un valor medido de $h_{H_2O} = 0.05m$, y se sustituyendo en la ecuación A.11 se obtiene lo siguiente:

$$Pa = (1000 * 9.81 * 0.05) = 490.5$$

Realizando el análisis dimensional se tiene lo siguiente:

$$\left(\frac{kg}{m^3} * \frac{m}{s^2} * m \right) = \frac{kg}{m * s^2}$$

$$Si \ 1kg = \frac{N - s^2}{m}$$

Sustituyendo tenemos;

$$\frac{\frac{N - s^2}{m}}{m - s^2} = \frac{N - s^2}{m^2 - s^2} = \frac{N}{m^2} = Pascal$$

La formula del tubo de pitot aplicada al experimento es de la siguiente forma:

$$P_{at} + 1/2 \delta_A U_g^2 = \delta_{H_2O} * g * h_{H_2O} \tag{A.12}$$

Se desea conocer la U_g y como se trabaja al borde de la tubería la P_{at} se desprecia pues sólo se toma en cuenta si el tubo de pitot se encuentra dentro de la tubería, porque ahí si existe una presión estática distinta de cero. Y el análisis queda como se muestra a continuación:

$$1/2 \delta_A U_g^2 = \delta_{H_2O} * g * h_{H_2O} \tag{A.13}$$

Despejando la U_g se obtiene la ecuación (3.8), si se considera que $\delta_{H_2O} * g * h_{H_2O} = Pascales$, la ecuación se reduce a la siguiente forma:

$$U_g = \sqrt{\frac{2 * Pascales}{\delta_A}} \tag{A.14}$$

Continuando con el ejemplo se tiene lo siguiente:

$$U_g = \sqrt{\frac{2 * 490.5}{1.2}} = 28.59 \frac{m}{s}$$

Realizando el análisis dimensional se tiene lo siguiente:

$$U_s = \sqrt{\frac{\left(\frac{kg}{m^3}\right)\left(\frac{m}{s^2}\right)(m)}{\left(\frac{kg}{m^3}\right)}} = \sqrt{\frac{m^2}{s^2}} = m/s$$

Esta velocidad obtenida es conocida como la velocidad puntual, sin embargo se necesita obtener la U_{SG} . De la misma forma que en el procedimiento anterior se toman 11 mediciones por cada abertura de la válvula, significando que por cada abertura se tendrán 11 U_p , Tal y como se ilustra en la tabla A.5.

Tabla A.5 Velocidades puntuales.

	PRUEBAS CON EL DE VUELTA Y	REALIZADAS TUBO DE PITOT MANOMETRO PLACA DE	PARA PARA INCLINADO ORIFICIO	OBTENER LA ABERTURAS PARA 1	VELOCIDAD DE MEDICIONES B = 0.4	SUPERFICIAL VALVULA EN	DEL AIRE DESDE 1/6 cmH20
	DATOS Y	CALCULOS PARA LA PLACA DE ORIFICIO 1					
	Presión diferencial	Presion Dinamica	Abertura válvula	Conversion De mmH20 a	CALCULO formula	Distancia barrido	
	mmHg	Tubo pitot mmH20	vuelatas	Pascales	Velocidad m/s	mm	Velocidad superficial del gas m/s
1	15	40	1/6	392.4	25.573	0	29.352
2	15	50	1/6	490.5	28.592	5	Velocidad superficial del gas m/s
3	15	52	1/6	510.12	29.158	10	Velocidad superficial del gas m/s
4	15	54	1/6	529.74	29.714	15	29.104
5	15	54	1/6	529.74	29.714	20	Velocidad superficial promedio m/s
6	15	52	1/6	510.12	29.158	25	29.228
7	15	52	1/6	510.12	29.158	30	
8	15	52	1/6	510.12	29.158	35	
9	15	54	1/6	529.74	29.714	40	
10	15	50	1/6	490.5	28.592	45	
11	15	36	1/6	353.16	24.261	50	

Para la obtención de la U_{SG} en un punto como se muestra en la figura A.17

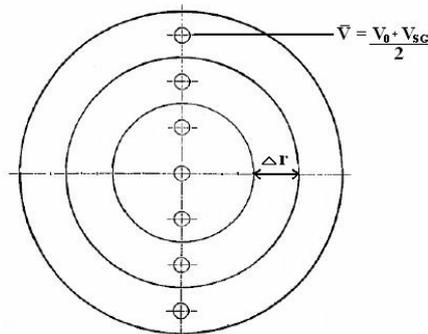


Figura A.17 Velocidad promedio en un punto.

Se aplican las siguientes ecuaciones:

$$\bar{U} = \frac{1}{A} \int_0^A \bar{U}(r) dA$$

$$\bar{U} = \frac{1}{A} \int_0^{r_0} \bar{U}(r) 2\pi r dr \tag{A.15}$$

$$U_{SG} = \frac{1}{A} \sum_{i=0}^n \left(2 * \bar{U}(r) * \pi * r_i * \Delta r \right)$$

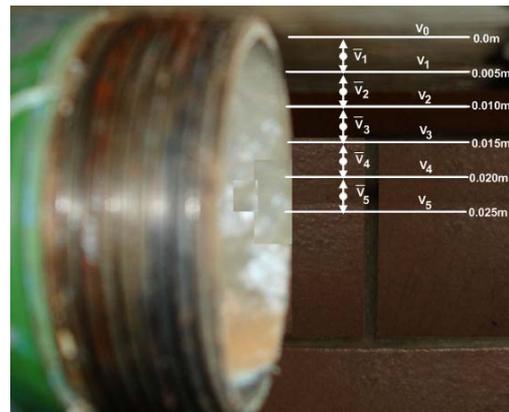
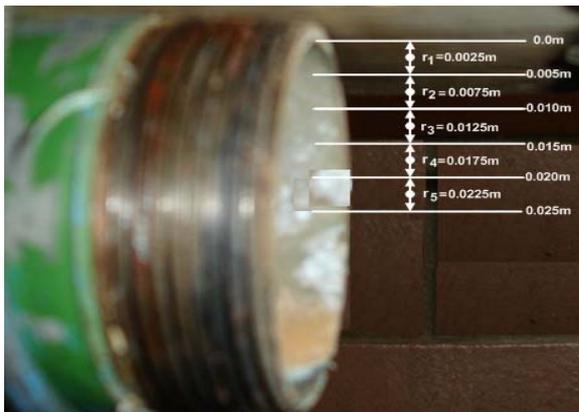
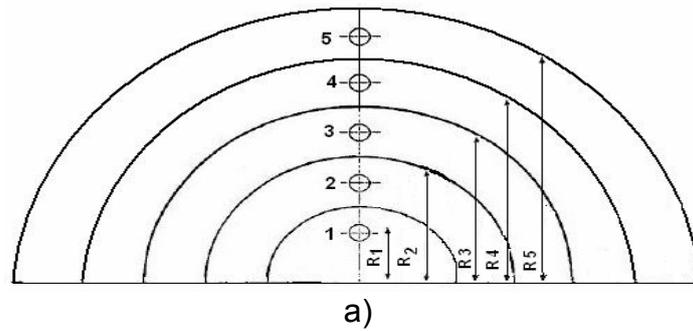
A partir de este procedimiento se obtiene la formula A.15 y con esta se conoce la U_{SG} que es la velocidad que se está buscando.

De acuerdo con la ecuación (A.2) y como el valor del diámetro del tubo es de 50.8 mm, se convierte a metros y se substituye en la ecuación (A.2), el valor del área es $2.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.

$r_i =$ Radio que se incrementa en m

$\Delta r = 0.005\text{m}$

De acuerdo con la figura A.18 se explica este incremento:



b)

b)

$\bar{V}_i =$ Velocidad promedio de velocidades puntuales

$$\bar{V}_1 = \frac{V_0 + V_1}{2}$$

$$\bar{V}_2 = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

$$\bar{V}_3 = \frac{V_2 + V_3}{2}$$

$$\bar{V}_4 = \frac{V_3 + V_4}{2}$$

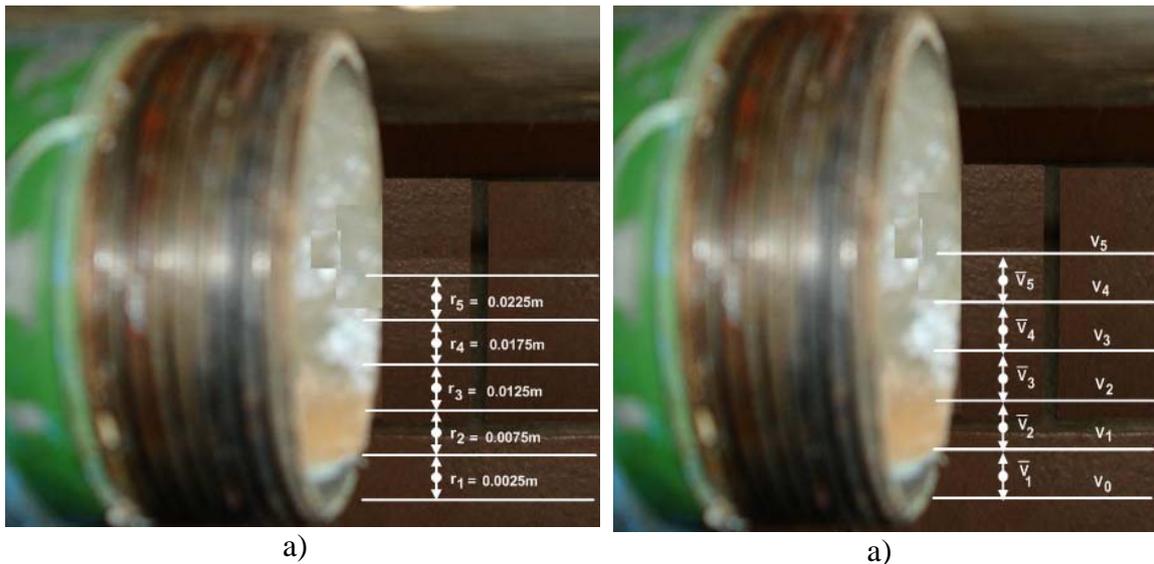
$$\bar{V}_5 = \frac{V_4 + V_5}{2}$$

c)

Figura A.18. Explicación lineal de incrementos en. a) Incrementos en r_i circular b) incrementos

en r_i lineal c) explicación lineal de incremento en \bar{V}_i

Una vez que se cuentan con los valores de todas las variables se sustituyen en la ecuación A.15 y se obtiene una $U_{SG} = 29.35 \text{ m/s}$, pero como se tomaron 11 mediciones y se conoce que no existe un comportamiento simétrico, se calcula la U_{SG} en el extremo bajo de la tubería como se muestra en la figura A.19:



$\bar{V}_i = \text{Velocidad promedio de velocidades puntuales}$

$$\bar{V}_1 = \frac{V_0 + V_1}{2}$$

$$\bar{V}_2 = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

$$\bar{V}_3 = \frac{V_2 + V_3}{2}$$

$$\bar{V}_4 = \frac{V_3 + V_4}{2}$$

$$\bar{V}_5 = \frac{V_4 + V_5}{2}$$

Figura A.19 Explicación lineal de incrementos en. a) Incrementos en r_i lineal b) Explicación

lineal de incremento en \bar{V}_i

Así aplicando la ecuación A.15 para la parte inferior de la tubería se tiene que $U_{SG} = 29.10 \text{ m/s}$ y calculando el promedio de ambas se tiene que

$$U_{SG \text{ promedio}} = 29.22 \text{ m/s}.$$

De acuerdo con la tabla de Mandhane esta velocidad será suficiente para generar el flujo anular.

La conclusión anterior da como resultado la certeza de que el flujo anular se va a generar, sin embargo debido a que a 1/6 de abertura de válvula se tienen U_{SG} muy grandes, ahora se deben de tomar valores inferiores a esa U_{SG} , esto se logra tomando mediciones antes de llegar a 1/6 de abertura, con la finalidad de tener un rango de U_{SG} para generar un perfil de velocidad mas amplio.

Debido a que el manómetro en U utilizado contiene columnas en $mmHg$ y estas son una escala muy grande en comparación con las presiones que se miden en el tubo de pitot desde cero hasta 1/6 de vuelta, se utiliza un manómetro inclinado con la finalidad de detectar pequeñas variaciones en la toma de presión dinámica del tubo de pitot. A su vez se utiliza un manómetro en U en cmH_2O para medir la presión diferencial que se genera en la placa de orificio.

A.2.7 Procedimiento para conocer las velocidades superficiales (Gas)

Se toman mediciones cada $1\ cmH_2O$ hasta llegar a $30\ cmH_2O$, esto se repite 3 veces para tener el promedio de estas mediciones y trabajar con estos valores promedios, en cada medición se toman los mismos valores y las mismas consideraciones que cuando se hacia con aberturas de 1/6 en 1/6, las únicas diferencias es que ahora el incremento será cada $1\ cmH_2O$, y se tomará en cuenta el factor multiplicativo (f_m) indicado por el manómetro inclinado tal como dice en sus especificaciones, la tabla de la primera medición quedará como se muestra en la tabla A.6:

Tabla A.6 Valores obtenidos en la primera medición

CALCULOS PARA LA PLACA DE ORIFICIO 1		
	Presion Dinamica	Abertura
factor	Tubo pitot	cmH20
multiplicativo	cmH20	
0.1	1.28	21
0.1	1.3	21
0.1	1.34	21
0.1	1.37	21
0.1	1.385	21
0.1	1.39	21
0.1	1.39	21
0.1	1.36	21
0.1	1.31	21

Para el análisis de estos valores, la única variación se presenta cuando se necesita convertir a pascales la presión dinámica del tubo de pitot en mmH_2O ,

esto se hace multiplicando el f_m por la presión dinámica, como se muestra a continuación;

$$kPa = (f_m)(mmH_2O)$$

$$kPa = (0.1)(1.28) = 0.128$$

Para obtener los pascales correspondientes a cada lectura se multiplica la ecuación anterior por 1000 debido a que se necesitan pascales y no kPa , a excepción de ese paso, la U_p , la U_{SG} , la $U_{SG_{promedio}}$ se realiza de la misma manera que como se hizo anteriormente, la tabla A.7 muestra los resultados como se observa a continuación:

Tabla A.7 Resultado de análisis para la primera medición

MANOMETRO INCLINADO PARA MEDICIONES EN cmH2O						
CALCULOS PARA LA PLACA DE ORIFICIO 1						
	Presion Dinamica	Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	Velocidad
factor	Tubo pitot	cmH2O	De mmH2O a	formula	barrido	superficial
multiplicativo	cmH2O		Pascales	Velocidad m/s	mm	m/s
0.1	1.28	21	128	14.606	5	22.133
0.1	1.3	21	130	14.720	10	Velocidad
0.1	1.34	21	134	14.944	15	superficial
0.1	1.37	21	137	15.111	20	m/s
0.1	1.385	21	138.5	15.193	25	22.407
0.1	1.39	21	139	15.221	30	velocidad
0.1	1.39	21	139	15.221	35	promedio
0.1	1.36	21	136	15.055	40	superficial
0.1	1.31	21	131	14.776	45	22.133

Debido a que se manejan grandes U_{SG} , la presión diferencial en la placa de orificio será grande, por lo tanto se convierten los cmH_2O a $mmHg$, esto se hace por dos razones, la primera es para poder utilizar los dos medidores en $mmHg$ y no tener que cambiar a cmH_2O cada vez que se necesiten velocidades pequeñas y para tener una gráfica en la cual se encuentren integrados los valores de las U_{SG} obtenidas desde $1cmH_2O$ hasta los $30cmH_2O$, y los valores de las U_{SG} obtenidas desde $1/6$ de abertura hasta 2 vueltas de abertura.

La conversión de cmH_2O a $mmHg$ se realiza de la siguiente manera:

1.- Se convierten los cmH_2O a *pascales*

$$Pascales = (1000)(9.81)(0.01) = 98.1$$

2.- Se convierten los *pascales* a $cmHg$

$$cmHg = pascals * 0.0007501$$

$$cmHg = (98.1) * (0.0007501)$$

$$cmHg = 0.073 mmHg$$

Donde

a_b = Abertura de la válvula desde $a_b=0$ hasta $a_b=12$, cada abertura será de $1/6$ de vuelta de válvula.

A.3 Funcionamiento del laboratorio de experimentación.

El proceso de calibración se llevo a cabo en una sección del sistema esta se muestra en la figura A.20.

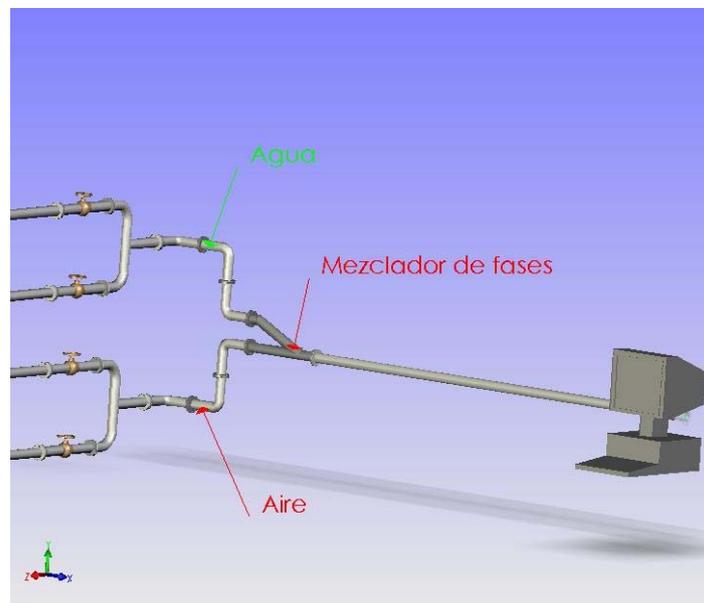


Figura A.20 Sección del sistema donde se llevo a cabo la calibración de las placas de orificio

Para generar el patrón del flujo anular es necesario tomar en cuenta las condiciones mostradas en la tabla A.8:

Tabla A.8 Condiciones bajo las cuales se llevo a cabo el experimento.

