

01180



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**DIVISION DE INGENIERIA MECANICA E INDUSTRIAL  
CENTRO DE DISEÑO Y MANUFACTURA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**"APLICACION DEL DISEÑO ROBUSTO EN LA INVESTIGACION Y  
DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA MUESTREO DE  
HIDROCARBUROS QUE PRESERVA PRESION Y TEMPERATURA DE  
YACIMIENTO"**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**DOCTOR EN INGENIERIA**

**P R E S E N T A:**

**MARCO ANTONIO HERNANDEZ ROJO**



**DIRECTOR DE TESIS: DR. SAUL D. SANTILLAN GUTIERREZ (FI,CDM-U.N.A.M.)**

**SEPTIEMBRE DE 2004**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Agradecimientos

Se agradece al **Instituto Mexicano del Petróleo** por el apoyo recibido en el desarrollo de este trabajo, así como a la **Dirección Ejecutiva de Exploración y Producción** y en especial al Ing. Tomás Ramírez Maldonado quien me ofreció su apoyo incondicional para la continuación de éste proyecto.

De igual forma agradezco profundamente a la **Universidad Nacional Autónoma de México**, Facultad de Ingeniería, Centro de Diseño y Manufactura, por haberme permitido desarrollar el proyecto bajo el programa de doctorado y en especial a mi asesor Dr. Saúl D. Santillán Gutiérrez quien me dedicó su tiempo y sus conocimientos.

Atentamente

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Marco Antonio Hernández Rojo'. The signature is stylized and somewhat abstract, with a prominent vertical stroke extending downwards from the bottom of the name.

Marco Antonio Hernández Rojo

## **Resumen**

Este trabajo describe el proceso para el rediseño de una herramienta para muestreo de hidrocarburos, que puede ser utilizada para obtener muestras de petróleo del fondo de los pozos y traerla a superficie a las condiciones del yacimiento, con la finalidad de estudiar la problemática de la depositación de ceras y asfáltenos encontrada en tuberías de producción. El fenómeno es completamente no lineal de tal forma que puede ser generado debido a cambios de presión y temperatura afectando la producción del yacimiento.

El autor presenta el desarrollo de un instrumento tecnológico fue diseñado para operar en el fondo de los pozos a condiciones extremas de presión  $703.06 \text{ kg/cm}^2$  (10 000 psi) y temperatura de hasta  $302^\circ\text{F}$  ( $150^\circ\text{C}$ ). Una cámara interna puede almacenar 300 ml de hidrocarburo. La presión y la temperatura son controlados electrónicamente tomando como referencia las condiciones del yacimiento monitoreadas por sensores de presión y temperatura. La herramienta utiliza un calentador eléctrico para mantener la temperatura. La muestra ingresa al contenedor por diferencia de presión al abrirse una válvula. Este proceso es controlado por un amortiguador hidráulico con el objeto de mantener la muestra de hidrocarburo en una sola fase. El autor desarrolló el proyecto utilizando el Diseño Robusto, considerado como una metodología eficiente y sistemática que involucra diseños experimentales para mejorar procesos de manufactura y productos, con la finalidad de crear productos robustos e insensibles a aquellas variables difíciles de controlar consideradas como ruidos.

### **Abstract**

This paper describes the redesign of a HST (Hydrocarbon sampler tool), which is an important tool used to get petroleum samples from the bottom of the reservoir, conserving its physical characteristics and carrying it to the surface, in order to characterize the problematic of wax and asphaltenes precipitation over the production pipelines. The aforementioned phenomena is highly non linear, so slight variations in temperature and pressure can spark irreversible changes of the fluid properties and produce diminished performance in the exploitation of the reservoir.

The author presents a new technological instrument which was designated for deep down hole liquid hydrocarbon sampling, operates at extreme  $703.06 \text{ kg/cm}^2$  (10 000 psi) pressure and  $302^\circ\text{F}$  ( $150^\circ\text{C}$ ) temperature conditions respectively. An internal chamber can collect 300 ml ( $8.31 \text{ in}^3$ ) hydrocarbon sample up. Parameters P and T are controlled by pressure and temperature sensors, they are the reference to control the original high temperature resistant electronic system set up inside of the storage container. The oil sample enters in to the chamber by pressure difference, due to an outside and inside pressure. This process is controlled using a damper to maintain the hydrocarbon in a single phase. For this stage of the project Robust Design was used, because is an efficient and systematic methodology that applies static and dynamic experimental design to improve products and manufacture processes, its focus is to make an output response insensitive or robust to difficult to control variation (noise).

## Contenido

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Contenido.....	III
Índice de tablas y figuras.....	VI
Nomenclatura .....	XI
Introducción.....	XIII

### Capítulo I. Antecedentes

1.0 Antecedentes.....	1
1.1 El petróleo.....	2
1.2 Tipos de yacimiento.....	3
1.2.1. Yacimientos de aceite ligero.....	4
1.2.2. Yacimientos de aceite volátil.....	5
1.2.3. Yacimientos de gas retrógrado.....	6
1.2.4. Yacimientos de gas húmedo.....	7
1.2.5. Yacimientos de gas seco.....	8
1.3 Fenómeno de depositación de sólidos orgánicos.....	9
1.4 Envoltentes de precipitación de ceras y asfaltenos.....	14
1.5 El problema de la depositación orgánica en pozos petroleros de México.....	18
1.6 Estado del arte de herramientas de muestreo.....	22
1.6.1. Técnicas de muestreo de hidrocarburos.....	22
1.6.2. Tipos de herramientas de muestreo de fondo más usuales.....	23

### Capítulo II Problemática

2.1 Planteamiento del Problema.....	28
2.2 Descripción general del sistema de muestreo propuesto .....	29
2.3 Establecimiento de la Hipótesis.....	33
2.4 Objetivos del proyecto.....	33
2.5 Alcances.....	34
2.6 Porque utilizar el Método Taguchi.....	34
2.6.1. El método QFD .....	35
2.6.2. El método TRIZ .....	36
2.6.3. El método de Diseño Axiomático .....	37
2.6.4. El Diseño de Experimentos .....	38
2.6.5. Relación entre diferentes metodologías con el método Taguchi .....	41
2.7 Especificaciones requeridas.....	48

### Capítulo III. Metodología

3.1 Método de Diseño Robusto.....	49
3.2 Herramientas del Diseño Robusto.....	51
3.3 Tipos de Relación de la señal de ruido.....	52
3.4 Clasificación de parámetros de diseño.....	52
3.5 Estrategias de optimización.....	54
3.6 Matriz de experimentos utilizando una distribución ortogonal.....	55
3.7 Análisis de Varianza.....	56

**Capítulo IV. Caso de estudio**

4.1	Aplicación del Diseño Robusto a la optimización de la herramienta de muestreo de hidrocarburos.....	63
4.2	Caso 1: Contenedor de la muestra de hidrocarburo.....	64
4.2.1.	Descripción del problema.....	64
4.2.2.	Optimización del sistema de calentamiento y el contenedor.....	71
4.2.3.	Desarrollo experimental.....	76
4.2.4.	Análisis de resultados experimentales.....	80
4.2.5.	Análisis de la varianza.....	83
4.2.6.	Interpretación de resultados.....	87
4.2.7.	Confirmación del experimento.....	89
4.3	Caso 2: Válvula de admisión.....	94
4.3.1.	Descripción del problema.....	94
4.3.2.	Planteamiento de mejoras.....	95
4.3.3.	Enfoque del Método de diseño robusto.....	97
4.3.4.	Desarrollo experimental.....	100
4.3.5.	Análisis de resultados experimentales.....	102
4.3.6.	Análisis de la varianza.....	104
4.3.7.	Interpretación de resultados.....	104
4.4	Caso 3. Sistema de amortiguamiento.....	107
4.4.1	Análisis del sistema de amortiguamiento.....	107
4.4.2	Enfoque del Método Taguchi.....	108
4.4.3	Desarrollo experimental.....	110
4.4.4	Análisis teórico del sistema de muestreo.....	112
4.4.5	Caracterización del movimiento del fluido en el amortiguador del sistema de muestreo.....	116
4.4.6	Dimensiones y estructura del sistema de amortiguamiento.....	128
4.5	Sistema de referencia para medición de profundidad.....	129
4.5.1	Detector de coples.....	129
4.5.2	Análisis teórico.....	131

**Capítulo V. Diseño de detalle**

5.0	Diseño de detalle.....	140
5.1	Selección de materiales de fabricación.....	140
5.2	Análisis de esfuerzos sobre la herramienta de muestreo.....	144
5.3	Calculo de esfuerzos sobre los espesores de pared de elementos sometidos a presión.....	146
5.4	Deformación del diámetro de cilindros debido al esfuerzo por presión.....	160
5.5	Evaluación de esfuerzos utilizando teoría de fallas.....	162
5.6	Esfuerzos en uniones roscadas.....	165
5.7	Consideraciones para selección de arosellos.....	167
5.8	Descripción general del equipo de superficie.....	170
5.9	Descripción general de sistemas de control electrónico.....	175
5.10	Descripción detallada del funcionamiento del muestreador.....	180
5.11	Especificaciones técnicas de la herramienta.....	189
5.12	Plano general de ensamble.....	190

**Capítulo VI Pruebas de laboratorio**

6.0	Pruebas de laboratorio.....	192
6.1	Pruebas de la válvula de admisión.....	192
6.2	Pruebas de laboratorio de las camisas del sistema de calentamiento.....	195
6.3	El sistema de calentamiento.....	196
6.4	Prueba general de funcionamiento en laboratorio.....	201
6.5	Evaluación de resultados.....	207

**Capítulo VII Conclusiones**

Conclusiones.....	208
Recomendaciones y trabajo a futuro.....	211

<b>Referencias Bibliográficas.....</b>	<b>213</b>
--	------------

**Apéndices**

A.	Modelos matemáticos que describen el comportamiento de ceras y asfaltenos .....	223
B.	Ecuaciones de los casos de la relación de la señal de ruido dinámica y estática.....	229
C.	Gráficas de experimentos en la optimización de la cámara de almacenamiento y el calentador.....	233
D.	Dibujos de detalle.....	248
E.	Deducción de ecuaciones para calcular el espesor de pared de elementos sometidos a presión.....	309
F.	Teoría para el cálculo de esfuerzos en uniones roscadas.....	314
G.	Características técnicas de sensores .....	319
H.	Pruebas de funcionamiento del detector de coples .....	323

## Índice de Tablas

1.1	Clasificación del petróleo de acuerdo a su densidad.....	2
1.2	Clasificación de las mezclas de aceite.....	3
1.3	Efecto del solvente sobre el CPT(Cloud Point Temperature) para un aceite típico	11
1.4	Problemática en diversos activos de PEP.....	19
1.5	Herramienta de muestreo más comunes.....	27
2.1	Comparación utilizando Diseño Axiomático .....	45
2.2	Comparación entre Diseño Axiomático, Triz y Diseño Robusto .....	45
2.3	Resumen de fortalezas y debilidades entre el Diseño Axiomático , el Método Triz Y el Diseño Robusto .....	46
4.1	Valores tomados de una prueba experimental bajo un proceso de calentamiento.....	70
4.2	Señal de ruido (signal to noise) .....	73
4.3	Factores de control.....	73
4.4	Factores de ruido.....	74
4.5	Factores de señal.....	74
4.6	Condiciones experimentales.....	75
4.7	Esquema experimental.....	76
4.8	Tabla lógica de experimentos.....	76
4.9	Datos de la fase de calentamiento.....	80
4.10	Datos de la fase de enfriamiento.....	80
4.11	Cálculos de la relación S/N.....	82
4.12	Tabla de respuesta de la relación S/N.....	83
4.13	Análisis de la varianza (ANOVA) para $\eta$ .....	86
4.14	Factores que tienen mayor relación de la señal de ruido (S/N).....	88
4.15	Reporte de temperaturas de la confirmación del experimento .....	91
4.16	Comparación de resultados experimentales entre el modelo inicial y el mejorado.....	92
4.17	Cálculo de relación de ruido para los resultados del experimento de verificación. muestras de hidrocarburos.....	92
4.18	Comparación entre válvulas propuestas .....	96
4.19	Factores de ruido.....	98
4.20	Factores de control.....	98
4.21	Distribución general de experimentos.....	99
4.22	Distribución general de experimentos con traducción de parámetros.....	100
4.23	Cálculo de la relación S/N para el análisis de la válvula.....	102
4.24	Tabla de respuesta de la relación S/N para cada factor de control .....	103
4.25	Análisis de la varianza (ANOVA) para la relación de señal de ruido (S/N) .....	105
4.26	Factores que tienen mayor relación de la señal de ruido .....	106
4.27	Factores de ruido .....	109
4.28	Factores de control .....	109
4.29	Distribución ortogonal de experimentos .....	110
4.30	Tabla experimental para el análisis del sistema de amortiguamiento .....	112
4.31	Relación de viscosidades y otras características físicas de algunas muestras de hidrocarburo .....	115
4.32	Datos de velocidades y presiones en diversos puntos del sistema.....	122
5.1	Propiedades de algunos materiales utilizados para la construcción de elementos mecánicos de herramientas de prospección geofísica.....	143
5.2	Relación de piezas con esfuerzos críticos por presión de trabajo.....	146
5.3	Evaluación de las camisas utilizando los criterios de diversos autores para considerar los recipientes como pared delgada o gruesa.....	146

5.4	Esfuerzos de tensión y cedencia para aleación de titanio 6Al-6V-2Sn en función de la temperatura.....	148
5.5	Distribución de esfuerzos sobre el espesor de la camisa del amortiguador a 175°C.....	149
5.6	Distribución de esfuerzos sobre el espesor de pared del contenedor fabricado en acero 17-4Ph.....	152
5.7	Distribución de esfuerzos sobre el espesor de la camisa exterior del contenedor a 175°C.....	155
5.8	Distribución de esfuerzos sobre el espesor de la camisa para motor y sensor a 175°C.....	157
5.9	Distribución de esfuerzos sobre el espesor de la camisa de circuitería.....	159
5.10	Deformación del diámetro de las camisas sometidas a presión exterior.....	160
5.11	Calculo de factor de seguridad utilizando la teoría de esfuerzo normal máximo.....	162
5.12	Calculo de factores de seguridad utilizando la teoría del esfuerzo cortante máximo.....	163
5.13	Calculo de factores de seguridad utilizando la teoría de la energía de distorsión.....	165
5.14	Esfuerzos de tensión en elementos roscados.....	166
5.15	Características generales para alojamiento de sellos en estado estático.....	168
5.16	Relación de arosellos empleados en la herramienta para muestreo de hidrocarburos...	169

### Índice de Figuras

1.1	Diagrama de fase de un aceite negro.....	4
1.2	Diagrama de fase típico de un aceite volátil.....	6
1.3	Diagrama de fase típico de un gas retrogrado, también puede conocerse como gas-condensado retrógrado.....	7
1.4	Diagrama típico de un yacimiento de gas húmedo.....	8
1.5	Diagrama de fase típico de un yacimiento de gas seco.....	9
1.6	Pozo productor de petróleo.....	10
1.7	Fenómeno de depositación de sólidos.....	12
1.8	Envolverte de precipitación de ceras (EPC) en coordenadas presión-temperatura.....	16
1.9	Distribución de la depositación de orgánicos en un pozo petrolero como función de su presión de saturación.....	16
1.10	Región Sur, PEP.....	20
1.11	Región marina Suroeste, PEP.....	20
1.12	Región marina noroeste, PEP.....	23
1.13	Herramienta de muestreo utilizada por línea de acero (Pemex).....	24
1.14	Herramienta de Oil Phase accionada por un reloj, no preserva la temperatura del yacimiento.....	26
2.1	Diagrama a bloques del sistema de muestreo de hidrocarburos.....	30
2.2	Diagrama general del sistema de muestreo de hidrocarburos y su interrelación con los mecanismos de transferencia.....	32
3.1	Diagrama de bloques de un producto o proceso.....	53
3.2	Descomposición de la suma de cuadrados.....	62
4.1	Herramienta para muestreo de hidrocarburos.....	64
4.2	Disposición mecánica de las partes que integran la cámara de muestreo.....	65
4.3	Arreglo eléctrico del calentador.....	66
4.4	Distribución natural del gradiente de temperatura del pozo en función de la profundidad.....	67
4.5	Gráfica de temperatura-tiempo con aire como medio aislante.....	68

4.6	Esquema representativo del equipo utilizado para realizar la simulación de la cámara de almacenamiento y el calentador.....	69
4.7	Gráfica del proceso de calentamiento rápido del prototipo de muestreo.....	70
4.8	Esquema de la instrumentación de una cámara para almacenar muestras de hidrocarburo.....	78
4.9	Arreglo de la probeta de pruebas.....	79
4.10	Detalle del calentador.....	79
4.11	Ilustración del sistema con bomba para registro de presión y medidor de temperatura.....	79
4.12	Experimento con empleo de vacío.....	79
4.13	Velocidad de calentamiento de cada experimento.....	81
4.14	Velocidad de enfriamiento de cada experimento.....	81
4.15	Gráfica de respuesta del experimento.....	83
4.16	Confirmación del experimento.....	90
4.17	Gráfica del experimento a condiciones iniciales.....	90
4.18	Esquema general del sistema de almacenamiento.....	93
4.19	Arreglo original del sistema de válvula.....	94
4.20	Válvula hidráulica.....	95
4.21	Válvula de motor.....	96
4.22	Diagrama P para el caso de la válvula.....	97
4.23	Prueba de válvula a presión.....	100
4.24	Arreglo e instrumentos empleados para el desarrollo de experimentos de la válvula.....	101
4.25	Arreglo experimental para prueba de válvula hidráulica.....	102
4.26	Gráfica de respuesta del experimento.....	103
4.27	Esquema general de la válvula.....	106
4.28	Esquema del funcionamiento del sistema amortiguador.....	107
4.29	Diagrama P para el sistema de amortiguación.....	108
4.30	Diagrama P para el caso dinámico con dos factores de señal.....	111
4.31	Flujo radial hacia un pozo vertical, fluido incompresible y estado continuo.....	114
4.32	Flujo ascendente a través de dos cilindros concéntricos.....	116
4.33	Comportamiento del flujo en una tubería de producción con diámetro libre y con obstrucción por la introducción de una herramienta.....	117
4.34	Variación de la velocidad de flujo en una tubería con flujo libre y con obstrucción debido a la introducción de una herramienta para muestreo.....	118
4.35	Esquema representativo del sistema de amortiguamiento.....	118
4.36	Reducción de la velocidad del pistón, calculada para diversos diámetros de orificios de escape.....	121
4.37	Velocidad de llenado de la cámara utilizando un orificio de salida del fluido de 1.19 mm ( 3/64 pulg.) de diámetro.....	121
4.38	Variación de las velocidades del fluido dentro del amortiguador.....	123
4.39	Comparación entre diversas presiones dentro del sistema de amortiguación.....	124
4.40	Volumen de gas comprimido debido a la presión y movimiento del aceite de amortiguamiento.....	125
4.41	Diseño del sistema de amortiguamiento.....	128
4.42	Distribución del flujo magnético sobre la masa de un cople.....	130
4.43	El galvanómetro experimenta una deflexión mientras el imán se mueva con respecto a la bobina.....	131
4.44	Generación de <i>fem</i> en el dispositivo para detección de coples.....	132
4.45	Cuando la pendiente del flujo es positiva la <i>fem</i> es negativa y viceversa.....	136

4.46	Caracterización del flujo.....	136
4.47	Variación de fem inducida en función de la velocidad.....	137
4.48	Esquema del detector de coples.....	137
4.49	Instalación del detector de coples.....	138
4.50	Flujo magnético del CCL instalado.....	139
5.1	Análisis de fuerzas sobre la herramienta de muestreo.....	145
5.2	Relación de esfuerzos de la aleación de titanio 6-6-2 a diferentes temperaturas.....	148
5.3	Distribución de esfuerzos sobre el espesor de pared del amortiguador, cuando es sometido a temperatura y presión sobre el exterior.....	150
5.4	Constitución del contenedor de muestra.....	150
5.5	Distribución de esfuerzos sobre el espesor del contenedor, comparando el acero 17-4Ph y la aleación de titanio 6Al-6V-2Sn.....	151
5.6	Comportamiento de temperaturas de la cubierta exterior del contenedor en el caso crítico.....	153
5.7	Distribución de esfuerzos sobre el espesor de la camisa exterior del contenedor, cuando es sometido a temperatura y presión sobre el exterior.....	154
5.8	Distribución de esfuerzos sobre el espesor de la camisa para motor y sensores.....	156
5.9	Distribución de esfuerzos sobre el espesor de la camisa de circuitería.....	158
5.10	Deformación del diámetro de las piezas sometidas a presión externa.....	161
5.11	Expansión diametral del contenedor por esfuerzos debido a presión interna.....	161
5.12	Detalle típico del alojamiento de arosellos.....	168
5.13	Esquema de la interacción del equipo de fondo y el equipo de superficie.....	170
5.14	Esquema del equipo de superficie.....	171
5.15	Pantalla principal del programa de adquisición de datos del muestreador.....	172
5.16	Panel para introducción de datos y análisis gráfico con Excel.....	173
5.17	Panel de análisis en Word.....	174
5.18	Módulo de control electrónico.....	175
5.19	Reguladores de voltaje.....	176
5.20	Vista parcial del amortiguador.....	180
5.21	Sección de la cámara de almacenamiento y sistema de calentamiento.....	181
5.22	Sección del sistema de admisión.....	182
5.23	Sección del módulo de electrónica.....	183
5.24	Sección del módulo de sensores de fondo y conexión para cabeza MH-22.....	184
6.1	Maquinado de camisa exterior del sistema de calentamiento.....	192
6.2	Válvula de admisión con tubing para conexión al contenedor.....	193
6.3	Inicio de prueba de válvula a presión.....	193
6.4	Prueba a 351 kg/cm <sup>2</sup> (5000 psi) de presión en la válvula y variación de temperatura.....	194
6.5	Válvula utilizada en las pruebas de laboratorio.....	194
6.6	Simulador de Pozo.....	195
6.7	Tapa roscada para cerrar el tubo.....	195
6.8	Prueba de presión en el simulador.....	196
6.9	Conexión entre válvula y contenedor.....	197
6.10	Contenedor con el calentador eléctrico.....	197
6.11	Camisa exterior del contenedor instrumentada con sensores de temperatura.....	198
6.12	Comportamiento de temperaturas en función del incremento de energía en el calentador.....	199
6.13	Prueba a 107.88°C, con potencia de 52.3 W.....	200
6.14	Estabilizador de temperatura.....	200
6.15	Diseño del arreglo para soporte de las tablillas electrónicas sobre varillas de acero.....	201
6.16	Sistema de control electrónico de la herramienta de muestreo.....	202

6.17	Equipo de pruebas.....	203
6.18	Inicio de prueba de integración del equipo y su funcionamiento.....	204
6.19	Pantalla del sistema de adquisición de datos.....	204
6.20	Resultados del control de temperatura y presión de la herramienta de muestreo.....	205
6.20a	Variación de presión por efectos de temperatura .....	206
6.21	Portasensor de yacimiento.....	207

## Nomenclatura

- $k$  = conductividad térmica (W/m.K)  
 $\rho_{ma}$  = densidad promedio de la mezcla (Kg/m<sup>3</sup>)  
 $C_p$  = capacidad calorífica de la mezcla (J/Kg.K)  
 $R_o$  = radio interior del tubo limpio (m)  
 $z$  = distancia desde la entrada del tubo (m)  
 $T_o$  = temperatura de entrada (K)  
 $T_a$  = temperatura ambiental (K)  
 $T_r$  = temperatura de referencia (K)  
 $u$  = coeficiente de transferencia de calor (W/m<sup>2</sup>.K)  
 $q_h$  = fuente de calor (J/s.m<sup>3</sup>)  
 $D_m$  = coeficiente de difusión (cm<sup>2</sup>/s)  
 $\omega$  = función de peso adimensional  
 $C_l$  = parámetro en el modelo de difusión (N)  
 $\mu$  = viscosidad (N.s/m<sup>2</sup>)  
 $w_i$  = fracción peso  
 $\delta_i$  = solubilidad de la fase  
 $x_i$  = fracción molar del componente  
 $\psi = L_y/L_x$   
 $\alpha_i$  = coeficiente de expansión térmica =  $-(1/\rho_m)[\partial\rho_m/\partial T]$  (K<sup>-1</sup>)  
 $\Delta H_f$  = calor de fusión (J/mol)  
 $\phi_i$  = fracción de volumen del componente  
 $\rho$  = densidad  
 $L_x$  = número de moles en fase líquida por mol de mezcla  
 $L_s$  = número de moles en fase sólida por mol de mezcla  
 $R$  = constante del gas ideal = 8.3143 (J/mol.K)  
 $P$  = presión (bar)  
 $T$  = temperatura (K)  
 $V_i$  = volumen molar de la fase  
 $\underline{Z}$  = composición  
 $J_i$  = flux de masa de cera (Kg/s.m<sup>2</sup>)  
 $t$  = tiempo (h)  
 $L$  = longitud del tubo (m)  
 $Q$  = flujo volumétrico (m<sup>3</sup>/s)  
 $M$  = parámetro en el modelo de la ley de potencias  
 $M_{wi}$  = peso molecular del componente i (Kg/Kmol)  
 $R_e$  = número de Reynolds  
 $R_w$  = radio interior del tubo dependiente del tiempo (m)  
 $S_e^2$  = promedio de los cuadrados debido al error experimental  
 $MS$  = promedio de los cuadrados debido a los factores de control  
 $S/N$  = señal de relación de ruido  
 $\eta$  = señal de relación de ruido

---

GTSS=	gran total de suma de cuadrados
$r$ =	número de réplicas
$F$ =	relación de Fisher
$R_f$ =	resistencia de referencia
$y_f$ =	respuesta del experimento
$m$ =	promedio general de la relación de ruido $\eta$
dB=	decibeles
$e$ =	error
GL=	grados de libertad
$P_w$ =	presión en el pozo ( $\text{Kg/cm}^2$ )
$r_e$ =	radio exterior (m)
$r_w$ =	radio del pozo (m)
$v$ =	velocidad del fluido (m/s)
$k$ =	permeabilidad de la roca (darcys)
$B_o$ =	factor volumétrico del aceite
$h$ =	espesor de la formación (m)
$A_1$ =	área del pistón ( $\text{m}^2$ )
$F_v$ =	fuerza de fricción
$E_k$ =	energía cinética
$V_{max}$ =	velocidad máxima (m/s)
$V_o$ =	velocidad del flujo (m/s)
$V_p$ =	velocidad del pistón (m/s)
$g$ =	fuerza de gravedad ( $\text{kg/s}^2$ )
$W_g$ =	trabajo de compresión del gas
$\gamma$ =	$C_p/C_v$
$\varepsilon$ =	fem inducida (V)
$\Phi_B$ =	flujo magnético
$N$ =	número de bueltas
$q_1$ =	carga eléctrica
$B$ =	campo magnético
$\mu_o$ =	permeabilidad magnética en el vacío
$dS$ =	superficie
$L$ =	longitud (m)
$\nu$ =	relación de poisson
$E$ =	módulo de elasticidad ( $\text{kg/cm}^2$ )
$\tau$ =	esfuerzo cortante ( $\text{kg/cm}^2$ )
$S_y$ =	esfuerzo de cedencia ( $\text{kg/cm}^2$ )
$S_u$ =	esfuerzo último ( $\text{kg/cm}^2$ )
$\sigma$ =	esfuerzo ( $\text{kg/cm}^2$ )

---

## Introducción

Dentro de las tuberías de producción y conductos que transportan hidrocarburos, recientemente se han descubierto problemas asociados con la disminución del flujo y la producción de hidrocarburos originado por la depositación de sedimentos y compuestos orgánicos, parafinas y asfáltenos, cuyo comportamiento obedece a variaciones termodinámicas de los hidrocarburos, donde la composición, la presión y la temperatura toman un papel importante en el desarrollo de este fenómeno (A.R. Solaimany, 2001). Para la investigación del origen y la predicción de este fenómeno, se desarrolló en el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), un proyecto denominado "Sistema de Muestreo de Hidrocarburos Preservando Presión y Temperatura de Yacimiento" cuyo objetivo ha sido desarrollar y construir un prototipo de una herramienta que pueda capturar en el fondo del pozo, muestras de hidrocarburos a presión y temperatura del yacimiento y que mantenga estas condiciones por el tiempo necesario para que pueda ser transferida a un laboratorio para su estudio.

Se tiene la hipótesis de que una muestra de hidrocarburo bajo estas condiciones permitirá simular y predecir en el laboratorio, todos los fenómenos de depositación y algunos otros, que ocurrirán en la trayectoria del crudo a través de la tubería de producción de pozos petroleros, transmisión, instalaciones de producción y ductos de transporte.

En un origen, el proyecto fue planteado con base en la necesidad de integrar un equipo de muestreo al proyecto de investigación denominado "***Predicción de la Depositación de Orgánicos Pesados (ceras y asfáltenos) en Mezclas de Petróleo***", desarrollado conjuntamente por el IMP y Pemex- Exploración y Producción; cuyo principal objetivo fue el minimizar, con el desarrollo de simuladores e implantación de tecnologías de avanzada, el riesgo de formación de depósitos de sólidos orgánicos en yacimientos de petróleo e instalaciones de producción. Además de esto, recientemente se han encontrado aún más aplicaciones, tal es el caso de estudios de las propiedades PVT, así como estudios de fases de crudos mexicanos a condiciones supercríticas. Como resultados de dichos estudios, se podrá obtener información referente a la historia del yacimiento que pueden repercutir en nuevas técnicas de extracción mejorada del petróleo.

Entre otras aplicaciones, también se encuentra la posibilidad de determinar experimentalmente (bajo condiciones estáticas) las propiedades termodinámicas, que permitan conocer y controlar los fenómenos que intervienen en el proceso de explotación de Crudo Mexicano.

La preservación de la temperatura de yacimiento en la muestra recolectada, es una de las ventajas que ofrece este novedoso equipo de muestreo, sin embargo para su validación será necesario continuar con diversas investigaciones y desarrollos sobre su comportamiento ante fenómenos no considerados en este trabajo y que se encuentran relacionados con el tipo de hidrocarburo del yacimiento, las condiciones y estado mecánico de los pozos, situaciones que no pueden ser simuladas ampliamente en laboratorio y que requieren pruebas de campo, con el apoyo económico adecuado. Trabajos de investigación sobre las muestras obtenidas han demandado la necesidad de tomar atención y mejorar aquellos sistemas que mantienen el control de la presión y la temperatura de la muestra, en herramientas actualmente empleadas.

Partiendo de un diseño previo, la aplicación del Diseño Robusto, ofrece una excelente alternativa para lograr la optimización de la obtención de muestras con temperatura y presión controladas. Según Taguchi, la meta del Diseño Robusto es la generación de tecnologías, productos y/o procesos diseñados con robustez, esto es, que los productos diseñados bajo esta metodología deben ser mínimamente sensibles a los factores que causan variabilidad y que se generan a un bajo costo de manufactura.

El método Taguchi, utiliza diversas herramientas para poder lograr su meta, una de las más importantes es la realización de una serie de experimentos controlados estadísticamente a través de una distribución ortogonal, tabla o matriz de experimentos, que integra y distribuye todos aquellos factores que interactúan en el funcionamiento y operación del producto. Al término de las corridas de los experimentos, los resultados son analizados a través del Análisis de la Varianza (ANOVA) donde se definen aquellos parámetros de mayor influencia en el sistema y que optimizan el nivel de la calidad deseado, considerando los costos en la toma de decisiones y asegurando la fiabilidad del funcionamiento del producto.

En el campo de la industria petrolera, esta metodología tiene amplia aplicación, si consideramos que además que la problemática suele ser compleja; el procedimiento del Diseño Robusto ofrece una alternativa para el análisis paso a paso de los problemas proporcionando como resultado una solución optimizada. A continuación se plantea un problema en el cual será aplicado el método de Diseño Robusto, también llamado Método Taguchi, en las secciones más importantes de la herramienta de muestreo.

***Capítulo I***  
***Antecedentes***

## **Antecedentes**

El objetivo de muestrear fluidos de yacimiento es recolectar una muestra que es representativa del fluido del yacimiento a la profundidad y tiempo adecuado para los estudios de laboratorio, debido a que las propiedades físicas y químicas del hidrocarburo cambian durante la fase de producción y movimiento.

Una muestra no representativa no refleja las propiedades verdaderas del yacimiento y puede resultar costoso debido a la posibilidad de causar errores en el diseño y administración del yacimiento independientemente de que los resultados de los análisis de laboratorio sean exactos.

Un programa exitoso de muestreo en un pozo requiere de buena planeación. El equipo adecuado de muestreo y la técnica a ser empleada; además de que éste se realice en un tiempo oportuno. En muchas situaciones la mejor condición para tomar una muestra representativa del fluido de yacimiento es durante la fase de producción. Puede haber diferencias en el reto, dependiendo de la condición del fluido si es aceite ó está cerca de ser un fluido crítico, un gas ó un gas y condensado, o un gas seco. Antes de la toma de muestras, el pozo debe ser analizado a través de herramientas de registro para obtener información que servirá en la planeación de las operaciones de muestreo.