	Temperatura ambiente T_A °C	Numero de Reynolds R_e	Tiempo de duración del evento. T_D s	Velocidad superficial del Líquido U_{SL} m/s	Velocidad superficial de Gas U_{SG} m/s
Condiciones Ideales	[21]	Varia de acuerdo a la formula siguiente $R_e = \frac{V_{fluido} * D}{\mu_{cinematica}}$	[60]	[0.05 – 0.2]	[15 - 41]
Condiciones Reales	[19 - 25]	Varia de acuerdo a la formula siguiente $R_e = \frac{V_{fluido} * D}{\mu_{cinematica}}$	[40 – 60]	[0.05 – 0.2]	[15 - 20]

Observación:

Las condiciones reales son las consideradas al momento de realizar la experimentación. La temperatura en este experimento no es una variable a controlar, dado que este fenómeno es aleatorio en cualquier proceso que este se manifieste. Como se puede observar de la tabla anterior el número de Reynolds varia dependiendo principalmente de la velocidad del líquido o del gas, pues la viscosidad cinemática de estos fluidos es una constante conocida y el diámetro de la tubería es el mismo para ambos. La duración del patrón del flujo anular varía en ese lapso de tiempo ya que se tiene como limitante la presión del compresor. Si el tanque almacenara más presión el evento duraría más tiempo. Por la otra parte se sabe que la velocidad que requiere el líquido es pequeña y el tanque de almacenamiento del mismo puede trabajar hasta por 2 minutos suministrando el rango máximo de velocidad de manera constante.

Recomendación importante para realizar la parte experimental:

Primero se debe de abrir la válvula de bola para permitir el paso del flujo de gas y después se permite el paso del flujo del líquido. Se debe de seguir este procedimiento porque de lo contrario debido a la presión del líquido éste podría circular por la tubería del gas y llegar al compresor, dañando a este.

A 4 TOPOLOGIA DE LA RED EXPERIMENTAL (EQUIPO)

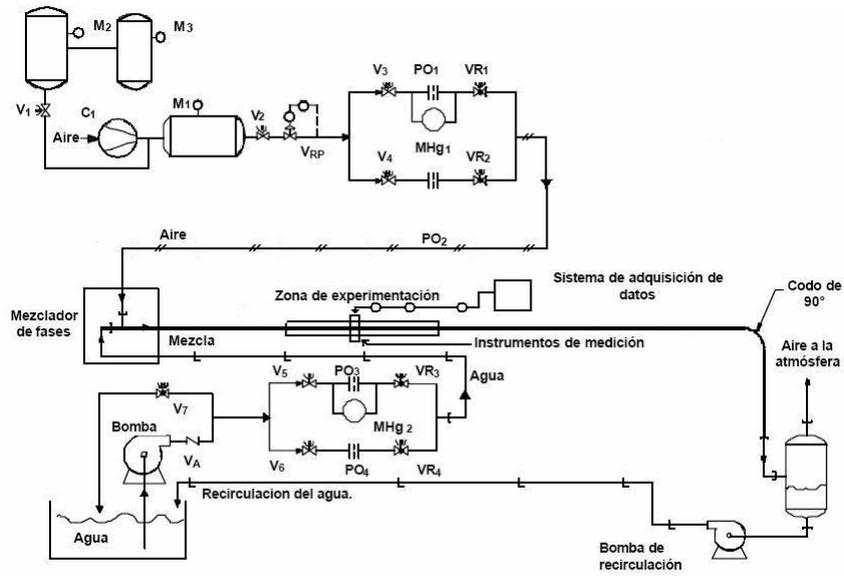


Figura A.21 Instrumentación y tubería utilizada en el montaje experimental

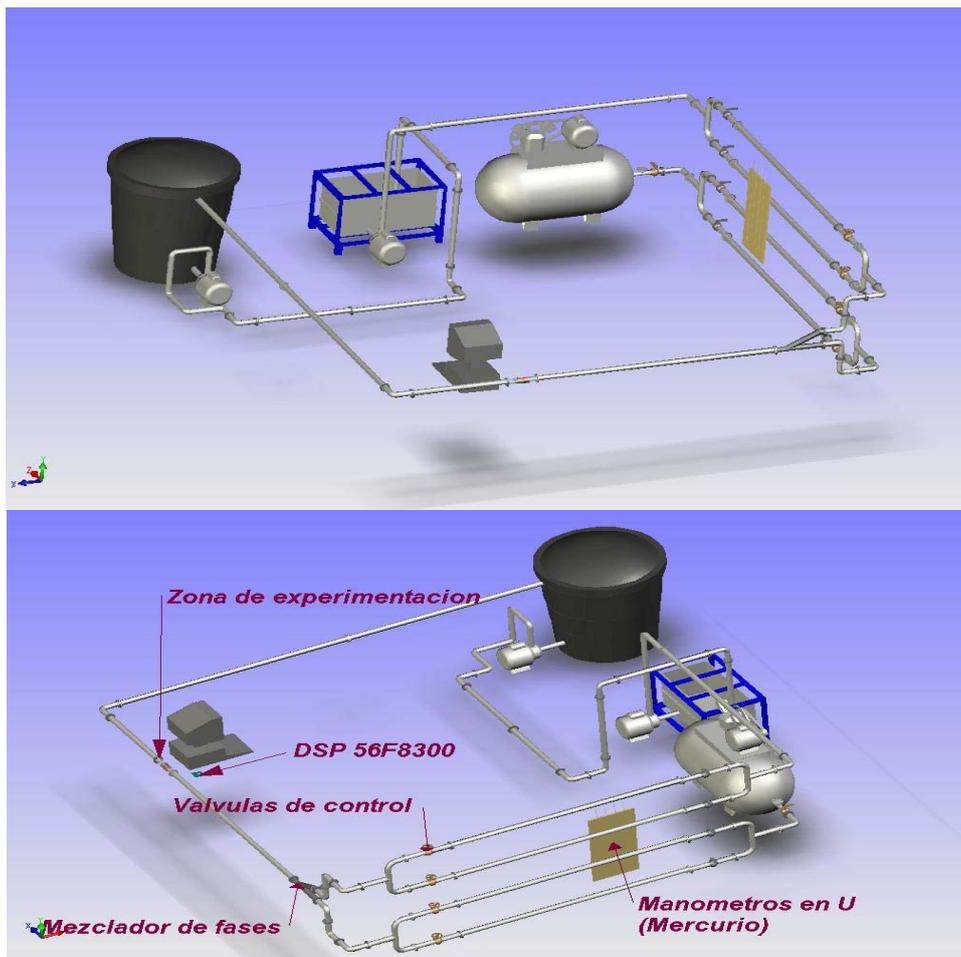


Figura A.22 Topología de la red

A4.1 Suministro De Fluidos

La parte básica del suministro de los fluidos con los que se trabajó (agua y aire) está conformada por un tanque y bomba en el caso del agua, y para suministro de la presión de aire un compresor.

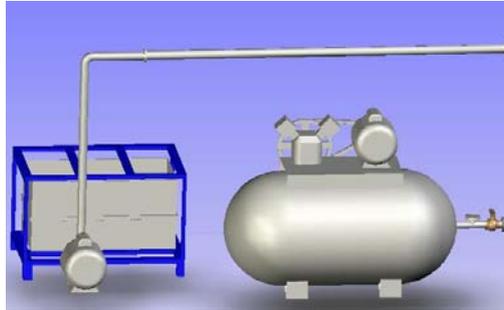


Figura A.23 Tanque de agua y compresor



Figura A.24 Sistemas de suministro de los fluidos de trabajo

A4.2 Medición Y Control.

Como ya ha sido explicado en capítulos anteriores el flujo anular solo se presenta en determinados rangos de presión y velocidad superficial para cada uno de los fluidos, por lo tanto el dispositivo con el que se mide la presión dinámica de ambos fluidos, son placas de orificio las cuales se localizan en la parte interior de las bridas que contienen tomas de presión, así como manómetros en U, y para el control de las distintas presiones se utilizan las válvulas de globo, tal como se muestra en las ilustraciones.



Figura A.25 Sistemas de medición y control de los fluidos

A4.3 Mezclador De Fases

Aquí convergen ambos fluidos, la medición se realiza algunos metros después de este punto con la finalidad de que los perfiles de velocidad de los fluidos ya estén completamente desarrollados.

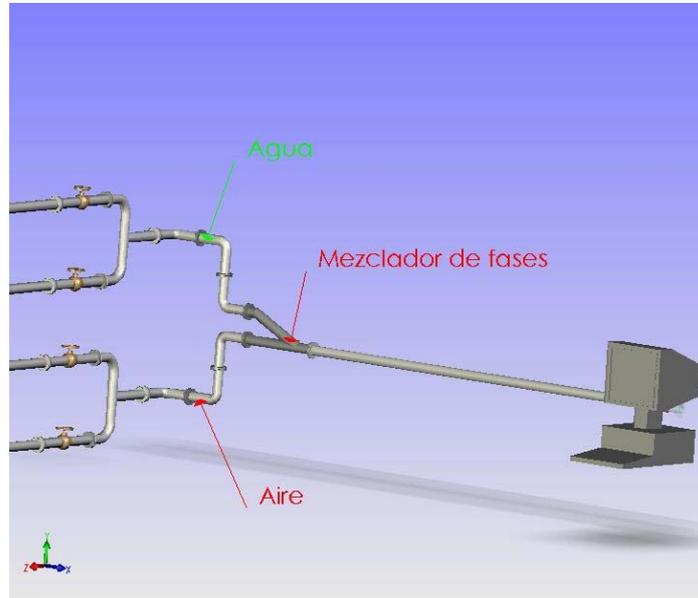


Figura A.26 Mezclador de fases

A4.4 Zona De Experimentación

La zona de experimentación y adquisición de datos está conformada por los sensores, el Procesador de Señales Digitales 56F8300, y la computadora personal, de los cuales ya se han explicado las respectivas funciones.



Figura A.27 Zona de experimentación

A4.5 Zona De Retroalimentación

Retroalimentación de flujo liquido: se localiza un tanque para almacenamiento prácticamente en la parte final de la tubería, en este punto el flujo de aire se separa y se permite el escape libre hacia la atmósfera, mientras que el liquido se almacena, para posteriormente mediante una bomba sea retroalimentado hacia el tanque de suministro.

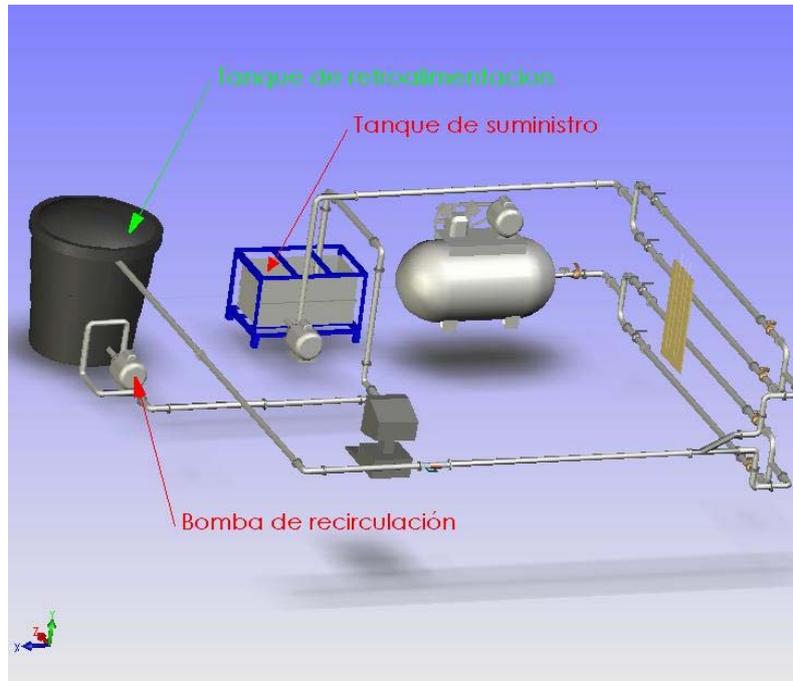


Figura A.28 Zona de retroalimentación

Bajo estas características queda establecido el sistema en el que previamente calibrado se genera el flujo bifásico anular, y el montaje experimental, del cual se obtendrán archivos en la computadora, en el formato de freemaster, que como ya se explicó es un interfaz entre la tarjeta de demostración 56f8300 y la PC, una vez almacenados los datos de las distintas pruebas, se analizan con el paquete Matlab.

APENDICE B

**METODOLOGIA DE CALIBRACION
DEL PROTOTIPO PARA
LA MEDICION DE LA PELICULA LIQUIDA
ESTATICA**

Para lograr la calibración del dispositivo es necesario generar una serie de pruebas en modo estático, es decir la medición de la película líquida que no posee movimiento.

Para realizar la calibración en estado estacionario es necesario construir un prototipo, dicho prototipo tiene características similares al sistema que se utiliza en el laboratorio, solo que es más pequeño y por lo tanto se facilita la realización las pruebas y la comodidad de utilizarlo sin necesidad de estar en el laboratorio y sin utilizar el compresor ni la bomba de agua.

La tubería sobre la cual se colocan los sensores es una tubería especial de acrílico, lo cual constituye el mismo material en el cual se colocaran en el sistema real, sólo que el diámetro de la tubería del prototipo es de 38.1 milímetros y el diámetro de la tubería del sistema real es de 50.8 milímetros, en la figura B.1 se muestra este prototipo.

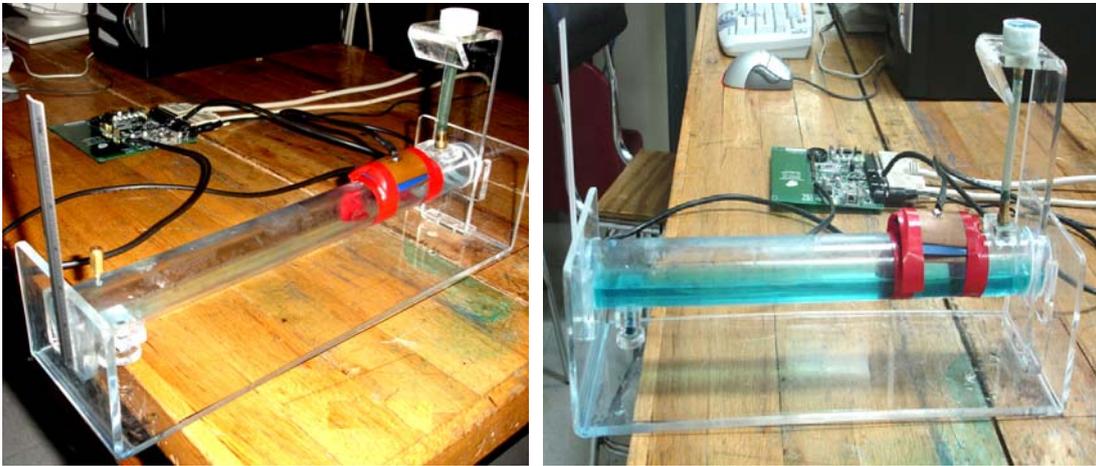


Figura B.1 Prototipo de acrílico

Se puede observar en la figura B.1 el prototipo, el cual se encuentra formado por un ducto de sección transversal circular de 40.6 mm de diámetro y con una longitud de 500 mm, ambos extremos se encuentran bloqueados por una placa de acrílico transparente con la finalidad de poder medir el espesor de la película líquida que en este caso es estática, el líquido es introducido mediante un orificio en la parte superior del tubo y extraído por otro en la parte inferior, el prototipo cuenta con pequeños tapones en dichas perforaciones. En la parte frontal es posible observar la sección transversal del ducto, y con ayuda de una regla, es posible medir el nivel de la película líquida estática.

B.1 Descripción de los sensores.

Los electrodos utilizados están contruidos de placa de cobre y están moldeados de tal forma que se ajustan a la superficie de la tubería del prototipo, una ventaja de que el prototipo sea en su totalidad de acrílico es que este material no es conductor de electricidad ni genera interferencias al sensor en la medición del campo electrostático además de que se podrá observar como incrementa el nivel del líquido.

Se hacen dos tipos de electrodos, uno circular y uno rectangular, y se hacen pruebas en ambos para ver cual de ellos es el apropiado, teóricamente se piensa que el electrodo circular es el indicado debido a su forma ya que se elimina un problema llamado efecto de punta, y esto es debido a que el sensor circular al no tener puntas la distribución del efecto electrostático será mejor y no se escapará por las puntas. El sensor rectangular no es totalmente plano sino que presenta una curvatura de tal forma que se puede ajustar mejor a la base de la tubería, los dos sensores se presentan en la figura B.2.



Figura B.2 (a) Electrodo circular de $D = 5$ mm. B.2 (b) Electrodo rectangular de 4.5 cm x 6 cm

Una vez determinada la topología de ambos electrodos propuestos, el siguiente paso es determinar cual de los 2 es mas sensible a la película líquida, lo cual se define haciendo pruebas comparativas con cada electrodo montado ya en el prototipo y conectado a la tarjeta de demostración del 56F8300 previamente programado.

B.2 Programación del DSP56f8323

El algoritmo necesario es simple solo se necesita obtener el valor de uno de los electrodos y desplegarlo en la pantalla de la computadora continuamente y se ilustra en la figura B.3.

B.3 Pruebas realizadas con los sensores.

Se colocan los sensores en la parte superior de la tubería, primero se hacen dos pruebas una para cada sensor, con la finalidad de observar cual de los dos tiene mayor sensibilidad al momento en que la tubería pasa de vacía a totalmente llena. La primera prueba es simple ya que solo se toman los valores mínimos y máximos que lee cada sensor y así se concluye que el sensor que presenta mayor sensibilidad es el de forma rectangular. En la figura B.4 se muestra el nivel y la lectura que alcanzó el sensor rectangular.

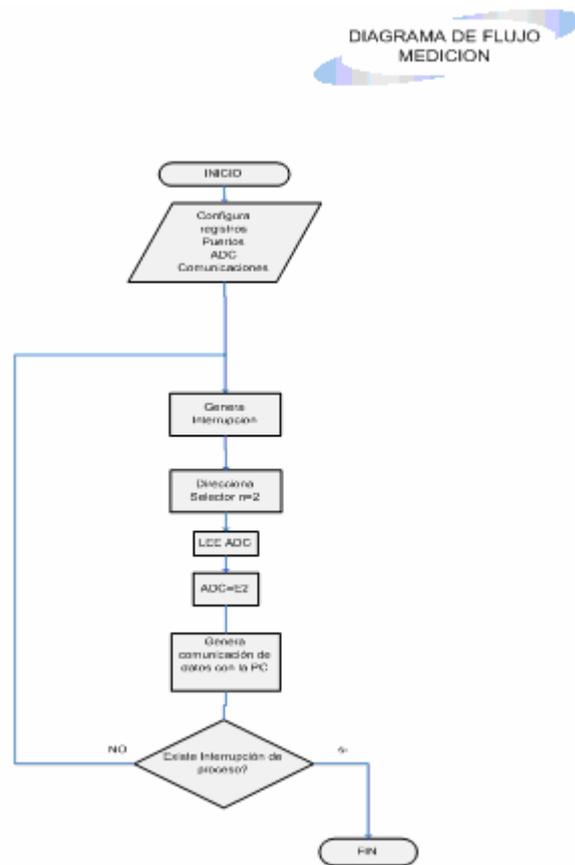


Figura B.3 Diagrama a bloques empleado para la programación del 56f8300 (Medición estática)

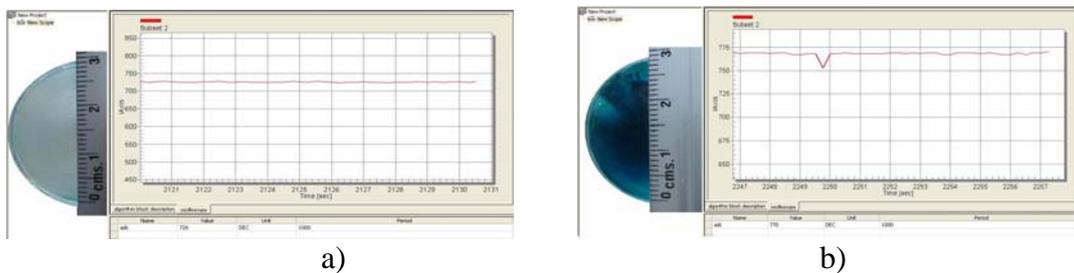


Figura B.4 Lectura del sensor rectangular a) Vacío b) Lleno

B.4 Calibración de los sensores en forma estacionaria.

El sensor rectangular es el que presenta una mejor lectura del campo electrostático debido a que su forma permite captar mejor las variaciones del campo producido por el incremento del líquido en la tubería, la primera conclusión es que el área del sensor es importante.

Se hacen otras pruebas para encontrar la máxima sensibilidad del sensor ya que se conoce de los manuales del 56F8300 y algunos artículos que el sensor debe ir conectado a una tierra de referencia, así que se hacen las siguientes combinaciones que:

- Electrodo Sin tierra de referencia.
- Electrodo – Mica de plástico. Sin tierra de referencia.
- Electrodo – Mica de plástico – Electrodo. Con tierra de referencia.

Dentro de esta última combinación se hacen algunas variaciones, pues un electrodo se conecta a tierra y el otro va conectado al sensor, dándose las siguientes opciones:

- Electrodo conectado a tierra física real – Mica de plástico – Electrodo conectado a sensor.
- Electrodo conectado a sensor – Mica de plástico – Electrodo conectado a tierra física real.
- Electrodo conectado a tierra del sistema – Mica de plástico- Electrodo conectado al sensor.
- Electrodo conectado al sensor – Mica de plástico – Electrodo conectado a tierra del sistema.

En cada combinación anterior se realiza una prueba la cual consiste en tomar la lectura del sensor cuando se encuentra vacía la tubería, otra lectura cuando se encuentra a la mitad y la última cuando la tubería se encuentra llena, en la figura B.5 se muestran las tres mediciones por prueba, cada prueba se repite tres veces, estos datos son capturados en el programa FreeMaster, la variable capturada es llamada adc porque es tomada del convertidor analógico digital, después se crea un archivo con la impresión de la pantalla a cada lectura y con la foto correspondiente a cada medición. Se comparan todas las fotos de cada combinación y se llega a la segunda conclusión, la cual es que la combinación Electrodo conectado al sensor – Mica de plástico – Electrodo conectado a tierra física real es el que da un valor de diferencia mayor que los demás.

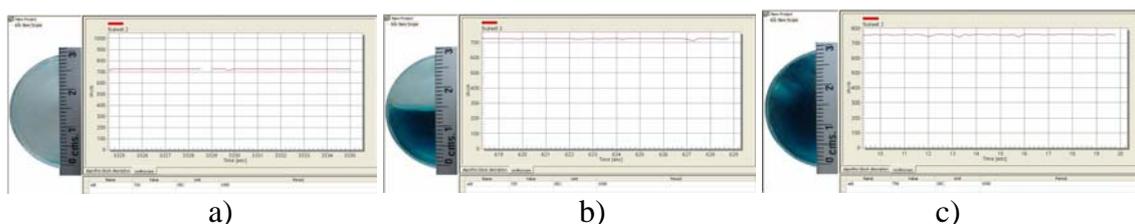


Figura B.5 Mediciones obtenidas. a) Vacío b) Mitad c) Lleno

Una vez encontrada la combinación ideal del prototipo en estático se comienza con una segunda prueba la cual consiste en colocar el sensor en la parte superior de la tubería e ir tomando la medición de campo, y con la ayuda de una cámara de alta definición colocada en un tripie se toma una foto por cada lectura, debido a que el diámetro de la tubería es de 2.8 cm, se toma una lectura cada 1mm para tener un total de 28 lecturas por prueba y nuevamente se repite el proceso en tres ocasiones para tener el promedio de lecturas en cada incremento de 1 mm de nivel de liquido con el incremento del campo.

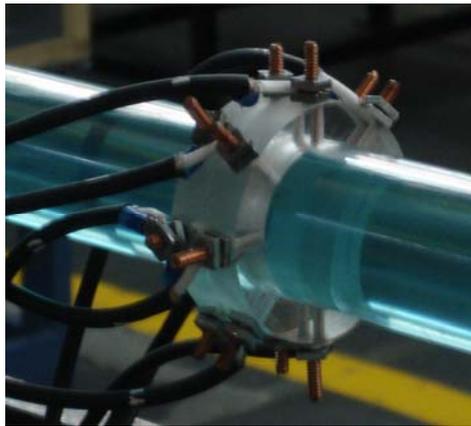
B.5 Observaciones y conclusiones obtenidas en la calibración con el prototipo en régimen estático.

Una observación muy importante es que las pruebas realizadas en el prototipo son hechas con la finalidad de conocer que tan sensible es el sensor de campo que se encuentra habilitado en el 56F8300, pues en esta prueba solamente se utiliza un sensor pero las siguientes pruebas en el sistema dinámico se habilitarán y utilizarán los ocho sensores que tiene el 56F8300, otra observación de importancia es que en el sistema dinámico el suministro de liquido y de gas se realiza mediante una bomba y un compresor respectivamente, esto significa que el liquido y el gas tendrán una velocidad y una presión al momento de que los sensores se encuentren tomando las mediciones y debido al tamaño del prototipo el tamaño de los sensores es más pequeño que en el sistema dinámico.

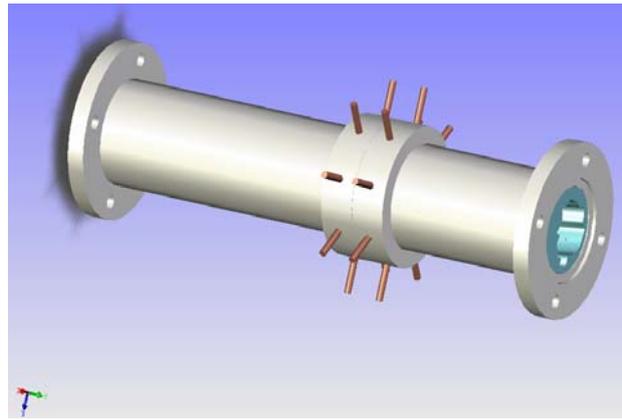
Como ya se mencionó anteriormente, se pueden obtener varias conclusiones, la primera es que el tamaño del sensor es importante para mejorar su sensibilidad, el cobre es el material ideal para construir los ocho sensores, el sensor debe de ser de forma rectangular y debe estar moldeado de tal forma que se ajuste lo mejor posible a la tubería de acrílico y así tener mayor área de contacto, se concluye también que se debe de tener una configuración especial para colocar los sensores con la finalidad de obtener su máxima sensibilidad, en las siguientes pruebas se explicará la forma en la cual se colocarán, conectarán y cual será su arreglo.

Una vez realizados los experimentos de calibración en forma estática, ya se puede pensar que el dispositivo en efecto permitirá la medición de la película líquida de un flujo bifásico anular.

De la misma forma que para las mediciones en forma estacionaria, se presentan dos opciones para los electrodos de medición una donde el área nuevamente será de forma circular, y la otra de forma rectangular. Tal como se muestra en la figura B.6



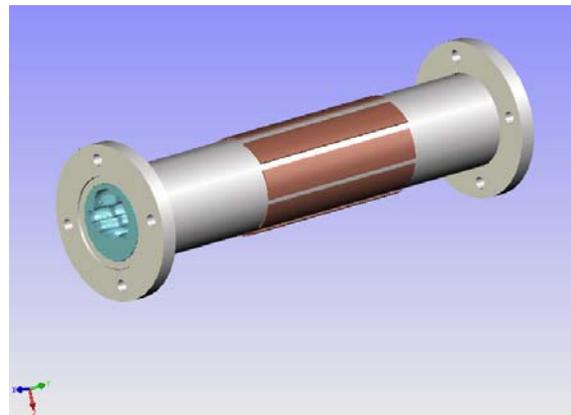
a)



b)



c)



d)

Figura B.6 Distintos electrodos a) y b) de sección circular, c) y d) de sección Rectangular

De forma completamente análoga se realizaron las correspondientes pruebas. Esta vez es necesario habilitar la medición con los 8 electrodos por lo tanto es indispensable un nuevo diagrama de flujo y un programa que considere el direccionamiento y la lectura.

En la figura B.3 y B.7 se pueden ver respectivamente los diagramas de flujo y nótese en el programa (anexo de programas) que el direccionamiento se realiza bit a bit, ya que las señales no forman parte de un solo puerto, sin embargo, de forma conjunta los bits A, B, C, D nos indican el electrodo en uso.

Además se corrobora que los electrodos de forma rectangular son más adecuados, esto debido a que su área es mayor.

La señal es adquirida por los electrodos e interpretada por el circuito integrado MC33794DH (Ver hoja de especificaciones) la superficie de dichos electrodos no entran en contacto con el fluido y se localizan muy cerca de la película líquida esta característica favorece la medición, ya que los electrodos no sufren alteraciones como oxidación, ni altera los valores medidos, como ya se mencionó anteriormente es una técnica no intrusiva.

la medición indica el espesor de película en cada electrodo así se pretende generar en un momento de reconstrucción una interpretación aproximada,

aunque es importante mencionar que si se desea una mayor definición de lo que es la sección transversal por este método sería necesario incrementar el número de electrodos alrededor del ducto.

Una vez diseñados los electrodos, programado el 56F8300, se conectan los electrodos con 8 cables coaxiales, los blindajes de estos cables, todos van unidos a la terminal shield, esto con la finalidad de eliminar la posibilidad de una inducción de distorsión por ruido mayor. En las figuras B.8 y B.9 se observa la medición no intrusiva y la comparación de la sección real y la medida.

DIAGRAMA DE FLUJO
MEDICION

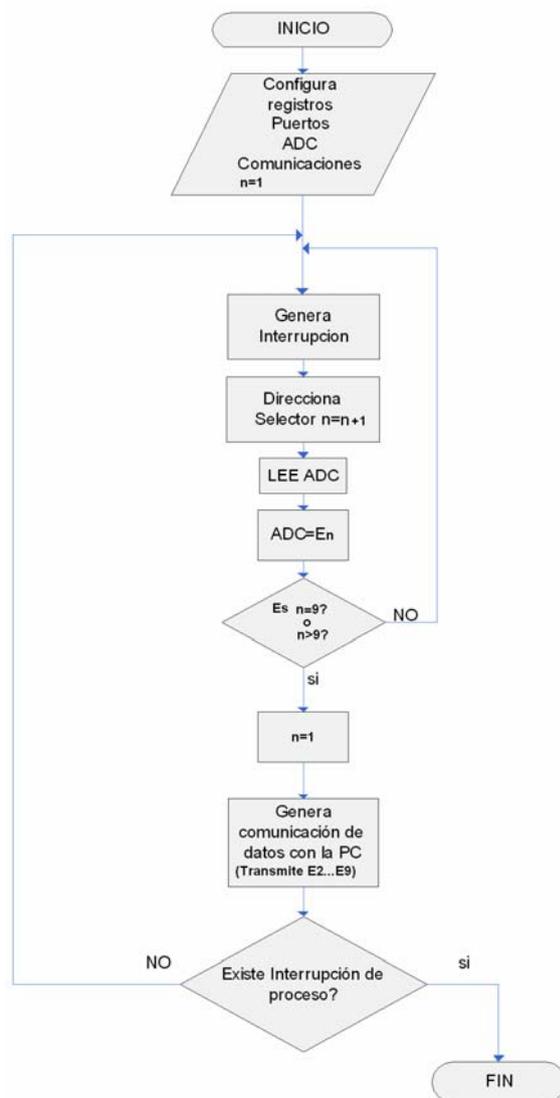


Figura. B.7 Diagrama a bloques empleado para la programación del 56f8300 (Medición estática)

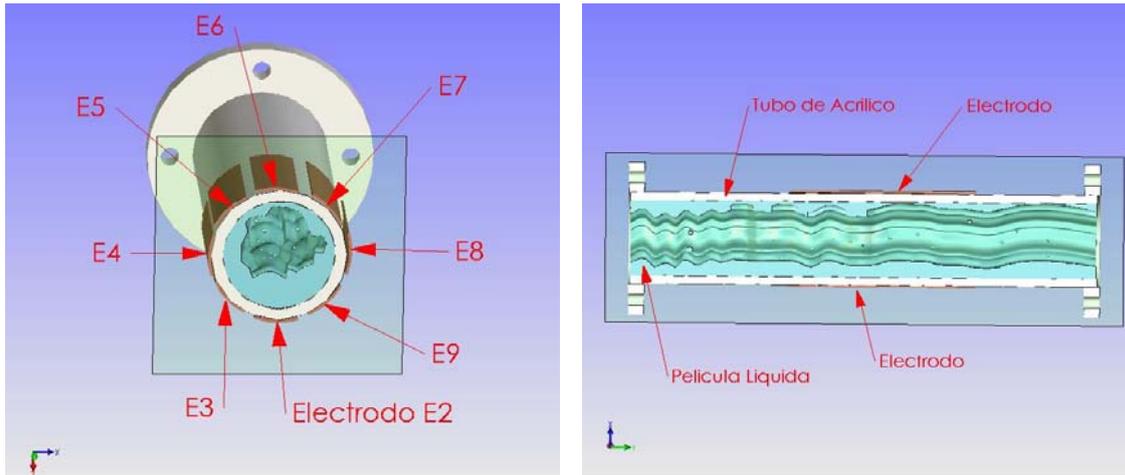


Figura B.8 Medición no intrusiva

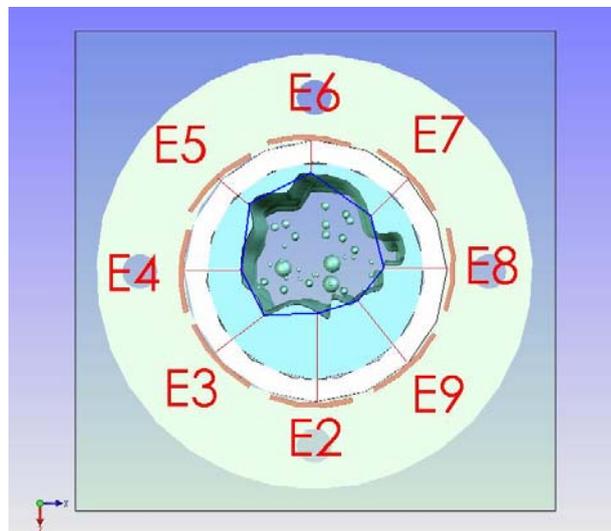


Figura B.9 Comparación de la sección real y la medida (polígono formado por líneas azules)

La conexión final entre los electrodos, tarjeta de adquisición de datos y la computadora personal se en la figura B.10.