Por mucho tiempo versiones de herramientas de muestreo han sido utilizadas para obtención de fluidos de yacimiento con objeto de realizar análisis PVT, conservando solo la presión. Para el caso de muestras verdaderamente representativas de fluidos de yacimiento, utilizadas para el estudio y caracterización de fenómenos relacionados con la deposición de ceras y asfaltenos donde es necesario el control de la presión y la temperatura de la muestra, se ha requerido una nueva herramienta para el muestreo de hidrocarburos que preserve la presión y temperatura del yacimiento.

Los temas relacionados con la operación de muestreo son extensos por lo que se proporciona una descripción general de los temas más importantes referentes a esta área y que ayudarán a comprender el problema y las condiciones de operación.

## 1.1. El Petróleo

El petróleo es una mezcla que se encuentra en el subsuelo (a diferentes profundidades, dependiendo de la ubicación geográfica), generalmente en forma sólida, líquida o gaseosa. El bitumen natural (porción del petróleo en fase sólida o semi-sólida), el aceite crudo y el gas natural son ejemplos de estas acumulaciones, respectivamente, las cuales son denominadas yacimientos, y pueden ser de bitumen, de aceite y gas disuelto o de gas, dependiendo de la fase en que se encuentran (Informe interno STDP-PEP, 1999).

Los yacimientos de aceite crudo están constituidos por hidrocarburos líquidos, a las condiciones de presión y temperatura del yacimiento, con una viscosidad menor o igual a 10,000 centipoises. Esta viscosidad es medida a la temperatura original del yacimiento y a la presión atmosférica, como un líquido estabilizado libre de gas.

Es práctica común hablar de clases de aceite crudo de acuerdo a su peso específico, y expresado en una escala normalizada por el Instituto Estadounidense del Petróleo (American Petroleum Institute). Esta escala es llamada densidad API, o comúnmente conocida como grados API

En la tabla 1.1 se muestra una clasificación de acuerdo a la densidad del aceite, aunque hay que enfatizar que la producción de diversos yacimientos productores está asociada a un solo tipo de aceite crudo.

<b>Aceite crudo</b>	<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad (grados API)</b>
Extrapesado	> - 1.0	< - 10.0
Pesado	1.01 – 0.92	10.1 – 22.3
Mediano	0.91 – 0.87	22.4 – 31.1
Ligero	0.86 – 0.83	31.2 – 39
Superligero	< - 0.83	> - 39

**Tabla 1.1. Clasificación del petróleo de acuerdo a su densidad** (<http://www.imp.mx/petroleo/apuntes/tipos.htm> )

Desde el punto de vista molecular, el petróleo es una mezcla compleja de hidrocarburos y de compuestos orgánicos de bióxido de azufre, oxígeno y nitrógeno, así como compuestos que contienen metales, particularmente vanadio, níquel, hierro y cobre. Estos componentes químicos del petróleo están clasificados principalmente como ceras (o parafinas), naftenos, aromáticos y resinas asfálticas. Dependiendo de la clase de petróleo, la composición de las ceras puede variar predominantemente desde n-alcanos con bajo peso molecular (C<sub>20</sub> - C<sub>40</sub>) hasta altas proporciones de isoalcanos y alcanos cíclicos de alto peso molecular (Ronningsen y Bjornadal,

1991; Speight 1999). También existen hidrocarburos aromáticos y nafténicos en las ceras (Fagin, 1945; Goldman y Nathan, 1957; Katz y Bew, 1945).

Para propósitos comerciales y asegurar un mejor valor económico de los hidrocarburos mexicanos, los aceites crudos vendidos nacional e internacionalmente son en general mezclas de aceites de diferentes densidades como se muestra en la siguiente tabla 1.2.

Tipo de aceite	Clasificación	Densidad (grados API)
Maya	Pesado	22
Istmo	Ligero	32
Olmecca	Superligero	39

Tabla 1.2. Clasificación de las mezclas de aceite. ( <http://www.imp.mx/petroleo/apuntes/tipos.htm> )

## 1.2. Tipos de Yacimiento

Aunque su clasificación teórica requiere del conocimiento del comportamiento termodinámico del fluido (diagrama P-T), las condiciones del yacimiento y de las instalaciones de superficie, los yacimientos suelen usualmente clasificarse en función de propiedades observables durante la operación. Para la clasificación de la naturaleza del yacimiento, se utilizan criterios que incluyen la relación gas-aceite (RGA), densidad del líquido de tanque y el color del líquido en el tanque. La RGA de la producción inicial es el indicador más importante del tipo de fluidos, tan solo el color del líquido en el tanque no es un buen indicador del tipo de fluido, sin embargo el color y la densidad del líquido en el tanque son utilizados para confirmar el tipo de fluido indicado por el valor de la relación gas-aceite (McCain,1990). Para determinar el comportamiento termodinámico, se debe realizar un estudio PVT sobre una muestra de fluido.

Bajo las condiciones iniciales del yacimiento, los hidrocarburos se encuentran en estado monofásico (una sola fase) o en estado bifásico (dos fases). En el estado monofásico puede ser líquido, caso en el cual todo el gas presente está disuelto en el petróleo o también el estado monofásico puede ser gaseoso. Si este estado gaseoso contiene hidrocarburos vaporizados, recuperables como líquidos en superficie, el yacimiento se denomina de condensado de gas o destilado de gas (nombre antiguo). Cuando existe la acumulación en estado bifásico, al estado de vapor se denomina capa de gas y al estado líquido subyacente zona de petróleo. (J.M. Kindelan,1977).

William D. McCain, en su libro *"The properties of petroleum fluids"*, especifica que existen cinco tipos de yacimientos, son normalmente llamados *aceite negro*, *aceite volátil*, *gas retrógrado*, *gas húmedo* y *gas seco*.

### 1.2.1 Yacimientos de aceite negro

Este tipo de yacimiento consiste de una amplia variedad de especies químicas incluyendo moléculas grandes, pesadas y no volátiles. El diagrama de fase predecible cubre un rango amplio de temperaturas. El punto crítico se encuentra sobre la pendiente de la envolvente de fase. En la figura 1.1, en el diagrama de fase, la línea 1-2-3 indica la reducción en presión a temperatura constante que ocurre en el yacimiento durante la producción. Cuando la presión del yacimiento se presenta sobre la línea 1-2, se dice que el aceite es bajo saturado, lo que significa que el aceite puede disolver más gas si éste estuviera presente. Si la presión del yacimiento estuviera en el punto 2, el aceite se encontraría en su punto de burbuja y sería saturado. El aceite contiene tanto gas disuelto como pueda soportar. Una reducción en la presión liberaría gas para formar una fase de gas libre en el yacimiento.

El nombre de aceite negro es solo un descriptivo por el color, sin embargo no siempre es negro. Este tipo de yacimiento también es llamado como aceite de bajo encogimiento o simplemente aceite ordinario, se caracteriza por tener una relación de gas-aceite menor a  $200 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , su densidad normalmente se encuentra con valores mayores a  $0.85 \text{ gr/cm}^3$ .

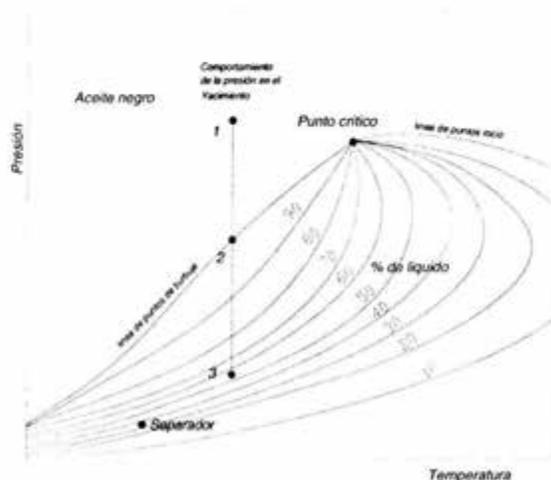


Figura 1.1. Diagrama de fase de un aceite negro

El valor de RGA incrementa durante la producción cuando la presión del yacimiento cae por debajo de la presión de burbuja. El aceite en el tanque tiene una densidad de 45° API y va a decrecer con la vida del yacimiento. El color en el tanque es muy oscuro, indicando la presencia de hidrocarburos pesados, siempre negros algunas veces con un color verdoso oscuro o café.

### 1.2.2. Yacimientos de aceite volátil

El aceite volátil contiene relativamente pocas moléculas pesadas y más intermedias, definidas como etano a hexano, esto comparado con el aceite negro. El diagrama de fase 1.2, es algunas veces diferente que el diagrama de fase del aceite negro. El rango de temperaturas cubierto por la envolvente de fase es algunas veces pequeño, sin embargo la posición de mayor interés es el punto crítico. La temperatura crítica es mucho menor que para un aceite negro y en realidad está muy cerca de la temperatura del yacimiento.

La línea vertical muestra el camino que toma a temperatura constante, la reducción de la presión en la etapa de producción. Note que una pequeña reducción en la presión por abajo del punto de burbuja, punto 2, causa una liberación de una gran cantidad de gas en el yacimiento. A un yacimiento de aceite volátil le debe corresponder alrededor del 50% del gas en el yacimiento en un intervalo de presión por debajo de la presión del punto de burbuja. También, en las líneas de calidad con mucho menor porcentaje de líquido cruzan las condiciones de separación, de aquí el nombre de aceite volátil. El aceite volátil también ha sido llamado aceite crudo de alto encogimiento.

La línea que divide el aceite negro del aceite volátil algunas veces es arbitraria. La diferencia depende en gran medida del punto en el cual se realice un balance de materia en el que las ecuaciones empiezan a ser intolerablemente inexactas. La línea divisoria entre aceites volátiles y gas retrógrada es clara. Para un fluido que tiende a ser volátil su temperatura crítica debe ser mayor que la temperatura del yacimiento. El aceite volátil se caracteriza por tener una relación gas aceite al inicio de la producción de 200 a 1000 m<sup>3</sup>/ m<sup>3</sup>, su densidad normalmente se encuentra entre 0.85 a 0.78 gr/cm<sup>3</sup>. La RGA incrementa cuando la producción procede y la presión del yacimiento baja por debajo de la presión de burbuja del aceite. La densidad en el tanque de almacenamiento es usualmente de 40° API o mayor y se incrementa durante la producción. El color en el tanque es diverso, usualmente café, anaranjado, algunas veces verde oscuro.

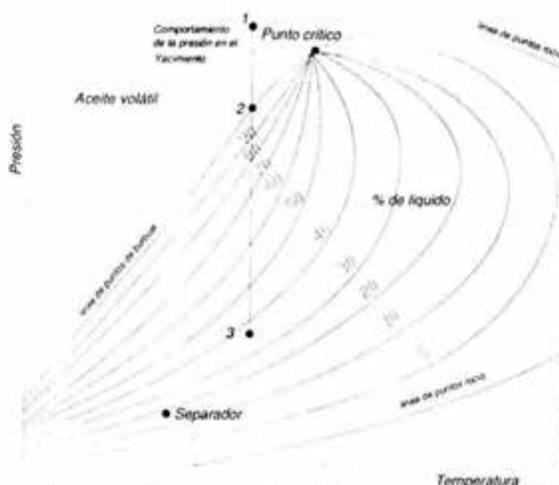


Figura 1.2. Diagrama de fase típico de un aceite volátil

### 1.2.3. Yacimientos de gas retrógrado

En este yacimiento el fluido se considera gas retrógrado. El diagrama de fase como se observa en la figura 1.3, es algunas veces más pequeño que para los aceites, el punto crítico está muy alejado, por debajo de la izquierda de la envolvente. Estos cambios son el resultado de gases retrógrados que contienen pocos hidrocarburos pesados en comparación con los aceites. El diagrama de fase del gas retrógrado tiene una temperatura crítica menor que la temperatura del yacimiento y una cricondenterma<sup>(1)</sup> mayor que la temperatura del yacimiento. Inicialmente, el gas retrógrado exhibe un punto de rocío, punto 2. Cuando la presión se reduce, el líquido condensado del gas forma un líquido libre en el yacimiento, este líquido normalmente no fluye y no puede ser parte de la producción.

La línea de comportamiento de presión del yacimiento, indica que a baja presión el líquido comienza a vaporizarse. Esto ocurre en laboratorio, sin embargo, probablemente no ocurre en el yacimiento debido a que durante la producción, la composición general del fluido de yacimiento cambia.

El límite bajo de la relación de gas aceite para gas retrógrado es aproximadamente  $500 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , el límite superior de GRA no está bien definido, valores mayores de  $15\,000 \text{ m}^3/\text{m}^3$  se han observado; su densidad normalmente se encuentra entre  $0.82$  a  $0.75 \text{ gr}/\text{cm}^3$ .

<sup>(1)</sup> La temperatura más alta sobre la envolvente de saturación es llamada cricondenterma (William D. McCain; 1989)

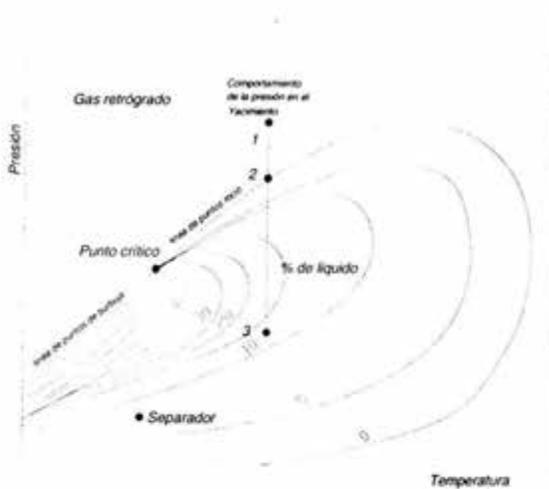


Figura 1.3. Diagrama de fase típico de un gas retrogrado, también puede conocerse como gas-condensado retrógrado.

Si la RGA es alta indica que el diagrama de fase es mucho menor que el que se muestra en la figura 1.2.3. Gases con alto RGA tienen cricondentermas muy cerrada a la temperatura del yacimiento y sueltan muy poco líquido retrógrado en el yacimiento.

La densidad en el tanque de almacenamiento es usualmente de 40° y 60° API e incrementa cuando la presión del yacimiento decrece por debajo de la presión de rocío. El líquido puede ser ligeramente coloreado, café, anaranjado, verdoso o como el agua.

#### 1.2.4. Yacimientos de gas húmedo

En éstos yacimientos de hidrocarburos están en estado gaseoso, por características específicas de presión, temperatura y composición. La palabra húmedo no significa que el gas esté mojado con agua, se refiere a los hidrocarburos líquidos que se condensan a las condiciones de superficie. En general los yacimientos de gas están saturados normalmente de agua. Durante la producción del yacimiento, la presión disminuye y permite que el gas se condense en petróleo líquido, el cual al unirse en forma de película a las paredes de los poros queda atrapado y no puede ser extraído. Esto puede evitarse inyectando gas a fin de mantener la presión del yacimiento.

En la superficie el líquido normalmente es llamado condensado y el yacimiento de gas es llamado gas y condensado. Esto indica una gran confusión entre los gases húmedos y los gases retrógrados.

El diagrama de fase de la mezcla de hidrocarburos es predominantemente pequeño, las moléculas están por debajo de la temperatura del yacimiento. Un ejemplo del diagrama de fase de este tipo de yacimientos se muestra en la figura 1.4. Un gas húmedo existe solamente como un gas en el yacimiento a través de la reducción de la presión de yacimiento. El comportamiento de la presión del yacimiento, línea 12, no se encuentra dentro de la envolvente de fase; por lo que el líquido no se forma en el yacimiento. Sin embargo, las condiciones de separación están dentro de la envolvente, causando algún líquido que se forma en la superficie.

Los gases húmedos producen líquidos en el tanque de almacenamiento con el mismo rango de RGA tal como los gases retrógrados. Sin embargo, la densidad del líquido no cambia durante la vida del yacimiento. El líquido en el tanque de almacenamiento es usualmente como el agua. Es verdad que los gases húmedos tienen RGA muy alta.

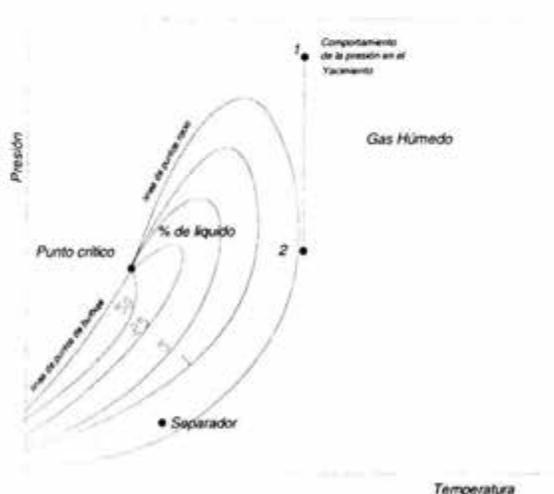


Figura 1.4. Diagrama típico de un yacimiento de gas húmedo

### 1.2.5. Yacimientos de gas seco

El gas seco es primariamente metano en un 90 a 95%. La figura 1.5. muestra una mezcla de hidrocarburos donde se encuentra gas en mayor proporción en el yacimiento.

A condiciones normales en superficie, el separador cae fuera de la envolvente de fase; por lo que ningún líquido se forma ni en el yacimiento ni en la superficie.

La palabra "seco", en el gas seco indica que el gas no contiene suficiente del comportamiento de las moléculas para formar hidrocarburo líquido en la superficie. Usualmente algún líquido como el agua se condensa en la superficie.

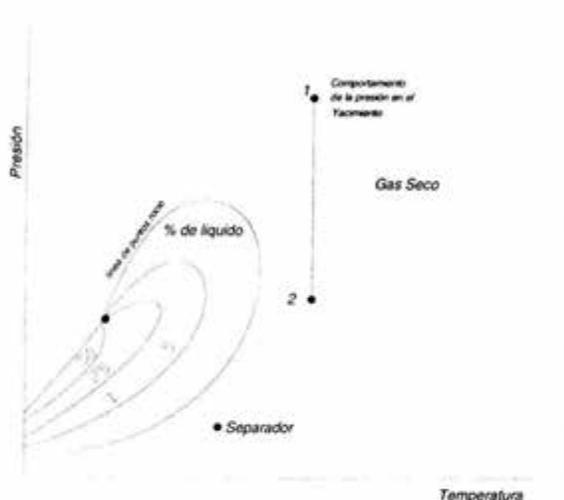


Figura 1.5. Diagrama de fase típico de un yacimiento de gas seco.

### 1.3. El fenómeno de deposición de sólidos orgánicos

La deposición de ceras y asfaltenos representa un problema muy serio en la producción de petróleo en algunos yacimientos alrededor del mundo. Las ceras son las fracciones no polares más pesadas del petróleo, que pueden precipitar tanto en el pozo, como en instalaciones superficiales de producción y transporte de hidrocarburos. La deposición de ceras puede ocurrir en la producción o transporte de gases y condensados, aceites ligeros o aceites pesados a temperaturas tan altas como 66 °C aproximadamente (Firoozabadi, 1999).

La deposición de asfaltenos, sin embargo, puede ocurrir en la formación productora (yacimiento), tubería de producción (pozo) e instalaciones superficiales. Los asfaltenos pueden depositarse en algunos aceites ligeros, pero probablemente no se depositen en aceites pesados. *No se tiene una razón teórica precisa sobre este comportamiento, pero se ha observado en laboratorio que los aceites pesados tienen mayor cantidad de gas disuelto que los ligeros, pudien-*

do ocasionar que las fracciones pesadas sean menos propensas a depositarse en estos aceites. No existen reportes de deposición de asfaltenos en yacimientos productores de gas y condensados. En la figura 1.6. se representa un pozo productor de petróleo, desde el yacimiento hasta las instalaciones superficiales.

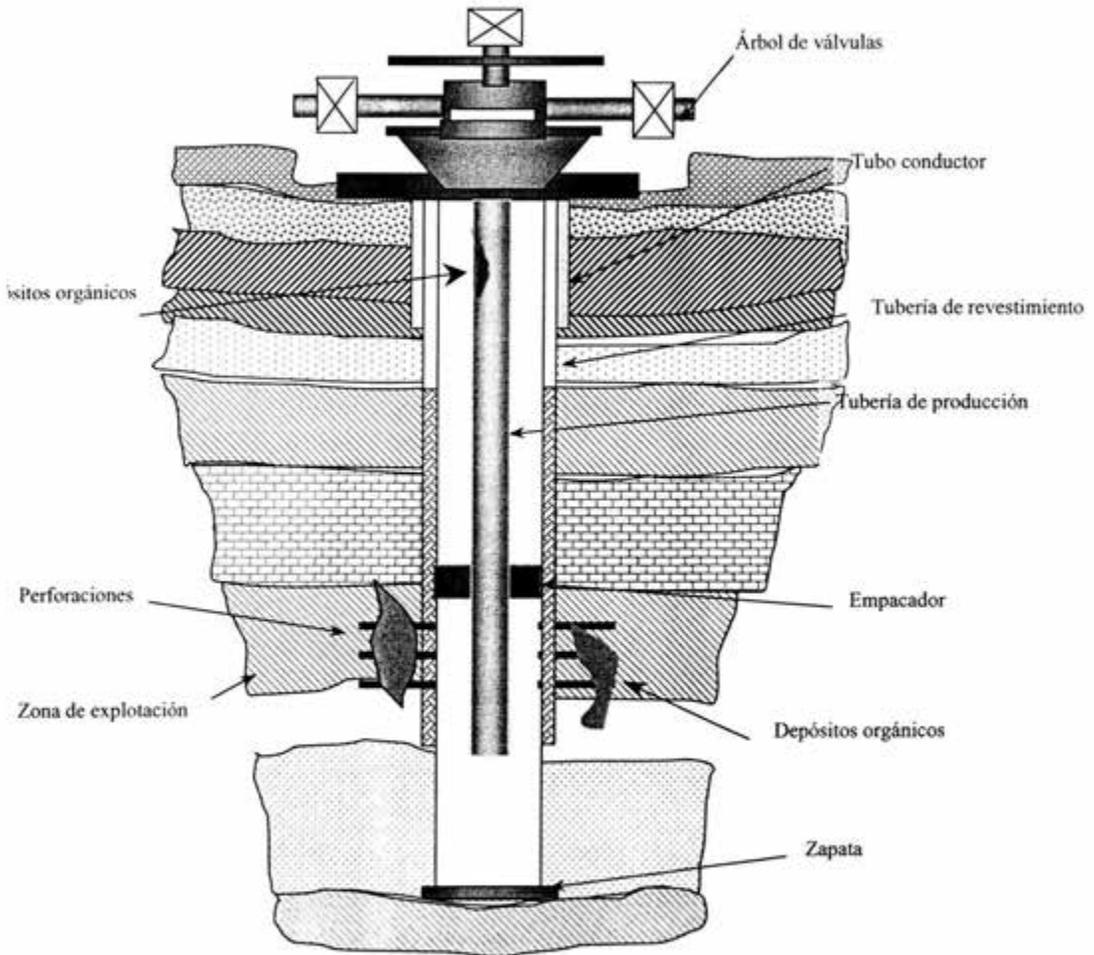


Figura 1.6. Pozo productor de petróleo.

La modelación de la deposición de ceras y asfaltenos requiere de diferentes aproximaciones debido a que son fundamentalmente diferentes. El efecto de la presión, temperatura y composición sobre la deposición, es también fundamentalmente diferente. La temperatura tiene

un efecto dominante sobre la depositación de ceras en yacimientos de gas y condensado y aceite.

En general, cuando la presión aumenta en forma isotérmica, la cera se depositará en el aceite crudo, pero también bajo estas condiciones, las ceras pueden disolverse en sistemas de gases naturales y así prevenir la depositación. En el caso de los asfaltenos, la depositación es menos sensible a cambios en la temperatura. Se ha observado que cuando la presión disminuye, eventualmente ocurrirá la depositación. El efecto de la composición es también diferente en ambos fenómenos (Firoozabadi, 1999).

Un ejemplo claro donde se muestra el efecto que tiene la composición se muestra a continuación. En la tabla 1.3. se presentan los resultados de mediciones para determinar la temperatura de formación de ceras (CPT, Cloud Point Temperature) realizadas en una muestra de aceite con composición conocida (Pan et al., 1997).

Solvente, %mol	Presión [bar]	CPT [K]
0	38.2	318.9
C <sub>1</sub> , 30	106.2	316.8
C <sub>3</sub> , 30	73.5	316.8
NC <sub>5</sub> , 30	37.2	314.4
NC <sub>7</sub> , 30	37.6	314.2
NC <sub>10</sub> , 30	36.2	316.0
NC <sub>12</sub> , 30	35.5	322.0
NC <sub>15</sub> , 30	35.5	323.0

**Tabla 1.3. Efecto del solvente sobre el CPT (Cloud Point Temperature) para un aceite típico.**

El CPT a 38.2 bar es 318.9 K. Cuando el 30 % mol de C<sub>1</sub> se disuelve en este aceite, como un resultado del incremento de la presión, el CPT cambia a 316.8 K. Este cambio es el resultado de dos efectos: (1) presión, y (2) composición. El efecto neto del cambio de composición sobre el CPT es de 2.1 K. El efecto de nC<sub>5</sub> y nC<sub>7</sub> resulta ser más pronunciado que el efecto de C<sub>1</sub>; 30 % mol de nC<sub>7</sub> disminuye el CPT a 314.2 K, el cual es 4.7 K menor que el CPT del aceite original. Para el caso de los alcanos normales nC<sub>12</sub> y nC<sub>15</sub>, el efecto se invierte, provocando un aumento en el valor del CPT (Firoozabadi, 1999).

Madsen y Boistelle (1976, 1979) midieron las solubilidades de nC<sub>28</sub>, nC<sub>32</sub> y nC<sub>36</sub> en solventes de alcanos normales desde nC<sub>5</sub> hasta nC<sub>12</sub> a condiciones atmosféricas. Sus resultados revelaron

que la solubilidad de un hidrocarburo pesado en el primer solvente se incrementa con el número de carbonos y posteriormente disminuye. Por ejemplo, a 298 K, la solubilidad del  $nC_{36}$  se incrementa desde  $nC_5$  hasta  $nC_7$ , y posteriormente disminuye a medida que el solvente utilizado tenga un número de carbonos mayor (Huaunquan et al., 1996; Firoozabadi, 1999).

Las implicaciones económicas del problema de la deposición en pozos es enorme, considerando el hecho de que las pérdidas por la subexplotación (debido a la obstrucción de los equipos de producción, almacenamiento y procesamiento) de los pozos problemáticos pueden representar cientos de miles o hasta millones de dólares, dependiendo de la capacidad de producción del pozo y el tiempo que tarde en restablecerse la producción normal (Firoozabadi, 1999). La figura 1.7. muestra esquemáticamente los daños que se producen en tuberías de flujo de hidrocarburos.

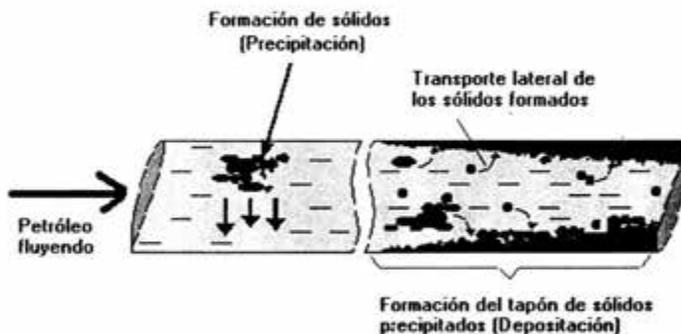


Figura 1.7. Fenómeno de deposición de sólidos.

En general, el fenómeno de la deposición de sólidos se puede entender a partir de dos mecanismos básicos, relacionados fuertemente entre sí, y que a su vez dependen principalmente de las condiciones de presión, temperatura y composición existentes en la tubería.

El primer mecanismo es la precipitación de la fase sólida (ceras y/o asfáltenos). Ocurre cuando en el pozo se alcanzan ciertas condiciones de presión y temperatura (propias de cada aceite), las cuales provocan una transición de fase de las fracciones más pesadas del líquido a la fase sólida (efecto termodinámico). Esto crea un gradiente de concentración local de sólidos precipitados, los cuales son transportados dentro del fluido por la misma inercia del flujo.

El segundo mecanismo es el transporte lateral (o radial) de la fase sólida desde el interior del líquido hacia la pared interna de la tubería. Para este segundo mecanismo se han identificado tres procesos diferentes que contribuyen al transporte lateral, estos mecanismos son: (1) difusión molecular, (2) difusión browniana, y (3) dispersión de corte, aunque recientemente, algunos investigadores han propuesto que el principal mecanismo que contribuye al transporte lateral de la fase sólida es la difusión molecular (por ejemplo Ribeiro et al., 1997, Lindeloff, 1999).

Algunos autores (Burger et al., 1981) consideran que la depositación de los sólidos en la pared y su posterior crecimiento con el tiempo, se debe principalmente a una estructura porosa cuyos poros se van llenando con el aceite y las ceras disueltas. En la actualidad continua el debate respecto al mecanismo que gobierna el crecimiento de esta capa (Harold L, 2000).

En muchos casos, la depositación de ceras y/o asfáltenos, se presenta en las etapas de la llamada recuperación mejorada, debido a la inyección de gases miscibles como bióxido de carbono o nitrógeno (Hansen, 1977; Tuttle, 1983). Por otra parte, las instalaciones superficiales de producción, como los árboles de válvulas, tuberías, bombas, separadores, tanques, etc., también se ven afectadas frecuentemente por la formación de depósitos (Katz y Bew, 1945; M.E. Newberry, 2000).

Hace algunos años, la prevención y/o remediación a los problemas de la depositación se llevó a cabo utilizando las siguientes técnicas: a) aislamiento y calentamiento periódico de la tubería (Simkin et al., 1967; Hunt, 1962), b) agregando polímeros y otros disolventes a la corriente de aceite producida (Holder y Winkler, 1965; Mieulet y Peinado, 1966; Garcia-Hernández, 1989), y c) revistiendo el interior de las tuberías con materiales sofisticados como películas aislantes hechas a partir de ciertas clases de polímeros (Licha y Herrera, 1975). En la actualidad las técnicas utilizadas para la remediación y/o prevención de la depositación, van desde la inyección de productos químicos inhibidores de (Lira-Galeana et al., 1998c, 1998d, 1998e, 1999a, 1999b; M. E. Newberry, 2000), hasta la colocación de dispositivos magnéticos en la tubería de producción (Reyes-Reza y Méndez-López, 1999; Nguyen P., 2001).

Si bien existen métodos de remediación con los cuales es posible mitigar el problema a nivel de campo, aún no ha sido posible conjuntar una metodología general y confiable con la cual se pueda predecir o diagnosticar el comportamiento de la aparición de depósitos en el yacimiento, pozo o instalaciones superficiales, bajo esquemas de producción variable (Lijian D., et al, 2001).

Recientemente, en el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), se desarrolló una metodología de carácter general para estudiar esta problemática de la depositación en pozos. La metodología combina información sobre el comportamiento termodinámico experimental de la depositación de sólidos de muestras de aceite preservadas en presión, así como la simulación del comportamiento del pozo bajo diferentes esquemas de producción y geometría de la tubería utilizando flujo multifásico.

Los retrasos en la producción, los costos de rehabilitación, mantenimiento, y la amenaza del taponamiento definitivo de los pozos, son factores que inciden directamente en la viabilidad económica de la explotación de yacimientos con problemas de depositación. Tomando en cuenta que las tendencias de la industria petrolera son la explotación de yacimientos cada vez más profundos, extraer crudos más pesados, y la aplicación de metodologías de inyección de gases miscibles para recuperación de petróleo, el problema de la depositación y las estrategias para su prevención y tratamiento, tendrán un impacto crucial y definitivo en la perspectiva económica de dichas tendencias.

#### 1.4. Envoltentes de Precipitación de Ceras y Asfáltenos

Una de las mejores técnicas experimentales con las que se cuenta en la actualidad para predecir las condiciones bajo las cuales se podrán presentar problemas de obstrucción en las tuberías de producción debido a la depositación de ceras y/o asfáltenos, son las llamadas envoltentes de precipitación.

El comportamiento de fases de las ceras y asfáltenos es un tanto diferente al comportamiento de fases convencional PVT. Los asfáltenos exhiben un comportamiento en algún estado termodinámico llamado **floculación**. Esto es, las partículas de asfáltenos o micelas, se agregan o floculan en agregados más grandes o flóculos. El lugar geométrico de todos los puntos termodinámicos en un diagrama de fases P-T-x en el cual la floculación tiene lugar se le conoce como "envolvente de precipitación de asfáltenos (EPA)". Las ceras, por otro lado en el mismo estado termodinámico, exhiben un fenómeno de **crystalización**. El lugar geométrico de todos los puntos termodinámicos en un diagrama de fases P-T-x en el cual la cristalización tiene lugar, se le conoce como "envolvente de precipitación de ceras (EPC)". La floculación de los asfáltenos puede ser tanto reversible como irreversible (debido a su naturaleza coloidal).