Figura B.10 Cableado entre Electrodos y tarjeta de demostración 56F8300

APENDICE C

PROGRAMAS

PROGRAMA 1

```

/** #####
** Filename : Events.C
** Project : Campo_Electrico2
** Processor : 56F8323
** Beantype : Events
** Version : Driver 01.03
** Compiler : Metrowerks DSP C Compiler
** Date/Time : 29/11/2006, 05:38 a.m.
** Abstract :
** This is user's event module.
** Put your event handler code here.
** Settings :
** Contents :
** TTI1_OnInterrupt - void TTI1_OnInterrupt(void);
**
** (c) Copyright UNIS, spol. s r.o. 1997-2006
** UNIS, spol. s r.o.
** Jundrovska 33
** 624 00 Brno
** Czech Republic
** http : www.processorexpert.com
** mail : info@processorexpert.com
** #####*/
/* MODULE Events */

#include "Cpu.h"
#include "Events.h"

extern word Valor1,Valor3;
extern byte Valor2;
extern int i;

/*
** =====
** Event : TTI1_OnInterrupt (module Events)
**|
** From bean : TTI1 [TimerInt]
** Description :
** When a timer interrupt occurs this event is called (only
** when the bean is enabled - "Enable" and the events are
** enabled - "EnableEvent").
** Parameters : None
** Returns : Nothing
** =====
*/

#pragma interrupt called /* Comment this line if the appropriate 'Interrupt preserve registers' property *
/* is set to 'yes' (#pragma interrupt saveall is generated before the ISR) */
void TTI1_OnInterrupt(void)
{
/* Write your code here ... */

    i=2;

    A_SetDir(TRUE);
    B_SetDir(FALSE);
    C_SetDir(TRUE);
    D_SetDir(TRUE);

    Sensor_Measure(TRUE);

    Sensor_GetValue(&E2);

    Led_NegVal();
}

/* END Events */
/*
** #####

```

Por medio de este programa se controla al Procesador de Señales Digitales para qué lea la señal que proviene de uno de los sensores de campo, los almacena en una matriz de datos (Base de datos en FreeMaster).

PROGRAMA 2

```

/** *****
** Filename : Events_C
** Project : Campo Electrico2
** Processor : 56F323
** Beantype : Events
** Version : Driver 01.03
** Compiler : Metrowerks DSP C Compiler
** Date/Time : 29/11/2006, 05:38 a.m.
** Abstract :
** This is user's event module.
** Put your user's event handler code here.
** Settings :
** Contents :
** TTI_OnInterrupt - void TTI_OnInterrupt(void);
**
** (c) Copyright UNIS, spol. s r.o. 1997-2006
** UNIS, spol. s r.o.
** Jundrovska 33
** 624 00 Brno
** Czech Republic
** http : www.processorexpert.com
** mail : info@processorexpert.com
** *****
*/
/* MODULE Events */

#include "Cpu.h"
#include "Events.h"

extern word Valor1,Valor3;
extern byte Valor2;
extern int i;

/*
** -----
** Event : TTI_OnInterrupt (module Events)
** From bean : TTI [TimerInt]
** Description :
** When a timer interrupt occurs this event is called (only
** when the bean is enabled - "Enable" and the events are
** enabled - "EnableEvent").
** Parameters : None
** Returns : Nothing
** -----
*/
#pragma interrupt called /* Comment this line if the appropriate 'Interrupt preserve registers' property */
void TTI_OnInterrupt(void) /* is set to 'yes' (#pragma interrupt saveall is generated before the ISR) */
{
    /* Write your code here ... */
    if (i>9)
    {
        i=1;
    }
    if (i==1)
    {
        A_SetDir(FALSE);
        B_SetDir(TRUE);
        C_SetDir(TRUE);
        D_SetDir(TRUE);
    }
    if (i==2)
    {
        A_SetDir(TRUE);
        B_SetDir(FALSE);
        C_SetDir(TRUE);
        D_SetDir(TRUE);
    }
    if (i==3)
    {
        A_SetDir(FALSE);
        B_SetDir(FALSE);
        C_SetDir(TRUE);
        D_SetDir(TRUE);
    }
    if (i==4)
    {
        A_SetDir(TRUE);
        B_SetDir(TRUE);
        C_SetDir(FALSE);
        D_SetDir(TRUE);
    }
    if (i==5)
    {
        A_SetDir(FALSE);
        B_SetDir(TRUE);
        C_SetDir(FALSE);
        D_SetDir(TRUE);
    }
    if (i==6)
    {
        A_SetDir(TRUE);
        B_SetDir(FALSE);
        C_SetDir(FALSE);
        D_SetDir(TRUE);
    }
    if (i==7)
    {
        A_SetDir(FALSE);
        B_SetDir(FALSE);
        C_SetDir(FALSE);
        D_SetDir(TRUE);
    }
    if (i==8)
    {
        A_SetDir(TRUE);
        B_SetDir(TRUE);
        C_SetDir(TRUE);
        D_SetDir(FALSE);
    }
    if (i==9)
    {
        A_SetDir(FALSE);
        B_SetDir(TRUE);
        C_SetDir(TRUE);
        D_SetDir(FALSE);
    }
    Sensor_Measure(TRUE);
    Sensor_GetValue(&Valor1);
    Sensor_GetValue8(&Valor2);
    Sensor_GetValue16(&Valor3);
    Led_NegVal();
    i++;
}

/* END Events */
/*
** *****
** This file was created by UNIS Processor Expert 2.98 [03.79]
** for the Freescale 56800 series of microcontrollers.
** *****
*/

```

PROGRAMA 3

```

% INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
% ANALISIS DEL FENOMENO ANULAR EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA
% DISEÑO: DOMITILLO LIBREROS
% ESTE PROGRAMA DETERMINA LAS COMPONENTES DE LA FRECUENCIA DEL
% FENOMENO ANULAR.
% DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA (TRABAJO DOCTORAL)
% ESTE PROGRAMA CORRE EN LA PC EN MATLAB FUERA DE LINEA

clear, clc
K=0;
while K < 5
K = MENU('ANALISIS DE FRECUENCIAS','1) Analisis a 25 Hz','2) Analisis a 100 Hz','3) Analisis
a 150 Hz ',...
'4) Analisis a 200 Hz','EXIT');
switch ( K )

case 1
clear, clc
disp('PROGRAMA PARA OBTENER LAS FRECUENCIAS FUNDAMENTALES UTILIZANDO
UN FILTRO DE 25 HZ')
A = input('Introduzca la matriz a analizar: ');
Matriz_entrada = ((A-8500)*2.5)/1700;
[B,C] = butter (1,0.025);
Matriz_filtrada = filtfilt (B,C,Matriz_entrada);
Matriz_Transformada = fft (Matriz_filtrada);
Absoluto = abs (Matriz_Transformada);
K = 1;
subplot (2,2,1:2); stairs (Absoluto,'DisplayName','Absoluto');figure (gcf)
xlabel ('Frecuencia'); Ylabel ('Amplitud'); title ('Grafica de frecuencias fundamentales');
grid
subplot (2,2,3); stairs (Matriz_entrada,'DisplayName','Matriz_entrada');figure (gcf)
xlabel ('Tiempo'); Ylabel ('Amplitud'); title ('Señal obtenida de los 8 sensores sin filtrar');
grid
subplot (2,2,4); stairs (Matriz_filtrada,'DisplayName','Matriz_filtrada');figure (gcf)
xlabel ('Tiempo'); Ylabel ('Amplitud'); title ('Señal obtenida de los 8 sensores filtrada');
grid
case 2
clear, clc
disp('PROGRAMA PARA OBTENER LAS FRECUENCIAS FUNDAMENTALES UTILIZANDO
UN FILTRO DE 150 HZ')
A = input('Introduzca la matriz a analizar: ');
Matriz_entrada = A;
[B,C] = butter (1,0.15);
Matriz_filtrada = filtfilt (B,C,Matriz_entrada);
Matriz_Transformada = fft (Matriz_filtrada);
Absoluto = abs (Matriz_Transformada);

K = 2;
subplot(2,1,2); stairs (t,Matriz_Transformada,'DisplayName','Matriz_filtrada');figure (gcf)
subplot(2,1,1); stairs (t,Matriz_filtrada,'DisplayName','Matriz_filtrada');figure (gcf)
xlabel ('Tiempo'); Ylabel ('Amplitud'); title ('Señal obtenida de los 8 sensores filtrada');
grid
case 3
clear, clc
disp('PROGRAMA PARA OBTENER LAS FRECUENCIAS FUNDAMENTALES UTILIZANDO
UN FILTRO DE 150 HZ')
A = input('Introduzca la matriz a analizar: ');
Matriz_entrada = A;

```

```
[B,C] = butter (1,0.15);
Matriz_filtrada150hz = filtfilt (B,C,Matriz_entrada);
Matriz_Transformada150hz = fft (Matriz_filtrada150hz);
Absolutode150hz = abs (Matriz_Transformada150hz);
K = 3;
subplot (2,2,1:2); stairs (Absolutode150hz,'DisplayName','Absoluto');figure (gcf)
xlabel ('Frecuencia'); Ylabel ('Amplitud'); title ('Grafica de frecuencias fundamentales');
grid
subplot (2,2,3); stairs (t,Matriz_entrada,'DisplayName','Matriz_entrada');figure (gcf)
xlabel ('Tiempo [s]'); Ylabel ('Espesor de pelicula [cm]'); title ('Señal obtenida de los 8
sensores sin filtrar');
grid
subplot (2,2,4); stairs (t,Matriz_filtrada150hz,'DisplayName','Matriz_filtrada');figure (gcf)
xlabel ('Tiempo [s]'); Ylabel ('Espesor de pelicula [cm]'); title ('Señal obtenida de los 8
sensores filtrada');
grid
case 4
clear, clc
disp('PROGRAMA PARA OBTENER LAS FRECUENCIAS FUNDAMENTALES UTILIZANDO
UN FILTRO DE 200 HZ')
A = input('Introduzca la matriz a analizar: ');
Matriz_entrada = ((A-8500)*2.5)/1700;
[B,C] = butter (1,0.2);
Matriz_filtrada = filtfilt (B,C,Matriz_entrada);
Matriz_Transformada = fft (Matriz_filtrada);
Absoluto = abs (Matriz_Transformada);
K = 4;
subplot (2,2,1:2); stairs (Absoluto,'DisplayName','Absoluto');figure (gcf)
xlabel ('Frecuencia'); Ylabel ('Amplitud'); title ('Grafica de frecuencias fundamentales');
grid
subplot (2,2,3); stairs (Matriz_entrada,'DisplayName','Matriz_entrada');figure (gcf)
xlabel ('Tiempo'); Ylabel ('Amplitud'); title ('Señal obtenida de los 8 sensores sin filtrar');
grid
subplot (2,2,4); stairs (Matriz_filtrada,'DisplayName','Matriz_filtrada');figure (gcf)
xlabel ('Tiempo'); Ylabel ('Amplitud'); title ('Señal obtenida de los 8 sensores filtrada');
grid
end
end
```

PROGRAMA 4

```
% INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
% ANALISIS DEL FENOMENO ANULAR EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA
% DISEÑO: DOMITILLO LIBREROS
% ESTE PROGRAMA RECONSTRUYE AL FENOMENO ANULAR.
% DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA (TRABAJO DOCTORAL)
% ESTE PROGRAMA CORRE EN LA PC FUERA DE LINEA EN MATLAB
```

```
clear all; % Elimina variables utilizadas en otras rutinas
% Número de términos de la serie (entero, > 0), excluido av
n = 9;
k = 1: n;
% Coeficientes de la serie (expresiones algebraicas en función de k)
av = 0.0025*pi; % (constante real)
ak = .005*[2.5,2.5,2.2,2.2,2.7,1.5,.7,.65,.5];
bk = .005*[2.5,2.2,2.8,2.4,1.6,0.8,.6,.6,.28];
% Periodo de la función (> 0)
T0 = 1.1;
% Número de periodos a representar (entero, > 0)
np = 100;
% Base de tiempos
tinicial = 0; % Instante inicial del primer periodo
inicial = tinicial - (np/2)*T0; final = - inicial; puntos = 1000;
t = linspace (inicial, final, puntos);
% Cálculo de módulos y fases
A = sqrt(ak.^2 + bk.^2); fase = atan2(bk, ak);
senal = av;
k = 1;
while k<=n
senal = senyal + A(k)*cos((2*pi*k/T0)*t + fase(k));
k = k + 1;
end
plot (t, senyal, 'b', 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel ('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times', 'FontSize', 14);
ylabel ('Señal', 'FontName', 'Times', 'FontSize', 14);
axis ([0, 100, -(3/2)*abs(min(senyal)), (3/2)*abs(max(senyal))]);
clear all; % Elimina las variables utilizadas en esta rutina
```

PROGRAMA 5

```

% INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
% ANALISIS DEL FENOMENO ANULAR EN EL DOMINIO DEL TIEMPO
% DISEÑO: DOMITILO LIBREROS
% ESTE PROGRAMA RECONSTRUYE AL FENOMENO ANULAR.
% DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA (TRABAJO DOCTORAL)
% ESTE PROGRAMA CORRE EN LA PC FUERA DE LINEA EN MATLAB

M=input('introduce la matriz a analizar [t,E2,E3,E4,E5,E6,E7,E8,E9,] ');
%AREA TODA
AT=(pi*2.5^2)/2;
t=M(:,1);
C1=M(:,[2,3,4,5,6,7,8,9]);
R=2.5;
RD=2.5/sqrt(2);
[CIRCLEX,CIRCLEY]=scircle1(0,0,2.5);
n=input('indica el numero de secciones a graficar ');
for A=1 : n
    PL=0;
    figure
    title(['Seccion transversal instantanea t=',num2str(t(A))])
    line(CIRCLEX,CIRCLEY)
    CX=[0,RD-(C1(A,2)/sqrt(2)),R-C1(A,3),(R-C1(A,4))/sqrt(2),0,(-R+C1(A,6))/sqrt(2)...,
        (-R+C1(A,7)),(-R+C1(A,8))/sqrt(2),0];
    CY=[(-R+C1(A,1)), -RD+(C1(A,2)/sqrt(2)),0,(R-C1(A,4))/sqrt(2),(R-C1(A,5))... ,
        (R-C1(A,6))/sqrt(2),0,(-R+C1(A,8))/sqrt(2),(-R+C1(A,1))];

        for i=1 : 8
            PL=(PL+C1(A,i));
        end
    RLP=PL/7;
    AL=(pi*RLP^2)/2;
    AG=AT-AL;
    PORCIENTO_DEL_LIQUIDO=(AL*100)/AT;
    PORCIENTO_DEL_GAS=(AG*100)/AT;

    text(-.5,0,' Gas =          %')
    text(0,0,num2str(PORCIENTO_DEL_GAS))

    text(-.6,-2.3,'Liquido =          %')
    text(0,-2.3,num2str(PORCIENTO_DEL_LIQUIDO))

    line(CX,CY,'LineWidth',4,'Color',[.8 .8 .9])
end

```

PROGRAMA 6

```

/*
    INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
    SEPI-ESIME-ZACATENCO
    DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA
    FLUJOS BIFASICOS (FLUJO ANULAR)
    DISEÑO: DOMITILLO LIBREROS
    ENTRADA: ARCHIVO DE TEXTO (BASE DE DATOS) ENVIADO POR EL
    PROCESADOR DE SEÑALES DIGITALES
    SALIDA: PELICULA ANULAR O FRACCION DE LIQUIDO O GAS POR UNIDAD DE
    AREA Y SIMULACION DEL FLUJO ANULAR
    ESTE PROGRAMA CORRE EN LA PC EN LINEA EN TURBO C

*/

#include <iostream.h>
#include <conio.h>
#include <graphics.h>
#include <stdlib.h>
#include <dos.h>
#include <math.h>
#include <stdio.h>

#define pi 3.14159

void iniciarModoGrafico();
void pantallaDePresentacion( int, int );
void iniciarPantallaDelTubo( int, int );
void generacionDeValoresDeSensor( int, int, int [], int [], int [] );
void calculoDePorcentajes( int [], int [] );
void iniciarPantallaTiempo( int, int );
void imprimirValoresDeSensor( int, int, int [], int [] );
void imprimirValoresEnTiempoS1( int [], int, int [] );
void imprimirValoresEnTiempoS2( int [], int, int [] );
void imprimirValoresEnTiempoS3( int [], int, int [] );
void imprimirValoresEnTiempoS4( int [], int, int [] );
void imprimirValoresEnTiempoS5( int [], int, int [] );
void imprimirValoresEnTiempoS6( int [], int, int [] );
void imprimirValoresEnTiempoS7( int [], int, int [] );
void imprimirValoresEnTiempoS8( int [], int, int [] );
void mostrarSalida( int, int );

void main()
{
    // variables;
    int maxx, maxy;
    char tecla, opcion;
    int raton, boton, posX, posY;
    int vLineaX[ 8 ], vLineaY[ 8 ], vEnTiempo[ 8 ], vEnTiempoTemp[ 8 ];
    int sensor1[ 30 ], sensor2[ 30 ], sensor3[ 30 ], sensor4[ 30 ];
    int sensor5[ 30 ], sensor6[ 30 ], sensor7[ 30 ], sensor8[ 30 ];

    union REGS mostrarRaton;
    union REGS detectarRaton;

```

```

union REGS colocarRaton;
union REGS presionarBoton;
union REGS quitarRaton;

// Inicia modo grafico
    iniciarModoGrafico();

// Obtener coordenadas maximas de la pantalla
    maxx = getmaxx();
    maxy = getmaxy();

// Mostrar pantalla de inicio
    pantallaDePresentacion( maxx, maxy );

// Interrupcion para la deteccion del raton
/*    raton = detectarRaton.x.ax;
    boton = detectarRaton.x.bx;
    int86( 0x33, &detectarRaton, &detectarRaton );
*/
// Interrupcion para mostrar el raton
//    mostrarRaton.x.ax = 1;
//    int86( 0x33, &mostrarRaton, &mostrarRaton );

// Interrupcion para posicionar al raton
/*    colocarRaton.x.ax = 4;
    colocarRaton.x.cx = 180;
    colocarRaton.x.dx = 200;
    int86( 0x33, &colocarRaton, &colocarRaton );
*/

    randomize();
    tecla = 'p';
    opcion = tecla;
    do
    {
        switch( opcion )
        {
            case 'a':{
                // Iniciar la pantalla principal del tubo
                iniciarPantallaDelTubo( maxx, maxy );
                do
                {
                    generacionDeValoresDeSensor( maxx, maxy, vLineaX, vLineaY, vEnTiempo );
                    imprimirValoresDeSensor(
maxx, maxy, vLineaX, vLineaY );

                    setfillstyle( SOLID_FILL, BLUE );
                    circle( maxx / 2 - 140, maxy / 2 + 40, 150 );
                    floodfill( 220, 400, WHITE );

                    calculoDePorcentajes( vLineaX,
vLineaY );

                    delay( 50 );

                    setfillstyle( SOLID_FILL, BLACK );
                    circle( maxx / 2 - 140, maxy / 2 + 40, 150 );
                    floodfill( 220, 400, WHITE );