La cristalización de las ceras es generalmente un proceso reversible. Sin embargo, en algunas ocasiones puede suceder que las ceras se precipiten junto con resinas y asfaltenos al mismo tiempo, por lo que en estas ocasiones se reporta el fenómeno como irreversible.

La precipitación de ceras en fluidos de petróleo es considerada como un fenómeno de saturación termodinámica. Las moléculas de cera están inicialmente disueltas en el fluido. En equilibrio termodinámico el fluido se satura con moléculas de cera, lo cual da por resultado el inicio de la precipitación. Este estado termodinámico se le conoce como el "*onset*" (*umbral*) *de precipitación de cera o solidificación*. Esto es análogo al punto de rocío o al fenómeno de condensación, excepto que en el caso de la precipitación de cera, un sólido es el que se precipita a partir del líquido (Kawanaka et al., 1987).

En la precipitación de ceras, las resinas y las micelas de asfaltenos se comportan como moléculas pesadas. Cuando su energía cinética es suficientemente reducida debido al enfriamiento, éstas se precipitan fuera de la solución, pero sin sufrir destrucción. Si se proporciona energía cinética en forma de calor a la solución, estas micelas podrán desagregarse y regresar a su estado natural en la solución.

Como en el caso de los asfaltenos, el hecho de que la precipitación de ceras se presente en algún estado termodinámico y no en otro, para un fluido dado, es indicativo de que hay una porción del espacio termodinámico que se encuentra encerrado por una frontera dentro de la cual la cera precipita. A este espacio termodinámico acotado se le conoce como envolvente de precipitación de ceras (Leontaritis y Mansoori, 1987; Leontaritis, 1996). En la figura 1.8. se esquematiza una envolvente hipotética.

Esta clase de diagramas proporciona información que permite estimar, con muy buena aproximación, las condiciones de P y T a las cuales se pueden esperar problemas por depositación durante la producción de un pozo (Zapata-Gonzalez et al., 1999) y es la fuente de los datos de equilibrio de fases, necesarios para el desarrollo y prueba de modelos de precipitación.

Se sabe que los pozos con problemas de depositación presentan el taponamiento (u obstrucción) principalmente en las secciones de la tubería de producción cuya presión se encuentra alrededor de la presión de burbuja, o también conocida como presión de saturación (en esta condición de

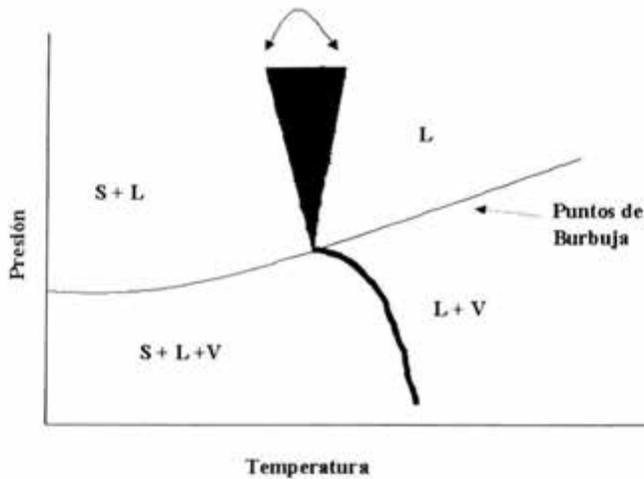


Figura 1.8. Envolvente de precipitación de ceras (EPC) en coordenadas presión-temperatura.

presión se inicia la formación de la primera burbuja), mientras que abajo ( $P < P_{sat}$ ) o arriba ( $P > P_{sat}$ ) de este punto, generalmente ya no se detectan depósitos; en consecuencia se ha observado que los problemas de deposición disminuyen cuando la presión del yacimiento se reduce por abajo de la presión de burbuja. Dicho fenómeno se esquematiza en la figura 1.9.

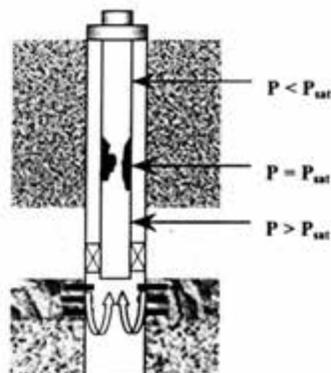


Fig. 1.9. Distribución de la deposición de orgánicos en un pozo petrolero como función su presión de saturación.

Hasta hace algunos años, las pruebas de laboratorio utilizadas para caracterizar el comportamiento del petróleo, eran las llamadas pruebas "PVT" convencionales. Este tipo de estudios se hacían, en la mayoría de las veces, con muestras de petróleo recombinadas, es decir

muestras de aceite y gas tomadas en la superficie por separado. Estas muestras se recombinaban en el laboratorio agregando gas al aceite hasta alcanzar el valor de la presión de burbuja o igualando la relación gas-aceite (RGA) a condiciones de yacimiento del pozo bajo estudio (es decir, la presión y temperatura a la cual produce el yacimiento en un momento determinado) (Towler, 1989; Henk K. et al, 2001.)

Con estas pruebas básicamente se podían determinar las composiciones de la fase líquida y la fase vapor para presiones por arriba de la presión de burbuja y para presiones por debajo de ésta. También era posible determinar algunas propiedades físicas del aceite como por ejemplo densidad, viscosidad, composición, factor de encogimiento (Relación entre el volumen del fluido de petróleo y el volumen de gas liberado), etc. Este tipo de estudios no proporcionaba información sobre el comportamiento de las fracciones pesadas (ceras y asfaltenos) presentes en el petróleo. Tampoco describía el comportamiento termodinámico del mismo.

Debido a la naturaleza del fenómeno de la depositación, esta clase de estudios no aportaba la información necesaria ni suficiente para desarrollar estrategias de tipo predictivo con las cuales fuera posible atacar sus consecuencias. Las metodologías utilizadas para enfrentar esta problemática eran un tanto empíricas, por lo que el problema no desaparecía por completo, dando por resultado los taponamientos continuos de los pozos productores y generando grandes pérdidas económicas.

Con el desarrollo de las tecnologías para la obtención de muestras de petróleo preservadas a alta presión (muestras cuya presión es casi la misma que la presión encontrada en el yacimiento). Los modernos equipos de muestreo pueden bajar esta clase de tecnología hasta zonas cercanas al yacimiento (comúnmente conocida como zona de disparos) es decir, la zona de la tubería donde penetra el petróleo y comienza su camino hacia la superficie. Esto junto con mejores equipos de laboratorio con avanzados sistemas de detección del umbral de precipitación, ha hecho posible obtener las envolventes de precipitación de ceras y asfaltenos con mayor precisión para el caso de las muestras preservadas solo bajo presión no en temperatura. (Hammami, et al., 1995; Ferworn, et al., 1997; Lira-Galeana, et al., 1997, 1998a, 1998b).

Desafortunadamente debido a su naturaleza, los estudios arriba mencionados se realizan bajo condiciones estáticas, es decir en equipos de laboratorio, por lo que no es posible predecir de forma más aproximada el comportamiento del aceite bajo condiciones dinámicas, tal como sucede en el pozo.

En el apéndice A se desarrollan los modelos matemáticos que describen el comportamiento de las ceras y los asfáltenos.

### 1.5. El problema de la depositación orgánica en pozos petroleros de México

La depositación de sólidos en aceites mexicanos fue investigada primero por Glazerbrook, Higgins y Pannell en 1915 cuando analizaron el incremento de viscosidad en crudos pesados almacenados. Supusieron una asociación molecular la cual daba por resultado la formación de nuevas moléculas. De estas investigaciones concluyeron que era debido al incremento en la viscosidad durante el almacenamiento. Observaron que la viscosidad inicial podía ser parcialmente restituida por agitación y que podría ser completamente restituida mediante agitación térmica.

En 1985, Guzmán et al., presentaron un trabajo referente a un análisis termogravimétrico de asfáltenos derivados de un aceite crudo pesado mexicano. Posteriormente, se han publicado diversos reportes sobre la problemática de la depositación de sólidos en aceites crudos mexicanos (Escobedo et al., 1992,1995; Mark A.,2000).

En los últimos años, el problema de la precipitación y depositación de sólidos en los yacimientos, las tuberías de producción y las instalaciones en superficie, se ha convertido en uno de los problemas tecnológicos de mayor impacto económico que enfrentan algunos de los mejores campos de producción de nuestro país (García-Hernández, 1989; Chávez-Alcaraz y Lory-Mendoza, 1991; Escobedo y Mansoori, 1992, 1995; Pacheco-Sánchez y Mansoori, 1997; Zapata-González et al., 1999; Cosultchi et al., 1997, J. C. Hernández et al, 1999).

Existen una gran cantidad de pozos productores de petróleo, donde se han invertido una cantidad considerable de recursos económicos para controlar este problema con objeto de mantener los niveles de producción. Ejemplos de estos pozos se encuentran en los campos Jujo-Tecominoacan (Lira-Galeana, et al. 1998e), Bellota-Chinchorro (Lira-Galeana et al. 1999a, 1999b) en el estado de Tabasco; el campo Artesa en el estado de Chiapas (Lira-Galeana, et al. 1998d) y el campo Abkatún de la región marina suroeste (Chávez-Alcaraz y Lory-Mendoza, 1991; Lira-Galeana, et al. 1997). Durante estudios realizados en el proceso de recuperación mejorada, se encontró que los mecanismos de inyección de gases miscibles como gas natural, bióxido de carbono y nitrógeno, provocan la precipitación de asfáltenos en varios de los aceites crudos del

activo Jujo-Tecominoacan, (Lira-Galeana, et al., 1998e) lo que ha obligado a las autoridades correspondientes a replantear sus estrategias para la recuperación mejorada del hidrocarburo.

Por ejemplo, en el caso particular de un pozo productor ubicado en el campo Abkatún, en la sonda de Campeche, se detectaron problemas de depositación muy severos. Los costos por intervención para remover los depósitos ascendieron a más de \$4,300,000 USD por pura producción diferida. Posteriormente fue necesario realizarle intervenciones continuas mediante inyección de químicos para remover depósitos. El costo de estas operaciones fue alrededor de \$20,000,000 USD (Reyes-Reza y Méndez-López, 1999).

Recientemente el Instituto Mexicano del Petróleo realizó un estudio de mercado en diferentes campos productores de petróleo de PEMEX-Exploración y Producción (PEP) en la Región Sur de México con el fin de conocer la problemática que tiene PEMEX en sus pozos productores (Lira-Galeana et al., 2000). El estudio proporcionó los siguientes resultados: de una muestra de aproximadamente 636 pozos productores en operación actualmente en las regiones Sur, Marina Suroeste y Marina Noreste (en las figuras 1.10 - 1.12, se presenta la ubicación geográfica de estas regiones) de Pemex Exploración y Producción, el 18% (es decir, 116 pozos) presentan problemas de depositación de sólidos en sus diferentes etapas de producción. La distribución de pozos problemáticos por región es la siguiente: Región Marina Suroeste 7% (8 pozos); Región Marina Noreste 3% (3 pozos) y Región Sur 90% (105 pozos). En la tabla 1.4. se resumen la información.

Activos	Yacimientos en operación	Pozos en operación	Pozos con problemas	Asfáltenos	Parafinas
<b>Bellota-Chinchorro</b>	14	112	77	14	63
<b>Jujo-Teco</b>	7	83	21	21	0
<b>Luna</b>	N.D.	N.D.	1	0	1
<b>Macuspac-Giraldas-Agave</b>	7	39	5	5	0
<b>Muspac- Catedral</b>	8	59	0	0	0
<i>Total Región Sur</i>	<b>36</b>	<b>293</b>	<b>104</b>	<b>40</b>	<b>64</b>
<b>Abkatún</b>	4	65	5	4	1
<b>Litoral de Tabasco</b>	3	12	2	2	0
<b>Pol-Chuc</b>	3	44	1	1	0
<i>Total Región Marina Suroeste</i>	<b>10</b>	<b>121</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>1</b>
<b>Cantarell</b>	4	144	0	0	0
<b>Ek-Balam</b>	5	37	1	1	0
<b>Ku-Maloob Zaap</b>	6	41	3	3	0
<i>Total Región Marina Noreste</i>	<b>15</b>	<b>222</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>0</b>
<b>Total de pozos</b>	<b>61</b>	<b>636</b>	<b>116</b>	<b>51</b>	<b>65</b>

**Tabla 1.4. Problemática en diversos activos de PEP**



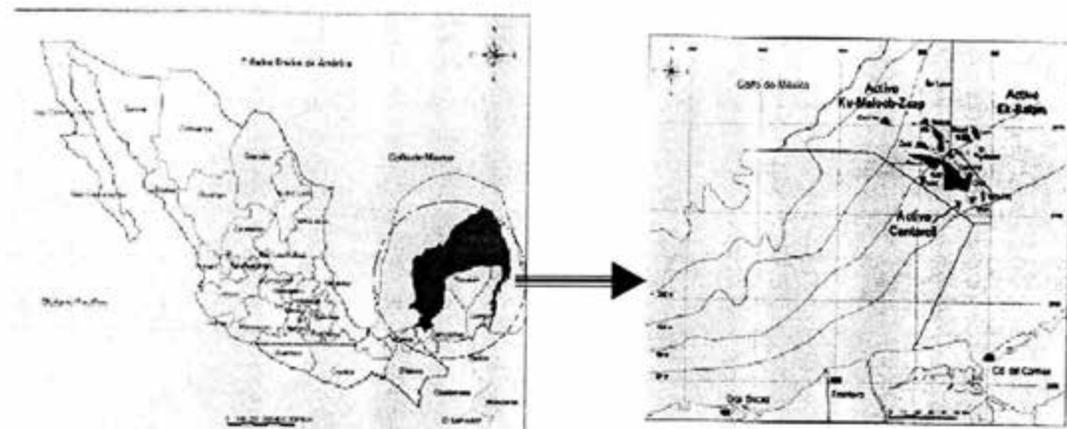


Figura 1.12. Región Marina Noreste, PEP

En un intento por encontrar soluciones viables a esta problemática, las administraciones de varios Activos de PEMEX- Exploración y Producción han impulsado el desarrollo de proyectos de investigación y desarrollo tecnológico en el Instituto Mexicano del Petróleo, encaminados a la búsqueda de métodos de solución y estrategias para prevenir este problema (Zapata-González, et al. 1999; Lira-Galeana, et al. 1997, 1998c, 1998d, 1999b; E. Ramírez, 2001). Sin embargo, dada su complejidad, el problema está lejos de tener una solución definitiva, prevaleciendo una gran incertidumbre en la efectividad de los métodos de remediación y prevención, mientras que los modelos predictivos están lejos de satisfacer los requerimientos de precisión y flexibilidad que impone su aplicación en la industria petrolera.

Así, la investigación de la depositación de ceras y/o asfaltenos bajo condiciones dinámicas en ductos que transportan petróleo en México se encuentra aún en etapa de desarrollo, con algunas tecnologías que han probado su eficacia. Debido a que el problema de la depositación afecta de forma considerable a la industria petrolera nacional, es necesario encontrar un modelo de predicción (bajo condiciones reales de producción de un pozo) que se convierta en una herramienta fundamental para el ingeniero de campo en la definición de estrategias más eficientes y seguras para la explotación y administración de los yacimientos productores de petróleo.

## 1.6. Estado del arte de herramientas de muestreo

*El Proceso de muestreo* . Se entiende por muestreo de fluidos de un punto dado, en un sistema dinámico o estático, a la captura de una porción representativa del fluido presente en ese punto a las condiciones del mismo, en el momento de la operación (T. Méndez, 1997)

El estado físico de los fluidos manejados en un sistema de flujo dinámico puede ser diferente en varios puntos del mismo para condiciones de operación fijas, y puede cambiar en un mismo punto si sus condiciones de operación cambian.

Así, los fluidos manejados en un sistema de flujo dinámico pueden presentarse en una sola fase, gaseosa o líquida, o coexistiendo como fase líquida y gaseosa. En los sistemas dinámicos, la coexistencia de las fases líquida y gaseosa generalmente no ocurre en equilibrio a las condiciones de presión y temperatura del punto en que se presentan, por lo que tales puntos no son adecuados para muestreo ya que, además no hay forma de garantizar una muestra con partes alícuotas de fases presentes.

Frecuentemente es necesario obtener información sobre los fluidos de la formación en un yacimiento previo a la producción del pozo. Medir la presión y la temperatura de los fluidos es importante, pero es deseable obtener muestras recientes de los fluidos y traerlas a la superficie y observar las características físicas del fluido (L.F. Mainer, Halliburton Company, 1987).

### 1.6.1 Técnicas de muestreo de hidrocarburos

Existen tres técnicas para obtención de fluidos de yacimiento (James W. Amyx, et al, 1960; Bjord,2001), para el análisis de la relación entre la presión, el volumen y la temperatura (PVT), esas tres técnicas son comúnmente conocidas como:

1. *Muestreo de fondo*. Consiste en la obtención de muestras de fluidos de yacimiento utilizando herramientas especiales introducidas al pozo y llevadas a la profundidad donde se desea obtener el fluido de muestra. En este tipo de muestreo se debe seleccionar un pozo con alta productividad para mantener la presión tan alta como sea posible alrededor de la formación. Se sugiere que el pozo sea recientemente habilitado para minimizar la saturación de gas. El pozo seleccionado no debe de estar produciendo agua.

2. *Muestreo de recombinación*, esta segunda técnica es usada para obtener muestras de fluidos de los cuales se determina las relaciones de las propiedades PVT y es conocida como muestreo de recombinación y el fluido muestra es recolectado en la superficie, se recolecta principalmente en instalaciones del separador de aceite y de gas y posteriormente las muestras son recombinadas en el laboratorio en la proporción en la que sus características fueron determinadas durante la operación de muestreo.
3. *Muestreo en instalaciones superficiales*. Este tercer método consiste principalmente en tomar volúmenes de gas y condensado, además de los datos que se toman en el muestreo de recombinación, es necesario obtener la temperatura y la presión del flujo de vapor en el punto donde se recolecta la muestra.

La normatividad para la toma de muestras así como las condiciones y procedimiento que debe de llevarse a cabo, está especificado en una práctica recomendada por API, "*Recommended Practice for Sampling Petroleum Reservoir Fluids, American Petroleum Institute, New York, N.Y. 1966*", y es la norma que se sigue en las practicas de muestreo de hidrocarburos en Petróleos Mexicanos.

Objetivamente este trabajo considera solo aquellas operaciones que se relacionan con el método de muestreo en fondo.

### **1.6.2. Tipos de herramientas de muestreo de fondo más usuales**

Como resultado de obtener muestras más representativas del fluido de yacimiento, se han diseñado numerosas pruebas y aparatos para muestreo (Walter et al.,1983; Jou et al., 1987; Gary D. et al., 1989; Roger L. et al., 1994, 2000; W. Smith,2000; Sapesco Measurement services, 2003), que han evolucionado como resultado de nuevas investigaciones sobre el comportamiento de hidrocarburos en estado natural y fenómenos asociados. Cada nuevo aparato para toma de muestras se desarrolla tomando en cuenta los problemas que se presentan en el momento de asegurar la muestra, algunos consideran el tipo de fluido, el tipo de yacimiento, las condiciones de presión y temperatura, la forma de obtener la muestra, los fluidos contaminantes, la metodología par la extracción de las muestras en laboratorio, etc. Se han encontrado sistemas de muestreo que utilizan volúmenes de mercurio colocados en sistemas para extraer la muestra, y en la actualidad han ido desapareciendo, debido a la toxicidad en el manejo del metal líquido.

Algunos otros son muy simples como se muestra en la figura 1.13, donde se puede observar un sistema para obtener muestras de hidrocarburos, el cual consiste de una bola de metal que obstruye un orificio para capturar la muestra, esta herramienta es utilizada actualmente por Línea de acero de la región marina, como se puede observar carece de cualquier instrumento para determinar la presión y temperatura, importantes para los análisis y mas aún para la caracterización de los fluidos de yacimiento.

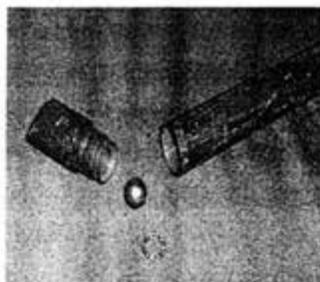


Figura 1.13. Herramienta de muestreo utilizada por línea de acero

La siguiente figura 1.14, muestra una herramienta perteneciente a Oil Phase, la captura de la muestra se realiza mediante la activación de una válvula con un reloj interno que libera un electroimán. Cuando la muestra es capturada se cierra la cámara por la acción de la presión del yacimiento; no se monitorea la presión en la herramienta ni la temperatura. Cuando la herramienta llega a la superficie se le inyecta nitrógeno para compensar la presión por cambio de temperatura.

El muestreo de fondo ha sido favorecido como un método para obtener muestras cercanas a las perforaciones desde los años 50's. Propiamente diseñadas las herramientas de muestreo son capaces de recolectar muestras válidas de fluidos de yacimiento. Sin embargo cuando la herramienta regresa a la superficie presenta un enfriamiento, permitiendo que la muestra se encoja, este tipo de herramientas generalmente mantiene un volumen fijo, por lo que la separación de fase puede ocurrir, hasta nuestros días las herramientas de muestreo han pasado por tres estados de desarrollo (W. Smith, 2000)

### 1ª Generación 1950's –1980's Muestreadores de fondo sencillos

Estos muestreadores fueron básicamente tubos abiertos con válvulas muy simples acopladas en los extremos, estaban operadas por un reloj mecánico. Se desplegaban dentro de la tubería y la

muestra fluía hasta que el reloj, previamente calibrado, actuaba atrapando la muestra a un volumen fijo. En la superficie, un volumen de mercurio se inyectaba dentro de la muestra para represurizar la cámara por arriba de la presión de saturación del hidrocarburo, desplazando la fase simple. El mercurio que se utilizaba era conocido como el único fluido que causaba una contaminación mínima a la muestra.

### **2ª Generación 1986- Muestreadores de pistón de desplazamiento**

Los muestreadores de pistón de desplazamiento fueron introducidos en 1986, una muestra desplazada utilizando mercurio era inaceptable. Resultaba muy complejo, como un pistón mecánico con el fluido hidráulico era usado para regular el flujo de la muestra dentro de la cámara, cerrar la válvula y desplazar la muestra hacia otro cilindro ya en superficie. A pesar de esta complejidad, un diseño superior de este sistema de muestreo incrementó grandemente la fiabilidad de la recolección de muestras en el fondo del yacimiento. Sin embargo, el volumen de la cámara de almacenamiento continuaba siendo fija permitiendo que la muestra se separara en dos fases durante el proceso de muestreo.

### **3ª Generación 1991- Muestreador de fase simple**

Se sabe que los asfáltenos pueden flocular y depositarse desde los fluidos del yacimiento, primeramente como una reducción de la presión. Depósitos de asfáltenos puede ser extremadamente difícil de re-solubilizar y realmente puede suceder que en algunos sistemas, la reversibilidad no puede lograrse del todo.

En 1990 una herramienta de muestreo de fondo de fase simple, fue introducida al mercado. Utilizaba un buffer de nitrógeno sobre-presurizado, para variar el volumen de la cámara después de que la muestra es capturada. Este dispositivo compensa el encogimiento de la muestra cuando la temperatura de la muestra se reduce durante la transferencia, permitiendo que la muestra se mantenga por arriba de la presión de muestreo. Éste puede evitar la floculación de los asfáltenos en muchos casos.

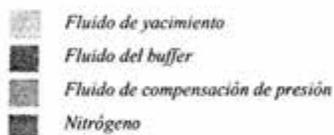
El muestreador de fase simple ofrecía claras ventajas sobre las generaciones previas, manteniendo la muestra en una fase, eliminando la necesidad de recombinar la muestra en la superficie previo a la transferencia.

### Sigle-phase reservoir Sampler (SRS)

#### Principio de operación

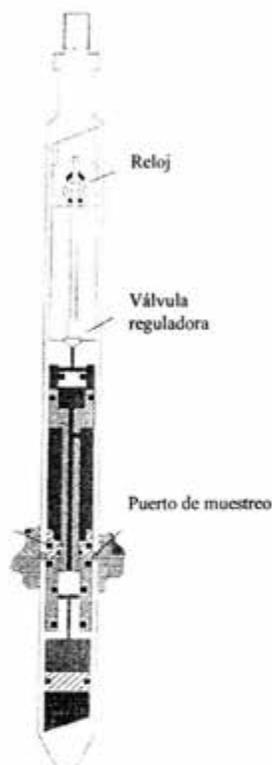
##### Posición de la corrida

- Carga de nitrógeno en superficie preparada para compensar la presión del fluido
- El puerto de muestreo se encuentra cerrado
- Cuenta con un reloj para abrir la válvula



Pistón flotante

Oilphase



**Figura 1.14.** Herramienta de Oil Phase accionada por un reloj interno, no preserva la temperatura del yacimiento.

La adición de un buffer de nitrógeno incrementaba también la complejidad del sistema. Sin embargo, la fiabilidad del sistema mejoraba a versiones anteriores como el de pistón de desplazamiento.

El muestreador de fase simple es ahora el sistema de muestreo preferido, usado por la mayoría de compañías, en muchas partes del mundo, la figura 1.14 presenta una herramienta de la compañía Oil Phase que se utiliza en Pemex para el muestreo.

La tabla 1.5. resume las características de las herramientas encontradas comercialmente. Cabe señalar que ninguna de las herramientas encontradas tiene control sobre la temperatura de la muestra, después de que ésta es capturada, la mayoría realiza compensaciones a la presión. En esta tabla se indican las características de nuestra propuesta.

Descripción	Marca	Características técnicas								
		Tipo	Vol. de Muestra	Presión máx. de trabajo Kg/cm <sup>2</sup> (psi)	Temp. máx. de operación	Servicio en H <sub>2</sub> S/CO <sub>2</sub>	Material de Const.	Largo (m)	Diám. Exterior mm (pulg)	Preserva Tem.
Single Phase Bottomhole Sampler (PS)	Exal	Desp. Positivo	600 cc	1054.6 (15 000)	176 °C	√	17-4Ph	5.18	42.85 (1.687)	NO
Single Phase Reservoir Sampler (SRS)	Oil Phase	Desp. Positivo	600 cc	1054.6 (15 000)	200 °C			4.14	44.45 (1.750)	NO
Multi-phase Bottomhole Sampler (operación electrónica, monoconductor, pueden durarse hasta 5 hts.)	Xact		700 cc	703.07 (10 000)	160 °C		Carbon Steel SS2541	7.7	42.92 (1.690)	NO
Sampler	Kuster		600 cc	114.13 (2 050)	175 °C		Acero Inox.	1.95	30.1 (1.500)	NO
Flow Through Sampler	Kuster		600 cc	703.07 (10 000)	232 °C		17-4 Ph	2.21	30.1 (1.500)	NO
Capture Disk Full-Flow Sampler	Halliburton		1 200 cc	1054.6 (15 000)		√		3.32	99.06 (3.90)	NO
Mini-sampler	Halliburton		400 cc	1054.6 (15 000)		√		1.68	31.75 (1.250)	NO
Mini-sampler (activada electrónicamente)	Halliburton		600 cc	1054.6 (15 000)		√		3.78	30.1 (1.500)	NO
Single Phase Subsurface Sampling Tool	Pencor	Desp. Positivo	600/700 cc	1054.6 (15 000)	176 °C	√				NO

Tabla 1.5. Herramientas de muestreo más comunes.

***Capítulo II***  
***Problemática***

## 2.1. Planteamiento del problema

En el capítulo anterior se presentó una serie de conceptos relacionados al problema de la toma de muestras y en especial al problema de la depositación de compuestos orgánicos que se manifiesta en todas las etapas de la producción de petróleo (Leontaritis, 1998). Esta depositación obstruye, según el caso, las tuberías de producción, transmisión, instalaciones superficiales de producción y los ductos de transporte. En otros casos la precipitación de parafinas y asfáltenos reduce la permeabilidad del yacimiento, y cuando ésta ocurre cerca del pozo produce daño a la formación y obstruye los orificios de los disparos. La precipitación de asfáltenos y parafinas se desencadena por varios factores, entre los que se puede mencionar (Kokal, et al, 1995): cambios de presión, temperatura, composición química del crudo, mezclas con diluyentes u otros aceites y durante la estimulación ácida.

Los métodos actuales para evitar las pérdidas de productividad de los pozos (caídas indeseables de presión) consisten en el diario monitoreo de la producción y en aplicar alguna de las técnicas de remoción de depositaciones cuando se llega a una producción mínima aceptable. En otras palabras, no existen aún técnicas para prever el fenómeno y combatirlo tempranamente.

El fenómeno de depositación de asfáltenos y parafinas no se ha caracterizado totalmente y aún quedan muchas incógnitas por resolver (Victorov, Firoozabadi, 1996). La caracterización inicial del comportamiento del crudo permite diseñar adecuadamente el aparejo de producción, así como las instalaciones superficiales, para todas las etapas de producción del pozo. Por lo tanto se requiere conocer de antemano qué fenómenos de depositación existirán en algún momento de la vida productiva del pozo, esto puede llevarse a cabo por el análisis de muestras de fluidos de yacimiento con las condiciones físicas más representativas del fluido original.

Las técnicas estándar para muestreo de fluidos en el fondo de los pozos, permiten obtener la muestra y llevarla a superficie a "volumen constante", variando la temperatura según el ambiente y la presión que depende de  $V$ , y  $T$ , varía lo necesario según la composición del fluido. En otras palabras y dado que el fenómeno de depositación es irreversible, no se pueden restituir las condiciones iniciales del fluido y por lo tanto es imposible estudiar este fenómeno. Existen otras técnicas donde se mantiene la presión ó el volumen, pero no la temperatura, las muestras son empleadas en análisis simples de composición y PVT.

Dadas las exigencias de obtener una muestra representativa del yacimiento, se ha planteado la necesidad de generar un desarrollo tecnológico que consiste en el diseño de una herramienta bajo el empleo de una metodología que permita crear un producto optimizado, que asegure su funcionalidad ante todos aquellos factores que intervienen en su operación. El Método de Diseño Robusto, puede ser empleado para la generación de esta tecnología, cuya principal característica será la de proporcionar un control en las condiciones de presión y temperatura del yacimiento, con la finalidad de mantener una muestra realmente representativa del yacimiento y poder realizar los estudios de investigación para la caracterización de fluidos así como de los fenómenos antes descritos.

## 2.2. Descripción general del sistema de muestreo propuesto

A diferencia de equipos comerciales, en los que el principio de operación se basa en preservar la presión de la muestra por encima de la presión de yacimiento mediante una carga de nitrógeno, sin mantener las condiciones de temperatura de yacimiento; el sistema base de esta trabajo, se fundamenta en el control de la presión de la muestra controlando la temperatura, utilizando una fuente de calor.

Es importante señalar que la importancia de controlar estos parámetros depende del tipo de análisis que se pretende realizar sobre la muestra de hidrocarburo. Un análisis convencional de la caracterización de hidrocarburos se realiza a través de un estudio de PVT, donde la presión y temperatura son variadas en laboratorio, para establecer el comportamiento del volumen, en este caso la muestra no necesita ser preservada en temperatura pero si en presión. Para un análisis especializado como lo es la investigación sobre el fenómeno de depositación de compuestos orgánicos sobre tuberías de producción es necesario controlar la temperatura y la presión, ya que como se ha mencionado, éstas obedecen a cambios termodinámicos donde P y T influyen ampliamente. El comportamiento de los hidrocarburos se ha establecido ampliamente en referencias bibliográficas, (William D. McCain, *"The Properties of Petroleum Fluids"*) que indican que en el equilibrio de fase la presión, composición del hidrocarburo y la temperatura, toman un papel importante.

El sistema completo para el muestreo de hidrocarburos está integrado por dos bloques, uno denominado de fondo y otro de superficie, ambos están conectados por un cable monoconductor, como lo muestra la figura 2.1.

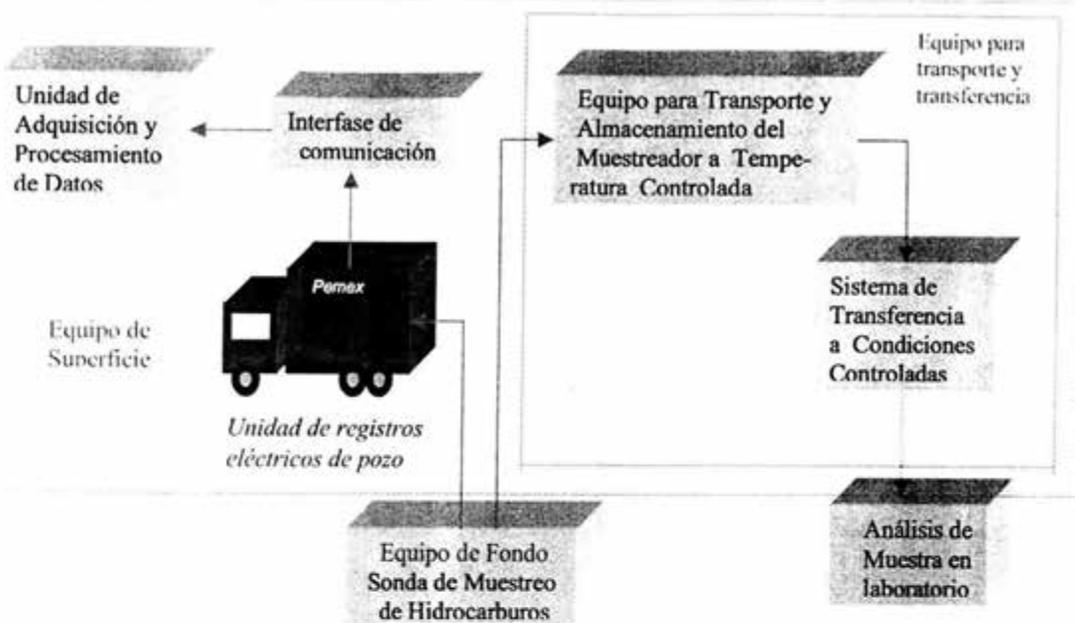


Figura 2.1. Diagrama a bloques del sistema de muestreo de hidrocarburos

El primer bloque, equipo de superficie está integrado por los siguientes elementos:

- Unidad de adquisición y procesamiento de datos (UAPD)
- Programas de cómputo para operación de la herramienta
- Electrónica de control contenida en la UAPD
- Fuente de alimentación con rango de 300 a 900 V y una corriente máxima de 2A
- Interfase de comunicación con equipo de fondo
- Equipo para transporte y transferencia
- Módulo de baterías
- Unidad alternativa de energía
- Estabilizador de temperatura
- Contenedores con control de P y T

El equipo de fondo está integrado por una herramienta para muestreo de hidrocarburos, formado por las siguientes secciones:

- Módulo de amortiguador

- Contenedor
- Módulo de control electrónico
- Módulo de sensores
- Detector de coples (CCL)

Como se puede apreciar en la figura 2.1., el equipo de superficie se instala en un camión de registros con un malacate incluido donde se instala un cable monoconductor de 4 mm (5/32") de diámetro, que actúa como interfase entre el equipo de fondo (herramienta de muestreo) y el equipo de superficie.

La herramienta de muestreo o equipo de fondo, consiste de un equipo con medidores de presión, temperatura, cámaras para obtención y alojamiento de la muestra, dispositivos de amortiguación, válvulas e instrumentos para detectar coples, electrónica de fondo, sistemas de aislamiento térmico, los cuales se han diseñado en una primera etapa para operar en presencia de  $H_2S$  y  $CO_2$  a temperaturas y presiones de  $150^{\circ}C$  y 10 000 PSI respectivamente. La cámara de admisión cuenta con una capacidad de 300 ml y lleva una resistencia eléctrica que suministra la energía calorífica necesaria para mantener la muestra a la temperatura de yacimiento, toda vez que ésta se mantiene conectada a una fuente de energía externa. La figura 2.2. muestra el diagrama general de la relación entre cada uno de estos elementos.

El sistema en su conjunto cuenta con una computadora personal, unidad de adquisición de información, que contiene programas de cómputo para la adquisición, control y manejo de información que permiten tener mediciones en tiempo real de los parámetros de fondo del pozo.

En la superficie, después de extraer la herramienta del pozo, la sección que contiene la muestra de hidrocarburos puede ser introducida a un estabilizador de temperatura, donde se mantendrá el control de la temperatura. Posteriormente, ya sea en un laboratorio o en campo, se procederá a realizar la transferencia de la muestra de hidrocarburo de la cámara de muestreo a un contenedor especial, que controle las mismas condiciones. La transferencia se llevará a cabo de manera intermitente.

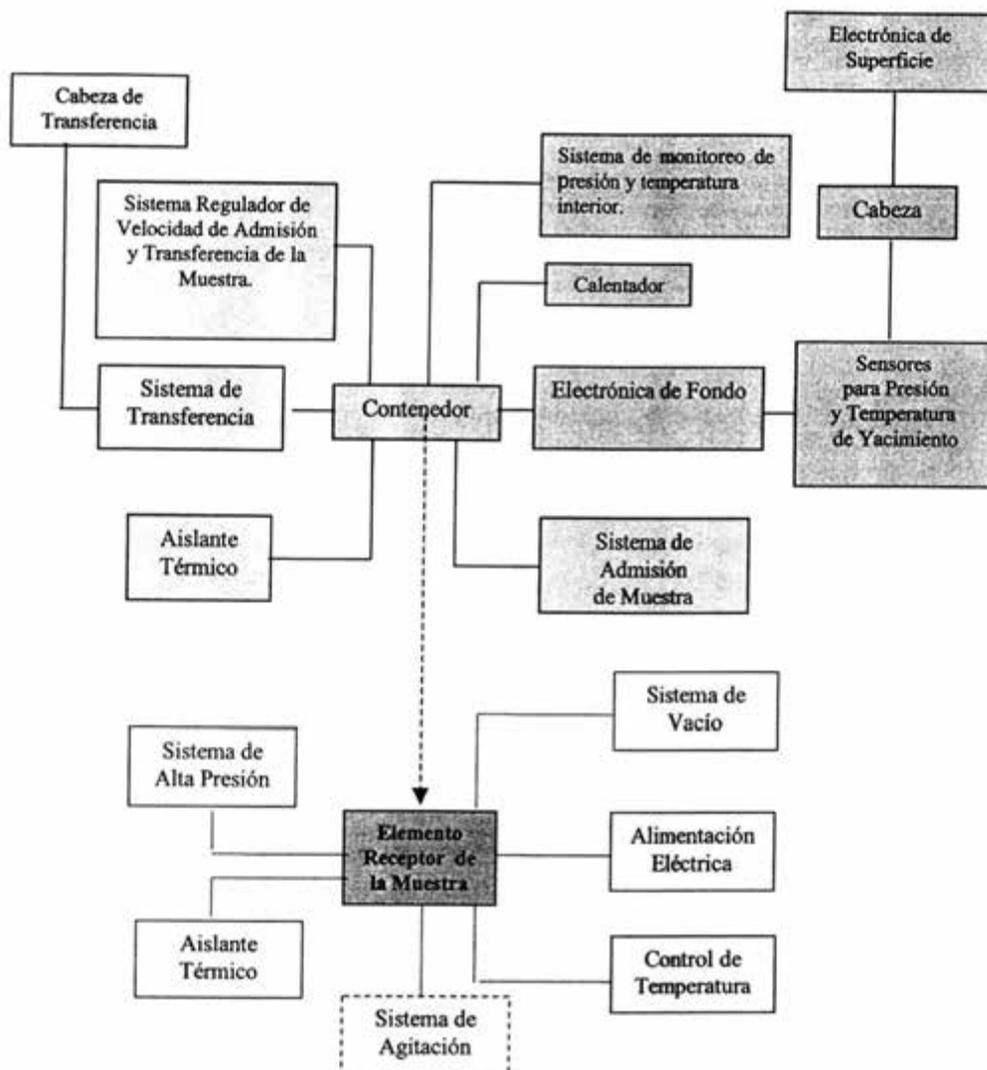


Figura 2.2. Diagrama general del sistema de muestreo de hidrocarburos y su interrelación con los mecanismos de transferencia.

En este diseño no se utiliza mercurio como fluido de desplazamiento, la transferencia se realiza mediante el empleo de sistemas de bombeo a presión que mantienen constantes en todo momento la presión interna de la muestra.

En el proceso de transporte, se considera que la energía eléctrica necesaria para mantener la temperatura a un cierto nivel de forma constante, debe de ser suministrada por una fuente de energía externa, de otra forma la herramienta podrá ser conectada a un módulo de baterías auxiliar, en el caso en que se realicen maniobras como cambios de unidad de transporte. Durante todo el proceso de transporte se llevará un registro de los parámetros de presión y temperatura de la muestra, lo que va a permitir asegurar su originalidad.

### 2.3. Establecimiento de la hipótesis

A diferencia de equipos comerciales, en los que el principio de operación es preservar la presión de la muestra de hidrocarburos por arriba de la presión de yacimiento mediante una carga de nitrógeno, el sistema motivo de esta propuesta, se basa en el empleo de una fuente de energía calorífica para mantener la muestra a una temperatura de yacimiento de forma constante, desde que ésta fue atrapada en el yacimiento. Así como también, la muestra será alojada herméticamente en una cámara contenedora, asegurando que no ocurran variaciones de presión que provoquen cambios de fase durante el proceso de toma de muestra, transporte y transferencia.

#### *Hipótesis*

- 1. Es posible desarrollar un sistema electromecánico para toma de muestras de hidrocarburos en el fondo de los pozos y llevarlo a la superficie manteniendo las condiciones de presión y temperatura con un mínimo de variación, esta herramienta podrá ser empleada como un elemento necesario en el estudio de los fenómenos asociados en la depositación de compuestos orgánicos (parafinas y asfáltenos) en tuberías de producción.*
- 2. El método Taguchi puede ser utilizado para el desarrollo de aquellos sistemas pertenecientes a la herramienta de muestreo, que requieran ser robustos, es decir que sean poco sensibles a los factores del ambiente de operación que afectan al funcionamiento de la herramienta, para poder modelar la respuesta de la herramienta y predecir su comportamiento.*

### 2.4. Objetivos del proyecto

- Generar tecnología mediante la aplicación del método de diseño robusto que cubra las necesidades de contar con una herramienta para muestreo de hidrocarburos*

*que preserve la presión y temperatura del yacimiento, con la finalidad de ofrecer la posibilidad de tener muestras reales de hidrocarburos para el estudio de fenómenos de depositación de compuestos orgánicos.*

- *Caracterización experimental de aquellos sistemas importantes que forman parte de la herramienta y con los cuales se asegura la calidad de la muestra, verificando que éstos sean mínimamente sensible a aquellos factores que afectan su desempeño.*

## 2.5. Alcances

Como resultado de la investigación, se presentarán las bases de un diseño optimizado para la construcción de una herramienta para toma de muestras que preserve la presión y la temperatura del yacimiento, así como la caracterización de un prototipo que permita validar el desarrollo de la investigación

Se investigarán y caracterizarán los fenómenos que se encuentran relacionados con la toma de muestras de hidrocarburos de las diferentes regiones del país, con objeto de optimizar los sistemas de admisión de la muestra a la cámara de almacenamiento de la herramienta.

## 2.6. Porque utilizar el Método Taguchi

Investigadores en el campo relacionado a la calidad, la productividad, administración estratégica de costos y reingeniería, han reportado el uso de metodologías para lograr mejoras en diversos tipos de productos (Kevin N. Otto, 1991; Sangwoo et al., 2003; Kai Yang and Hogwei Zhang, 2000). Métodos como QFD; “*Quality Function Deployment*”, que llegó a Norte América en 1984 (Aguayo G. Fco, 2000), TRIZ; “*Theory of Inventive Problem Solving*”, que arribó en 1991 (Prakash R. Apte, 1999), Diseño Axiomático, que apareció alrededor de 1990 (<http://voodooengineering.home.comcast.nt>) y DOE; “*Design of Experiments*”, fundamentado en el uso de métodos estadísticos desde 1933 (Montgomery Douglas, 1991); han sido utilizados en la actualidad para la solución de problemas relacionados con el diseño del producto.

El esfuerzo de los investigadores e ingenieros en la mayoría de las ocasiones se consume en la conducción de experimentos con el objeto de generar la información necesaria que pueda guiar a la toma de decisiones. La eficiencia para el desarrollo de ésta actividad es la clave para abrir la

ventana al mercado, manteniendo los costos de desarrollo y manufactura a un nivel bajo y proporcionando alta calidad en los productos.

Una herramienta muy útil en el desarrollo de éstas actividades es el diseño a través del método Taguchi o Diseño Robusto, que consiste en una metodología de la ingeniería para la mejora de la productividad durante la investigación y el desarrollo de productos. Esta metodología puede ser combinada con las técnicas mencionadas con anterioridad para enriquecer el contexto del método y proporcionar productos de alta calidad que pueden ser producidos rápidamente a bajo costo. (Madhav S. Padke, 1989)

A continuación se proporciona una breve descripción de cada metodología con la finalidad de ubicar cada una de las técnicas con el método de diseño robusto.

### 2.6.1. El método QFD

El concepto de *Quality Function Deployment*, QFD, fue introducido en Japon por Yoji Akao en 1966. Fue traducido al Ingles hasta 1994 (Mizuno and Akao, 1994), QFD es un método para desarrollar un diseño con el propósito de satisfacer al comprador traduciendo las demandas de éste en metas de diseño para mejorar la calidad asegurándola en diversos puntos a través de la fase del diseño y manufactura (V. Guedez, et al, 2001).

El método QFD, necesita desarrollar una matriz para mostrar su funcionalidad. Esto es muy útil cuando el número de parámetros es muy alto y los aspectos de diseño son todos diferentes. La matriz contiene entradas que son los requerimientos del usuario y son tomadas como parámetros de diseño. La lista de los requerimientos del cliente, reciben el nombre de ¿qué es lo que quiere?. No todos los requerimientos son igualmente importantes, tienen un valor numérico que indica la importancia con respecto a otros requerimientos, se utiliza una escala del 1 al 5, para dar prioridad e importancia. QFD utiliza una segunda matriz para especificar ¿cómo?, que representa la manera en que es posible responder a la matriz de lo ¿qué es lo que quiere?; cada cuestión debe ser respondida específicamente por un ¿cómo?. En algunos casos es necesario desarrollar una función de calidad para asegurar que los objetivos se están cumpliendo.

Una matriz más, presenta la correlación entre lo que se quiere y lo que se ofrece como respuesta.

Una cuarta matriz presenta el análisis del comprador, que muestra el impacto de los requerimientos, mostrando los más importantes. El proceso de presentar soluciones a los requerimientos, es apoyado por una lluvia de ideas, con las que se generan las alternativas de solución a los requerimientos del cliente. (V. Guedez, et al.,2001)

### 2.6.2. El método TRIZ

TRIZ es un acrónimo Ruso que significa "*Theory of Inventive Problem Solving*". Fue generada desde 1946 por Genrich Altshuller cuando trabajaba en una oficina de patentes. Esta metodología llego a América en 1991. Cuando Genrich Altshuller completó su investigación en el mundo de las patentes basado en lo que él identificó las cuatro claves del saber.

- 1.- *Existen 5 niveles de invención*
- 2.- *Los problemas inventivos contienen al menos una contradicción ( conflictos en los requerimientos)*
- 3.- *Existen patrones estándar de evolución*
- 4.- *El mismo principio es utilizado en muchos diseños inventivos y pueden ser empleados como patrones de solución.*

Estudios exhaustivos de las patentes en el mundo revelaron que los mismos principios han sido utilizados en soluciones innovadoras a problemas en diferentes industrias, algunas veces con muchos años entre cada una de las aplicaciones. El acceso a esta información es una de las contribuciones de TRIZ. Este estudio fue continuado, por Altshuller y su disciplina, por más de 50 años proporcionando un método sistemático a la definición e identificación de problemas de innovación, así como una herramienta para resolver problemas y una basta base de datos de conocimiento, que puede ayudar a resolver desde los problemas técnicos mas sencillos con una alternativa innovadora. Esta técnica se presenta en un software con una base de datos de más de 2 500 000 patentes.

Altshuller definió 39 propiedades básicas y 40 principios para resolver problemas conteniendo contradicciones en al menos dos de las 39 propiedades. Esto se presentó en la forma de una tabla de contradicciones de 39 x 39, en la que cada celda daba mas de 4 principios los cuales deben ser utilizado para eliminar la contradicción.

Altshuller también dejo los fundamentos para desarrollar un método para resolver problemas de invención con el axioma "La evolución de toda sistema técnico es gobernado por leyes objetivas".

Las mejoras de alguna parte del sistema que ha logrado un alto nivel de desempeño **va** a dejar conflicto con alguna otra parte del sistema. Esto **va** a permitir eventualmente mejoras **en** menos partes. Continuando sustancialmente el proceso **va** a llevar al sistema lo más cercano **al** estado ideal (Prakash R. Apte, 2000)

Utilizando la metodología TRIZ, es posible generar conceptos para reducir los efectos **negativos** y mejorar el desempeño de diseños existentes, TRIZ incluye cuatro herramientas analíticas usadas para estructurar el problema de innovación y seis herramientas del conocimientos base usadas para marcar las direcciones del concepto de solución. (Terninko J., 1997)

### 2.6.3. El método de Diseño Axiomático

Este método tiene como objetivo conducir el proceso de diseño y desarrollo de producto que se integra mediante QFD, evitando el acoplamiento funcional y reduciendo la complejidad del producto y proceso de fabricación; tomado, por lo tanto, las decisiones correctas para **obtener** un diseño que satisfaga los requerimientos funcionales bajo los axiomas de independencia funcional y mínima información.

El resultado del proceso de diseño axiomático es la creación de sistemas que **verifiquen** sus axiomas y teoremas. Formalmente el concepto de sistemas, objeto del diseño axiomático, puede describirse por una terna:  $SI = \langle C, E, S \rangle$ ; donde C es un conjunto que representa su comparación, S representa su estructura y E constituye su entorno con el que se encuentra en interacción.

Los distintos elementos del sistema constituyen su composición C, estas partes son **definidas** por sus propiedades o atributos, que suelen ser caracterizadas por una magnitud, un nivel y una tolerancia. Estas partes, mediante el proceso de síntesis, se asocian entre sí en **atención** a sus atributos, conforme a un esquema holístico preliminar, de todo lo cual deriva una **interacción** dinámica entre ellas y con el entorno E, que puede ser descrita por modelos matemáticos que relacionan la magnitudes correspondientes. Esto queda recogido en la estructura S del **sistema**, y serán los resultados de esta fase de análisis matemático los que aportarán **información** para validar el esquema sintético preliminar de diseño, así como para proceder a generar **un** nuevo esquema sintético o reformar el propuesto como preliminar, en base al cumplimiento de los requerimientos funcionales bajo los axiomas correspondientes.

Un aspecto de interés, de cara a la resolución de problemas actuales, es el conocimiento de las propiedades de los sistemas para instrumentarlo en la búsqueda eficiente de soluciones, entre las que cabe mencionar:

- *Ser parcialmente descomponibles*
- *Ser gerarquizables*
- *Interacción entre subsistemas, partes y de estos con el medio externo*
- *Subsidiariedad*
- *Comportamiento determinístico, probabilístico o caótico*
- *Estabilidad*
- *Eficiencia*
- *Sinergia y emergencia de nuevas propiedades*
- *Integración jerárquica*

En el enfoque de diseño axiomático se distinguen cuatro dominios para las distintas etapas o fases del diseño:

- 1.- Dominio del cliente. Está constituido por la expresión de las expectativas y deseos de los clientes o del mercado,  $NC_s$ .
- 2.- Dominio Funcional. En este dominio las necesidades del cliente se especifican como un conjunto de requerimientos Funcionales,  $RF_s$ .
- 3.- Dominio Físico. En este dominio se satisfacen los  $RF_s$  mediante parámetros de diseño  $PD_s$ , que constituyen una alternativa de síntesis desde un dominio tecnológico.
- 4.- Dominio del proceso. En este dominio se obtiene un diseño a los  $PD_s$  del dominio físico mediante un proceso caracterizado por variables del proceso  $VP_s$ .

El proceso de diseño consiste en un mapeo sucesivo entre los distintos dominios, que será conducido bajo dos axiomas generales: de independencia e información, así como un conjunto de teoremas y axiomas complementarios. En el caso de existir varios diseños que satisfagan al axioma de independencia se usará el axioma de información para seleccionar el mejor diseño.

Por lo tanto el postulado básico de éste método de diseño es que existe un conjunto de axiomas y teoremas que gobiernan el proceso de diseño. (Aguayo G. Fco., 2000; Matthew Hu et al, 2000 )

#### 2.6.4. El Diseño de Experimentos

Ronald A. Fisher fue el innovador del uso de los métodos estadísticos en el diseño de experimentos. Fisher fue quien desarrolló y usó por primera vez el análisis de la varianza como herramienta primaria para el análisis estadístico en el diseño experimental.

Muchas de las aplicaciones de los métodos del diseño experimental se dieron en el área de la agricultura y ciencias biológicas. Como resultado de ello, gran parte de la terminología proviene de estos antecedentes agrícolas. Las primeras aplicaciones del diseño experimental se dieron en la década de 1930, en las industrias textil y de la lana británicas. Después de la Segunda Guerra Mundial, los métodos del diseño experimental se introdujeron en las industrias químicas y de transformación de estados Unidos y Europa. Estos grupos industriales son todavía áreas muy fértiles para el uso del diseño experimental en el desarrollo de productos y procesos.

Gran parte de la investigación en el campo de la ingeniería, ciencia e industria es empírica y emplea en forma extensiva la experimentación. Los métodos estadísticos pueden incrementar grandemente la eficiencia de estos experimentos y, a menudo, reforzar las conclusiones obtenidas.

El proceso de experimentación es virtualmente realizado por los investigadores en todos los campos del saber, por lo general para descubrir algo acerca de un proceso o sistema en particular. Literalmente, un experimento es una prueba o ensayo. Un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida.

Suele ser posible visualizar el proceso como una combinación de máquinas, métodos, personas y otros recursos que transforman alguna entrada (a menudo un material) en una salida que tiene una o más respuestas observables. Algunas de las variables del proceso  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$  son controlables, mientras que otras  $z_1, z_2, z_3, \dots, z_p$  son incontrolables (aunque pueden ser controlables para los fines de una prueba). Entre los objetivos del experimento pueden incluirse:

1. Determinar cuales variables tienen mayor influencia en las respuesta,  $y$ .
2. Determinar el mejor valor de las  $x$  que influyen en  $y$ , de modo que  $y$  tenga casi siempre un valor cercano al valor nominal deseado.
3. Determinar el mejor valor de las  $x$  que influyen en  $y$ , de modo que la variabilidad de  $y$  sea pequeña.
4. Determinar el mejor valor de las  $x$  que influyen en  $y$ , de modo que se minimicen los efectos de las variables incontrolables  $z_1, z_2, z_3, \dots, z_p$ .

Los métodos de diseño experimental tienen un cometido importante en el desarrollo de procesos y en la depuración de procesos para mejorar el rendimiento. En muchos casos, el objetivo puede

ser desarrollar un proceso consistente o robusto, esto es: un proceso afectado mínimamente por fuentes de variabilidad externas (las  $z$ ).

Los métodos de diseño experimental tienen amplia aplicación en muchas disciplinas. En efecto es posible considerar a la experimentación parte del proceso científico y una de las formas en que aprendemos acerca de la forma en que funcionan los sistemas o procesos. Por lo general este aprendizaje se da a través de una serie de actividades en las cuales hacemos conjeturas acerca de un proceso, realizamos experimentos para generar datos a partir del proceso, y entonces usamos la información del experimento para establecer nuevas conjeturas, que llevan a realizar nuevos experimentos y así sucesivamente.

La aplicación de técnicas de diseño de experimental en una fase temprana del desarrollo de un proceso puede dar por resultado la mejora en el rendimiento del proceso, una menor variabilidad y mayor apego a los requerimientos nominales u objeto, así como menor tiempo de desarrollo y menores costos globales.

Los métodos de diseño experimental también tienen un cometido importante en las actividades de diseño técnico ( o diseño de ingeniería), en las cuales se desarrollan nuevos productos y se mejoran otros ya existentes. Algunas aplicaciones del diseño experimental en el diseño técnico son:

- 1.- Evaluación y comparación de configuraciones de diseño básicas.
- 2.- Evaluación de materiales alternativos.
- 3.- Selección de parámetros de diseño de modo que el producto funcione bien en una amplia variedad de condiciones de campo; esto es de modo que el producto sea consistente (robusto)

El diseño estadístico de experimentos es el proceso de planear un experimento para obtener datos apropiados, que pueden ser analizados mediante métodos estadísticos, con objeto de producir conclusiones válidas y objetivas. Se requiere de un enfoque estadístico del diseño de experimentos para obtener conclusiones significativas a partir de los datos. La metodología estadística es el único enfoque objetivo para analizar un problema que involucren datos sujetos a errores experimentales. Así que hay dos aspectos en cualquier problema experimental: el diseño del experimento y el análisis estadístico de los datos.

Los tres principios básicos en el diseño de experimentos son el de obtención de réplicas, aleatorización y análisis por bloques.

Para usar un enfoque estadístico al diseñar y analizar un experimento se requiere que todos los participantes en él tengan de antemano una idea clara de qué se va a estudiar, cómo se van a recopilar los datos y, al menos, una idea cualitativa de cómo se van a analizar, a continuación se presenta una guía del procedimiento: (Montgomery Douglas C, 1991; <http://www.udc.es>)

1. *Composición y planteamiento del problema*
2. *Elección de factores y niveles*
3. *Selección de la variable de respuesta*
4. *Elección del diseño experimental*
5. *Realización del experimento*
6. *Análisis de datos*
7. *Conclusiones y recomendaciones*

### **2.6.5. Relación entre diferentes metodologías con el método Taguchi**

#### ***Diseño de experimentos y Diseño Robusto***

Se ha confundido varias veces con la premisa de que el método Taguchi es un método experimental similar al método factorial (diseño de experimentos), sin embargo éste último hace que los experimentos sean muy complejos, tomando en cuenta que el número de combinaciones dependen del número de factores y sus niveles. El método Taguchi toma solo una sección de éste método, proponiendo la distribución ortogonal para la realización de experimentos, en donde cada nivel del factor tiene el mismo número de corridas dentro de la distribución de tal forma que existe un balance en el experimento, proporcionando a los factores el mismo peso. Además de que el diseño robusto utiliza conocimientos de ingeniería en la planeación experimental enfocados hacia el cumplimiento de los objetivos. Una de las formas tradicional en que se utiliza el diseño de experimentos es estudiar los factores uno a uno, esto es, variar los niveles de un factor permaneciendo fijos los demás. Esta metodología presenta grandes inconvenientes (<http://www.udc.es>):

- Es necesario un gran número de pruebas
- Las condiciones obtenidas en el estudio de cada factor tiene un campo de validez muy restringido
- No es posible estudiar la existencia de interacciones entre los factores
- Es inviable, en muchos caso, por los problemas de tiempo y de costo.

El tema de discusión entre el diseño de experimentos y la metodología de Diseño Robusto ha sido tratada con regularidad. Esto es muy malo, debido a que la meta debe ser lograr un diseño robusto independientemente del método que se utilice. Sin embargo, existen datos sustantivos de eficiencia experimental y diseño por aditividad que representa aportación real entre los dos campos. En este trabajo se utiliza el método Taguchi porque resulta ser efectivo, utilizando conocimientos de ingeniería en la planeación de experimentos y se enfoca a soluciones según los objetivos o metas. El método matemático de diseño de experimentos (DOE) está muy apegado a estadística pura del diseño experimental y a las correcciones del modelo que representa los resultados que con la solución de ingeniería. La idea detrás de esta metodología es que con un entendimiento científico, incluyendo una rigurosa comprensión de la validación de las conclusiones de DOE, la solución en el aspecto de la ingeniería resulta ser aparente.

Los ingenieros e investigadores requieren diferentes herramientas. El método científico es utilizado para analizar, razonar y determinar las reglas que sigue el fenómeno. Este es un precursor importante para utilizar el método Taguchi para Diseño Robusto. La técnica de Taguchi, sin embargo es más eficiente para la optimización y caracterización de la calidad del diseño. El método del Dr. Taguchi es un proceso de comercialización. El método clásico de DOE es un proceso de Conocer para construir.

Un objetivo importante es que los ingenieros actualmente completan el experimento de optimización, incluyendo la verificación del óptimo diseño. El método Taguchi es reconocido por esta característica en la práctica de los ingenieros. Es muy conocido que la probabilidad de que los ingenieros actualmente usen una matriz de experimentos, completando y aplicando los resultados, es mucho más alta con el método Taguchi que con el clásico DOE.

La selección de la característica de calidad es absolutamente esencial para un eficiente diseño de experimentos. Como se relaciona la respuesta a la función fundamental del sistema que se estudia debe afectar a la forma en que el experimento es diseñado y analizado. Esta es una de las razones por la que el Dr. Taguchi considera el método como una base de ingeniería más allá que una base estadística. La relación de ruido (S/N) actúa como un excelente recopilador estadístico para la interacción entre la respuesta de los factores de ruido y de control. Esta es una satisfacción para los practicantes de ingeniería y es consistente con el análisis del diagrama P. (William Y. Folkes, 1995; Henrique Sestren M, 2001)

## QFD y el Diseño Robusto

De igual forma el método QFD (Quality Function Deployment) puede ser un procedimiento útil en la generación del concepto de diseño que Taguchi necesita para pasar al proceso del diseño de parámetros.

El Diseño Robusto es practicado efectivamente en coordinación con la aplicación del QFD. La siguiente descripción identifican las fases en las que QFD y las actividades del diseño Robusto deben de ser practicadas, según William Y. Folkes (1995).

John Terninko, considera que el método Taguchi y Triz, pueden ser empleados para ayudar en el desarrollo de QFD, a través de cinco pasos. (Terninko John, 1997), sin embargo William Y. Folkes (1995), menciona que el Diseño Robusto es practicado efectivamente en coordinación con la aplicación de QFD para la administración del proyecto. Las fases de QFD que se identifican con el Diseño Robusto son las siguientes:

1. La casa de la calidad ( la vos de comprador vs el sistema total esperado), aquí la clave del diseño es la medida observable de los atributos que el cliente demanda, tales como la calidad del producto, emisiones al medio ambiente, etc. Los productos son puestos en un *Benchmarked* como un sistema utilizando los factores de ruido que afectan al sistema de interés. Los limites funcionales del comprador deben de ser determinados en esta etapa.
2. El sistema total de la matriz de diseño ( sistema esperado vs subsistema esperado). Aquí la clave del diseño es la medida de la función ideal utilizando subsistemas como característica de calidad. El subsistema es probado utilizando factores de ruido para inducir variabilidad. En suma, la habilidad del subsistema de interés para afectar otros subsistemas, es notado en la matriz. La proximidad de los factores es utilizada para intentar detectar la interacción de los subsistemas.
3. El diseño de la matriz del subsistema (subsistema esperado vs componentes esperados). El resultado del experimento de la optimización de parámetros es utilizado para especificar los componentes de los parámetros. En suma, la medida de los índices de capacidad , pueden ser aplicados a parámetros de la función crítica. Las tolerancias de diseño son realizadas utilizando la función de pérdida y la medida de la variabilidad de los componentes es determinada utilizando factores de ruido.
4. El componente del diseño de la matriz (componentes esperados vs requerimientos del proceso de producción). Aquí el diseño robusto permite procesos de manufactura a bajo costo cuando es posible. Donde necesariamente, el diseño robusto es aplicado para optimizar el

proceso de manufactura. Los procesos de manufactura más caros son aplicados selectivamente como una justificación a la calidad perdida contra el costo de negocio.

### ***Diseño Robusto , TRIZ y Diseño Axiomático***

El propósito de la comparación es remarcar la fuerza y el enfoque de diferentes disciplinas contemporáneas tales como el Diseño Axiomático (Shu), el Diseño Robusto (Taguchi) y Triz (Altshuller).

Un producto puede ser dividido en operaciones funcionalmente orientadas de un producto. La función es la palabra clave y básica necesaria para describir los productos y su desempeño. Haciendo caso omiso de cuál es el método que va a ser utilizado para facilitar el diseño, es necesario empezar con el entendimiento de la función. Entendiendo el concepto de función, cada una de éstas disciplinas podría ayudar a tomar ventaja de las herramientas que mejoran la eficiencia del diseño y su efectividad.

De acuerdo con el diccionario, la función tiene tres explicaciones básicas:

- a.- Los actos o las operaciones esperadas de una persona o cosa
- b.- La acción para la cual una persona o cosa es especialmente fijada o utilizada, ó
- c.- Operar en la manera propia o esperada

Generalmente, la gente está de acuerdo con lo que la función describe, que significa en términos muy generales como lo que hace una cosa y que puede ser expresada como la combinación de un sustantivo y un adverbio. Por ejemplo, crear un sello, enviar un mail, etc.

En el Diseño Axiomático, la función es definida como la salida deseada, que es lo mismo que la definición original. Sin embargo la importancia de un requerimiento funcional no es identificada en el contexto del diseño axiomático. No existe una guía o criterio para la descomposición del requerimiento funcional. Los requerimientos funcionales son tratados con igual importancia como si no fueran prácticamente necesarios o factibles.

En el Diseño Robusto, la definición de función tiene el mismo significado general pero con un significado más amplio en términos de la función ideal, la cuál esta contemplada de acuerdo a que cosas fundamentales de un sistema es supuestamente conocido el como la energía se transforma suavemente. Por ejemplo: ¿cómo puede ser formado un sello efectivamente ?. Lo que es la función básica de la ingeniería de sellado. Por lo tanto, la definición de función en Diseño Robusto debe de ser definida como una energía de transformación.