```

```

        setcolor( BLACK );
        moveto( vLineaX[ 0 ], vLineaY[ 0 ] );
        for( int i = 1; i < 8; i++)
            lineto( vLineaX[ i ], vLineaY[ i ] );
        lineto( vLineaX[ 0 ], vLineaY[ 0 ] );
        }while( !kbhit() );
    }
    tecla = 'p';
    break;
case 't':
    {
        posX = 50;
        iniciarPantallaTiempo( maxx, maxy );
        do
        {
            generacionDeValoresDeSensor( maxx, maxy, vLineaX, vLineaY, vEnTiempo );
            calculoDePorcentajes( vLineaX, vLineaY );
            imprimirValoresEnTiempoS1( vEnTiempo, posX, vEnTiempoTemp );
            imprimirValoresEnTiempoS2( vEnTiempo, posX, vEnTiempoTemp );
            imprimirValoresEnTiempoS3( vEnTiempo, posX, vEnTiempoTemp );
            imprimirValoresEnTiempoS4( vEnTiempo, posX, vEnTiempoTemp );
            imprimirValoresEnTiempoS5( vEnTiempo, posX, vEnTiempoTemp );
            imprimirValoresEnTiempoS6( vEnTiempo, posX, vEnTiempoTemp );
            imprimirValoresEnTiempoS7( vEnTiempo, posX, vEnTiempoTemp );
            imprimirValoresEnTiempoS8( vEnTiempo, posX, vEnTiempoTemp );
            posX += 20;
            if( posX > 340 )
            {
                posX = 50;
                setfillstyle(
                    SOLID_FILL, BLACK );
                /*
                bar( 41, 210, 350, 429 );
                bar( 41, 389, 350, 351 );
                bar( 41, 349, 350, 311 );
                bar( 41, 309, 350, 271 );
                bar( 41, 269, 350, 231 );
                bar( 41, 229, 350, 191 );
                bar( 41, 189, 350, 151 );
                bar( 41, 149, 350, 101 );
                */
                delay( 250 );
                tecla = getch();
            }while( /*tecla != 'q'*/ !kbhit() );
            tecla = 'p';
        }
        break;
case 's':{
            mostrarSalida( maxx, maxy );
            delay( 4000 );
            restorecrtmode();
            closegraph();
            exit(0);
        }
        break;
case 'p':{
            // Iniciar la pantalla principal del tubo
            iniciarPantallaDelTubo( maxx, maxy );
            do

```

```

    {
    generacionDeValoresDeSensor( maxx, maxy, vLineaX, vLineaY, vEnTiempo );
    imprimirValoresDeSensor( maxx, maxy, vLineaX, vLineaY )

        setfillstyle( SOLID_FILL, BLUE );
        circle( maxx / 2 - 140, maxy / 2 + 40, 150 );
        floodfill( 220, 400, WHITE );

        calculoDePorcentajes( vLineaX, vLineaY );

        do
        {
            tecla = getch();
        }while( tecla != 'a' && tecla != 'p' && tecla != 's' && tecla != 't');

/*
        setfillstyle( SOLID_FILL, BLACK );
        circle( maxx / 2 - 140, maxy / 2 + 40, 150 );
        floodfill( 220, 400, WHITE );

        setcolor( BLACK );
        moveto( vLineaX[ 0 ], vLineaY[ 0 ] );
        for( int i = 1; i < 8; i++)
            lineto( vLineaX[ i ], vLineaY[ i ] );
        lineto( vLineaX[ 0 ], vLineaY[ 0 ] );
*/

/*
        presionarBoton.x.ax = 3;
        int86( 0x33, &presionarBoton, &presionarBoton
);

        posX = presionarBoton.x.cx;
        posY = presionarBoton.x.dx;
        boton = presionarBoton.x.bx;

        if( posX >= 601 && posX <= maxx - 1 )
        {
            if( posY >= 31 && posY <= 50 )
            {
                if( boton == 1 )
                {
                    restorecrtmode();
                    closegraph();
                    exit(0);
                }
            }
        }

        */
        }
        break;
        default:{
            tecla = 'p';
        }
    }
    opcion = tecla;
}while( 1 /*tecla != 's' || tecla != 'S'*/ /*!kbhit()*/ );
// restorecrtmode();
// closegraph();
}

```

```

void mostrarSalida( int maxx, int maxy )

```

```

{
    setfillstyle( CLOSE_DOT_FILL, WHITE );
    bar( 0, 0, maxx, maxy);
    floodfill( 2, 2, WHITE );
    rectangle( 0, 0, maxx, maxy );
    settextstyle( 2, 0, 8 );
    outtextxy( 290, 100, "I.P.N.");
    outtextxy( 200, 200, "S.E.P.I. E.S.I.M.E.");
    outtextxy( 80, 300, "Departamento de Ingenieria El,ctrica");
}

void calculoDePorcentajes( int vLineaX[], int vLineaY[] )
{
    double distanciaTemporal, areaDelTubo, areaDelAgua, areaDelGas;
    double porcentajeDelGas, porcentajeDelAgua;
    char buffer[ 10 ];

    for( int i = 0; i < 5; i++ )
        buffer[ i ] = '\0';

    for( i = 0; i < 7; i++ )
    {
        distanciaTemporal += sqrt( abs( ( vLineaX[ i ] - 179 ) * ( vLineaX[ i ] - 179 ) ) +
abs( ( vLineaY[ i ] - 279 ) * ( vLineaY[ i ] - 279 ) ) );
    }

    distanciaTemporal = distanciaTemporal / 8;

    areaDelTubo = 2 * pi * ( 150 * 150 );
    areaDelGas = 2 * pi * ( distanciaTemporal * distanciaTemporal );
    areaDelAgua = areaDelTubo - areaDelGas;

    porcentajeDelGas = areaDelGas * 100 / areaDelTubo;
    porcentajeDelAgua = 100 - porcentajeDelGas;

    setfillstyle( SOLID_FILL, BLACK );
    bar( 401, 111, 479, 249 );
    floodfill( 402, 112, WHITE );

    setfillstyle( SOLID_FILL, BLACK );
    bar( 521, 111, 599, 249 );
    floodfill( 522, 112, WHITE );

    setfillstyle( SOLID_FILL, BLUE );
    bar( 401, 249, 479, 249 - ( porcentajeDelAgua * 140 / 100 ) );
    floodfill( 402, 248, WHITE );

    setfillstyle( SOLID_FILL, BROWN );
    bar( 521, 249, 599, 249 - ( porcentajeDelGas * 140 / 100 ) );
    floodfill( 522, 248, WHITE );

    settextstyle(2,0,4);
    sprintf( buffer, "%2.2lf%", porcentajeDelAgua );
    outtextxy( 425, 170, buffer );
    sprintf( buffer, "%2.2lf%", porcentajeDelGas );
    outtextxy( 545, 170, buffer );
}

```

```

void generacionDeValoresDeSensor( int maxx, int maxy, int vLineaX[], int vLineaY[], int
vEnTiempo[] )
{
    int pSuperior, plInferior, plzquierda, pDerecha;
    int pSuperiorIzquierda, pSuperiorDerecha;
    int plInferiorIzquierda, plInferiorDerecha;
    int asignado;

    setcolor( WHITE );
    asignado = 0;

    //sensor superior
    do
    {
        if( ( pSuperior = rand() % 145 ) > 132 )
            asignado = 1;
    }while( asignado != 1 );
    vLineaX[ 0 ] = maxx / 2 - 140;
    vLineaY[ 0 ] = pSuperior;
    vEnTiempo[ 0 ] = pSuperior;
    //sensor superior derecho
    asignado = 0;
    do
    {
        if( ( pSuperiorDerecha = rand() % 288 ) > 270 )
            asignado = 1;
    }while( asignado != 1 );
    vLineaX[ 1 ] = pSuperiorDerecha;
    vLineaY[ 1 ] = maxy / 2 - 100 + 40;
    vEnTiempo[ 1 ] = pSuperiorDerecha;
    //sensor derecho
    asignado = 0;
    do
    {
        if( ( pDerecha = rand() % 325 ) > 179 )
            asignado = 1;
    }while( asignado != 1 );
    vLineaX[ 2 ] = pDerecha;
    vLineaY[ 2 ] = maxy / 2 + 40;
    vEnTiempo[ 2 ] = pDerecha;
    //sensor inferior derecho
    asignado = 0;
    do
    {
        if( ( plInferiorDerecha = rand() % 315 ) > 179 )
            asignado = 1;
    }while( asignado != 1 );
    vLineaX[ 3 ] = plInferiorDerecha;
    vLineaY[ 3 ] = maxy / 2 + 40 + 40;
    vEnTiempo[ 3 ] = plInferiorDerecha;
    //sensor inferior
    asignado = 0;
    do
    {
        if( ( plInferior = rand() % 420 ) > 279 )
            asignado = 1;
    }while( asignado != 1 );
    vLineaX[ 4 ] = maxx / 2 - 140;
    vLineaY[ 4 ] = plInferior;
    vEnTiempo[ 4 ] = plInferior;
}

```

```

//sensor inferior izquierdo
asignado = 0;
do
{
    if( ( plInferiorIzquierda = rand() % 179 ) > 40 )
        asignado = 1;
}while( asignado != 1 );
vLineaX[ 5 ] = plInferiorIzquierda;
vLineaY[ 5 ] = maxy / 2 + 40 + 40;
vEnTiempo[ 5 ] = plInferiorIzquierda;
//sensor izquierdo
asignado = 0;
do
{
    if( ( plzquierda = rand() % 179 ) > 33 )
        asignado = 1;
}while( asignado != 1 );
vLineaX[ 6 ] = plzquierda;
vLineaY[ 6 ] = maxy / 2 + 40;
vEnTiempo[ 6 ] = plzquierda;
//sensor superior izquierdo
asignado = 0;
do
{
    if( ( pSuperiorIzquierda = rand() % 82 ) > 73 )
        asignado = 1;
}while( asignado != 1 );
vLineaX[ 7 ] = pSuperiorIzquierda;
vLineaY[ 7 ] = maxy / 2 - 100 + 40;
vEnTiempo[ 7 ] = pSuperiorIzquierda;
//
}

void imprimirValoresDeSensor( int maxx, int maxy, int vLineaX[], int vLineaY[] )
{
    int pSuperior, plInferior, plzquierda, pDerecha;
    int pSuperiorIzquierda, pSuperiorDerecha;
    int plInferiorIzquierda, plInferiorDerecha;

    setfillstyle( SOLID_FILL, BLACK );
    bar( 10, 100, 350, 450 );
    setcolor( WHITE );
    settextstyle( 2, 0, 5);
    outtextxy( 175, maxy - 45, "S1" ); //sensor 1
    outtextxy( 53, maxy - 95, "S2" );//sensor 2
    outtextxy( 8, maxy / 2 + 35, "S3" ); //sensor 3
    outtextxy( 53, 155, "S4" ); //sensor 4
    outtextxy( 175, 110, "S5" ); //sensor 5
    outtextxy( 295, 160, "S6" ); //sensor 6
    outtextxy( 338, maxy / 2 + 35, "S7" ); //sensor 7
    outtextxy( 295, maxy - 95, "S8" ); //sensor 8

    //sensor superior
    // putpixel( maxx / 2 - 140, pSuperior, WHITE);
    //sensor superior derecho
    // putpixel( pSuperiorDerecha, maxy / 2 - 100 + 40, WHITE);
    //sensor derecho
    // putpixel( pDerecha, maxy / 2 + 40, WHITE);
    //sensor inferior derecho

```

```

//      putpixel( plInferiorDerecha, maxy / 2 + 70 + 40, WHITE);
//      //sensor inferior
//      putpixel( maxx / 2 - 140, plInferior, WHITE);
//      //sensor inferior izquierdo
//      putpixel( plInferiorIzquierda, maxy / 2 + 80 + 40, WHITE);
//      //sensor izquierdo
//      putpixel( plzquierda, maxy / 2 + 40, WHITE);
//      //sensor superior izquierdo
//      putpixel( pSuperiorIzquierda, maxy / 2 - 100 + 40, WHITE);

//      setfillstyle( WIDE_DOT_FILL, LIGHTGRAY );
//      moveto( vLineaX[ 0 ], vLineaY[ 0 ] );
//      for( int i = 1; i < 8; i++)
//          lineto( vLineaX[ i ], vLineaY[ i ] );
//      lineto( vLineaX[ 0 ], vLineaY[ 0 ] );
//      floodfill( 220, 250, WHITE );
}

void imprimirValoresEnTiempoS1( int vEnTiempo[], int posX, int vEnTiempoTemp[] )
{
    //sensor inferior (S1)
    vEnTiempo[ 4 ] = 420 - vEnTiempo[ 4 ] + 30;
    if( vEnTiempo[ 4 ] > 335 )
        vEnTiempo[ 4 ] = 335;
    putpixel( posX, 429 - vEnTiempo[ 4 ], RED );

    setcolor( RED );
    if( posX == 50 )
        moveto( 41, 429 );
    else
        moveto( posX - 20, vEnTiempoTemp[ 4 ] );
    lineto( posX, 429 - vEnTiempo[ 4 ] );
    vEnTiempoTemp[ 4 ] = 429 - vEnTiempo[ 4 ];
}

void imprimirValoresEnTiempoS2( int vEnTiempo[], int posX, int vEnTiempoTemp[] )
{
    //sensor inferior izquierda (S2)
    vEnTiempo[ 5 ] = 179 - vEnTiempo[ 5 ] + 30;
    if( vEnTiempo[ 5 ] > 335 )
        vEnTiempo[ 5 ] = 335;
    putpixel( posX, 429 - vEnTiempo[ 5 ], BLUE );

    setcolor( BLUE );
    if( posX == 50 )
        moveto( 41, 429 );
    else
        moveto( posX - 20, vEnTiempoTemp[ 5 ] );
    lineto( posX, 429 - vEnTiempo[ 5 ] );
    vEnTiempoTemp[ 5 ] = 429 - vEnTiempo[ 5 ];
}

void imprimirValoresEnTiempoS3( int vEnTiempo[], int posX, int vEnTiempoTemp[] )
{
    //sensor izquierda (S3)
    vEnTiempo[ 6 ] = 179 - vEnTiempo[ 6 ] + 30;
    if( vEnTiempo[ 6 ] > 335 )
        vEnTiempo[ 6 ] = 335;
    putpixel( posX, 429 - vEnTiempo[ 6 ], YELLOW );
}

```

```
    setcolor( YELLOW );
    if( posX == 50 )
        moveto( 41, 429 );
    else
        moveto( posX - 20, vEnTiempoTemp[ 6 ] );
    lineto( posX, 429 - vEnTiempo[ 6 ] );
    vEnTiempoTemp[ 6 ] = 429 - vEnTiempo[ 6 ];
}

void imprimirValoresEnTiempoS4( int vEnTiempo[], int posX, int vEnTiempoTemp[] )
{
    //sensor superior izquierda (S4)
    vEnTiempo[ 7 ] = 82 - vEnTiempo[ 7 ] + 30;
    if( vEnTiempo[ 7 ] > 335 )
        vEnTiempo[ 7 ] = 335;
    putpixel( posX, 429 - vEnTiempo[ 7 ], GREEN );

    setcolor( GREEN );
    if( posX == 50 )
        moveto( 41, 429 );
    else
        moveto( posX - 20, vEnTiempoTemp[ 7 ] );
    lineto( posX, 429 - vEnTiempo[ 7 ] );
    vEnTiempoTemp[ 7 ] = 429 - vEnTiempo[ 7 ];
}

void imprimirValoresEnTiempoS5( int vEnTiempo[], int posX, int vEnTiempoTemp[] )
{
    //sensor superior (S5)
    vEnTiempo[ 0 ] = 145 - vEnTiempo[ 0 ] + 30;
    if( vEnTiempo[ 0 ] > 335 )
        vEnTiempo[ 0 ] = 335;
    putpixel( posX, 429 - vEnTiempo[ 0 ], CYAN );

    setcolor( CYAN );
    if( posX == 50 )
        moveto( 41, 429 );
    else
        moveto( posX - 20, vEnTiempoTemp[ 0 ] );
    lineto( posX, 429 - vEnTiempo[ 0 ] );
    vEnTiempoTemp[ 0 ] = 429 - vEnTiempo[ 0 ];
}

void imprimirValoresEnTiempoS6( int vEnTiempo[], int posX, int vEnTiempoTemp[] )
{
    //sensor superior derecha (S6)
    vEnTiempo[ 1 ] = 288 - vEnTiempo[ 1 ] + 30;
    if( vEnTiempo[ 1 ] > 335 )
        vEnTiempo[ 1 ] = 335;
    putpixel( posX, 429 - vEnTiempo[ 1 ], MAGENTA );

    setcolor( MAGENTA );
    if( posX == 50 )
        moveto( 41, 429 );
    else
        moveto( posX - 20, vEnTiempoTemp[ 1 ] );
    lineto( posX, 429 - vEnTiempo[ 1 ] );
    vEnTiempoTemp[ 1 ] = 429 - vEnTiempo[ 1 ];
}
```