En la metodología TRIZ, la definición de función también tiene el mismo significado general con pensamientos negativos en términos de contradicciones físicas. Altshuller buscó entregar todos las funciones del sistema simultáneamente maximizando los recursos existentes. La siguiente tabla muestra la comparación entre éstos tres métodos, según Matthew Hu (2000):

Método	Axioma de Independencia	Axioma de Información
Diseño Axiomático	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mantiene la independencia de los requerimientos funcionales</li> </ul>	Minimiza la información
TRIZ	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eliminación de técnicas o contradicciones físicas (manteniendo la independencia de los parámetros)</li> </ul>	Concepto ideal
Diseño Robusto	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identificando la función ideal</li> <li>Selecciona el sistema propio de la característica de salida y los factores de control para promover la aditividad y los efectos de los parámetros.</li> </ul>	Maximiza la relación de la señal de ruido (S/N ratio)

Tabla 2.1. Comparación utilizando Diseño Axiomático

Método	Función	Es mejor aplicarse a:	A través del proceso:	Enfatiza:
Diseño Axiomático	Salida Deseada	Estructura del sistema y fundación en el diseño conceptual	Pensamiento positivo. Cómo un diseño puede ser creado perfectamente. Cómo un diseño es inmune.	Proyección de Requerimientos. Funcionales para Diseñar requerimientos
TRIZ	Función Básica	Estructura del sistema y fundación en el diseño conceptual	Pensamiento negativo. Inicia con conflicto o contradicciones. Como una contradicción puede ser resuelta.	Ataca las Contradicciones. Comienza con el diseño de parámetros, luego regresa a los requerimientos funcionales
Diseño Robusto	Energía de Transformación	Dando optimización de tecnología ó dando estructuras ó conceptos de diseño en la optimización.	Dentro de una estructura ó diseño, cómo un sistema de ingeniería puede ser optimizado para sensibilizar los amplios efectos de las condiciones incontrolables	Aplicación efectiva de estrategias de ingeniería. Identificando la función ideal (relación ideal). Comienza con un sistema propio de respuestas de salida, entonces maximiza la función del Sistema.

Tabla 2.2. Comparación entre Diseño Axiomático, Triz y Diseño Robusto

Método	Fortaleza	Debilidad
<b>Diseño Axiomático</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Proporciona una buena fundación para el sistema (concepto de diseño)</li> <li>▪ Diseña axiomas como una referencia fuerte</li> <li>▪ Dominios bien definidos</li> <li>▪ Modelo cuantitativo para diseño acoplado y desacoplado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Los atributos del cliente son vagos</li> <li>▪ El contenido de la información es difícil de aplicar</li> </ul>
<b>TRIZ</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Conflicto en los dominios, contradicciones físicas y la eliminación de las metas de los requerimientos funcionales y el diseño de parámetros más precisamente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dificultad para trabajar en sistemas largos y complicados</li> <li>▪ No hay proceso en los atributos del cliente</li> </ul>
<b>Diseño Robusto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mejora la robustez de tecnología básica</li> <li>▪ Más profundidad en el entendimiento de la tecnología dada o del comportamiento del sistema funcional</li> <li>▪ El dominio se encuentra dentro de los parámetros de diseño, el efecto de los factores de ruido o incontrolables puede ser desensibilizado a través de la optimización de los niveles de control</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No se procesa sobre el diseño del sistema</li> <li>▪ Limita el concepto de diseño dado</li> <li>▪ Es un método considerado como un caja negra</li> </ul>

Tabla 2.3. Resumen de fortalezas y debilidades entre el Diseño Axiomático, el método TRIZ y el Diseño Robusto.

Como se pudo observar, el Método de Diseño Robusto puede ser complementado a fortalecido por otras metodologías que hacen le dan al método un esquema más estructurado. Además se puede deducir que el Método Taguchi cuenta con herramientas que permiten diseñar el producto o proceso con un enfoque de ingeniería, tomando en consideración la calidad a través del proceso de diseño.

Tomando en consideración el estudio antes descrito, el desarrollo de esta investigación será bajo los principios teóricos del Método Taguchi, dado que es una técnica experimental poderosa, para obtener información de aquellos parámetros que influyen en el desempeño del equipo o producto y que se apoya en otras técnicas para el análisis de los factores, así como en el método QFD para el estudio de la generación de ideas, siendo también mucho más corto en la realización de experimentos en comparación con otros métodos experimentales como el método factorial (DOE). El Método Taguchi se describirá posteriormente, sin embargo podemos apreciar de forma general que el "Diseño Robusto", es empleado en el rediseño de productos y se basa en la detección de parámetros que afectan el desempeño, éstos son clasificados como factores de ruido y factores de control, ambos son empleados para construir una matriz de experimentos que llevará a una optimización de los factores previamente el análisis de los datos resultado de los experimentos. El Diseño Robusto es una metodología de la ingeniería para aumentar la productividad durante la investigación y el desarrollo, generando productos de alta calidad que pueden ser fabricados rápidamente a un bajo costo (Genichi Taguchi et al, 1999).

El principio fundamental de esta metodología es incrementar la calidad de un producto minimizando los efectos y las causas que disminuyen la calidad de un producto o proceso, esto es eliminando precisamente las causas; logrando este objetivo con la optimización del producto a través del proceso de diseño, logrando que su funcionamiento sea mínimamente sensible a las causas que disminuyen su calidad. Este parámetro es definido como "*parámetro de diseño*".

En el método de diseño robusto, se establece que el aumento de la calidad de un producto puede ser obtenido con el control de aquellos factores que causan su variación. El diseño Robusto sirve como un amplificador, el cual es capaz de generar la ingeniería necesaria para tomar decisiones reduciendo a la mitad los esfuerzos, sin embargo existen dos tareas importantes en esta metodología:

- Medir la calidad durante el diseño y/o desarrollo, esto es identificar los indicadores que afectan la calidad con los cuales se evalúan los efectos de su comportamiento y son empleados como parámetros en el diseño.
- Realizar experimentos eficientes para encontrar información dependiente de los parámetros de diseño, esto es un punto importante, el obtener información que depende de los parámetros de diseño a tal grado que el diseño puede cambiar durante la manufactura. También, la información debe obtenerse en un mínimo de tiempo y recursos.

Los efectos estimados de los parámetros de diseño deben ser validados siempre y cuando otros parámetros cambien durante el subsecuente esfuerzo de diseño o cuando el diseño se relaciona con cambios de subsistemas, en este caso se emplea una herramienta más, denominada "*relación de señal de ruido*", que mide la calidad, realizando lo que se le llama una "*distribución ortogonal*" que es simplemente la elaboración de una matriz de experimentos utilizada para estudiar parámetros de diseño simultáneamente.

En general la metodología del diseño robusto está concentrada en los siguientes puntos:

- *Relación entre señales denominadas de ruido, ambiente, salida, que miden la calidad de la operación del equipo.*
- *Diseño de experimentos con arreglos ortogonales*
- *Uso de análisis estadísticos para la definición de mejoras y predicción del rendimiento*
- *Verificación experimental*

## 2.7. Especificaciones requeridas

Según las necesidades y características de los pozos petroleros en el país, es necesario que la herramienta cuente con las siguientes características técnicas:

Temperatura máxima de operación	150 °C
Presión máxima de operación	10 000 psi (703.069 kgf/cm <sup>2</sup> )
Volumen de muestra (+ 3ml, -0 ml)	300 ml
Control de temperatura de la muestra	± 3 ° C
Corriente máxima de operación	1 A
Voltaje máximo de operación (en fondo)	120 V
Resistente a agentes corrosivos como H <sub>2</sub> S y CO <sub>2</sub>	
Libre de mercurio en fase de transferencia	
Conexión con cable monoconductor de 5.55 mm de diámetro (7/32 ")	
Proporcionar una referencia de la profundidad (Detector de coples)	
Capacidad para medir presión de yacimiento en tiempo real (± 5 psi)	
Capacidad para medir temperatura de yacimiento en tiempo real (± 2 ° C)	
Compatible con equipo de Pemex en conexiones en los extremos (En parte superior con cabeza Tipo MH-22, en parte inferior con contrapesos de 60 lb)	

***Capítulo III***  
***Metodología***

### 3.1. Método de Diseño Robusto

La metodología de Diseño Robusto, fue creada por el Dr. Genichi Taguchi y se utilizó por primera vez después de la segunda guerra mundial, cuando fue necesario realizar mejoras a los sistemas de telecomunicación de Japón. En la actualidad muchas compañías en todo el mundo utilizan esta metodología en el desarrollo e investigación de nuevos productos y/o procesos.

La meta de esta metodología es la optimización de productos basada en el concepto establecido por el Dr. Taguchi que es la "Robustez", cuya definición según el autor es:

***El estado donde la tecnología, producto o proceso que se desempeña es mínimamente sensible a factores que causan variabilidad y envejecimiento, esto es a un bajo costo de manufactura. (Genichi Taguchi, 1999)***

El Diseño Robusto puede ser aplicado en una amplia variedad de problemas, en áreas como la electrónica, productos automotrices, aeronáutica y muchas otras industrias, en las que ha sido un importante factor de crecimiento industrial. El diseño robusto proporciona la generación de ideas a través de un diseño estadístico para planear experimentos y obtener información de las variables involucradas en la toma de decisiones. La ciencia del diseño estadístico de experimentos fue originada en Inglaterra por el investigador Sir Ronald Fisher en los años 20's (Douglas C. Montgomery, 1991). Fisher fundó los principios básicos para el diseño de experimentos y los asocio con una técnica de análisis de datos llamada *análisis de la varianza*, el planteamiento de cada experimento se plasma en distribuciones matriciales que forman combinaciones de cada una de las variables que intervienen en el funcionamiento del producto a desarrollar, esto permite realizar experimentos con variaciones de variables de forma simultánea. El diseño Robusto hace uso de las *distribuciones ortogonales* para la planeación de experimentos, además agrega una nueva dimensión al diseño estadístico de experimentos que proporcionan explícitamente una ruta de solución a cuestionamientos de diseñadores de tecnologías y productos, que son:

- *¿Cómo reducir económicamente la variación de la función de los productos en el medioambiente del usuario ?*
- *¿Cómo asegurar que la decisión encontrada durante los experimentos va a ser la óptima durante la fase de manufactura y en el medio ambiente del usuario?*

En la dirección de estos cuestionamientos, el Diseño Robusto utiliza formalismos matemáticos en el diseño estadístico de experimentos, y éste es diferente en cada proceso. La respuesta aportada por Diseño Robusto a estas interrogantes hace que éste sea una herramienta para incrementar la productividad de las actividades de diseño (Kevin et al., 1991). Dentro de esta metodología la calidad y los costos que se involucran juegan un papel importante, el nivel de calidad de un producto o proceso debe medirse con referencia a la calidad ideal; un cliente puede esperar como calidad ideal que el producto cumpla con los requerimientos de funcionamiento cada vez que sea utilizado a las condiciones de operación establecidas y sin daños o defectos, aunque se sabe que es imposible que se fabriquen productos con la calidad ideal, sin embargo ésta sirve como un punto de referencia para medir los niveles de calidad.

Según Taguchi, (Genichi Taguchi, 1999) cuando el funcionamiento de un producto se desvía del objetivo de diseño, su calidad es considerada como inferior, el desarrollo debe de diferir de una unidad a otra, de unas condiciones de operación a otras, o puede deteriorarse antes de que se termine la vida útil estimada, esta variación en el desempeño causa una pérdida para el usuario del producto, a la manufactura del producto en diferentes grados, y también al resto de la sociedad. El Método Taguchi mide la calidad de un producto en términos del total de calidad pérdida en términos de la variación funcional y los efectos de los daños en cuestión de costos, la pérdida de la calidad podría ser cero y una gran pérdida sería un muy bajo nivel de calidad.

El costo de generar productos con un mínimo de calidad pérdida y a bajo costo dentro de un proyecto involucra diferentes áreas, como ingenieros, economistas, directores de departamento, etc. Existen tres principales categorías de costo que deben de considerarse en el desarrollo de producto (Fink, 1993):

1.- *Costo de Operación*, consiste en el costo de la energía necesaria para operar el producto, controles ambientales, mantenimiento, inventario de partes de repuesto, etc, el producto hecho por diferentes manufacturas puede tener diferente costo de energía

Un fabricante puede reducir el costo de operación diseñando el producto robusto, esto es minimizando la sensibilidad del producto al medio ambiente y a las condiciones de uso, variaciones en la manufactura y el deterioro de partes.

2.- *Costo de manufactura*, un importante elemento en el costo de manufactura es el equipo, la maquinaria, el material, jornada de trabajo, ajustes, etc., en un ambiente competitivo, es importante mantener la unidad de costo de manufactura (umc) en nivel bajo, utilizando materiales de bajo grado, empleando trabajadores con las habilidades necesarias y empleando menos

equipo costoso y al mismo tiempo manteniendo un nivel de calidad apropiado. Esto es posible diseñando el producto de forma robusta y diseñando los procesos de manufactura también de forma robusta, esto es minimizando la sensibilidad de los procesos a disturbios de manufactura.

3.- *Costo del Diseño Robusto*, El tiempo tomado para desarrollar un nuevo producto más la cantidad de investigación e ingeniería y los recursos necesarios en el laboratorio son los principales elementos del costo del diseño robusto. La meta de las actividades de esta metodología es mantener la unidad de costo de manufactura y el costo de operación en un nivel bajo.

El Diseño Robusto juega un rol importante para alcanzar esta meta porque incrementa, la eficiencia en la generación de información necesaria para diseñar los productos y procesos, por consiguiente se reduce el tiempo de desarrollo y los recursos necesarios para el desarrollo.

El costo de manufactura y el costo de Diseño Robusto son incurridos por el productor y luego pasan al cliente a través del precio de venta del producto. El costo de operación, que es llamado también *costo de uso*, es cargado directamente por el cliente y esta directamente relacionado con la calidad del producto. Desde el punto de vista del cliente, el precio de venta más el costo de operación determina económicamente la satisfacción del cliente, por lo tanto el producto puede ser comprado. Alta calidad significa bajo costo de operación y viceversa. El Diseño Robusto es un método sistemático para mantener el costo de producción bajo mientras se entrega un producto con alta calidad.

### 3.2. Herramientas del Diseño Robusto

El Diseño Robusto sirve como un amplificador que habilita al investigador a generar información necesaria para la toma de decisiones con la mitad del esfuerzo experimental comparado con el método experimental de tipo factorial (Douglas C. Montgomery, 1991).

Existen dos tareas importantes a ser desarrolladas por el Diseño Robusto:

1.- *Medir la calidad durante el proceso de diseño o desarrollo*, se requiere un indicador de calidad con el cual se evalúan los efectos de los cambios en los parámetros en el desempeño del producto.

2.- *Experimentación eficiente para encontrar información fidedigna de los parámetros de diseño*. En muchas ocasiones es difícil obtener información fidedigna de los parámetros de diseño debido a que el diseño cambia durante el proceso de manufactura. También, la información debe ser obtenida con un mínimo de tiempo y recursos.

Los efectos estimados de los parámetros de diseño deben ser validados siempre y cuando otros parámetros cambian durante el siguiente esfuerzo de diseño o cuando el diseño relacionado con el subsistema cambia. Esto puede ser considerado empleando la relación de la señal de ruido S/N ( signal to noise ratio ) para medir la calidad y la distribución ortogonal ( *orthogonal arrays*) para estudiar series de parámetros de diseño simultáneamente. Estas son dos herramientas del Diseño Robusto (Vijayan, 1992; Wei , 1996).

### 3.3. Tipos de Relación de la señal de ruido

Existen dos clases de relación de señal de ruido (S/N), estática y dinámica. La forma estática aplica a casos donde la característica de calidad tiene un nivel fijo. La forma dinámica aplica en los casos en los que la característica de calidad opera sobre un rango de valores. Las relaciones de ruido clasificadas dentro del tipo dinámico, según Yuin Wu (Yuin Wu,1997), para variables continuas pueden ser analizadas por las siguientes ecuaciones:

1. Ecuación proporcional por el origen
2. Ecuación proporcional
3. Ecuación lineal
4. Ecuación lineal usando la tabla de ecuaciones polinómicas ortogonales

Para los tipos no dinámico hay cuatro tipos de aplicaciones:

1. Nominal es mejor
2. Menor es mejor
3. Mayor es mejor
4. Ventana operativa no dinámica

El apéndice B, se desarrollan las ecuaciones para cada una de estas aplicaciones, con el objeto de conocer su estructura y utilizarlas para la evaluación de la calidad de un producto o proceso, recordando que el método de diseño robusto utiliza la relación de señal de ruido, para medir la calidad.

### 3.4. Clasificación de parámetros de diseño

El diagrama de bloques que se muestra en la figura, representa un producto, la respuesta de un producto es denotada por "y". La respuesta podría ser la salida del producto o alguna otra

característica adecuada. Recordando que la respuesta que se considera para el propósito de la optimización en el Diseño Robusto es llamada característica de calidad.

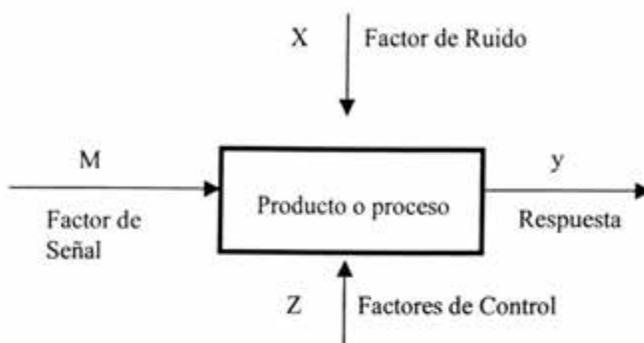


Figura 3.1. Diagrama de bloques de un producto o proceso

Un número de parámetros puede influenciar la calidad característica o la respuesta del producto. Estos parámetros pueden ser clasificados en las siguientes tres clases, (podemos considerar que la palabra parámetro equivale en el diseño robusto a la palabra factor):

1. *Factor de Señal (M)*, son los parámetros fijados por el usuario o el operador del producto que expresa el valor pretendido para la respuesta del producto. La señal de factor es seleccionada por el diseñador basado en sus conocimientos de ingeniería acerca del objetivo del diseño. Algunas veces se utilizan dos o más señales en combinación para expresar la respuesta deseada.
2. *Factor de Ruido (X)*, Ciertos parámetros no pueden ser controlados por el diseñador y son llamados factores de ruido. Los parámetros que son establecidos (también llamados niveles) son difíciles de controlar. Los niveles de ruido cambian de una unidad a otra, de un medio ambiente a otro y de un tiempo a otro. Los factores de ruido causan que la respuesta "y" se desvíe de los objetivos especificados por el factor de señal a e indican la calidad pérdida.
3. *Factor de control (z)*, son los parámetros que pueden ser especificados libremente por el diseñador. Cada factor puede tener múltiples valores llamados niveles. Cuando los niveles de ciertos factores de control son cambiados los costos de manufactura no cambian, sin embargo, cuando los niveles de otros son cambiados, el costo de manufactura también cambia. Nos vamos a referir a los factores de control que afectan el costo de manufactura

---

como *factores de tolerancia*, mientras que los otros factores de control van a ser llamados simplemente factores de control.

### 3.5. Estrategias de optimización

El diseño de un producto o en el proceso de manufactura es realmente una actividad compleja. La descripción de la actividad está establecida en dibujos y las especificaciones que indican como hacer el producto en particular, los tres elementos esenciales de estos dibujos son:

- a.- La arquitectura del sistema
- b.- Los valores nominales para todos los parámetros del sistema
- c.- La tolerancia o las variaciones permitidas en cada parámetro

Optimizar un producto o proceso significa determinar la mejor arquitectura, el mejor valor de los parámetros y las mejores tolerancias, para lo cual existen tres estrategias de optimización:

1. Minimizando el costo de manufactura mientras se mantiene la misma calidad si hubiera un competidor.
2. Minimizar la calidad pérdida mientras se mantiene el costo de manufactura en el mismo nivel del competidor.
3. Minimizando la suma de la calidad pérdida y el costo de manufactura.

Considerando la estrategia 1, referente a la minimización del costo de manufactura mientras se mantiene un nivel específico de calidad. El problema de optimizar un producto o proceso de diseño para reflejar esta estrategia es difícil y complicado. Primero la relación entre el número de parámetros y la respuesta es siempre desconocida y debe ser observada experimentalmente. Segundo, durante el diseño de un producto y/o proceso las magnitudes precisas de las variaciones de los factores de ruido y los costos de diferentes grados de materiales, componentes y tolerancias, no son conocidas. Por ejemplo, durante el diseño de un producto, las variaciones exactas no son conocidas hasta que existe el proceso donde van a ser usadas. Por lo tanto escribir un simple objetivo de una función considerando todos los costos no es posible. Tomando en cuenta estas dificultades, la siguiente estrategia consiste en los siguientes tres pasos.

1. *Concepto de diseño*. En este paso el diseñador examina una gran variedad de arquitecturas y tecnologías para alcanzar la función deseada de un producto y seleccionar la mejor para el producto. Usualmente, solo una arquitectura o tecnología es

seleccionada basada en el juicio del diseñador. Sin embargo, para productos altamente complejos, se seleccionan dos o más arquitecturas; cada una es desarrollada separadamente y al final, se adopta la mejor. El concepto de diseño puede jugar un rol en la reducción de sensibilidad a los factores de ruido también como reduciendo los costos de manufactura.

2. *Parámetros de diseño*, en este caso, se determina el mejor escenario para los factores de control que no afecten los costos de manufactura, esto es en realidad se minimice la calidad pérdida. De esta forma se debe minimizar la sensibilidad de una función del producto o proceso a todos los factores de ruido y también obtener la función principal. Durante los parámetros de diseño, se asume amplia tolerancia en los factores de ruido y se asume que los componentes de bajo grado así como materiales con estas características, pueden ser empleados, esto es que se fija el costo de manufactura a un valor bajo, por debajo de estas condiciones, minimizando la sensibilidad al ruido, entonces minimizamos la calidad pérdida.
3. *Diseño de tolerancias*, referente a la selección de un valor óptimo de los factores de tolerancia (tipo de material, límites de tolerancia) para balancear el incremento de la calidad pérdida contra el incremento de la unidad de costo de manufactura.

El incremento de la calidad a través de estos conceptos necesita adelantarse y también es difícil de programar en tiempo. Los parámetros de diseño, incrementan la calidad sin incrementar la unidad de costo de manufactura. Esto puede desarrollarse sistemáticamente utilizando la distribución ortogonal (orthogonal arrays y la relación de la señal del factor de ruido) que son el mas económico camino para llegar a la calidad.

### 3.6. Matriz de experimentos utilizando una distribución ortogonal

Una matriz de experimentos consiste en fijar experimentos donde cambiamos los valores de varios parámetros del producto o proceso que queremos estudiar de un experimento a otro. Después de conducir la matriz de experimentos, los datos de todos los experimentos son tomados y analizados para determinar el efecto de varios parámetros. La conducción de la matriz de experimentos, utiliza una matriz especial denominada distribución ortogonal (orthogonal arrays), y permite que los efectos de varios parámetros sean determinados eficientemente, de esta forma se considera una importante técnica en el Diseño Robusto.

La construcción de distribución ortogonal ha sido analizada por muchos investigadores incluyendo Kempthorne (Kempthorne, 1979; Plackett and Burnan, 1980). El proceso de fijar una distribución

ortogonal a un proyecto específico ha sido particularmente fácil mediante una herramienta gráfica, llamada gráfica lineal (linear graphs), desarrollada por Taguchi, para presentar interacciones entre pares de columnas en una distribución ortogonal.

Antes de construir una distribución ortogonal, deben de definirse los siguientes requisitos:

1. Número de factores que van a ser estudiados
2. Número de niveles para cada factor
3. Especificar la interacción de 2-factores para ser estimados
4. Especificar dificultades que podrían ser encontradas en la corrida de los experimentos

El primer paso para construir una distribución ortogonal es contar el total de grados de libertad que especifica el mínimo número de experimentos que deben ser desarrollados para estudiar todos los factores de control escogidos.

### **3.7. Análisis de la varianza (ANOVA)**

La fase final del diseño de experimentos es analizar e interpretar los resultados experimentales resultado de mejorar las características de un producto o proceso. Después de que todas las pruebas se han conducido, es necesario tomar decisiones de acuerdo con los parámetros que afectan el desarrollo de un producto o proceso. Estas decisiones son realizadas con la asistencia de varias técnicas analíticas, tales como:

*Método de la observación*

*Métodos Ranking*

*Método de efectos en columna*

*Método gráfico*

*Análisis de la varianza*

Algunos de estos métodos son subjetivos en naturaleza y otros son objetivos, siendo una herramienta para la toma de decisiones. El Análisis de la varianza va a ser un método estadístico predominante usado para interpretar datos experimentales y para realizar las decisiones necesarias, siendo un método objetivo. Los otros métodos deben considerarse como técnicas de soporte y refuerzo.

El análisis de la varianza es una técnica computacional que habilita al investigador a estimar cuantitativamente la contribución relativa a cada factor de control del total de la respuesta medida y lo expresa como un porcentaje. (William Y. Fowkes, 1995)

ANOVA utiliza una técnica matemática conocida como *suma de cuadrados* para examinar cuantitativamente la desviación de los efectos del promedio de los factores de control sobre la respuesta general de un experimento. Esto se refiere a una variación entre los factores de control. El significado individual de los factores de control es cuantificado comparando la varianza entre el efecto de los factores de control contra la varianza de los datos experimentales debido a un error aleatorio y a los efectos de las interacciones entre los factores no representadas. La variación de los datos debido a éste error, se refiere a la variación dentro de los factores de control que componen el experimento.

La relación 3.1. se refiere a la **relación F**, que puede estar formada entre la varianza del efecto de los factores de control (el promedio de los cuadrados debido a los factores de control) en el numerador y la varianza del error experimental (el promedio de los cuadrados debido al error experimental) en el denominador.

$$F = \frac{MS}{S_e^2} \quad (3.1)$$

Donde  $MS$  es el promedio de los cuadrados debido a los factores de control y  $S_e^2$  es el promedio de los cuadrados debido al error experimental.

El proceso ANOVA permite tener una mejor idea respecto a qué factores son los más importantes y cuales son los menos significantes. En general si una comparación entre el efecto del Factor de control D (7%) y el efecto aleatorio experimental (5%), esto no es del todo claro que el factor D es verdaderamente una contribución a la respuesta en alguna dirección significativa mas haya del valor atribuido al efecto aleatorio del experimento. Este tipo de información puede ser muy útil cuando es necesario tomar decisiones acerca de qué factores son más necesarios o valiosos para incrementar la robustez del producto.

Típicamente, ANOVA es utilizado para ayudar a tomar decisiones durante la fase de diseño de tolerancias. Los factores de control que contribuyen con un alto porcentaje a la medida de la respuesta son analizados con base en una comparación entre el costo y el balance del desempeño.

ANOVA puede ser visto como un proceso que descompone la varianza para cada factor relativo al promedio general de la respuesta, es importante recordar que la varianza es una estadística

que mide el ancho de una distribución de datos sobre el valor promedio. En el método Taguchi, ANOVA puede ser aplicado a dos formas de datos. Primero, éste puede ser aplicado a los datos medidos en unidades de ingeniería (utilizada en la fase de las tolerancias de diseño). Segundo, éste puede ser aplicado a los datos después de que han sido transformados a la relación de ruido (S/N ratio, realizadas en la fase de Diseño de parámetros). ANOVA es utilizada en el Diseño de Parámetros para ayudar a identificar la fuerte contribución entre los factores de control, entonces un modelo predictivo exacto puede construirse y utilizarse durante el proceso de verificación. ANOVA es utilizado en el Diseño de Tolerancias para identificar aquellos factores de control que son mejores considerando la tolerancia, con mejores calidades en el material, o alguna otra característica que mejora la calidad y el costo.

El análisis de la varianza que se presenta aquí, se enfoca en el proceso de los parámetros de diseño, donde éste es utilizado para construir un modelo predictivo. En éste proceso, los valores de respuesta son relaciones S/N obtenidos de los resultados de una matriz ortogonal de experimentos. El promedio general de la relación S/N de toda la matriz debe ser calculada. Este es el punto de referencia en el cual la varianza del promedio de cada relación S/N de los factores de control es calculada, sumando la desviación cuadrática del promedio general. Muchas de las variaciones alrededor de promedio general de la relación S/N, son empleadas debido al efecto de los factores de control. Una pequeña parte de ésta es debido al error experimental aleatorio y otra parte, idealmente una pequeña cantidad corresponde al efecto interactivo entre los factores de control.

El proceso ANOVA comienza calculando el gran total de suma de cuadrados (GTSS):

$$GTSS = \sum_i^n (S/N)_i^2 \quad (3.2)$$

Donde  $n$  es el número de corridas o experimentos. El GTSS puede ser descompuesto en dos partes:

1. Suma de cuadrados debido al promedio general del experimento:

$$SS \text{ debido al promedio} = (\# \text{ de experimentos}) \text{ promedio de } S/N^2 \quad (3.3)$$

2. La suma de los cuadrados debido a la variación del promedio, referido como el total de suma de cuadrados:

$$TotalSS = \sum_{i=1}^n (S/N_i - S/N)^2 \quad (3.4)$$

El gran total de suma de cuadrados es :

$$GTSS = \text{total SS} + \text{SS debido al promedio} \quad (3.5)$$

La técnica de **suma de cuadrados** puede ser utilizada para definir la contribución individual de cada factor de control con el total de la suma de cuadrados. La suma de cuadrados está basada en una cuantificación numérica de variaciones que están inducidas por los efectos de los factores alrededor de la respuesta del promedio general del experimento. Esto es por lo que se llama análisis de la varianza. El proceso utiliza varianzas para cuantificar la fuerza del efecto del promedio de los factores de control. La relación de ANOVA se resume en la siguiente figura:

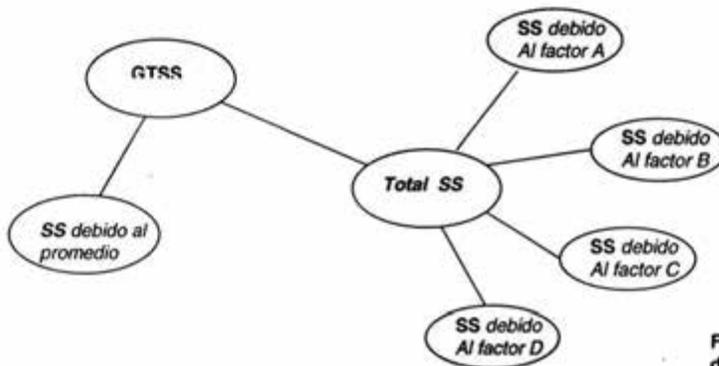


Figura 3.2. Descomposición de la suma de cuadrados

Si en un experimento existieran 3 corridas para el factor A, la suma de cuadrados debido a la variación del promedio sería:

$$SS_A = (\#de\_exp\_de\_A)(\bar{S/N}_1 - \bar{S/N})^2 + (\#de\_exp\_de\_A)(\bar{S/N}_2 - \bar{S/N})^2 + (\#de\_exp\_de\_A)(\bar{S/N}_3 - \bar{S/N})^2 \quad (3.6)$$

Donde  $\bar{S/N}_i$  es el promedio de las 3 muestras de  $S/N$  para cada nivel ( $i=1,2$  ó  $3$ ).

Si el experimento tuviera factores B, C y D, el proceso se repite. Estos valores representan la importancia relativa de cada factor de control en la medida de la respuesta controlada.

El porcentaje de contribución del efecto relativo de cada factor sobre la respuesta medida es:

$$\%contribución = (SS_{Factor} / TotalSS) \quad (3.7)$$

Hasta este momento no se ha asignado ningún porcentaje a cuenta de la contribución del error experimental, lo que esto significa es que ninguna suma de cuadrados ha sido asignada a éste

error, esto puede entenderse si introducimos el término de **grados de libertad** (GDF) del experimento.

Un grado de libertad es un parámetro independiente asociado con cada uno de los siguientes términos (Phillip J.1196):

- a. Una matriz de experimentos
- b. Un factor
- c. Una suma de cuadrados

Si se tuviera una distribución ortogonal con nueve experimentos L9, tendría 9 grados de libertad y el gran total de la suma de cuadrados (GTSS) tendría 9 grados de libertad. Calculando el promedio general para cualquier distribución ortogonal tomado un grado de libertad, como se hizo en la suma de cuadrados debido a promedio general del experimento, se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Total SS} &= (\text{GTSS} - \text{SS debido al promedio}) \\ \text{Total GDF} &= (\# \text{ de experimentos} - 1) \end{aligned} \quad (3.8)$$

El total de la suma de cuadrados solo puede tener 8 grados de libertad (GOF)

Similarmente, para factores en una distribución ortogonal, un grado de libertad es asignado para cada nivel del factor. Para el promedio general de cada factor, sustraer un grado de libertad. Por lo tanto, para cada factor de tres niveles (factor tres-niveles) existen  $3-1=2$  grados de libertad. En general el número de grados de libertad está asociado con el factor de tal manera que el DOF es uno menor que el número de niveles de cada factor. En una distribución L9 existen por lo tanto 8 DOF disponibles para estimar el efecto de los factores de control. Los 8 DOF son empleados para evaluar en este caso 4 factores de control. Ningún DOF está disponible para cuantificar el efecto del error experimental. No es necesario gastar energía para contabilizar el error experimental, lo que podría incurrir en un costo para realizar corridas de experimentos largos, consumiendo tiempo, esfuerzo y dinero.