}

```
void imprimirValoresEnTiempoS7( int vEnTiempo[], int posX, int vEnTiempoTemp[] )
{
    //sensor derecha (S7)
    vEnTiempo[ 2 ] = 325 - vEnTiempo[ 2 ] + 30;
    if( vEnTiempo[ 2 ] > 335 )
        vEnTiempo[ 2 ] = 335;
    putpixel( posX, 429 - vEnTiempo[ 2 ], BROWN );

    setcolor( BROWN );
    if( posX == 50 )
        moveto( 41, 429 );
    else
        moveto( posX - 20, vEnTiempoTemp[ 2 ] );
    lineto( posX, 429 - vEnTiempo[ 2 ] );
    vEnTiempoTemp[ 2 ] = 429 - vEnTiempo[ 2 ];
}
```

```
void imprimirValoresEnTiempoS8( int vEnTiempo[], int posX, int vEnTiempoTemp[] )
{
    //sensor inferior derecha (S8)
    vEnTiempo[ 3 ] = 315 - vEnTiempo[ 3 ] + 30;
    if( vEnTiempo[ 3 ] > 335 )
        vEnTiempo[ 3 ] = 335;
    putpixel( posX, 429 - vEnTiempo[ 3 ], LIGHTBLUE );

    setcolor( LIGHTBLUE );
    if( posX == 50 )
        moveto( 41, 429 );
    else
        moveto( posX - 20, vEnTiempoTemp[ 3 ] );
    lineto( posX, 429 - vEnTiempo[ 3 ] );
    vEnTiempoTemp[ 3 ] = 429 - vEnTiempo[ 3 ];
}
```

```
void iniciarPantallaDelTubo( int maxx, int maxy )
{
    setfillstyle( SOLID_FILL, BLACK );
    bar( 0, 0, maxx, maxy );
    // floodfill( 1, 1, WHITE );
    setcolor( WHITE );
    rectangle( 0, 0, maxx, maxy ); //cuadro completo
    rectangle( 0, 0, maxx, 30 ); //barra de titulo
    rectangle( 0, 30, maxx, 51 ); //barra de herramientas
    rectangle( 0, 51, 360, maxy ); //cuadro del tubo
    rectangle( 360, maxy - 200, maxx, maxy - 20 ); //cuadro de opciones
    rectangle( 360, maxy - 200, maxx, maxy - 180 );//titulo barra de operaciones
    rectangle( 0, maxy, maxx, maxy - 20 ); //barra de tareas

    setfillstyle( SOLID_FILL, GREEN );
    bar( 1, 1, maxx - 1, 29 ); //barra de titulo
    bar( 1, maxy - 1, maxx - 1, maxy - 19 ); //barra de tareas
    setfillstyle( SOLID_FILL, LIGHTGRAY );
    bar( 361, maxy - 179, maxx - 1, maxy - 21 ); //barra operaciones
    bar( 1, 31, maxx - 1, 50 ); //barra herramientas
    setfillstyle( SOLID_FILL, GREEN );
}
```

```

bar( 361, maxy - 199, maxx - 1, maxy - 181 );

rectangle( 600, 30, maxx, 51 ); //cuadro salir
rectangle( 410, 320, 480, 350 ); //cuadro paso a paso
rectangle( 510, 320, 580, 350 ); //cuadro automatico
rectangle( 410, 380, 480, 410 ); //cuadro en el tiempo
rectangle( 510, 380, 580, 410 ); //cuadro en la frecuencia
setfillstyle( SOLID_FILL, MAGENTA );
bar( 601, 31, maxx - 1, 50 );
bar( 411, 321, 479, 349 );
bar( 511, 321, 579, 349 );
bar( 411, 381, 479, 409 );
bar( 511, 381, 579, 409 );

settextstyle( 2, 0, 5);
outtextxy( 260, 5, "FLUJOS BIFASICOS" );
outtextxy( 120, 60, "Mezcla Agua - Gas" );
outtextxy( 420, 60, "Porcentaje de mezcla" );
outtextxy( 405, 280, ":::Panel de operaciones:::"),
outtextxy( 220, 33, "Simulaci3n de Flujos Bif sico");
setcolor( RED );
settextstyle(2,0,5);
outtextxy( maxx - 40, maxy - 15, "[S@S]");
setcolor( WHITE );
settextstyle(2,0,4);
outtextxy( 610, 35, "Salir");

setcolor( WHITE );
settextstyle(2,0,4);
rectangle( 400, 110, 480, 250 );
rectangle( 520, 110, 600, 250 );
outtextxy( 430, 250, "Agua");
outtextxy( 550, 250, "Gas");
outtextxy( 385, 240, "0%");
outtextxy( 373, 110, "100%");
outtextxy( 505, 240, "0%");
outtextxy( 493, 110, "100%");

outtextxy( 435, 326, "PaP");
outtextxy( 530, 326, "Auto");
outtextxy( 435, 386, "f(t)");
outtextxy( 530, 386, "F(x)");
}

void iniciarModoGrafico()
{
    int control = DETECT, modo, error;

    clrscr();
    initgraph(&control, &modo, "c:\\tc\\bgi");
    error = graphresult();

    if( error != grOk )
    {
        cout << grapherrormsg( error );
        exit( 0 );
    }
}

void pantallaDePresentacion( int maxx, int maxy )
{

```

```

setfillstyle( CLOSE_DOT_FILL, WHITE );
bar( 0, 0, maxx, maxy );
floodfill( 2, 2, WHITE );

setfillstyle( SOLID_FILL, BLACK );
bar( 155, 165, 495, 375 );
setcolor( BLACK );
rectangle( 155, 165, 495, 375);

setcolor( WHITE );
rectangle( 0, 0, maxx, maxy );
setfillstyle( SOLID_FILL, GREEN );
bar( 140, 150, 480, 360 );
rectangle( 140, 150, 480, 360 );

settextstyle(2,0,6);
outtextxy( 160, 180, "Instituto Polit,cnico Nacional");
settextstyle(2,0,5);
outtextxy( 200, 210, "S.E.P.I. E.S.I.M.E. Zacatenco");
settextstyle(2,0,5);
outtextxy( 180, 250, "Departamento de Ingenier;a Mecanica");
settextstyle(5,0,2);
outtextxy( 150, 300, ":: Simulaciøn de Flujos Bif sicos ::");

setcolor( RED );
settextstyle(2,0,5);
outtextxy( maxx - 40, maxy - 15, "[S@S]");

setcolor( WHITE );
getch();
setfillstyle( SOLID_FILL, BLACK );
bar( 0, 0, maxx, maxy );
floodfill( 1, 1, WHITE );
}

void iniciarPantallaTiempo( int maxx, int maxy )
{
    char buffer[ 3 ];

    for( int i = 0; i < 3; i++ )
        buffer[ i ] = '\0';

    setfillstyle( SOLID_FILL, BLACK );
    bar( 0, 0, maxx, maxy );
    setcolor( WHITE );
    rectangle( 0, 0, maxx, maxy ); //cuadro completo
    rectangle( 0, 0, maxx, 30 ); //barra de titulo
    rectangle( 0, 30, maxx, 51 ); //barra de herramientas
    rectangle( 0, 51, 360, maxy ); //cuadro del tubo
    rectangle( 360, maxy - 200, maxx, maxy - 20 ); //cuadro de opciones
    rectangle( 360, maxy - 200, maxx, maxy - 180 );//titulo barra de operaciones
    rectangle( 0, maxy, maxx, maxy - 20 ); //barra de tareas

    setfillstyle( SOLID_FILL, GREEN );
    bar( 1, 1, maxx - 1, 29 ); //barra de titulo
    bar( 1, maxy - 1, maxx - 1, maxy - 19 ); //barra de tareas
    setfillstyle( SOLID_FILL, LIGHTGRAY );
    bar( 361, maxy - 179, maxx - 1, maxy - 21 ); //barra operaciones
    bar( 1, 31, maxx - 1, 50 ); //barra herramientas
    setfillstyle( SOLID_FILL, GREEN );

```

```

bar( 361, maxy - 199, maxx - 1, maxy - 181 );

rectangle( 600, 30, maxx, 51 ); //cuadro salir
rectangle( 410, 320, 480, 350 ); //cuadro paso a paso
rectangle( 510, 320, 580, 350 ); //cuadro automatico
rectangle( 410, 380, 480, 410 ); //cuadro en el tiempo
rectangle( 510, 380, 580, 410 ); //cuadro en la frecuencia
setfillstyle( SOLID_FILL, BROWN );
bar( 601, 31, maxx - 1, 50 );
bar( 411, 321, 479, 349 );
bar( 511, 321, 579, 349 );
bar( 411, 381, 479, 409 );
bar( 511, 381, 579, 409 );

settextstyle( 2, 0, 5);
outtextxy( 260, 5, "FLUJOS BIFASICOS" );
outtextxy( 120, 60, "Gr fica en el Tiempo" );
outtextxy( 420, 60, "Porcentaje de mezcla" );
outtextxy( 405, 280, ":::Panel de operaciones:::"),
outtextxy( 240, 33, "Simulaciçn en el Tiempo");
setcolor( RED );
settextstyle(2,0,5);
outtextxy( maxx - 40, maxy - 15, "[S@S]");
setcolor( WHITE );
settextstyle(2,0,4);
outtextxy( 610, 35, "Salir");

setcolor( WHITE );
settextstyle(2,0,4);
rectangle( 400, 110, 480, 250 );
rectangle( 520, 110, 600, 250 );
outtextxy( 430, 250, "Agua");
outtextxy( 550, 250, "Gas");
outtextxy( 385, 240, "0%");
outtextxy( 373, 110, "100%");
outtextxy( 505, 240, "0%");
outtextxy( 493, 110, "100%");

setcolor( WHITE );
line( 40, 210, 40, 445 ); //vertical
line( 30, 430, 350, 430 );

//lineas horizontales
int temp = 430;
/*
for( int i = 0; i < 8; i++ )
{
    line( 30, temp, 330, temp );
    temp -= 40;
}
*/

//lineas verticales;
temp = 50;
int incTemp = 0;
for( i = 0; i < 15; i++ )
{
    line( temp, 430, temp, 432 );
    sprintf( buffer, "%1.0d", i + 1 );
    settextstyle( 2, 0, 3);
    if( i < 15 )

```

```

        outtextxy( 49 + incTemp, 435, buffer );
        incTemp += 20;
        temp += 20;
    }

    line( 38, 430, 40, 430 ); //0%
    line( 38, 314, 40, 320 ); //50%
    line( 38, 215, 40, 215 ); //100%

    outtextxy( 33, 428, "0.0" );
    outtextxy( 33, 312, "2.5" );
    outtextxy( 33, 213, "5.0" );

/*
    settextstyle( 2, 0, 5);
    outtextxy( 15, 420, "S1" );      //sensor 1
    outtextxy( 15, 380, "S2" );      //sensor 2
    outtextxy( 15, 340, "S3" );      //sensor 3
    outtextxy( 15, 300, "S4" );      //sensor 4
    outtextxy( 15, 260, "S5" );      //sensor 5
    outtextxy( 15, 220, "S6" );      //sensor 6
    outtextxy( 15, 180, "S7" );      //sensor 7
    outtextxy( 15, 140, "S8" );      //sensor 8
*/

    outtextxy( 435, 326, "PaP");
    outtextxy( 530, 326, "Auto");
    outtextxy( 435, 386, "f(t)");
    outtextxy( 530, 386, "F(x)");
}

```

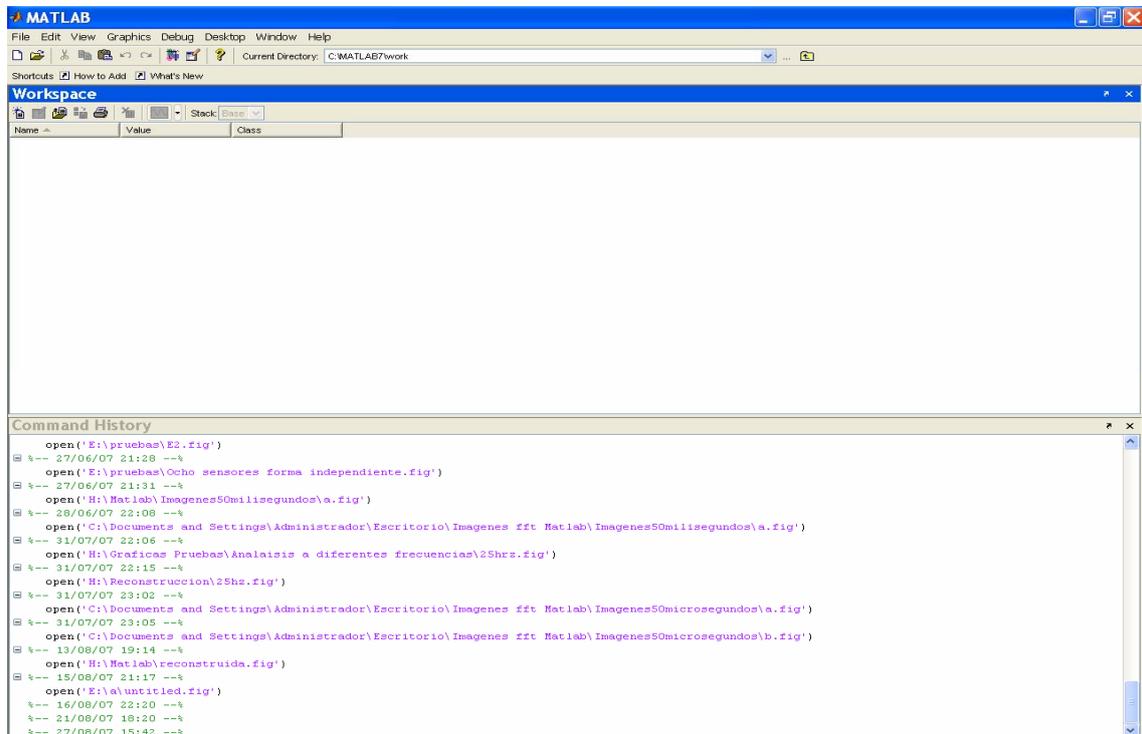


FIGURA C1 Ambiente de Matlab donde se realizó el análisis en el dominio del tiempo, frecuencia y frecuencia-tiempo así como la reconstrucción del fenómeno anular.

APENDICE D

ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO EMPLEADO

COMPRESOR AIRE INDUSTRIAL

Marca: Tbo Ingersoll - Rand

Especificaciones:



MAWP	200	PSI	AT	450 ° F
MDMT	20	° F	AT	200 PSI
YR	1992	MFG	SER	XX
WC	120	SH 181	HD	149

BOMBA DE AGUA

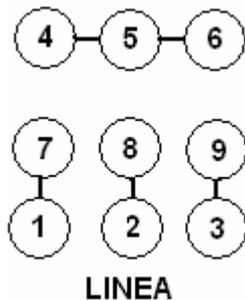
Marca: Siemens

Especificaciones:

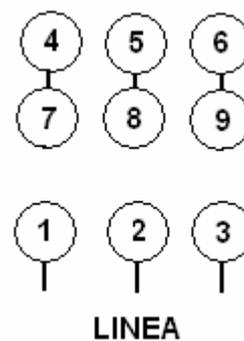


TIPO	RGZ	CLAS INS	F
HP	5	FACTOR DE SERV	1 15
VOLTS	220-230 / 440-460	TEMP AMB.	40 °C
AMPS	12.6-12.2 / 6.3-6.1	RISE TEMP.	CLASS B
HZ	60	DISEÑO NEMA	B
NUM. EFT NEMA	82.8%	PESO	75 LB

CONECCION BAJO VOLTAJE



CONECCION ALTO VOLTAJE.



BOMBA DE RETROALIMENTACION

Marca: Emco

Especificaciones:

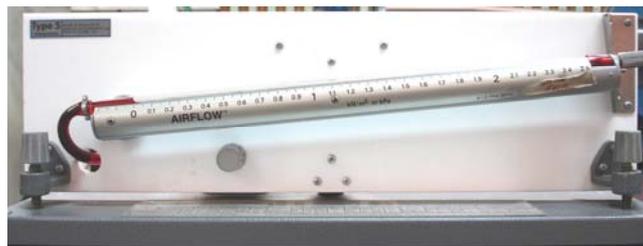


MODELO	Nº	32x25mm		
100	J-95	SUCC/DESC		
CARGA TOTAL	LTS/MIN	HP	R.P.M	
10/22	175/15	1	3450	
RPM	C.P	1	V 127/220	
1450			FASES	
			ELEV DE	90°C
			TEMP	SOBRE
				AMBIENTE
FACTOR DE SERVICIO		1.4	AMPERES A FACTOR DE SERVICIO	17.0 / 9.0

Especificaciones de su motor:

MANOMETRO INCLINADO.

Marca: Airflow Lufttechnix



INSTRUCCIONES.

El manómetro puede ser utilizado en un número alternativo de posiciones, puede ser movido de una posición a otra. Mover el tubo de soporte un poco hacia delante y moverlo hacia la locación requerida. El panel de nivel está provisto de dos perillas. Después de haber colocado la burbuja de nivel a cero rotando la perilla en el panel. No se fuerce más del límite del que se puede rotar.

Especificaciones:

Tubo largo tipo 4

Posición del tubo	RANGO			Escala Multiplicadora
	kN/m^2	<i>in</i>	<i>mm</i>	
Vertical	0 – 5	0 – 20	0 – 500	1
Inclinación Alta	0 – 1	0 – 4	0 – 100	0.2
Inclinación BTM	0 – 0.5	0 – 2	0 – 50	1

Posición del tubo	Tubo largo tipo 4 y 5 RANGO			Escala Multiplicadora
	kN/m^2	<i>in</i>	<i>mm</i>	
Vertical	0 – 2.5	1 – 10	0 – 250	1
Inclinación Alta	0 – 0.5	0 – 2	0 – 50	0.2
Inclinación Media	0 – 0.25	0 – 1	0- 25	0.1
Inclinación BTM	0 – 0.125	0 – 0.5	0 – 12.5	0.05

**TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE
AGUA**

Marca: Plásticos Rex. S.A. DE C.V.

Especificaciones:



CAPACIDAD 1050 litros. Tipo 6.

**TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE
AGUA**

Marca: Construido por el Labinthap

Especificaciones:



CAPACIDAD 550 litros.

APENDICE E

RESULTADOS DE CORRIDAS EXPERIMENTALES

Promedios de resultados de corridas experimentales para la calibración de la placa de orificio 1 utilizando liquido (Agua)

	DATOS Y		CALCULOS PARA LA PLACA DE ORIFICIO 1					Flujo o Caudal (Q) Tuberia gr/s	Velocidad Tuberia V = Q/A m/s
	Tiempo	Presión	Masa	Abertura	Diámetro	Diámetro			
	seg.	diferencial mmHg	lb	válvula vueltas	tubería mm	placa de orificio mm			
1	30	14	52	1//6	50.8	36.5	0.786	0.388	
2	30	22	81	2//6	50.8	36.5	1.225	0.604	
3	30	30	104	3//6	50.8	36.5	1.572	0.776	
4	30	42	127	4//6	50.8	36.5	1.920	0.947	
5	30	51	141	5//6	50.8	36.5	2.132	1.052	
6	30	60	155	1	50.8	36.5	2.344	1.156	
7	30	69	171	1//6 + 1	50.8	36.5	2.585	1.276	
8	30	79	188	2//6 + 1	50.8	36.5	2.843	1.402	
9	30	87	192	3//6 + 1	50.8	36.5	2.903	1.432	
10	30	96	210	4//6 + 1	50.8	36.5	3.175	1.567	
11	30	102	210	5//6 + 1	50.8	36.5	3.175	1.567	
12	30	106	215	2	50.8	36.5	3.251	1.604	
13	30	123	240	1//6 + 2	50.8	36.5	3.629	1.790	
14	30	126	233	2//6 + 2	50.8	36.5	3.523	1.738	
15	30	127	242	3//6 + 2	50.8	36.5	3.659	1.805	
16	30	127	245	4//6 + 2	50.8	36.5	3.704	1.828	
17	30	128	245	5//6 + 2	50.8	36.5	3.704	1.828	
18	30	129	246	3	50.8	36.5	3.719	1.835	

Promedio de mediciones	Variancia	Desviacion estandar
52	1.537	1.24
81	1.612	1.27
104	3.572	1.89
127	1.488	1.22
141	2.464	1.57
155	1.822	1.35
171	3.496	1.87
188	2.016	1.42
192	1.562	1.25
210	1.276	1.13
210	2.924	1.71
215	3.027	1.74
240	2.496	1.58
233	3.841	1.96
242	1.060	1.03
245	0.902	0.95
245	0.921	0.96
246	0.756	0.87

Promedio de mediciones	Variancia	Desviacion estandar
14	0.547	0.74
22	0.462	0.68
30	1.081	1.04
42	0.756	0.87
51	0.921	0.96
60	0.324	0.57
69	0.756	0.87
79	1.040	1.02
87	0.883	0.94
96	0.448	0.67
102	0.532	0.73
106	0.624	0.79
123	0.547	0.74
126	0.656	0.81
127	0.448	0.67
127	0.504	0.71
128	0.476	0.69
129	0.422	0.65

PRUEBAS REALIZADAS PARA OBTENER LA VELOCIDAD SUPERFICIAL DEL AIRE CON EL TUBO DE PITOT PARA ABERTURAS DE VALVULA DESDE 1/6 DE VUELTA Y MANOMETRO INCLINADO PARA MEDICIONES EN cmH2O. PLACA DE ORIFICIO 1 B = 0.4

	DATOS Y		CALCULOS PARA LA PLACA DE ORIFICIO 1				
	Presión	Presión Dinámica	Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	
	diferencial mmHg	Tubo pitot mmH2O	válvula vueltas	De mmH2O a Pascales	formula Velocidad m/s	barrido mm	
1	15	40	1//6	392.4	25.573	0	Velocidad superficial del gas m/s 29.352
2	15	50	1//6	490.5	28.592	5	Velocidad superficial del gas m/s
3	15	52	1//6	510.12	29.158	10	29.104
4	15	54	1//6	529.74	29.714	15	Velocidad superficial promedio m/s
5	15	54	1//6	529.74	29.714	20	29.228
6	15	52	1//6	510.12	29.158	25	
7	15	52	1//6	510.12	29.158	30	
8	15	52	1//6	510.12	29.158	35	
9	15	54	1//6	529.74	29.714	40	
10	15	50	1//6	490.5	28.592	45	
11	15	36	1//6	353.16	24.261	50	

	Presión diferencial	Presion Dinamica Tubo pitot	Abertura válvula	Conversion De mmH2O a	CALCULO formula	Distancia barrido	Velocidad supercial del gas m/s
	mmHg	mmH2O	vuelatas	Pascales	Velocidad m/s	mm	
1	26	76	2//6	745.560	35.251	0	39.881
2	29	94	2//6	922.140	39.203	5	Velocidad supercial
3	29	100	2//6	981.000	40.435	10	del gas m/s
4	29	100	2//6	981.000	40.435	15	39.714
5	29	98	2//6	961.380	40.029	20	Velocidad supercial
6	29	94	2//6	922.140	39.203	25	promedio m/s
7	29	96	2//6	941.760	39.618	30	39.797
8	28.8	98	2//6	961.380	40.029	35	
9	28.4	104	2//6	1020.240	41.236	40	
10	28.4	96	2//6	941.760	39.618	45	
11	28.2	56	2//6	549.360	30.259	50	

	Presión diferencial	Presion Dinamica Tubo pitot	Abertura válvula	Conversion De mmH2O a	CALCULO formula	Distancia barrido	Velocidad supercial del gas m/s
	mmHg	mmH2O	vuelatas	Pascales	Velocidad m/s	mm	
1	40	100	3//6	981	40.435	0	43.274
2	39.8	112	3//6	1098.72	42.792	5	Velocidad supercial
3	39.6	115	3//6	1128.15	43.361	10	del gas m/s
4	39.6	115	3//6	1128.15	43.361	15	43.357
5	39.4	115	3//6	1128.15	43.361	20	Velocidad supercial
6	39.4	115.5	3//6	1133.055	43.456	25	promedio m/s
7	39.4	116	3//6	1137.96	43.549	30	43.316
8	39.4	115.5	3//6	1133.055	43.4560	35	
9	39.4	114	3//6	1118.34	43.1729	40	
10	39.4	114	3//6	1118.34	43.1729	45	
11	39.2	100	3//6	981	40.4351	50	

	Presión diferencial	Presion Dinamica Tubo pitot	Abertura válvula	Conversion De mmH2O a	CALCULO formula	Distancia barrido	Velocidad supercial del gas m/s
	mmHg	mmH2O	vuelatas	Pascales	Velocidad m/s	mm	
1	49.8	134	4//6	1314.54	46.807	0	54.455
2	53	168	4//6	1648.08	52.409	5	Velocidad supercial
3	53	180	4//6	1765.8	54.249	10	del gas m/s
4	53	186	4//6	1824.66	55.146	15	52.707
5	52.8	186	4//6	1824.66	55.146	20	Velocidad supercial
6	52.2	180	4//6	1765.8	54.249	25	promedio m/s
7	52	178	4//6	1746.18	53.947	30	53.581
8	51.6	172	4//6	1687.32	53.030	35	
9	51.6	164	4//6	1608.84	51.782	40	
10	51.6	148	4//6	1451.88	49.191	45	
11	51.2	82	4//6	804.42	36.615	50	

	Presión diferencial	Presion Dinamica Tubo pitot	Abertura válvula	Conversion De mmH2O a	CALCULO formula	Distancia barrido	Velocidad supercial del gas m/s
	mmHg	mmH2O	vuelatas	Pascales	Velocidad m/s	mm	
1	57.6	132	5//6	1294.92	48.847	0	54.632
2	57.6	167	5//6	1638.27	52.253	5	Velocidad supercial
3	57.6	180	5//6	1765.8	54.249	10	del gas m/s
4	57.6	184	5//6	1805.04	54.848	15	54.181
5	57.6	185	5//6	1814.85	54.997	20	Velocidad supercial
6	57.6	190	5//6	1863.9	55.735	25	promedio m/s
7	57.6	188	5//6	1844.28	55.441	30	54.406
8	57.6	180	5//6	1765.8	54.249	35	
9	57.6	170	5//6	1667.7	52.720	40	
10	57.6	152	5//6	1491.12	49.851	45	
11	57.6	56	5//6	549.36	48.214	50	

	Presión diferencial	Presion Dinamica Tubo pitot	Abertura válvula	Conversion De mmH2O a	CALCULO formula	Distancia barrido	Velocidad supercial del gas m/s
	mmHg	mmH2O	vuelatas	Pascales	Velocidad m/s	mm	
1	63	155	1	1520.55	50.341	0	59.7268
2	63	210	1	2060.1	58.596	5	Velocidad supercial
3	63	220	1	2158.2	59.974	10	del gas m/s
4	63	226	1	2217.06	60.787	15	58.236
5	63	226	1	2217.06	60.787	20	Velocidad supercial
6	63	204	1	2001.24	57.755	25	promedio m/s
7	63	220	1	2158.2	59.974	30	58.981
8	63	214	1	2099.34	59.151	35	
9	63	204	1	2001.24	57.755	40	
10	63	182	1	1785.42	54.549	45	
11	63	110	1	1079.1	42.408	50	

	Presión diferencial	Presion Dinamica	Abertura válvula	Conversion De mmH2O a	CALCULO formula	Distancia barrido	Velocidad superficial del gas m/s
	mmHg	Tubo pitot mmH2O	vueltas	Pascales	Velocidad m/s	mm	
1	78.6	156	1+1/6	1530.36	50.503	0	59.085
2	78.4	196	1+1/6	1922.76	56.609	5	Velocidad superficial
3	78	214	1+1/6	2099.34	58.745	10	del gas m/s
4	77.4	218	1+1/6	2138.58	59.701	15	60.029
5	77	218	1+1/6	2138.58	59.701	20	Velocidad superficial
6	77	225	1+1/6	2207.25	59.524	25	promedio m/s
7	76	235	1+1/6	2305.35	61.985	30	59.557
8	75.6	225	1+1/6	2207.25	60.652	35	
9	75	218	1+1/6	2138.58	59.701	40	
10	54.8	182	1+1/6	1785.42	54.549	45	
11	54	155	1+1/6	1520.55	50.341	50	

	Presión diferencial	Presion Dinamica	Abertura válvula	Conversion De mmH2O a	CALCULO formula	Distancia barrido	Velocidad superficial del gas m/s
	mmHg	Tubo pitot mmH2O	vueltas	Pascales	Velocidad m/s	mm	
1	82.6	97	1+2/6	951.57	39.823	0	60.825
2	84	214	1+2/6	2099.34	59.151	5	Velocidad superficial
3	84	228	1+2/6	2236.68	61.055	10	del gas m/s
4	83.4	232	1+2/6	2275.92	61.588	15	60.183
5	82.8	232	1+2/6	2275.92	61.588	20	Velocidad superficial
6	82.4	230	1+2/6	2256.3	61.322	25	promedio m/s
7	82	240	1+2/6	2354.4	62.641	30	60.504
8	81.2	230	1+2/6	2256.3	61.322	35	
9	81	202	1+2/6	1981.62	57.469	40	
10	80.4	186	1+2/6	1824.66	55.146	45	
11	80	92	1+2/6	902.52	38.784	50	

	Presión diferencial	Presion Dinamica	Abertura válvula	Conversion De mmH2O a	CALCULO formula	Distancia barrido	Velocidad superficial del gas m/s
	mmHg	Tubo pitot mmH2O	vueltas	Pascales	Velocidad m/s	mm	
1	86.8	78	1+3/6	765.18	35.711	0	61.041
2	87.2	218	1+3/6	2138.58	59.701	5	Velocidad superficial
3	87.2	230	1+3/6	2256.3	61.322	10	del gas m/s
4	86.8	236	1+3/6	2315.16	62.117	15	61.418
5	86.4	234	1+3/6	2295.54	61.853	20	Velocidad superficial
6	86	230	1+3/6	2256.3	61.322	25	promedio m/s
7	85.6	245	1+3/6	2403.45	63.290	30	61.229
8	85	240	1+3/6	2354.4	62.641	35	
9	84	230	1+3/6	2256.3	61.322	40	
10	83.6	194	1+3/6	1903.14	56.319	45	
11	83.2	92	1+3/6	902.52	38.784	50	

	Presión diferencial	Presion Dinamica	Abertura válvula	Conversion De mmH2O a	CALCULO formula	Distancia barrido	Velocidad superficial del gas m/s
	mmHg	Tubo pitot mmH2O	vueltas	Pascales	Velocidad m/s	mm	
1	93.2	100	1+4/6	981	40.435	0	61.998
2	92.2	228	1+4/6	2236.68	61.055	5	Velocidad superficial
3	91.8	234	1+4/6	2295.54	61.853	10	del gas m/s
4	91.2	238	1+4/6	2334.78	62.380	15	62.168
5	90.6	240	1+4/6	2354.4	62.641	20	Velocidad superficial
6	90	245	1+4/6	2403.45	63.290	25	promedio m/s
7	89.2	250	1+4/6	2452.5	63.933	30	62.083
8	88.6	245	1+4/6	2403.45	63.290	35	
9	88	230	1+4/6	2256.3	61.322	40	
10	88	200	1+4/6	1962	57.183	45	
11	87.2	84	1+4/6	824.04	37.059	50	

	Presión diferencial	Presion Dinamica	Abertura válvula	Conversion De mmH2O a	CALCULO formula	Distancia barrido	Velocidad superficial del gas m/s
	mmHg	Tubo pitot mmH2O	vueltas	Pascales	Velocidad m/s	mm	
1	89.2	120	1+5/6	1177.2	44.294	0	62.401
2	89	230	1+5/6	2256.3	61.322	5	Velocidad superficial
3	89	238	1+5/6	2334.78	62.380	10	del gas m/s
4	89	240	1+5/6	2354.4	62.641	15	62.939
5	89	241	1+5/6	2364.21	62.772	20	Velocidad superficial
6	89	250	1+5/6	2452.5	63.933	25	promedio m/s
7	88	255	1+5/6	2501.55	64.569	30	62.670
8	88.6	245	1+5/6	2403.45	63.290	35	
9	88	240	1+5/6	2354.4	62.641	40	
10	87.4	220	1+5/6	2158.2	59.974	45	
11	87	88	1+5/6	863.28	37.931	50	

	Presión diferencial	Presion Dinamica	Abertura válvula	Conversion De mmH2O a	CALCULO formula	Distancia barrido	Velocidad superficial del gas m/s
	mmHg	Tubo pitot mmH2O	vueltas	Pascales	Velocidad m/s	mm	
1	85	154	2	1510.74	50.178	0	62.755
2	86	232	2	2275.92	61.588	5	Velocidad superficial
3	86	234	2	2295.54	61.853	10	del gas m/s
4	83.6	240	2	2354.4	62.641	15	63.763
5	83.2	246	2	2413.26	63.420	20	Velocidad superficial
6	84.8	254	2	2491.74	64.442	25	promedio m/s
7	84.2	260	2	2550.6	65.199	30	63.259
8	84	255	2	2501.55	64.569	35	
9	82.6	245	2	2403.45	63.290	40	
10	83	225	2	2207.25	60.652	45	
11	82	104	2	1020.24	41.235	50	

MANOMETRO	INCLINADO	PARA	MEDICIONES	EN	cmH2O	
CALCULOS PARA LA PLACA DE ORIFICIO 1						
factor	Presion Dinamica	Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	Velocidad
multiplicativo	Tubo pitot mmH2O	cmH2O	De mmH2O a Pascales	formula	barrido	superficial
				Velocidad m/s	mm	m/s
0.2	0.028	1	5.6	3.055	5	4.403
0.2	0.028	1	5.6	3.055	10	Velocidad
0.2	0.026	1	5.2	2.943	15	superficial
0.2	0.026	1	5.2	2.943	20	m/s
0.2	0.026	1	5.2	2.943	25	4.652
0.2	0.028	1	5.6	3.055	30	velocidad
0.2	0.03	1	6	3.162	35	promedio
0.2	0.033	1	6.6	3.316	40	superficial
0.2	0.033	1	6.6	3.316	45	4.403

factor	Presion Dinamica	Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	Velocidad
multiplicativo	Tubo pitot mmH2O	cmH2O	De mmH2O a Pascales	formula	barrido	superficial
				Velocidad m/s	mm	m/s
0.2	0.04	2	8	3.651	5	5.214
0.2	0.039	2	7.8	3.605	10	Velocidad
0.2	0.039	2	7.8	3.605	15	superficial
0.2	0.035	2	7	3.415	20	m/s
0.2	0.035	2	7	3.415	25	5.689
0.2	0.04	2	8	3.651	30	velocidad
0.2	0.045	2	9	3.872	35	promedio
0.2	0.05	2	10	4.082	40	superficial
0.2	0.06	2	12	4.472	45	5.214

factor	Presion Dinamica	Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	Velocidad
multiplicativo	Tubo pitot mmH2O	cmH2O	De mmH2O a Pascales	formula	barrido	superficial
				Velocidad m/s	mm	m/s
0.2	0.089	3	17.8	5.446	5	8.454
0.2	0.095	3	19	5.627	10	Velocidad
0.2	0.1	3	20	5.773	15	superficial
0.2	0.1	3	20	5.773	20	m/s
0.2	0.1	3	20	5.773	25	8.393
0.2	0.099	3	19.8	5.744	30	velocidad
0.2	0.099	3	19.8	5.744	35	promedio
0.2	0.093	3	18.6	5.567	40	superficial
0.2	0.085	3	17	5.322	45	8.454

	Presion Dinamica	Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	Velocidad
factor	Tubo pitot	cmH2O	De mmH2O a	formula	barrido	superficial
multiplicativo	mmH2O		Pascales	Velocidad m/s	mm	m/s
0.2	0.1	4	20	5.773	5	9.390
0.2	0.115	4	23	6.191	10	Velocidad
0.2	0.12	4	24	6.324	15	superficial
0.2	0.13	4	26	6.582	20	m/s
0.2	0.125	4	25	6.454	25	9.655
0.2	0.125	4	25	6.454	30	velocidad
0.2	0.13	4	26	6.582	35	promedio
0.2	0.13	4	26	6.582	40	superficial
0.2	0.13	4	26	6.582	45	9.390