Para aplicar la ecuación 3.1, es necesario estimar el error experimental. A continuación se da un procedimiento para calcularlo. El promedio de los cuadrados para un factor de control está definido como:

$$MS = \frac{\text{efecto\_de\_los\_factores\_en\_la\_suma\_de\_cuadrados}}{\text{grados\_de\_libertad\_de\_los\_factores}} \quad (3.9)$$

El error del promedio de los cuadrados (error de la varianza) para los factores de control están definidos por:

$$S_e^2 = \frac{\text{error\_de\_la\_suma\_de\_cuadrados}}{\text{grados\_libertad\_del\_error}} \quad (3.10)$$

En el interés de buscar la mayor información posible en una matriz de experimentos ortogonal, todos los grados de libertad disponibles son utilizados para enfocarse en el estudio de los factores de control. Un método para estimar el error de la varianza es nombrado como “pooling” que consiste en agrupar la suma de cuadrados de los factores de control que tienen una pequeña contribución sobre la relación general de S/N.

Una guía razonable es agrupar la suma de cuadrados hasta la mitad de los factores de control (la mitad definida por el porcentaje de contribución menos significativa). Esto hace más o menos la mitad de grados de libertad disponibles para estimar el error de la varianza. En esta instancia los factores de control más débiles son los que integran el error de la varianza. En algunos experimentos, todos los factores deben ser altamente significativos; en otros, pocos factores deben ser significativos. Sin embargo, el método *pooling* típicamente proporciona una estimación exagerada del error experimental y es visto normalmente como un método conservativo.

Un camino más directo para estimar el error de la varianza es repetir la medida de la respuesta tres o cuatro veces el mismo experimento. Esto significa fijar el mismo nivel de los factores de control y de ruido, haciendo una réplica de las medidas de la relación S/N de tres a cinco veces. Una verdadera réplica requiere cambios físicos para fijar el objetivo y regresar a las condiciones iniciales del experimento. Una simple repetición no proporciona el mismo efecto que una réplica.

Una estrategia común para efectuar una réplica, es hacer una repetición del sistema al comienzo, a la mitad y al final del experimento. Desde que los parámetros de control son los mismos para medición de la repetición, la variabilidad puede ser atribuida a la varianza del error experimental. Esta técnica sin embargo olvida cualquier error debido a interacciones.

La suma de cuadrados debido al error experimental determinada por las réplicas se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$S_e^2 = \frac{1}{(r-1)} \sum_{j=1}^r (S/N_j - \bar{S/N}_k)^2 \quad (3.11)$$

Donde  $r$  es el número de réplicas medidas,  $S/N_i$  es el valor individual de S/N (o cualquier otra respuesta que pueda ser considerada) para la réplica, y  $\overline{S/N}_R$  es el promedio de los valores de S/N de las réplicas. Este error puede ahora ser usado del mismo modo que el obtenido por el método *pooling*.

En la tabla que resume los cálculos de ANOVA, existe un término llamado **relación F**, referida también como a la relación de la varianza. Esta relación es usada para probar el significado de los efectos de los factores. La relación **F** está dada por la ecuación 3.1. Cuando **F** es mucho mayor que 1, el efecto de los factores de control es mayor comparado con la varianza debida al error experimental así como al efecto de las interacciones.

Aquí se tienen algunos criterios:

- $F < 1$ : El error experimental pesa más que el efecto de los factores de control. Los factores de control son insignificantes y no se distinguen del error experimental.
- $F \approx 2$  Los factores de control tienen un efecto moderado comparado con el error experimental.
- $F > 4$  Los factores de control son fuertes comparados con el error experimental y su efecto es claramente significativo.

Esta guía es útil cuando se decide que factores pueden ser incluidos en el modelo predictivo ó para definir aquellos factores que son críticos en el diseño robusto (William Y. Fowlkes, 1995).

Hasta aquí se ha dado una semblanza general sobre términos empleados en el análisis de la varianza, Ranjit K. Roy en su libro "*A primer on the Taguchi Method*", dedica un capítulo al estudio del análisis de la varianza, para una mayor referencia.

***Capítulo IV***  
***Caso de estudio***

#### 4.1. Aplicación del Diseño Robusto en la optimización de la herramienta de muestreo de hidrocarburos.

El diseño robusto ha sido aplicado en la mejora de tecnologías, productos o procesos haciendo que éstos sean menos vulnerables a aquellos factores que tienden a disminuir la calidad y la eficiencia del producto. En una búsqueda de información referente a la aplicación de la metodología en el área de instrumentación de la industria petrolera, realizada en importantes publicaciones como SPE (Society of Petroleum Engineers), Journal of Mechanical Design, ASME, banco de datos de Petroleum Abstract, así como en la página electrónica de Swets Information Service, que tiene una amplia base de datos referente a artículos de ciencia; no se encontró referencia alguna sobre la aplicación del método en esta área. Los reportes encontrados sobre su aplicación la mayoría de las veces fueron relacionados con la mejora de productos, especialmente en el área automotriz y manufactura como lo precisan los artículos: Jhy-Ping et al., 2001, "*Aplication of the Taguchi Method to Improve the Process Yield Rate For Air Cleaners in Toyota Corona Vehicles*", Hefin Rowlands et al., 2000, "*An Application of Experimental Design for Process Optimisation*". También se han encontrado trabajos con aplicación en farmacéutica, medicina y biotecnología (Laura R., 1999), así como aplicación en el desarrollo de elementos de laboratorio y computadoras (Y. H. Chen, et al., 1996).

En el presente trabajo el Método de Diseño Robusto se aplicará en el diseño y análisis de algunos elementos de la herramienta de muestreo cuya descripción se presenta más adelante como casos de estudio.

En los capítulos uno y dos, se mencionó la importancia que tiene el control de la temperatura y la presión en el proceso de muestreo, así como la obtención de una muestra representativa del yacimiento. Tomando como base la hipótesis establecida en el inciso 2.3, se piensa que es posible aplicar el Diseño Robusto en el diseño de una herramienta de muestreo realizando consideraciones sobre la influencia que tienen ciertos parámetros en la eficiencia del sistema.

A continuación se desarrollará el método tomando las siguientes secciones del muestreador para su análisis y desarrollo:

- A. Contenedor de la muestra de hidrocarburo**
- B. Válvula de admisión**
- C. Sistema de amortiguación**

Tomando como referencia el diagrama 2.2, a continuación se analizará cada uno de estos casos.

## 4.2. Caso 1 : Contenedor de la muestra de hidrocarburo

Aplicando la técnica de Diseño Robusto el primer paso es definir el alcance general:

### *Paso 1. Definición de alcances:*

Optimizar las partes consideradas como críticas o de mayor importancia en la herramienta, cuyo desempeño influyan en el control de los parámetros a controlar, como son la presión y la temperatura.

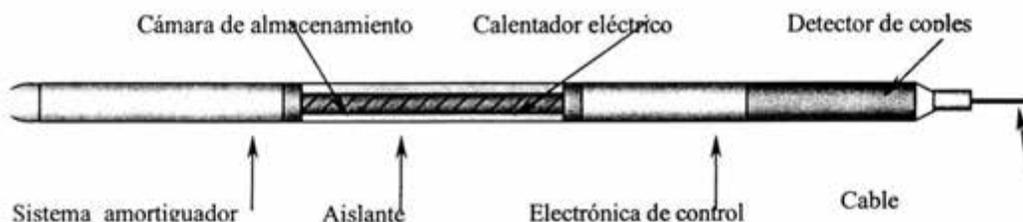
### *Paso 2. Definir las condiciones del subsistema*

La figura 4.1. muestra en sistema dividido en diversas partes, según la metodología del diseño robusto, es mejor dividir un proyecto muy grande en pequeños subproyectos, que proporcionen la oportunidad de realizar el estudio de los aspectos que influyen en el correcto desempeño, considerando lo que se le llama factores de ruido, descrito como todas aquellas circunstancias que afectan la eficiencia del producto y que lo hacen vulnerable.

Tomando como primer subproyecto el caso de la cámara de almacenamiento, el primer paso consiste en describir el problema y definir los alcances, los que se dan a continuación:

### 4.2.1. Descripción del problema

Como se observa en la figura 4.1., la herramienta cuenta con una cámara instrumentada que funciona como recipiente de almacenamiento, debido a la necesidad de mantener la temperatura de la muestra ha sido necesario acoplar un calentador. De forma general el funcionamiento del sistema es el siguiente:



**Figura 4.1. Herramienta para muestreo de hidrocarburos**

La herramienta para toma de muestras está conectada a un cable electromecánico de 5.55 mm de diámetro nominal (7/32") con un solo conductor, por el cual se mantiene la comunicación con el equipo de control y adquisición de datos localizado en superficie, en este caso particular, el

cable servirá también para suministro de energía. Una vez que la herramienta se introduce al pozo para tomar la muestra a la profundidad indicada, se hace operar una válvula para permitir que la muestra ingrese a la cámara por diferencia de presión, en un periodo de tiempo corto, la válvula se cierra y la muestra es atrapada teóricamente a las condiciones de P y T del yacimiento.

La cámara de almacenamiento tiene acoplados dos sensores uno de presión y otro de temperatura con los cuales se obtiene información sobre el comportamiento físico del fluido atrapado. Para mantener la temperatura de la muestra a la temperatura de referencia, (que es la del yacimiento en el momento que se tomó la muestra), se adaptó un calentador eléctrico, controlado electrónicamente, en función de la variación de temperatura detectada dentro de la cámara que es alimentado desde la superficie a través de un cable electromecánico.

Para disminuir las pérdidas de temperatura de la muestra, el que escribe propuso diseñar un sistema concéntrico en el cual la cámara de almacenamiento pudiera ser introducida dentro de otro recipiente (carcaza o camisa exterior), como se muestra en la figura 4.2. Sobre la superficie de la cámara podrá colocarse un aislante o algún elemento que disminuya las pérdidas de energía térmica; la camisa exterior tiene la finalidad de proteger el contenedor de las inclemencias del medio en operación, así como crear un efecto similar al de un termo, en donde sea posible disminuir al mínimo las pérdidas de temperatura así como la energía necesaria para mantener la muestra caliente.

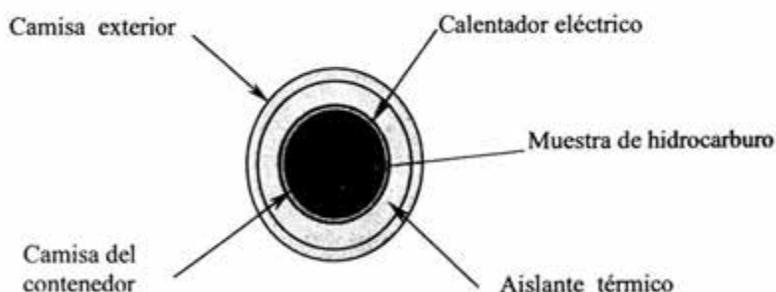


Figura 4.2. Disposición mecánica de las partes que integran la cámara de muestreo

Debido a las características del cable, existe una caída de voltaje debido a la longitud, por lo se requiere suministrar aproximadamente 850 V desde la superficie, para alimentar al calentador, repercutiendo en óptimo funcionamiento del calentador.

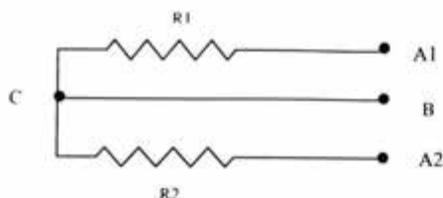


Figura 4.3. Arreglo eléctrico del calentador

El calentador está formado por dos resistencias A1-C-B y A2-C-B, conectadas en paralelo con una resistencia de 60 ohm cada una, como se muestra en la figura 4.3. Cuando la herramienta de muestreo se encuentra en el fondo del pozo para realizar la toma de muestra, se conecta una de las resistencias, recibiendo en el fondo del pozo un voltaje aproximado de 120 V, debido a la longitud del cable, que puede llegar a ser de 9000 m, el 85.8% del voltaje que es suministrado desde superficie se transforma en calor, ocasionado por el valor total de la resistencia del cable electromecánico. A continuación se presentan algunas especificaciones técnicas del cable monoconductor:

**Tipo de cable: Cable electromecánico de 7/32" de diámetro (5.556 mm) para uso en pozos petroleros de alta temperatura y alto contenido de H2S**

<i>Código:</i>	IN22SAZ-S75
<i>Diámetro nominal:</i>	0.224"-0.002"+0.004" (5.690mm-0.051mm+0.102mm)
<i>Resistencia a la carga de ruptura:</i>	2 359 Kg (5200 lb)
<i>Peso del cable en el aire:</i>	0.147 kg/m (99 Lbs/Kohm )
<i>Resistencia eléctrica del conductor (máx.):</i>	78 ohm/km
<i>Capacitancia del conductor (máx.):</i>	154.2 pf/m (47 pf/ft)
<i>Resistencia del aislamiento:</i>	5000 Mega ohm/Km (1500 mega $\Omega$ /Kft)
<i>Rango máximo de Voltaje</i>	1200 VDC
<i>Temperatura máxima de trabajo:</i>	260°C (500° F)

El material empleado en la fabricación del calentador es conocido como Nicromel y tiene una resistencia de 6 a 8 Ohm/m, este se enrolla sobre la superficie del contenedor, previamente aislado eléctricamente.

En la medida en que la herramienta asciende a la superficie, el gradiente natural de temperatura del pozo va disminuyendo como lo muestra la figura 4.4., en estas circunstancias la potencia necesaria para calentar la muestra se incrementa de 60 a 120 Watts, cambiando el valor de la resistencia al equivalente A1-C-A2, esto es la resistencia total aumenta a 120 ohm, con un circuito en serie.

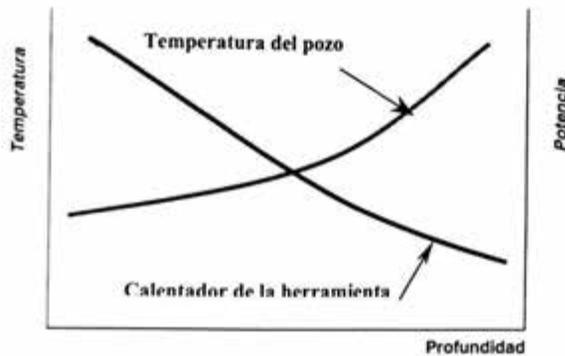


Figura 4.4. Distribución natural del gradiente de temperatura del pozo en función de la profundidad

Para analizar el funcionamiento y comportamiento de la temperatura dentro del sistema se construyó un prototipo a escala con las mismas características de la herramienta original (primera versión), se realizaron diversos experimentos variando las condiciones de temperatura dentro de la cámara. A continuación se describe el procedimiento y resultados obtenidos en dos de ellos:

La Figura 4.5. muestra un esquema representativo del equipo que se utilizó en los experimentos. El equipo empleado incluyó un adquirente de datos para obtener datos de temperatura, marca Fluke modelo Hydra 2620A, una fuente de voltaje variable de 10-15 V, construida y diseñada en el IMP, un sensor de presión de 0 a 15 000 psi, marca Entran Devices, modelo EPX-38-20 000A, un multímetro digital marca Fluke modelo 77, una camisa exterior fabricada en aleación de titanio 6-6-2, una camisa interior fabricada en aleación de titanio 6-6-2, 3 sensores para temperatura tipo RTD cerámicos, con resistencia nominal de 100 ohm, cinta de nicromel de 6 ohm /m, un volumen de aceite crudo con densidad de  $0.85 \text{ gr/cm}^3$ , además de cables de cobre con recubrimiento de teflón.

Se preparó el prototipo colocando debidamente el nicromel sobre el contenedor, colocando dos de los sensores en el exterior de la carcasa, uno en el centro ( $S_2$ ) y otro en uno de los extremos ( $S_1$ ), uno más se colocó de forma tal que pudiera proporcionar una referencia de la temperatura de la muestra ( $S_{ref}$ ), como lo muestra la figura 4.5. Se llenó el contenedor de forma manual con aceite crudo de densidad  $0.85 \text{ gr/cm}^3$ , se colocaron dos separadores de teflón de forma concéntrica para reducir pérdidas de temperatura por contacto entre los elementos, se cerró el sistema dejando aire entre el espacio anular entre las dos camisas. Se colocó un sensor de presión para tener referencia del comportamiento de la presión del aceite dentro del contenedor,

se realizaron las conexiones eléctricas correspondientes para tomar registro de la variación de los parámetros de temperatura y presión, específicamente.

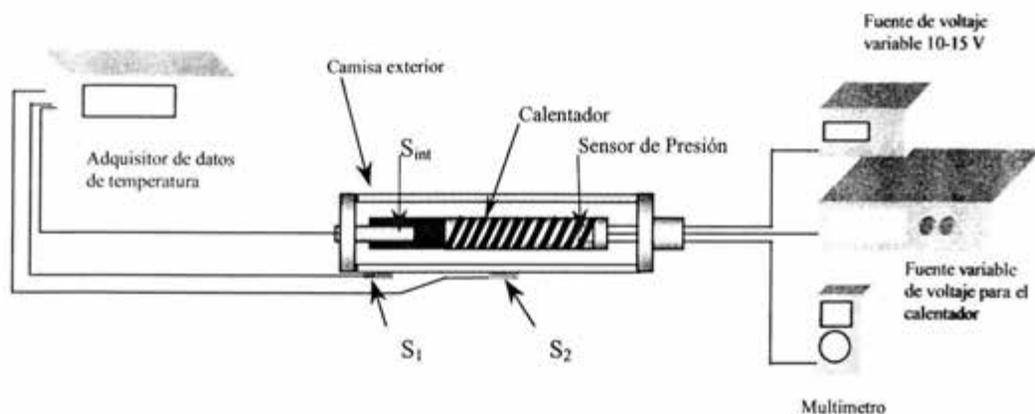


Figura 4.5. Esquema representativo del equipo utilizado para realizar la simulación de la cámara de almacenamiento y el calentador

Una de las pruebas consistió en llevar la temperatura a valores cercanos a los 175°C de forma gradual, alimentando el calentador con 10V, cada estación; esto fue debido a que no se cuenta con información del incremento de la temperatura en función del voltaje que se suministra. La figura 4.6., muestra la gráfica del comportamiento de temperaturas en el sistema. Se encontró que la temperatura se alcanzó en solo 3 estaciones, resultando un valor de 30V para llegar a la temperatura de 171.05 °C, en este instante la presión dentro del sistema fue de mas de 8500 psi, se apagó la fuente de voltaje, respondiendo automáticamente el sistema con un enfriamiento, como se aprecia en la figura.

En un intervalo de tiempo donde la diferencia entre la temperatura exterior e interior se mantenían mas o menos constantes, entre el minuto 100 y 140, el sistema mantuvo una diferencia de temperaturas de aproximadamente 60 °C, entre el sensor interior ( $S_{int}$ ) y el sensor que se encuentra en el exterior ( $S_2$ ), lo que indica que existe un retardo en la radiación de la temperatura que puede ser controlado. Cabe señalar que el contenedor que se utilizó fue un modelo a escala del contenedor real, utilizado solo para determinar el comportamiento radial de temperaturas.

Se puede observar que la diferencia de temperatura se mantiene en un tiempo aproximado de 120 minutos, es importante hacer notar también, que el espacio que se encuentra entre las dos camisas donde se origina la transferencia de calor por radiación es *aire* atrapado a la presión

atmosférica, actuando como aislante. En este experimento se evitó al máximo el contacto de la camisa interior con alguna superficie o elemento de la camisa exterior, utilizando separadores de teflón con una área de contacto muy pequeña, para disminuir las pérdidas de calor por conducción. El sensor 1, localizado en un punto donde probablemente se disipa calor por conducción debido al contacto entre la camisa exterior y los conectores que cierran el sistema, presenta la temperatura más baja, mostrando una pérdida de calor de  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con respecto al sensor  $S_2$ . La tabla 4.1. muestra los datos obtenidos.

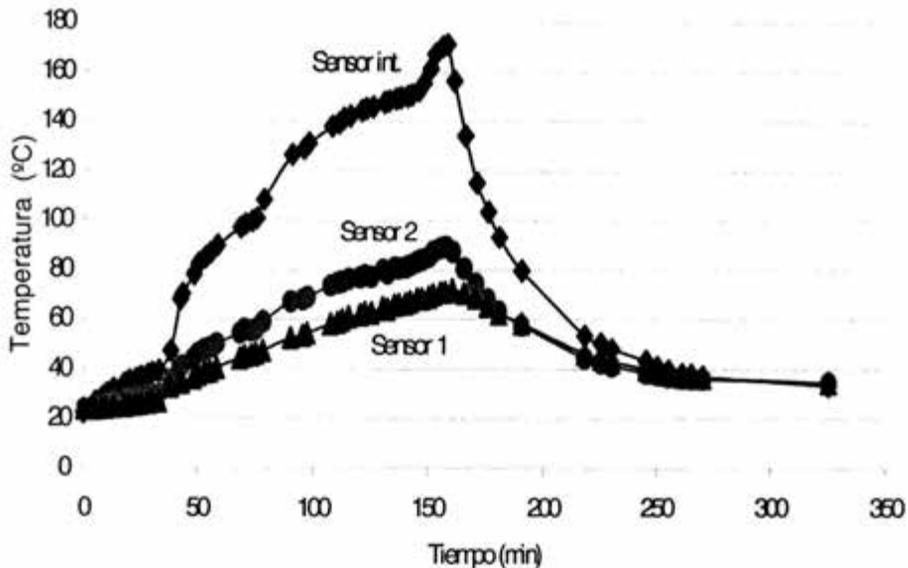


Figura 4.6. Gráfica de Temperatura – Tiempo con aire como medio aislante.

En otro experimento realizado con el mismo arreglo, se incrementó la velocidad de calentamiento, es decir se alimentó el calentador con un voltaje de  $30\text{ V}$ , el sistema llegó a la temperatura en el interior de la cámara de  $179\text{ }^{\circ}\text{C}$  en un tiempo menor que en el experimento anterior; aproximadamente  $46\%$  menos. De forma similar se apagó la fuente de voltaje respondiendo el sistema con un enfriamiento, como se aprecia en la figura 4.7. Las temperaturas en el exterior registradas por los sensores 1 y 2, se comporta de forma similar al experimento anterior. La diferencia entre la temperatura del sensor que se encuentra en el exterior ( $S_2$ ) y la temperatura en el interior de la cámara ( $S_{int}$ ), en el intervalo en que la temperatura aparentemente se encuentra estable, es de  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, la diferencia entre este valor y el del experimento anterior puede ser debido a la forma en que se alimenta el calentador, recordemos que en este caso fue de forma continua.

Tiempo (min)	Tint. (°C)	T1 (°C)	T2 (°C)
0	38.31	36.89	36.09
1	38.29	37.03	36.37
7	80.12	37.86	44.79
9	91.59	38.85	48.45
11	105.64	40.91	53.97
13	107.05	42.06	55.69
15	114.67	42.9	58.12
17	120.27	44.53	60.6
19	126.17	46.45	63
22	133.87	49.31	68.18
24	138.16	54.98	70.97
28	145.44	51.99	74.69
31	149.6	54.98	75.32
34	155.39	55.87	79.08
41	160.18	59.94	83.4
43	159.91	63.85	83.56
46	163.4	65.78	83.24
48	165.19	67.7	86
51	168.4	69.15	87.42
53	170.72	70.97	89.3
57	173.45	73.71	90.83
59	174.92	73.15	91.17
92.98	176.71	73.99	

Tabla 4.1. Valores tomados de una prueba experimental bajo un proceso de calentamiento.

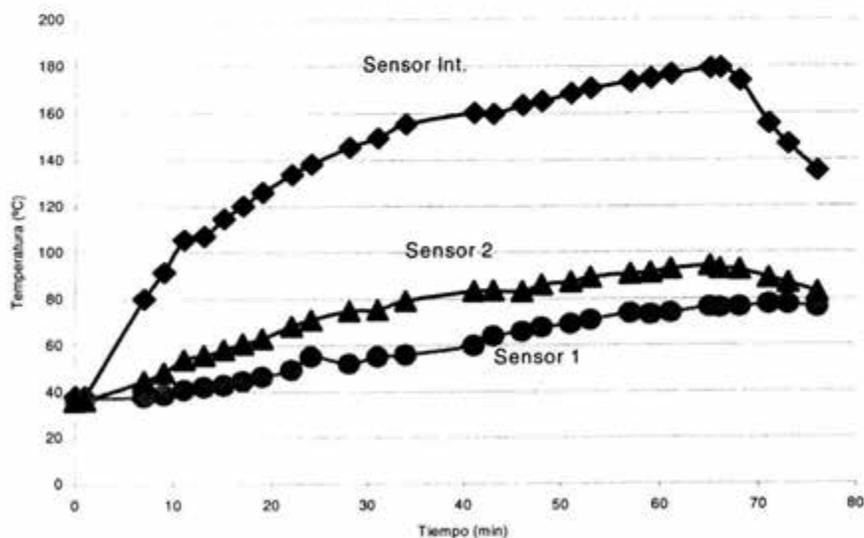


Figura 4.7. Gráfica del proceso de calentamiento rápido del prototipo del muestreador.

Ambos experimentos confirmaron la necesidad de tener un aislante térmico que ayude a disminuir las pérdidas de calor, además de seleccionar los materiales y el diseño adecuado que permitan disminuir las pérdidas y mantener el sistema constante por un tiempo mayor. En los siguientes párrafos se analizará el problema bajo la metodología del Diseño Robusto.

#### 4.2.2. Optimización del sistema de calentamiento y el contenedor

Como se ha mencionado anteriormente, el *Método de Diseño Robusto* es una herramienta utilizada para la optimización de productos a través de la experimentación y el análisis de resultados, en donde es posible combinar todos los factores que intervienen en su operación, de esta forma los factores que dependen de las necesidades de operación son denominados factores de control, aquellos que no pueden ser controlados por el diseñador y que afectan el funcionamiento del producto son denominados factores de ruido. Una forma de abordar el problema es realizar una formulación de pasos para plantear el problema y aplicar el método, como se presenta a continuación:

##### Elaboración del plan

###### Paso 1. Definir el alcance del subproyecto

*Aumentar la eficiencia del sistema de calentamiento, disminuyendo en lo posible pérdidas de calor por radiación natural, en función de la variación de temperaturas entre la  $T_m$  de la muestra y la  $T_e$  temperatura exterior de la herramienta.*

*Operar en un nivel intervalo de temperatura de 25° a 170° C, manteniendo el contenedor a la temperatura indicada por un controlador.*

*Disminuir el consumo de corriente y voltaje en la alimentación del calentador en diversas etapas de operación, que depende de las condiciones de operación y diseño del sistema.*

*Mantener la temperatura dentro de la cámara en un rango de  $\pm 3$  °C*

*Seleccionar los materiales adecuados, tanto metálicos como aislantes térmicos de acuerdo a las condiciones de operación del sistema.*

*Aumentar el tiempo de enfriamiento del sistema cuando el calentador no esté alimentado eléctricamente o en fases de operación.*

*Con base en los resultados obtenidos, realizar una caracterización del sistema.*

*Diseño del sistema de fácil mantenimiento.*

*Máxima presión de trabajo de la cámara de almacenamiento: 15 000 psi*

*Máxima presión de trabajo de la camisa exterior: 15 000 psi*

### *Paso 2. Definir los límites del subsistema*

*Este sistema está relacionado directamente con un sistema de válvula (analizado en el segundo caso). En el diseño final del dispositivo será necesario contemplar la salida de los cables de alimentación y la conexión mecánica hacia el sistema de válvula en un extremo y hacia el sistema de amortiguamiento, en el otro extremo.*

### *Paso 3. Definir la señal de entrada $M$ y la respuesta de salida " $y$ ", así como la función ideal.*

*En este caso existe una transformación de energía. La corriente que se suministra al calentador, es transformada en energía calorífica y la eficiencia depende de factores atenuantes, como son los materiales empleados como aislantes y conductores de calor, de esta forma existe una relación directa entre los factores que intervienen entre la energía que entra y la respuesta proporcionada por el sistema.  $M$  se denomina señal de entrada y está identificada como la potencia suministrada, en función de la corriente y el voltaje, " $y$ ", que es la señal de salida se convierte en la energía calorífica que proporciona la resistencia a la muestra en el interior de la cámara, con un mínimo de calor disipado, evaluado a través de diferencias de temperaturas.*

### *Paso 4. Desarrollo de la señal y estrategias de ruido*

*En esta fase de implementación de la metodología de diseño robusto, el factor  $M$ , va a ser variado intencionalmente, con el objeto de cubrir las condiciones de uso del sistema.*

*La señal de entrada  $M$ , corriente de alimentación será variada hasta la restricción técnica del cable monoconductor, que es de 1 A. Sin embargo, como se describió en el planteamiento del problema, el voltaje suministrado desde superficie es un parámetro importante e influye en la energía que recibe el calentador en la fase crítica de operación, que es cuando está en el fondo del pozo recibiendo la muestra.*

*En este caso será necesario analizar dos aspectos de la señal de ruido:*

- a.- La potencia que recibe el calentador en el fondo del pozo que depende de las condiciones de la resistencia eléctrica del calentador.*
- b.- La potencia que se envía desde la superficie para alimentar el calentador en el fondo del pozo, que depende de las características del cable y de las condiciones de operación.*

Como se observa en la figura 4.4., se requiere más potencia cuando la herramienta se encuentra cercana a la superficie, debido a la diferencia de temperatura entre la muestra atrapada y el fluido del pozo o el medio ambiente.

Es importante hacer notar que la resistividad del cable a diversas temperaturas debe de tomarse en cuenta, y está en función de 3 factores, ver ecuación 4.1:

a.- Coeficiente de resistividad térmica del conductor ( $\alpha_1$ )

b.- Variación de la temperatura ( $T-T_1$ )

c.- Valor de una resistencia de referencia  $R_1$

$$R = R_1 [1 + \alpha_1 (T - T_1)] \quad (4.1)$$

	M1	M2
Amperes	0.6	0.955
Volts	60	120

Tabla 4.2. Señal de ruido (Signal-to-noise)

#### Paso 5. Definición de factores de control y sus niveles

Para lograr una función robusta, se requerirá probar diversas alternativas de diseño. Los factores son seleccionados a través de la técnica de "Brainstorming", definida como la

reunión de especialistas, donde se discutieron todos aquellos factores que pueden ser tomados dentro del análisis del experimento. A continuación se presentan aquellos factores que fueron tomados como factores de control (parámetros de diseño), así como los factores de ruido y sus niveles.

Factor Nivel		1	2	3	Grados de libertad
Longitud de control	A Material del contenedor	Alac. de Titanio	Ac. Inox. 17-4PH	Aleac. de Titanio	2
	B Material de la camisa ext.	Ac. Inox. 17-4Ph	Ac. Inox. 17-4Ph	Alac. de Titanio	2
	C Tipo de aislante térmico	Aire	Papel cerámico	Vacío	2
	D Resistencia del calentador (ohm)	60	120	Alternado	2
	E Temperatura del medio ambiente	25	100	150	2
	F Tipo de aceite	0.8892 gr/cc (ligero)	0.8725 gr/cc	0.925 gr/cc (pesado)	2

Tabla 4.3. Factores de control

Factor		Nivel	1	2
Factores de ruido	N	Comportamiento de la temperatura	Calentamiento	Enfriamiento

Tabla 4.4. Factores de ruido

Factor	
M Energía necesaria para alimentar el Calentador en el fondo del pozo.	Cantidad de calor suministrada a la muestra por pérdidas

Tabla 4.5. Factores de Señal

Según el propósito de S/R, existen dos clasificaciones:

- 1.- Dinámico
- 2.- Estático (no dinámico)

La S/R dinámica especifica que existe una señal de entrada, identificada por el valor real de la muestra a medir y una respuesta de salida que es el resultado de la medida, esto es tal y como ocurre en los instrumentos de medición. Yuin Wu, especifica que las relaciones de ruido S/R del tipo dinámico se utilizan para mejorar la robustez de la función de un producto en un rango de

salida. La S/R estática (no dinámica) se utiliza para mejorar la robustez de la función únicamente para cierto valor objetivo de salida, en lugar de la totalidad del rango (Yuin Wu, 1997).

Dentro de este enfoque existen 2 aspectos en las relaciones S/R:

- a. Reducir la variabilidad
- b. Ajustar la medida al valor objeto

Los problemas estáticos pueden ser clasificados por la naturaleza de la característica de calidad, recordando que la respuesta esperada es llamada característica de calidad y es el objetivo a mejorar. Para el enfoque estático hay 4 tipos de aplicaciones:

1. Nominal es mejor (NB)
2. Menor es mejor (LB)
3. Mayor es mejor (HB)
4. Ventana operativa no dinámica

Se considera el problema como tipo S/R estático (no-dinámico) del tipo HB, debido a que se requiere que la señal de respuesta del sistema se traduzca en una mayor diferencia de temperaturas entre el contenedor ( $T_c$ ) y la temperatura en el exterior ( $T_e$ ); ambos parámetros

describen el comportamiento térmico del sistema, pudiendo ser positiva si  $T_c > T_e$  y negativa cuando  $T_c < T_e$ , dependiendo de la fase de operación. Sin embargo, si estimamos la cantidad de calor que se transfiere, lo más conveniente es que el sistema disipe menos calor, debido a que como un objetivo del sistema es preservar la temperatura de la forma mas eficiente posible, en este caso el problema podrá ser analizado como una señal de ruido del tipo "Menor es mejor (LB)". A continuación se presentan tablas que muestran el planteamiento del experimento, los resultados y su análisis.

Datos técnicos de algunos factores de control:

Tipo de aislante:

- 1.- Aire
- 2.- Papel cerámico y fibra de vidrio
- 3.- Vacío

Tipo de aceite

- 1.- Ligero densidad 0.8892 gr/cc
- 2.- Tipo 2 densidad 0.8725 gr/cc
- 3.- Pesado densidad 0.925 gr/cc

	Factor	Descripción	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Grados de libertad
Factores de control	A	Material del contenedor	Aleac. de Titanio	Ac. Inox. 17-4Ph	Aleación de Titanio	2
	B	Material de la camisa ext.	Ac. Inox. 17-4 Ph	Ac. Inox. 17-4 Ph	Aleac. de Titanio	2
	C	Tipo de aislante	1	2	3	2
	D	Resistencia del calentador	60	120	Alternado	2
	E	Temperatura del medio exterior (superficie y fondo)	25	100	150	2
	F	Tipo de aceite	1	2	3	2
Factores de ruido	N	Comportamiento de la temperatura	Calentamiento	Enfriamiento	-----	
	<b>Total</b>					<b>12+1=13</b>

Tabla 4.6. Condiciones experimentales

La matriz de experimentos según el número de grados de libertad, corresponde a  $L_{18}$  (Madhav S. Phadke, 1989). A continuación se presenta la tabla de la distribución ortogonal y los factores asignados:

Se emplea la técnica de Simulación "Dummy" para asignar un factor de 3er nivel a una columna, con el objeto de balancear la matriz experimental y completarla a  $L_{18}$ .

Número de Experimento	Número de columnas y factores asignados							
	1 e	2 A	3 B	4 C	5 D	6 E	7 e	8 F
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

Tabla 4.7. Esquema experimental

Número de experimento	A	B	C	D	E	F
Número de experimento	Material del contenedor	Material de la camisa ext.	Tipo de aislante	Resistencia del calentador	Temperatura de trabajo	Tipo de aceite atrapado
1	Aleac. de Titanio	Ac. Inox 17-4 Ph	Aire	60	25	Ligero
2	Aleac. de Titanio	Ac. Inox 17-4 Ph	Papel cerámico	120	100	2
3	Aleac. de Titanio	Aleac. de Titanio	Vacio	Alternado	150	Pesado
4	Ac. Inox. 17-4Ph	Ac. Inox 17-4 Ph	Aire	120	100	Pesado
5	Ac. Inox. 17-4Ph	Ac. Inox 17-4 Ph	Papel cerámico	Alternado	150	Ligero
6	Ac. Inox. 17-4Ph	Aleac. de Titanio	Vacio	60	25	2
7	Aleac. de Titanio	Ac. Inox 17-4 Ph	Papel cerámico	60	150	Pesado
8	Aleac. de Titanio	Ac. Inox 17-4 Ph	Vacio	120	25	Ligero
9	Aleac. de Titanio	Aleac. de Titanio	Aire	Alternado	100	2
10	Aleac. de Titanio	Ac. Inox 17-4 Ph	Vacio	Alternado	100	Ligero
11	Aleac. de Titanio	Ac. Inox 17-4 Ph	Aire	60	150	2
12	Aleac. de Titanio	Aleac. de Titanio	Papel cerámico	120	25	Pesado
13	Ac. Inox. 17-4Ph	Ac. Inox 17-4 Ph	Papel cerámico	Alternado	25	2
14	Ac. Inox. 17-4Ph	Ac. Inox.17-4 Ph	Vacio	60	100	Pesado
15	Ac. Inox. 17-4Ph	Aleac. de Titanio	Aire	120	150	Ligero
16	Aleac. de Titanio	Ac. Inox 17-4 Ph	Vacio	120	150	2
17	Aleac. de Titanio	Ac. Inox.17-4 Ph	Aire	Alternado	25	Pesado
18	Aleac. de Titanio	Aleac. de Titanio	Papel cerámico	60	100	Ligero

Tabla 4.8. Tabla Lógica de Experimentos

#### 4.2.3. Desarrollo experimental

Tomando como base la tabla lógica de experimentos, tabla 4.8, se diseñó el arreglo como se muestra en la figura 4.8. Para llevar a cabo un desarrollo experimental lo mas cercano posible a las condiciones de operación y para efectuar un análisis adecuado del comportamiento de los parámetros, como lo indica la tabla lógica de experimentos, fue necesario instalar equipos tales como sensores de presión con un rango de operación de 0 a 15 000 psi, marca IMO Delaval Inc, tipo 614473-0003, operado con galga extensométrica con una no linealidad de 0.15% FRO (Full Range Output), sensores de temperatura tipo RTD de platino, marca Omega film, serie F, modelo

F3105 de 100 ohm, cinta de nicromel con resistencia de 8 Ohm/m, Horno eléctrico con capacidad de hasta 300 °C, adquisitor de datos de temperatura Marca Fluke, modelo Hydra 2620A con capacidad para 20 canales, Bomba hidráulica manual con capacidad de hasta 10 000 psi, aceite de silicon tipo M-100, bomba mecánica de vacío, fuente de alimentación con rango de 0 a 600 V y 0 a 1.5 A, cables con recubrimiento de teflón, conectores de acero inoxidable para alta presión, así como un circuito electrónico diseñado para el control del voltaje.

La tabla 4.8. establece el orden para llevar a cabo la experimentación, de esta forma el primer experimento consiste en construir un contenedor para la muestra de aleación de titanio, una camisa exterior de la misma aleación, en este caso, utilizar aire como aislante dentro del espacio anular de las camisas, como se muestra en la figura 4.2., utilizar una calentador con resistencia de 60 Ohm, probar a la temperatura ambiente aproximadamente de 25 °C y considerar como muestra un aceite ligero de 0.8892 gr /cc, por lo tanto el primer experimento tiene la combinación A1, B1,C1,D1,E1, F1. Madhav S. Phandke establece diversos criterios para la conducción de la matriz de experimentos (Madhav, 1989). Una práctica común es el desarrollo aleatorio, cuidando que todos los parámetros lleguen a sus estados originales, en este caso el manejo de temperaturas debe de considerarse ampliamente, para evitar interrelaciones que complicarían el desarrollo del experimento o bien se presentaría un nuevo factor de ruido que podría entrar dentro de los parámetros de análisis, sin embargo no es recomendable, en este caso si el experimento requiere de una temperatura de 25 °C y se ha terminado un experimento donde se utilizó una temperatura de 100°C, es necesario en éste caso enfriar el sistema y llevarlo a la temperatura indicada, esto nos proporcionará datos más reales en la optimización de los factores que afectan la sensibilidad del diseño.

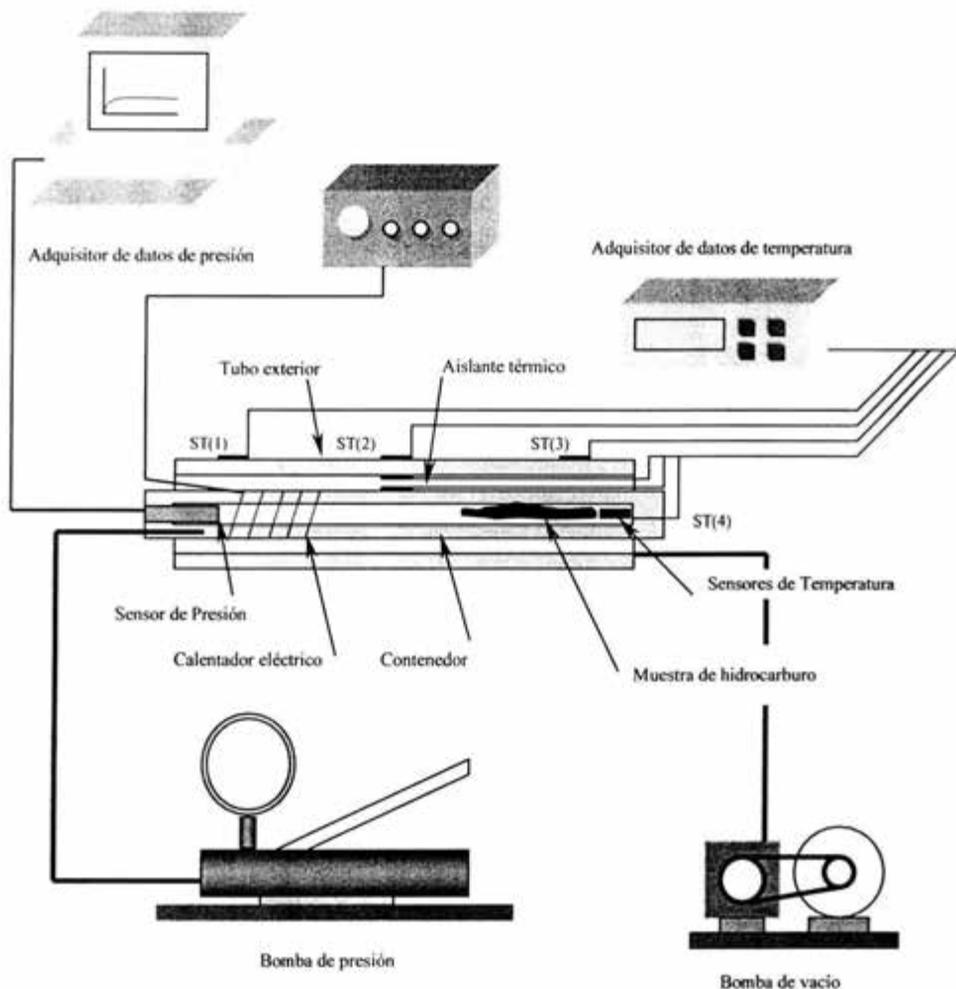


Figura 4.8. Esquema de la instrumentación de una cámara para almacenar muestras de hidrocarburo.



Figura 4.9. Arreglo de la probeta de pruebas

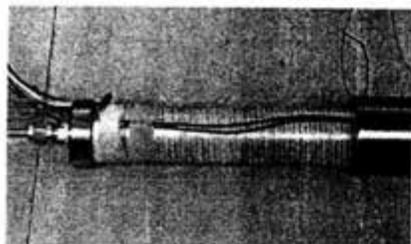


Figura 4.10. Detalle del calentador



Figura 4.11. Ilustración del sistema con bomba para registro de presión y medidor de temperatura



Figura 4.12. Experimento con empleo de vacío

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

#### 4.2.4. Análisis de resultados experimentales

En cada uno de los experimentos se utilizó un voltaje variable de 60 a 120 Volts y una corriente fija de 0.929 A; de cada proceso de calentamiento y enfriamiento se tomaron 5 valores representativos con la máxima diferencia de temperaturas entre la muestra y el exterior. Se evaluó el tiempo en el que se llegó a la temperatura objetivo en cada experimento y posteriormente se realizó una estimación de la velocidad del proceso, ya sea de calentamiento, como lo muestra la tabla 4.8 ó de enfriamiento como lo muestra la tabla 4.9. A continuación se presentan los datos obtenidos.

Núm. De Exp.	Diferencia de temperatura (Fase de calentamiento) (°C)	Tiempo de calentamiento t min. (T °C)	Vel. de calentamiento °C/min
1	62 87 74 55 42	95 (de 28.04 a 93.27)	0.686
2	2 2 2 2 2	78 (de 29.5 a 118.55)	1.142
3	67 63 73 84 70	75 (de 19.82 a 119.74)	1.332
4	24 26 25 27 25	60 (de 24.21 a 107.73)	1.392
5	50 49 46 38 38	105 (de 29.43 a 136.48)	1.019
6	71 69 75 70 64	50 (de 22.35 a 105.97)	1.672
7	30 40 40 37 34	75 (de 32.6 a 137.22)	1.394
8	67 71 74 67 69	45 (de 26.91 a 101.49)	1.657
9	28 33 30 27 23	90 (de 27.4 a 101.54)	0.820
10	52 66 65 54 39	97 (de 27.64 a 97.12)	0.716
11	43 48 52 48 44	80 (de 26.76 a 122.67)	1.198
12	46 49 50 48 47	25 (de 30.86 a 100.98)	2.804
13	27 31 25 25 24	80 (de 26.4 a 100.67)	0.928
14	67 69 64 64 63	55 (de 23.16 a 103.11)	1.453
15	26 26 28 30 27	43 (de 38.2 a 129.6)	2.125
16	87 88 87 75 70	85 (de 24.55 a 103.71)	0.931
17	30 33 36 34 31	60 (de 26.58 a 98.8)	1.203
18	33 37 34 30 29	60 (de 25.59 a 103.23)	1.294

Tabla 4.9. Datos de la fase de calentamiento.

Núm. de Exp.	Diferencia de temperatura en estado estable (Fase de enfriamiento) (°C)	Tiempo de enfriamiento t min. (T °C)	Vel. de enfriamiento °C/min
1	34 41 43 41 39	95 (de 93.27 a 42.58)	0.53
2	21 14 9 6 5	115 (de 102.8 a 38.92)	0.55
3	34 38 41 45 41	145 (de 116.59 a 39.51)	0.53
4	15 16 16 15 16	105 (de 100.86 a 41.21)	0.56
5	27 27 25 22 20	65 (de 106.61 a 55.41)	0.78
6	64 58 53 49 12	140 (de 105.97 a 40.8)	0.46
7	21 25 24 22 19	123 (de 104.14 a 35.57)	0.55
8	57 52 44 40 37	100 (de 101.49 a 41.1)	0.60
9	16 18 19 16 15	80 (de 100.35 a 47.25)	0.66
10	25 25 29 27 23	105 (de 95.10 a 48.13)	0.45
11	20 20 22 22 19	75 (de 103.94 a 47.28)	0.75
12	45 44 44 42 38	135 (de 100.9 a 36.27)	0.47
13	23 19 17 15 14	110 (de 100.85 a 39.64)	0.55
14	62 57 56 50 45	155 (de 100.83 a 40.5)	0.39
15	27 25 25 25 39	35 (de 129.2 a 89.9)	1.12
16	35 31 29 25 22	90 (de 101.43 a 39.35)	0.69
17	29 25 21 19 17	90 (de 98.8 a 40.31)	0.65
18	17 18 17 16 13	100 (de 103.6 a 40.96)	0.62

Tabla 4.10. Datos de la fase de enfriamiento.

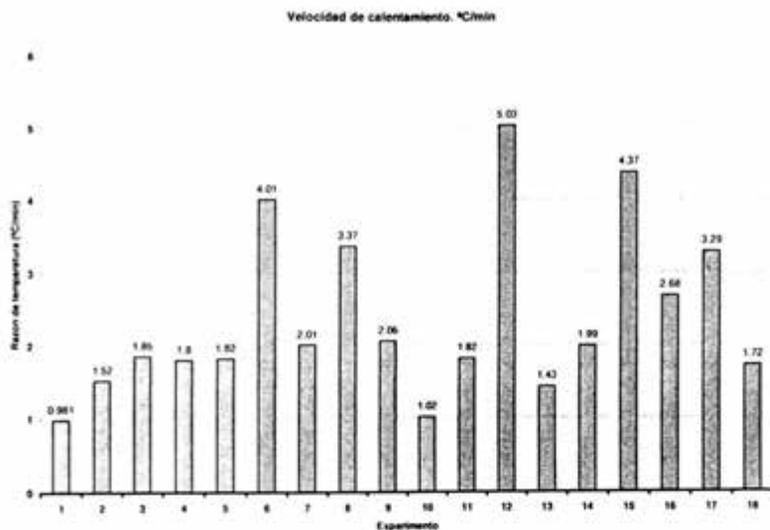


Figura 4.13. Velocidad de calentamiento de cada experimento

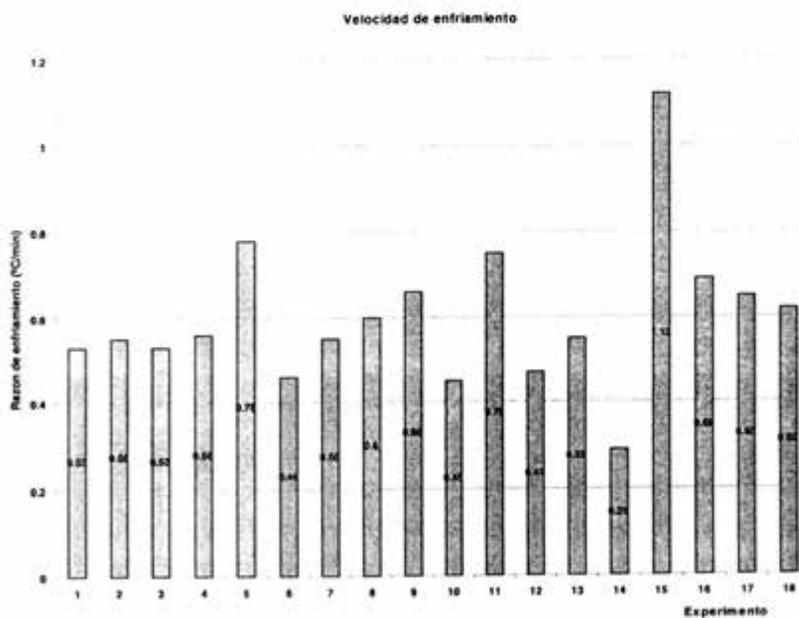


Figura 4.14. Velocidad de enfriamiento de cada experimento

Exp No.	Condiciones experimentales								Comportamiento de la temperatura (FR)	$\eta$ (dB)	$\mu c$ (°C)	$\mu \theta$ (°C)	$\mu$ (°C)	
	1 e	2 A	3 B	4 C	5 D	6 E	7 e	8 F						
									Nc	Ne				
1	1	1	1	1	1	1	1	1	62 87 74 55 42	34 41 43 41 39	33.25	64	39.6	51.8
2	1	1	2	2	2	2	2	2	2 2 2 2 2	21 14 9 6 5	8.73	2	11	6.5
3	1	1	3	3	3	3	3	3	67 63 73 84 70	34 38 41 41 41	33.61	71.4	39	55.2
4	1	2	1	1	2	2	3	3	24 26 25 27 25	15 16 16 15 16	25.46	25.4	15.6	20.5
5	1	2	2	2	3	3	1	1	50 49 46 38 38	27 27 25 22 20	29.36	44.2	24.2	34.2
6	1	2	3	3	1	1	2	2	71 69 75 70 64	64 58 53 49 41	35.31	69.8	53	61.4
7	1	3	1	2	1	3	2	3	30 40 40 37 34	21 25 24 22 19	28.41	36.2	22.2	29.2
8	1	3	2	3	2	1	3	1	67 71 74 67 69	57 52 44 40 37	34.45	34.8	46	40.4
9	1	3	3	1	3	2	1	2	28 33 30 27 23	16 18 19 16 15	26.07	28.2	16.8	22.5
10	2	1	1	3	3	2	2	1	52 66 65 54 39	25 25 29 27 23	30.22	55.2	25.8	40.5
11	2	1	2	1	1	3	3	2	43 48 52 48 44	20 20 22 22 19	28.47	47	20.6	33.8
12	2	1	3	2	2	1	1	3	46 49 50 48 47	45 44 44 42 38	33.04	47.4	42.6	45
13	2	2	1	2	3	1	3	2	27 31 25 25 24	23 19 17 15 14	26.01	26.4	17.6	22
14	2	2	2	3	1	2	1	3	67 69 64 64 63	62 57 56 50 45	35.29	65.4	54	59.7
15	2	2	3	1	2	3	2	1	26 26 28 30 27	27 25 25 25 39	28.68	27.4	28.2	27.8
16	2	3	1	3	2	3	1	2	87 88 87 75 70	35 31 29 25 22	31.25	81.4	28.4	54.9
17	2	3	2	1	3	1	2	3	30 33 36 34 31	29 25 21 19 17	27.96	32.8	22.2	27.5
18	2	3	3	2	1	2	3	1	33 37 34 30 29	17 18 17 16 13	26.08	32.6	16.2	24.4

Tabla 4.11. Cálculos de la relación S/N

La señal de ruido está dada por la ecuación:

$$\eta = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (4.2)$$

Ahora estimamos el efecto de los 6 parámetros del proceso de los valores observados de  $\eta$  en los 18 experimentos. El conjunto principal de  $\eta$  para la región experimental definida por los factores de nivel tabla 4.11, está dado por :

$$m = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} \eta_i \quad (4.3)$$

$$m = \frac{1}{18} [\eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_{18}] = 28.9805 \text{ dB} \quad (4.4)$$

siendo  $m$  un balance del conjunto principal de la región experimental.

El efecto de un factor de nivel está definido como la desviación que éste causa en el promedio total. De esta forma a través de la ecuación 4.5, podemos evaluar el efecto del material del contenedor A3 sobre el sistema. El promedio de la señal de ruido S/N para este experimento, se denota por  $m_{A3}$ :

$$m_{A_3} = \frac{1}{6} [\eta_7 + \eta_8 + \eta_9 + \eta_{16} + \eta_{17} + \eta_{18}] \quad (4.5)$$

$$m_{A_3} = [28.41 + 34.45 + 26.07 + 31.25 + 27.96 + 26.08] = 29.03 \text{ dB}$$

Entonces el efecto del material del contenedor A3 está dado como:

$$(m_{A_3} - m) = (29.03 - 28.98) = 0.05 \text{ dB} \quad (4.6)$$

Factor	Promedio de $\eta$ para cada nivel del factor (dB)			Relación entre promedios de $\eta$
	1	2	3	
A Material del contenedor	27.8867	<b>30.0183</b>	29.0366	2.13
B Material de la camisa ext.	29.1	27.3767	<b>30.465</b>	3.08
C Tipo de aislante	28.315	25.2717	<b>33.355</b>	8.08
D Resistencia del calentador	<b>31.135</b>	26.935	28.8717	4.2
E Temperatura del medio exterior	<b>31.67</b>	25.3083	29.9633	6.36
F Tipo de aceite	30.34	25.9733	<b>30.6283</b>	4.66

Tabla 4.12. Tabla de respuesta de la relación S/N

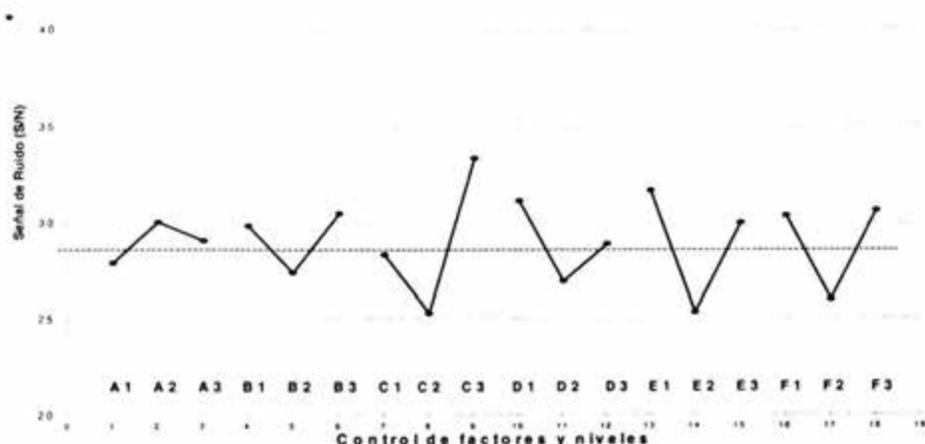


Figura 4.15. Gráfica de respuesta del experimento

#### 4.2.5. Análisis de la Varianza

Un mejor sentido para el efecto relativo de los diferentes factores puede ser obtenido por la descomposición lo que es llamado análisis de la varianza (ANOVA). ANOVA también es necesaria para estimar el error, para los efectos de los factores y los efectos de la varianza en la predicción del error.

El propósito de conducir ANOVA es determinar la magnitud relativa del efecto de cada factor sobre la función objetivo  $\eta$  y para estimar el error de la varianza. En Diseño Robusto, ANOVA, es

también utilizado para escoger de entre muchas alternativas, la característica de calidad mas apropiada y la señal de ruido (S/N) para un problema específico.

### Cálculo de la suma de cuadrados

La suma de los valores al cuadrado de  $\eta$  es llamada gran total de la suma de cuadrados, está dada por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Gran total de la suma de cuadrados} &= \sum_{i=1}^{18} \eta_i^2 & (4.7) \\ &= (33.25)^2 + (8.73)^2 + (33.61)^2 + (25.46)^2 + (29.36)^2 + (35.31)^2 + \\ &\quad (28.41)^2 + (34.45)^2 + (26.07)^2 + (30.22)^2 + (28.47)^2 + (33.04)^2 + \\ &\quad (26.01)^2 + (35.29)^2 + (28.08)^2 + (31.25)^2 + (27.96)^2 + (26.08)^2 \\ &= 15\,740.3683 \text{ dB}^2 \end{aligned}$$

La ecuación anterior puede descomponerse en dos partes; suma de cuadrados con respecto al promedio y total de suma de cuadrados, la cual se define como sigue:

$$\text{Suma de cuadrados con respecto al promedio} = (\text{número de experimentos}) m^2 \quad (a)$$

De donde :

$$\begin{aligned} m &= \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} \eta_i & (4.8) \\ &= 33.25+8.73+33.61+\dots \quad 27.96+26.08 \\ &= 28.9805 \text{ dB} \end{aligned}$$

sustituyendo en (a):

$$\begin{aligned} \text{Suma de cuadrados con respecto al promedio} &= 18(28.9805)^2 \\ &= 15\,117.6488 \text{ dB}^2 \end{aligned}$$

ahora, el total de cuadrados está dado como:

$$\begin{aligned} \text{Total de cuadrados} &= \sum_{i=1}^{18} (\eta_i - m)^2 & (4.9) \\ &= (33.25-28.9805)^2 + \dots + (26.08-28.9805)^2 \\ &= 18.2286+\dots + 8.4129 \\ &= 622.661 \text{ dB}^2 \end{aligned}$$

Debido a que  $m$  es el promedio de los 18 valores de  $\eta_i$ , tenemos la siguiente identidad algebraica:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{18} (\eta_i - m)^2 &= \sum_{i=1}^{18} \eta_i^2 - 18m^2 & (4.10) \\ 622.6615 &= 15740.3683 - 18(28.9805)^2 \\ 622.6615 &= 622.6615 \end{aligned}$$

La suma de cuadrados debido al factor A es igual al total de la desviación al cuadrado de la señal del factor A de la línea que representa el promedio general. Aquí hay 18 experimentos, cada uno con niveles A1, A2 y A3, consecuentemente:

Para el factor A

$$\text{Suma de cuadrados} = 6(m_{A_1} - m)^2 + 6(m_{A_2} - m)^2 - 6(m_{A_1} - m)^2 \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} \text{Suma de cuadrados} &= 6(27.8867-28.9805)^2 + 6(30.0183-28.9805)^2 + 6(29.0366 - 28.9805)^2 \\ &= 7.1784 + 6.462 + 0.0188 \\ &= 13.6594 \text{ dB}^2 \end{aligned}$$

Para el factor B:

$$\text{Suma de cuadrados} = 6(m_{B_1} - m)^2 + 6(m_{B_2} - m)^2 - 6(m_{B_1} - m)^2 \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \text{Suma de cuadrados} &= 6(29.1-28.9805)^2 + 6(27.3767-28.9805)^2 + 6(30.465 - 28.9805)^2 \\ &= 0.0856 + 15.433 + 13.2224 \\ &= 28.7412 \text{ dB}^2 \end{aligned}$$

Para el factor C:

$$\text{Suma de cuadrados} = 6(m_{C_1} - m)^2 + 6(m_{C_2} - m)^2 - 6(m_{C_1} - m)^2 \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \text{Suma de cuadrados} &= 6(28.315-28.9805)^2 + 6(25.2717-28.9805)^2 + 6(33.355 - 28.9805)^2 \\ &= 2.6574 + 82.5312 + 114.8174 = 200.0060 \text{ dB}^2 \end{aligned}$$

Para el factor D:

$$\text{Suma de cuadrados} = 6(m_{D_1} - m)^2 + 6(m_{D_2} - m)^2 - 6(m_{D_1} - m)^2 \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} \text{Suma de cuadrados} &= 6(31.135-28.9805)^2 + 6(26.935 - 28.9805)^2 + 6(28.8717 - 28.9805)^2 \\ &= 27.8512 + 25.1044 + 0.071 \\ &= 53.0266 \text{ dB}^2 \end{aligned}$$

Para el factor E:

$$\text{Suma de cuadrados} = 6(m_{E_1} - m)^2 + 6(m_{E_2} - m)^2 - 6(m_{E_1} - m)^2 \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} \text{Suma de cuadrados} &= 6(31.67-28.9805)^2 + 6(25.3083 - 28.9805)^2 + 6(29.9633 - 28.9805)^2 \\ &= 43.4004 + 80.9102 + 5.7952 \\ &= 130.1061 \text{ dB}^2 \end{aligned}$$

Para el factor F:

$$\text{Suma de cuadrados} = 6(m_{F_1} - m)^2 + 6(m_{F_2} - m)^2 - 6(m_{F_1} - m)^2 \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} \text{Suma de cuadrados} &= 6(30.34 - 28.9805)^2 + 6(25.9733 - 28.9805)^2 + 6(30.6283 - 28.9805)^2 \\ &= 11.0894 + 54.2594 + 16.2914 \\ &= 81.6404 \text{ dB}^2 \end{aligned}$$

Factor	Promedio de $\eta$ para cada nivel del factor (dB)			Grados de libertad	Suma de cuadrados	Desviación cuadrática	F	Contribución n (%)	F (Fisher)
	1	2	3						
A Material del contenedor	27.8867	<b>30.0183</b>	29.0366	2	13.6594 *	6.8297	0.3221	2.19	
B Material de la camisa ext.	29.1	27.3767	<b>30.465</b>	2	28.7412 *	14.3706	0.6778	4.48	
C Tipo de aislante	28.315	25.2717	<b>33.355</b>	2	200.0060	100.003	4.7170	32.12	
D Resistencia del calentador	<b>31.135</b>	26.935	28.8717	2	53.0267	26.5013	1.2500	8.52	
E Temperatura del medio exterior	<b>31.67</b>	25.3083	29.9633	2	130.1061	65.053	3.0685	20.90	
F Tipo de aceite	30.34	25.9733	<b>30.6283</b>	2	81.6402	40.8202	1.9254	13.11	
Error				5	115.4812	23.0962		18.68	
Total				17	622.661			100	
(Error)				(6)	(42.4006)	(21.2003)			

Los factores indicados como (\*) serán utilizados para analizar el error de la varianza, mientras que el resto podrá ser utilizado para estudiar la variación en el proceso de respuesta de la señal de ruido para  $\eta$ .

Tabla 4.13. Análisis de la varianza (ANOVA) para  $\eta$

Debido a que la matriz de experimentos presenta una ortogonalidad, se cumple con la siguiente expresión para estimar el error:

Total de suma de = (suma de cuadrados con respecto a los factores) + (suma de cuadrados con respecto al error)

Substituyendo:

$$S_T = \sum_{i=1}^n S_i + \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (4.17)$$

Por lo tanto:

$$622.661 = 507.1798 + \sum_{i=1}^n e_i^2$$

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = 115.4812 \text{ dB}^2$$

#### Cálculo de los grados de libertad para el error

Debido a la ortogonalidad de la matriz se puede establecer la siguiente relación:

$$\frac{\text{Grados de libertad del total de la suma de cuadrados}}{\text{suma de cuadrados}} = \frac{\text{suma de los grados de libertad para varios factores}}{\text{suma de cuadrados}} + \frac{\text{grados de libertad para el error}}{\text{suma de cuadrados}} \quad (4.18)$$

Substituyendo:

$$17 = 12 + \text{grados de libertad para el error}$$

$$\text{Grados de libertad para el error} = 17 - 12 = 5$$

El error de la varianza está determinado por la relación: (4.19)

$$\text{Error de la varianza} = (\text{suma de cuadrados con respecto al error}) / (\text{grados de libertad del error})$$

$$= 115.4812 / 5 = 23.0962 \text{ dB}$$

este error está denotado por  $\sigma_e^2 = 23.0962$  dB y es el error cuadrático promedio.