	Presion Dinamica	Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	Velocidad
factor	Tubo pitot	cmH2O	De mmH2O a	formula	barrido	superficial
multiplicativo	mmH2O		Pascales	Velocidad m/s	mm	m/s
0.2	0.145	5	29	6.952	5	10.948
0.2	0.16	5	32	7.302	10	Velocidad
0.2	0.165	5	33	7.416	15	superficial
0.2	0.17	5	34	7.527	20	m/s
0.2	0.17	5	34	7.527	25	10.937
0.2	0.168	5	33.6	7.483	30	velocidad
0.2	0.165	5	33	7.416	35	promedio
0.2	0.16	5	32	7.302	40	superficial
0.2	0.148	5	29.6	7.023	45	10.948

	Presion Dinamica	Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	Velocidad
factor	Tubo pitot	cmH2O	De mmH2O a	formula	barrido	superficial
multiplicativo	mmH2O		Pascales	Velocidad m/s	mm	m/s
0.2	0.155	6	31	7.187	5	11.631
0.2	0.175	6	35	7.637	10	Velocidad
0.2	0.185	6	37	7.852	15	superficial
0.2	0.196	6	39.2	8.082	20	m/s
0.2	0.2	6	40	8.164	25	12.571
0.2	0.23	6	46	8.755	30	velocidad
0.2	0.23	6	46	8.755	35	promedio
0.2	0.2	6	40	8.164	40	superficial
0.2	0.19	6	38	7.958	45	11.631

	Presion Dinamica	Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	Velocidad
factor	Tubo pitot	cmH2O	De mmH2O a	formula	barrido	superficial
multiplicativo	mmH2O		Pascales	Velocidad m/s	mm	m/s
0.2	0.2	7	40	8.164	5	13.080
0.2	0.229	7	45.8	8.736	10	Velocidad
0.2	0.236	7	47.2	8.869	15	superficial
0.2	0.244	7	48.8	9.018	20	m/s
0.2	0.244	7	48.8	9.018	25	13.185
0.2	0.243	7	48.6	9	30	velocidad
0.2	0.24	7	48	8.944	35	promedio
0.2	0.234	7	46.8	8.831	40	superficial
0.2	0.219	7	43.8	8.544	45	13.080

	Presion Dinamica	Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	Velocidad
factor	Tubo pitot	cmH2O	De mmH2O a	formula	barrido	superficial
multiplicativo	mmH2O		Pascales	Velocidad m/s	mm	m/s
0.2	0.22	8	44	8.563	5	13.528
0.2	0.24	8	48	8.944	10	Velocidad
0.2	0.253	8	50.6	9.183	15	superficial
0.2	0.26	8	52	9.309	20	m/s
0.2	0.264	8	52.8	9.380	25	13.951
0.2	0.268	8	53.6	9.451	30	velocidad
0.2	0.27	8	54	9.486	35	promedio
0.2	0.268	8	53.6	9.451	40	superficial
0.2	0.255	8	51	9.219	45	13.528

	Presion Dinamica	Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	Velocidad
factor	Tubo pitot	cmH2O	De mmH2O a	formula	barrido	superficial
multiplicativo	mmH2O		Pascales	Velocidad m/s	mm	m/s
0.2	0.27	9	54	9.486	5	14.151
0.2	0.28	9	56	9.660	10	Velocidad
0.2	0.28	9	56	9.660	15	superficial
0.2	0.27	9	54	9.486	20	m/s
0.2	0.27	9	54	9.486	25	14.102
0.2	0.265	9	53	9.398	30	velocidad
0.2	0.275	9	55	9.574	35	promedio
0.2	0.28	9	56	9.660	40	superficial
0.2	0.28	9	56	9.660	45	14.151

	Presion Dinamica	Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	Velocidad
factor	Tubo pitot	cmH2O	De mmH2O a	formula	barrido	superficial
multiplicativo	mmH2O		Pascales	Velocidad m/s	mm	m/s
0.2	0.295	10	59	9.916	5	15.084
0.2	0.315	10	63	10.246	10	Velocidad
0.2	0.32	10	64	10.327	15	superficial
0.2	0.31	10	62	10.165	20	m/s
0.2	0.309	10	61.8	10.148	25	14.903
0.2	0.305	10	61	10.082	30	velocidad
0.2	0.3	10	60	10	35	promedio
0.2	0.305	10	61	10.082	40	superficial
0.2	0.305	10	61	10.082	45	15.084

factor	Tubo pitot	cmH2O	De mmH2O a	formula	barrido	superficial
multiplicativo	mmH2O		Pascales	Velocidad m/s	mm	m/s
0.2	0.33	11	66	10.488	5	15.999
0.2	0.34	11	68	10.645	10	Velocidad
0.2	0.35	11	70	10.801	15	superficial
0.2	0.36	11	72	10.954	20	m/s
0.2	0.36	11	72	10.954	25	16.1880
0.2	0.36	11	72	10.954	30	velocidad
0.2	0.36	11	72	10.954	35	promedio
0.2	0.36	11	72	10.954	40	superficial
0.2	0.35	11	70	10.801	45	15.999
Presion Dinamic						
factor	Tubo pitot	Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	Velocidad
multiplicativo	mmH2O	cmH2O	De mmH2O a	formula	barrido	superficial
			Pascales	Velocidad m/s	mm	m/s
0.1	0.66	12	66	10.488	5	16.780
0.1	0.725	12	72.5	10.992	10	Velocidad
0.1	0.77	12	77	11.328	15	superficial
0.1	0.81	12	81	11.618	20	m/s
0.1	0.84	12	84	11.832	25	17.613
0.1	0.85	12	85	11.902	30	velocidad
0.1	0.86	12	86	11.972	35	promedio
0.1	0.86	12	86	11.972	40	superficial
0.1	0.82	12	82	11.690	45	16.780

Presion Dinamic		Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	Velocidad
factor	Tubo pitot	cmH2O	De mmH2O a	formula	barrido	superficial
multiplicativo	mmH2O		Pascales	Velocidad m/s	mm	m/s
0.1	0.84	13	84	11.832	5	18.094
0.1	0.87	13	87	12.041	10	Velocidad
0.1	0.905	13	90.5	12.281	15	superficial
0.1	0.915	13	91.5	12.349	20	m/s
0.1	0.92	13	92	12.382	25	18.015
0.1	0.915	13	91.5	12.349	30	velocidad
0.1	0.9	13	90	12.247	35	promedio
0.1	0.865	13	86.5	12.006	40	superficial
0.1	0.79	13	79	11.474	45	18.094

Presion Dinamic		Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	Velocidad
factor	Tubo pitot	cmH2O	De mmH2O a	formula	barrido	superficial
multiplicativo	mmH2O		Pascales	Velocidad m/s	mm	m/s
0.1	0.8	14	80	11.547	5	17.988
0.1	0.85	14	85	11.902	10	Velocidad
0.1	0.88	14	88	12.110	15	superficial
0.1	0.92	14	92	12.382	20	m/s
0.1	0.94	14	94	12.516	25	18.679
0.1	0.96	14	96	12.649	30	velocidad
0.1	0.97	14	97	12.714	35	promedio
0.1	0.96	14	96	12.649	40	superficial
0.1	0.92	14	92	12.382	45	17.988

factor	Tubo pitot	cmH2O	De mmH2O a	formula	barrido	superficial
multiplicativo	mmH2O		Pascales	Velocidad m/s	mm	m/s
0.1	0.925	15	92.5	12.416	5	19.012
0.1	0.965	15	96.5	12.682	10	Velocidad
0.1	1	15	100	12.909	15	superficial
0.1	1.01	15	101	12.974	20	m/s
0.1	1.01	15	101	12.974	25	18.867
0.1	1.005	15	100.5	12.942	30	velocidad
0.1	0.98	15	98	12.780	35	promedio
0.1	0.96	15	96	12.649	40	superficial
0.1	0.86	15	86	11.972	45	19.012

Presion Dinamic		Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	Velocidad
factor	Tubo pitot	cmH2O	De mmH2O a	formula	barrido	superficial
multiplicativo	mmH2O		Pascales	Velocidad m/s	mm	m/s
0.1	0.83	16	83	11.761	5	18.806
0.1	0.915	16	91.5	12.349	10	Velocidad
0.1	0.98	16	98	12.780	15	superficial
0.1	1.01	16	101	12.974	20	m/s
0.1	1.04	16	104	13.165	25	19.595
0.1	1.06	16	106	13.291	30	velocidad
0.1	1.07	16	107	13.354	35	promedio
0.1	1.05	16	105	13.228	40	superficial
0.1	1	16	100	12.909	45	19.504

Presion Dinamic		Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	Velocidad
factor	Tubo pitot	cmH2O	De mmH2O a	formula	barrido	superficial
multiplicativo	mmH2O		Pascales	Velocidad m/s	mm	m/s
0.1	1	17	100	12.909	5	19.633
0.1	1.02	17	102	13.038	10	Velocidad
0.1	1.07	17	107	13.354	15	superficial
0.1	1.07	17	107	13.354	20	m/s
0.1	1.09	17	109	13.478	25	19.556
0.1	1.08	17	108	13.416	30	velocidad
0.1	1.06	17	106	13.291	35	promedio
0.1	1.02	17	102	13.038	40	superficial
0.1	0.92	17	92	12.382	45	19.633

Presion Dinamic		Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	Velocidad
factor	Tubo pitot	cmH2O	De mmH2O a	formula	barrido	superficial
multiplicativo	mmH2O		Pascales	Velocidad m/s	mm	m/s
0.1	0.985	18	98.5	12.812	5	20.133
0.1	1.065	18	106.5	13.322	10	Velocidad
0.1	1.115	18	111.5	13.632	15	superficial
0.1	1.15	18	115	13.844	20	m/s
0.1	1.173	18	117.3	13.982	25	20.559
0.1	1.173	18	117.3	13.982	30	velocidad
0.1	1.165	18	116.5	13.934	35	promedio
0.1	1.144	18	114.4	13.808	40	superficial
0.1	1.1	18	110	13.540	45	20.133

Presion Dinamic		Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	Velocidad
factor	Tubo pitot	cmH2O	De mmH2O a	formula	barrido	superficial
multiplicativo	mmH2O		Pascales	Velocidad m/s	mm	m/s
0.1	1.15	19	115	13.844	5	21.021
0.1	1.185	19	118.5	14.053	10	Velocidad
0.1	1.21	19	121	14.200	15	superficial
0.1	1.23	19	123	14.317	20	m/s
0.1	1.249	19	124.9	14.427	25	21.231
0.1	1.249	19	124.9	14.427	30	velocidad
0.1	1.245	19	124.5	14.404	35	promedio
0.1	1.22	19	122	14.259	40	superficial
0.1	1.175	19	117.5	13.994	45	21.021

Presion Dinamic		Abertura	Conversion	CALCULO	Distancia	Velocidad
factor	Tubo pitot	cmH2O	De mmH2O a	formula	barrido	superficial
multiplicativo	mmH2O		Pascales	Velocidad m/s	mm	m/s
0.1	1.175	20	117.5	13.994	5	21.434
0.1	1.2125	20	121.25	14.215	10	Velocidad
0.1	1.2575	20	125.75	14.476	15	superficial
0.1	1.2925	20	129.25	14.677	20	m/s
0.1	1.3095	20	130.95	14.773	25	21.784
0.1	1.3165	20	131.65	14.812	30	velocidad
0.1	1.314	20	131.4	14.798	35	promedio
0.1	1.28	20	128	14.605	40	superficial
0.1	1.2375	20	123.75	14.361	45	21.434

Mediciones obtenidas en 8 sensores

$$U_{SL} = 0.5 \text{ m/s}$$

$$U_{SG} = 17 \text{ m/s}$$

# Time [sec]	E9	E8	E7	E6	E5	E4	E3	E2
-----	--	--	--	--	--	--	--	--
23.27	3344	3560	3632	3568	3240	3704	3544	3512
23.52	3344	3560	3632	3568	3240	3680	3560	3512
23.78	3344	3560	3632	3544	3264	3680	3560	3512
24.02	3344	3560	3624	3544	3264	3680	3560	3512
24.28	3352	3616	3624	3544	3264	3680	3560	3512
24.52	3352	3616	3624	3544	3264	3680	3480	3520
24.78	3352	3616	3624	3544	3248	3720	3480	3520
25.02	3352	3616	3672	3544	3248	3720	3480	3520
25.27	3352	3656	3672	3544	3248	3720	3480	3520
25.53	3376	3656	3672	3544	3248	3720	3480	3560
25.77	3376	3656	3672	3544	3248	3680	3528	3560
26.02	3376	3656	3672	3648	3264	3680	3528	3560
26.28	3376	3616	3704	3648	3264	3680	3528	3560
26.52	3344	3616	3704	3648	3264	3680	3528	3560
26.78	3344	3616	3704	3648	3264	3680	3472	3504
27.02	3344	3616	3704	3648	3232	3680	3472	3504
27.27	3344	3616	3688	3568	3232	3680	3472	3504
27.52	3344	3608	3688	3568	3232	3680	3472	3504
27.77	3384	3608	3688	3568	3232	3680	3472	3488
28.03	3384	3608	3688	3568	3232	3696	3480	3488
28.27	3384	3608	3688	3672	3328	3696	3480	3488
28.53	3384	3584	3720	3672	3328	3696	3480	3488
28.78	3400	3584	3720	3672	3328	3696	3480	3488
29.02	3400	3584	3720	3672	3328	3696	3472	3528
29.28	3400	3584	3720	3672	3408	3712	3472	3528
29.52	3400	3584	3744	3744	3408	3712	3472	3528
29.78	3400	3600	3744	3744	3408	3712	3472	3528
30.02	3320	3600	3744	3744	3408	3712	3472	3496
30.28	3320	3600	3744	3744	3408	3736	3512	3496
30.52	3320	3600	3744	3872	3528	3736	3512	3496
30.78	3320	3776	3912	3872	3528	3736	3512	3496
31.03	3360	3776	3912	3872	3528	3736	3512	3496
31.27	3360	3776	3912	3872	3528	3736	3512	3512
31.52	3360	3776	3912	3872	3728	3792	3512	3512
31.77	3360	3776	4040	4016	3728	3792	3512	3512
32.03	3360	3952	4040	4016	3728	3792	3512	3512
32.28	3360	3952	4040	4016	3728	3792	3512	3512
32.52	3360	3952	4040	4016	3728	3856	3512	3512
32.78	3360	3952	4040	4184	3904	3856	3512	3512
33.02	3360	3624	3944	4184	3904	3856	3512	3512
33.28	3328	3624	3944	4184	3904	3856	3512	3512
33.52	3328	3624	3944	4184	3904	3856	3504	3512
33.78	3328	3624	3944	4184	3128	3640	3504	3512

# Time [sec]	E9	E8	E7	E6	E5	E4	E3	E2
-----	--	--	--	--	--	--	--	--
25.77	3408	3648	3704	3544	3280	3744	3600	3544
26.03	3416	3648	3704	3544	3280	3744	3600	3528
26.28	3416	3648	3704	3544	3280	3720	3528	3528
26.53	3416	3648	3704	3544	3280	3720	3528	3528
26.77	3416	3648	3704	3616	3280	3720	3528	3528
27.02	3376	3632	3704	3616	3280	3720	3528	3528
27.28	3376	3632	3704	3616	3280	3720	3576	3544
27.53	3376	3632	3704	3616	3280	3760	3576	3544
27.77	3376	3632	3704	3584	3288	3760	3576	3544
28.02	3376	3648	3664	3584	3288	3760	3576	3544
28.28	3368	3648	3664	3584	3288	3760	3576	3544
28.52	3368	3648	3664	3584	3288	3704	3528	3544
28.77	3368	3648	3664	3584	3264	3704	3528	3544
29.03	3368	3648	3672	3592	3264	3704	3528	3544
29.27	3392	3600	3672	3592	3264	3704	3528	3544
29.52	3392	3600	3672	3592	3264	3704	3528	3568
29.78	3392	3600	3672	3592	3264	3744	3528	3568
30.03	3392	3600	3672	3592	3344	3744	3528	3568
30.27	3392	3600	3656	3592	3344	3744	3528	3568
30.52	3384	3600	3656	3592	3344	3744	3528	3536
30.77	3384	3600	3656	3592	3344	3704	3520	3536
31.02	3384	3600	3656	3592	3248	3704	3520	3536
31.27	3384	3600	3672	3600	3248	3704	3520	3536
31.52	3360	3632	3672	3600	3248	3704	3520	3536
31.77	3360	3632	3672	3600	3248	3704	3512	3536
32.02	3360	3632	3672	3600	3232	3680	3512	3536
32.27	3360	3632	3672	3552	3232	3680	3512	3536
32.52	3360	3648	3664	3552	3232	3680	3512	3536
32.77	3352	3648	3664	3552	3232	3680	3512	3536
33.03	3352	3648	3664	3552	3232	3760	3512	3536
33.28	3352	3648	3664	3552	3256	3760	3512	3536
33.52	3352	3648	3680	3632	3256	3760	3512	3536
33.77	3344	3624	3680	3632	3256	3760	3512	3536
34.02	3344	3624	3680	3632	3256	3760	3504	3520
34.28	3344	3624	3680	3632	3256	3696	3504	3520
34.53	3344	3624	3680	3560	3256	3696	3504	3520
34.77	3344	3648	3672	3560	3256	3696	3504	3520
35.02	3384	3648	3672	3560	3256	3696	3504	3488
35.27	3384	3648	3672	3560	3256	3720	3504	3488
35.52	3384	3648	3672	3560	3256	3720	3504	3488
35.77	3384	3648	3688	3560	3256	3720	3504	3488
36.02	3368	3648	3688	3560	3256	3720	3504	3488
36.28	3368	3648	3688	3560	3256	3720	3528	3504
36.52	3368	3648	3688	3560	3224	3672	3528	3504
36.77	3368	3648	3688	3552	3224	3672	3528	3504
37.03	3368	3600	3720	3552	3224	3672	3528	3504
37.27	3392	3600	3720	3552	3224	3672	3528	3536