### Intervalo de confianza para el efecto de los factores

El intervalo de confianza es utilizado para juzgar el tamaño o magnitud del cambio originado por la variación en los niveles de los factores comparados con la desviación estándar del error.

La variación del efecto de cada nivel del factor es

$$\frac{1}{6} \sigma_r^2 = \frac{1}{6} (23.0962) = 3.849 \text{ dB}^2 \quad (4.20)$$

Entonces el ancho del intervalo de confianza de la variación estándar, considerando 95 % de confiabilidad, para cada efecto estimado es :

$$\pm 2 \cdot 3.849 = \pm 3.9239 \text{ dB} \quad (4.21)$$

### Relación de la varianza

La relación de la varianza, denotada por **F** en la tabla 4.12, es la relación del promedio de los cuadrados con respecto al factor y al error cuadrático medio. Un valor de **F** muy grande indica que el efecto del factor es considerable comparado con el error de la varianza. También un valor grande de **F**, indica que el factor tiene una gran influencia en el proceso de respuesta de la señal de ruido  $\eta$ . Este valor puede usarse para clasificar el orden de los factores. (Phadke, 1989)

En el Diseño Robusto, se utiliza **F** solo para entender cualitativamente el efecto relativo de los factores. Un valor de **F** < 1, significa que el efecto del factor es mas pequeño que el error del modelo aditivo. **F** > 2, significa que el efecto del factor influye un poco sobre el sistema.

**F** > 4, significa que el efecto del factor es verdaderamente **significante**.

#### 4.2.6. Interpretación de resultados

De acuerdo con Phadke, una meta de la conducción de experimentos es la de optimizar el producto o proceso de diseño, esto es determinar el mejor o el óptimo nivel para cada factor, definiéndose como aquel factor que cuyo nivel proporciona el más alto valor de  $\eta$  (signal to noise ratio S/N), en la región experimental. Recordando que el objetivo del análisis del sistema de calentamiento es obtener la influencia de cada parámetro así como el nivel óptimo, para disminuir la transferencia de calor evaluando la diferencia de temperaturas; utilizando el enfoque

de Mayor es mejor (*“High the better”*, HB) para un proceso no dinámico, donde  $-\log$  es una función monótona decreciente, que implica que debemos maximizar  $\eta$ .

Entonces de la tabla 4.12., observamos que los factores C, E y F, tienen un efecto más grande, en consecuencia se establece que la mejor opción para construir el contenedor es A2, el mejor material para la cubierta exterior es B3, el mejor tipo de aislante es C3, el sistema opera adecuadamente en una temperatura exterior semejante a E1, utilizando un calentador del tipo D1, además de que el sistema se controla mejor cuando se tiene aceite como del tipo F3.

De la matriz de experimentos, la combinación A2,B3,C3,D1,E1,F3, maximizan la relación de S/N, el siguiente cuadro muestra descriptivamente el resultado del sistema óptimo, bajo el análisis de Diseño Robusto.

Factor de control	Nivel óptimo
A Material del contenedor	(A2) Ac. Inox. 17-4Ph
B Material de la cubierta exterior	(B3) Aleac. de Titanio
C Tipo de aislante	(C3) Vacío
D Resistencia del calentador	(D1) Alternado (60 y 120 Ohm)
E Temperatura del medio exterior	(E1) 25 °C
F Tipo de aceite	(F3) 0.925 gr/cc Aceite Pesado

**Tabla. 4.14. Factores que tienen mayor relación de la señal de ruido (S/N)**

Los factores E y F, fueron considerados como factores de ruido, sin embargo se consideraron dentro de la matriz de experimentos, como factores de control, para analizar el efecto que pudieran tener en el sistema, la tabla 4.14., muestra que ambos influyen de forma importante en el sistema, y es necesario realizar un análisis minucioso para considerar sus efectos en la fase de diseño de detalle. El factor D es un parámetro muy importante y tiene una influencia moderada sobre la relación S/N, este factor podría mejorar el sistema si operara bajo el nivel D3.

De igual forma en la tabla 4.13, a través de ANOVA, podemos establecer que el factor C tiene una mayor contribución al total de la suma de cuadrados, aproximadamente del 32.12 %, el segundo factor importante es E con un 20.90 % del total de la suma de cuadrados, estos resultados muestran de igual manera que en el análisis anterior que el factor E, temperatura del medio exterior tiene una gran influencia en la relación de la señal de ruido.

## Predicción y diagnóstico

Empleando la ecuación del modelo aditivo dada a continuación, es posible predecir el valor de  $\eta$  sobre las condiciones óptimas denotada por  $\eta_{opt}$ , bajo el análisis de Diseño Robusto las condiciones óptimas son A2,B3,C3,D1,E1,F3, entonces tenemos:

$$\begin{aligned}\eta_{opt} &= m + (m_{C_1} - m) + (m_{D_1} - m) + (m_{E_1} - m) + (m_{F_1} - m) & (4.22) \\ &= 28.9805 + (33.335 - 28.9805) + (28.8717 - 28.9805) + (31.67 - 28.9805) + (30.6283 - 28.9805) \\ &= 37.5635 \text{ dB}\end{aligned}$$

Nótese que A2 y B3 no se consideran debido a que están incluidas en el error.

El modelo aditivo es también usado para predecir la diferencia entre las condiciones del proceso. La mejora anticipada en cambiar las condiciones de las condiciones iniciales establecidas,

$$\eta_{ini} = m + (m_{C_1} - m) + (m_{D_2} - m) + (m_{E_2} - m) + (m_{F_1} - m) \quad (4.23)$$

consideradas como A1, B2, C1, D2, E2, F1 a las óptimas condiciones (C3, D3, E1, F3) está dada por la siguiente relación:

$$\begin{aligned}&= 28.9805 + (28.315 - 28.9805) + (27.3767 - 28.9805) + (25.3083 - 28.9805) + (30.34 - 28.9805) \\ &= 24.3955 \text{ dB}\end{aligned}$$

En consecuencia, la predicción de la ganancia esperada es:

$$\text{Ganancia} = 37.5635 - 24.3955 = 13.168 \text{ dB} \quad (4.24)$$

Después de realizar experimentos confirmatorios para ambas combinaciones (inicial y óptima), es necesario estimar las relaciones respectivas S/R y determinar la ganancia obtenida. La comparación de ésta con el valor de la ganancia estimando la predicción de 13.1 dB, indicará cuán reproducible es la conclusión experimental.

### 4.2.7. Confirmación del experimento

Según la tabla 4.11 el experimento número 6 cumple con el arreglo que funciona mejor y cuya combinación resultó ser la mejor según los resultados del análisis de la varianza. Armandando el sistema con la combinación de los elementos del cuadro de la tabla 4.12, se procedió a realizar el experimento confirmatorio, la gráfica de la figura 4.16 presenta el resultado y la tabla 4.15 reporta los datos obtenidos.

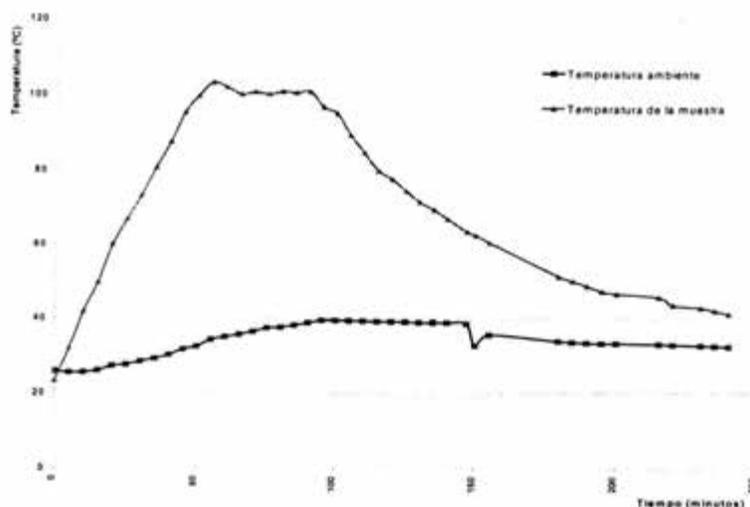


Figura 4.16. Confirmación del experimento, se utilizó una muestra de aceite pesado con densidad  $0.925 \text{ gr/cm}^3$ .

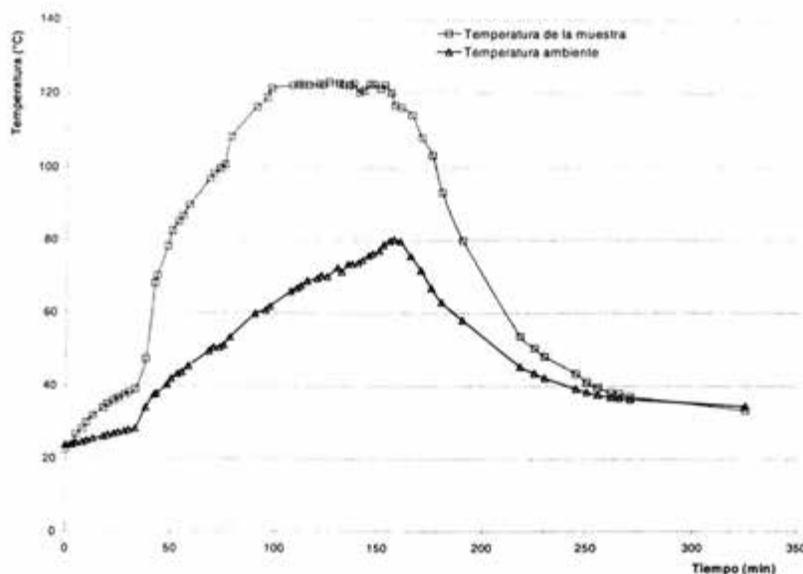


Figura 4.17. Gráfica del experimento a condiciones iniciales, se prueba con camisas de titanio en el Contendor y acero 17-4Ph<sup>(2)</sup> en el exterior, se emplea aire como aislante y crudo pesado.

<sup>(2)</sup> El acero 17-4Ph, es un acero inoxidable al cromo-níquel que puede ser endurecido a baja temperatura por medio de un tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación que le proporcionan excelentes propiedades mecánicas a niveles de alto esfuerzo, es muy resistente al ataque de agentes corrosivos a alta temperatura. (ver pag. 144)

Tiempo min	Temp. amb. °C	Temp. de la muestra	Presión Manom. Psi	Dif. De temperatura Tm-Text	Dif. De Temperatura Tm-Tamb
0	25.74	23.16	100	-0.86	-2.58
5	25.32	31.71	250	4.76	6.39
10	25.39	41.76	1350	9.38	16.37
15	25.67	49.63	2500	11.82	23.76
20	27.09	59.91	3800	13.92	32.82
25	27.43	66.75	4600	15.21	39.32
30	28.3	73.28	5400	16.41	<b>44.98</b>
35	29.04	80.6	6200	17.94	<b>51.56</b>
40	30.09	87.42	6900	19.54	<b>57.33</b>
45	31.62	95.28	7800	21.56	<b>63.66</b>
50	32.35	99.56	8300	22.88	<b>67.21</b>
55	34.17	103.11	9000	22.99	<b>68.94</b>
60	34.94	101.86	8400	22.07	<b>66.92</b>
65	35.63	99.96	8100	20.86	<b>64.35</b>
70	36.41	100.66	8200	21.35	<b>64.25</b>
75	37.4	100.02	8100	21.04	<b>62.62</b>
80	37.58	100.85	8100	21.76	<b>63.27</b>
85	38.14	100.49	8100	21.18	<b>62.35</b>
90	38.8	100.83	8100	21.23	<b>62.03</b>
95	39.44	96.81	7700	18.57	<b>57.37</b>
100	39.47	95.16	7550	17.72	<b>55.69</b>
105	39.42	89.53	6700	15.38	<b>50.11</b>
110	39.36	84.75	6200	13.69	<b>45.39</b>
115	39.23	80.08	5700	11.61	40.85
120	39.2	77.77	5400	11.47	38.57
125	39.15	74.6	5000	10.5	35.45
130	38.98	71.6	4750	9.55	32.62
135	38.96	69.55	4450	8.91	30.59
140	38.89	67.04	4200	8.17	28.15
147	38.63	63.59	3800	7.17	24.96
150	32.76	62.58	3650	7.27	29.82
155	35.71	60.6	3450	7.08	24.89
180	33.94	51.37	2400	4.8	17.43
185	33.64	50.1	2200	4.47	16.46
190	33.44	48.73	2075	4.1	15.29
195	33.32	47.27	1900	3.71	13.95
200	33.28	46.68	1850	3.56	13.4
215	33.09	45.67	1750	3.29	12.58
220	32.91	43.56	1500	2.77	10.65
230	32.74	42.88	1400	2.87	10.14
235	32.58	42.06	1300	2.38	9.48
240	32.45	41.2	1150	2.15	8.75
245	32.29	40.5	1100	1.99	8.21

Tabla 4.15. Reporte de temperaturas de la confirmación del experimento

Experimento	Diferencia de temperatura (fase de calentamiento) °C	Tiempo de calentamiento t min. (T °C)	Vel de calentamiento °C/min
Original	43 44 47.43 48	68 (26.77 a 99.7)	1.07
Mejorado	45 52 57 64 67	45 (25.87 a 99.56)	1.63

Experimento	Diferencia de temperatura (fase de enfriamiento) °C	Tiempo de enfriamiento t min. (T °C)	Vel. de enfriamiento °C/min
Original	46 47 48 47 46	76 (120.85 a 53.55)	0.88
Mejorado	57 56 50 45 41	145 (96.81 a 41.2)	0.38

Tabla 4.16. Comparación de resultados experimentales entre el modelo inicial y el mejorado

La tabla 4.16 muestra las mejoras del arreglo. Se aprecia que el sistema retiene más la temperatura ya que la velocidad de enfriamiento es más baja, la diferencia de temperaturas entre el medio ambiente y la muestra se mejora.

Experimento	Diferencia de temperatura (fase de calentamiento) °C	Diferencia de temperatura (fase de enfriamiento) °C	$\eta$	$\mu$ (°C)
Original	43 44 47.43 48	46 47 48 47 46	32.74 dB	45.9
Mejorado	45 52 57 64 67	57 56 50 45 41	34.25 dB	53.4

Tabla 4.17. Cálculo de la relación de ruido para los resultados del experimento de verificación.

El valor predicho es 37.5635 dB y el valor obtenido con la combinación de factores óptimos es 34.25 dB, la diferencia es 3.31 dB la diferencia es muy estrecha, puede ser ocasionada por errores experimentales, en consecuencia esta combinación de parámetros puede ser la ideal para tener un diseño robusto mínimamente sensible a aquellos factores que afectan su desempeño. Los resultados de los experimentos se encuentran en el apéndice C.

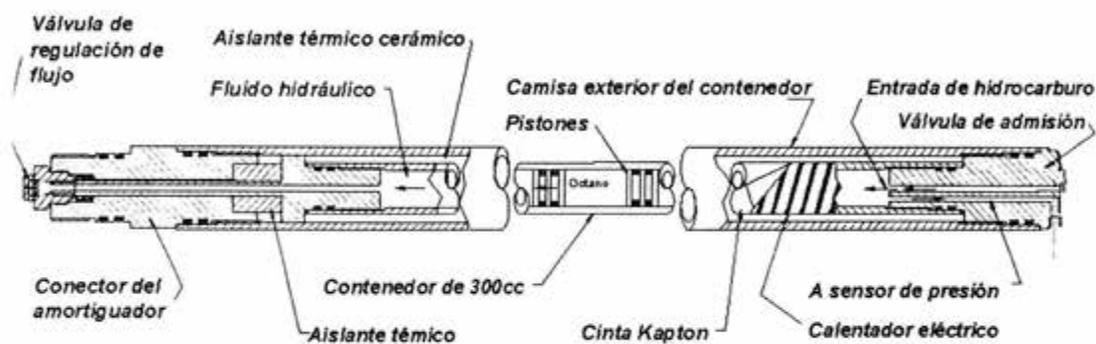


Figura 4.18. Esquema general del sistema de almacenamiento

### 4.3. Caso 2: Válvula de admisión

#### 4.3.1. Descripción del problema

La figura 4.19, muestra el diseño original de una válvula empleada en el muestreador. En general, la válvula estará sometida a las condiciones propias del yacimiento; presión máxima de 1054.6 kg/cm<sup>2</sup> (15 000 psi), temperatura de hasta 170°C, así como el ataque de agentes corrosivos como el ácido clorhídrico, en el caso más crítico. Para resistir estas condiciones ésta válvula está construida de acero inoxidable 316. La válvula utiliza un vástago de aguja para obstruir un orificio de 1.5mm (1/16 pulg); como se muestra en la figura, el vástago esta conectado a un motorreductor de velocidad que se mueve a 6 rpm; el motor a su máxima potencia de carga consume 20 V. Analizando con más detalle la figura, la válvula tiene un arreglo de tubing de 1/8" de diámetro exterior y 0.060" de diámetro interior, que se une a un conector de alta presión de 3mm (1/8 pulg) localizado en la cámara de almacenamiento, donde se guardará un volumen de 300 cm<sup>3</sup> de muestra de fluido de yacimiento. De esta línea se deriva una conexión para un sensor de presión, con el cual se tendrá referencia del comportamiento de la muestra; el volumen de fluido que se encuentra desde la entrada a la válvula hasta la conexión a la cámara y que en algún momento puede quedar atrapado en el sistema es de aproximadamente 0.9 ml.

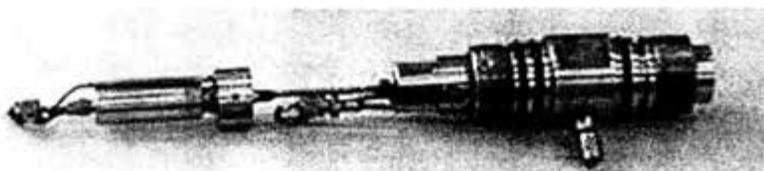


Figura 4.19. Arreglo original del sistema de válvula

En una operación de muestreo en campos mexicanos, es posible encontrar diversos tipos de hidrocarburos, desde crudos superligeros con grado API 57 (0.7507 gr/cc), como los encontrados en el campo Catedral, distrito de Reforma Chiapas (Viscosidad 0.032 Cp, temperatura 101°C), o pesados de grados API 18 (0.946 gr/cc), localizados en el campo Tintal, distrito de Comalcalco, Veracruz (viscosidad 2.4Cp, temperatura 128 °C). De igual forma pueden encontrarse con fluidos de yacimiento con partículas en suspensión, en la mayoría de las ocasiones estas partículas corresponden a areniscas que están mezcladas con el crudo, o corresponden a pequeñas partículas de asfaltenos precipitados.

### 4.3.2. Planteamiento de mejoras

Considerando el riesgo de taponamiento de la válvula, el autor de este trabajo, propuso nuevos diseños; entre los cuales sobresalieron dos:

El primero mostrado en la figura 4.20, consistió en una válvula operada hidráulicamente por la presión de yacimiento.

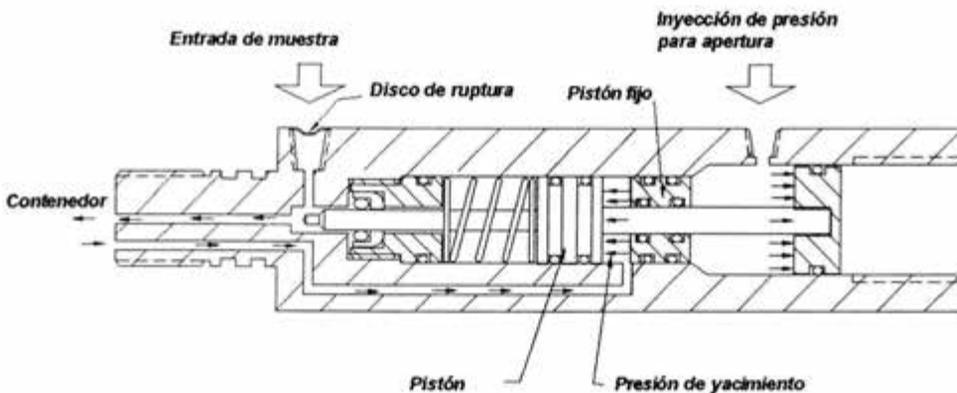


Figura 4.20. Válvula hidráulica

Sobre el orificio de entrada se colocó un disco de ruptura, que puede ser cambiado dependiendo de la presión en el yacimiento, al romperse éste, el fluido entraría directamente a la cámara, empujando los pistones de un amortiguador. Cuando el volumen de  $300 \text{ cm}^3$  llene la cámara, el fluido se comunicará con un pequeña receptáculo, que empujará a un pistón obstruyendo el orificio de entrada, cerrando la válvula con la presión interior de la cámara. Para abrir la válvula se inyectaría presión por un orificio, indicado en el dibujo, la diferencia de áreas entre los pistones ayudaría a vencer las fuerzas de empuje que cierran la válvula. La válvula ingresa al pozo en la posición de "abierto", ya que el pistón es empujado con un resorte como se aprecia en el dibujo.

El segundo diseño, consiste en una válvula de aguja, se emplea un motorreductor con un sistema de clutch para abrir o cerrar, se conectaría directamente al contenedor, evitando pasar la muestra por un tubing. El control del motor sería totalmente electrónico, podría manipularse en automático desde superficie, a través de un programa de control con decisión del operario ó bajo alguna referencia de tiempo, ó variable física (temperatura, presión ó profundidad) administrada por el programa de control. La figura 4.21 muestra el diseño conceptual.

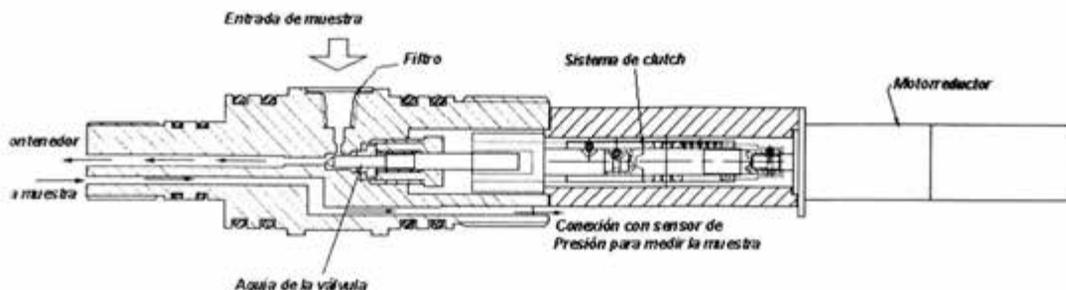


Figura 4.21. Válvula de motor

Analizando las ventajas y desventajas de las válvulas propuestas, se llega al siguiente cuadro comparativo:

Válvula	Hidráulica	Motor
Característica		
Funcionamiento	<i>Depende de presión del yacimiento y los discos de ruptura</i>	<i>Depende de operación del motor</i>
Seguridad de cierre	<i>Depende de los ajustes en la aguja, el material, fricción de los empaques, presión de la cámara</i>	<i>Depende del funcionamiento del motor, los ajustes en la aguja y el material de fabricación de ésta.</i>
Modo de cierre	<i>Por presión en la cámara</i>	<i>Control electrónico</i>
Modo de apertura para transferencia de la muestra	<i>Movimiento de un pistón por inyección de presión mayor al de la muestra atrapada</i>	<i>Electrónicamente, operada con un programa de control</i>
Tipo de energía de operación	<i>Hidráulica</i>	<i>Eléctrica</i>
Facilidad de conectar sensores P y T, para muestra	<i>Depende de diseño de detalle (complicado)</i>	<i>Depende de diseño de detalle (complicado)</i>
Accesorios adicionales fluido muerto	<i>Ninguno</i>	<i>Circuito de control electrónico</i>
Facilidad de ensamble con otra piezas	<i>Depende de número de conexiones eléctricas</i>	<i>Depende del número de conexiones eléctricas</i>
Espacio para conexiones eléctricas	<i>Depende de dimensiones de los pistones</i>	<i>Depende de conexión al contenedor y a los conectores para unir con camisas exteriores</i>
Factibilidad de manufactura	<i>Complicada</i>	<i>Complicada</i>
Dificultad de mantenimiento	<i>Regular</i>	<i>Fácil</i>
Costo aproximado	<i>\$102 dls.</i>	<i>\$872 dls.</i>

Tabla 4.18. Comparación entre válvulas propuestas

El análisis presenta que la válvula hidráulica es mas barata, sin embargo su operación depende de las condiciones del yacimiento, que tienen que ser conocidas por fuerza antes de que se inicie una operación, para colocar el disco de ruptura adecuado a la presión. Se podría eliminar éste e

introducir la herramienta sin el disco para no depender de sus características, sin embargo, la herramienta podría tomar una muestra de alguna parte del pozo (seguramente de la parte superior del pozo) la cual no se había decidido tomar, condición que proporciona un total descontrol de la herramienta. Tomando el enfoque Taguchi, los parámetros que influyen en la operación de la válvula son totalmente factores de ruido, que por definición son factores que afectan el funcionamiento de la válvula y que son difíciles de controlar.

La válvula operada con motor aunque más costosa es mucho más segura, ya que los parámetros que operan la válvula son totalmente controlables.

#### 4.3.3. Enfoque del método de diseño robusto

Analizando el funcionamiento de la válvula seleccionada con el objeto de obtener un diseño totalmente mejorado, Taguchi especifica que el primer paso para un análisis de optimización, es identificar los factores de ruido y de control, así como los factores de señal (entrada) y el de respuesta (salida), llevando éstos a un diagrama P, tenemos:

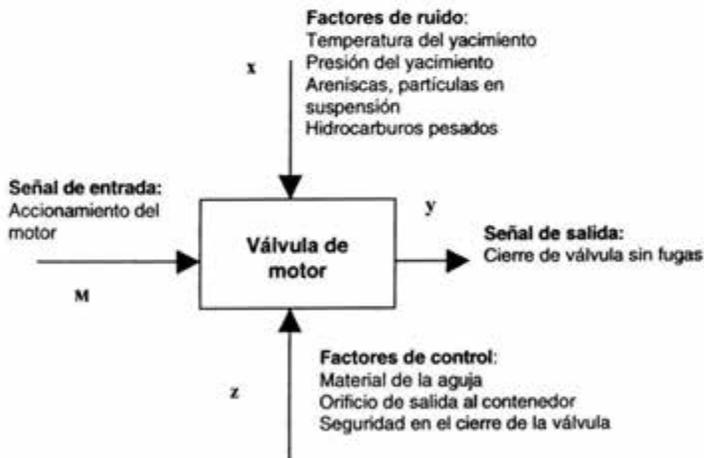


Figura 4.22. Diagrama P para el caso de la válvula

Combinando los factores de ruido de areniscas e hidrocarburos pesados, con un solo factor de ruido identificado como fluidos críticos, con dos niveles que serían precisamente éstos factores, la tabla 4.19 y 4.20 presenta la clasificación de los factores con sus niveles:

Factores de ruido	Factor	Descripción	Niveles		Grados de libertad
			1	2	
	1	Temperatura del yacimiento	100 °C	150 °C	1
	2	Presión del yacimiento	456.99 Kg/cm <sup>2</sup> (6500 psi)	703.07 Kg/cm <sup>2</sup> (10 000 psi)	1
	3	Fluidos críticos	Hidrocarburos Pesados	Hidrocarburos pesados y areniscas	1
<b>Total de G. L.</b>					<b>3</b>

Tabla 4.19. Factores de ruido

Factores de control	Factor	Descripción	Niveles		Grados de libertad
			1	2	
	A	Alimentación del motor	15 V	20V	1
	B	Diámetro del orificio de entrada de la muestra	1.58 mm (0.0625 pulg.)	1.984 mm (0.078 pulg.)	1
	C	Seguridad de cierre	Dos vueltas del trinquete	Una vuelta del trinquete	1
<b>Total de G. L.</b>					<b>3</b>

Tabla 4.20. Factores de control

Calculando los grados de libertad para obtener el tamaño del experimento:

El número de grados de libertad de una matriz debe ser igual al número de corridas del experimento menos uno, esto es:

$$GL_{\text{exp}} = \# \text{ corridas} - 1 \quad (4.25)$$

Por lo que el número de experimentos en este caso es de 4.

Los grados de libertad necesarios para describir el efecto de los factores es igual al número de niveles a probar menos uno, esto es:

$$\begin{aligned} GL_{\text{ef. de los fac.}} &= \# \text{ niveles} - 1 \\ 1 &= 2 - 1 \end{aligned} \quad (4.26)$$

Los grados de libertad requeridos para calcular el efecto principal de cada factor en el sistema es:

$$\begin{aligned} \text{Total } GL_{\text{ef. de los fac.}} &= \# \text{ de factores}(GL_{\text{ef. de los fac.}}) \\ 3 &= 3(2-1) \end{aligned} \quad (4.27)$$

Recordando que los grados es un concepto que es utilizado para describir que tan grande debe de ser un experimento y que tanta información se puede obtener del experimento.

Utilizando la distribución ortogonal L4, para tres factores con dos niveles ( $2^3$ ). La ortogonalidad se refiere al balance de varias combinaciones e indica que ninguno de los factores dados tendrá un peso más ni menos, comparado con los demás factores. La ortogonalidad también se refiere al

hecho de que cada factor puede ser evaluado matemáticamente independientemente del efecto de los otros factores.

Incluyendo en el experimento el efecto de los factores de ruido para encontrar la influencia de éstos sobre el sistema, Taguchi especifica que este tipo de experimentos es la condición para que un producto sea robusto, es decir que el control del proceso esté mucho más cerca del objetivo aunque los factores que no tienen control estén en el proceso. La tabla 4.21. muestra la distribución ortogonal con una distribución interna (factores de control) combinada con una distribución externa (factores de ruido).

No. de experimento	Factores de control			Resultados			
	A	B	C				
1	1	1	1				
2	1	2	2				
3	2	1	2				
4	2	2	1				

Factores de ruido	Columna			
	1	2	3	4
	1	1	2	2
	2	1	2	2
3	1	2	2	

Tabla 4.21. Distribución general de experimentos

No. de experimento	Factores de control A B C			Factores de ruido															
				Colum				1				2				3			
				1				2				3				4			
				100 °C				100 °C				150 °C				150 °C			
				456.99 Kg/cm <sup>2</sup> (6500 psi)				703.07 Kg/cm <sup>2</sup> (10 000 psi)				456.99 Kg/cm <sup>2</sup> (6500 psi)				703.07 Kg/cm <sup>2</sup> (10 000 psi)			
1	15 V	1.58 mm	2 vueltas al trinquete	20.27, 28.40, 12.24	37.70, 41.18,	35.85, 29.36, 23.57	24.56, 26.41,	37.35, 27.29, 25.29	32.48, 27.29,	43.75, 32.48, 21.11	58.93, 27.29,								
2	15 V	1.98 mm	1 vuelta al trinquete	34.47, 28.94, 34.58	29.65, 27.83,	21.84, 34.25, 38.25	27.14, 36.17,	39.15, 35.85, 30.22	41.25, 46.68,	54.81, 76.81, 109.37	57.11, 49.58,								
3	20 V	1.58 mm	1 vuelta al trinquete	17.69, 18.69, 20.87	17.36, 18.26,	31.67, 28.37, 21.37	20.73, 25.21,	16.21, 15.60, 16.14	15.21, 19.96,	19.96, 16.14, 13.32, 20.97, 21.11,									
4	20 V	1.98 mm	2 vuelta al trinquete	21.14, 34.07, 31.48	25.86, 28.75,	40.84, 35.17, 34.25	35.24, 27.14,	56.23, 21.19, 22.18	60.12, 24.78,	46.96, 36.54, 22.46	44.39, 31.13,								

Tabla 4.22. Distribución general de experimentos con traducción de parámetros.

#### 4.3.4. Desarrollo experimental

El primer experimento consistió en probar el diseño de la válvula hidráulica, sometiéndola directamente a presión utilizando aceite de silicón tipo M-100. Como se puede ver en la figura 4.23, la presión fue de 421.84 kg/cm<sup>2</sup> (6000 psi) para verificar el sello de la válvula. Se realizó el experimento con una duración de 2 horas sin considerar la temperatura, el sello de la válvula funcionó perfectamente.

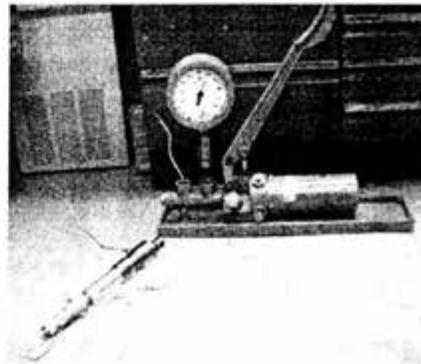


Figura 4.23. Prueba de válvula a presión.

Las siguientes pruebas consistieron en realizar los experimentos según las condiciones establecidas en la tabla 4.22. Se construyó un arreglo como lo muestra la figura 4.24, donde se utilizó un horno eléctrico para utilizar la temperatura como factor de ruido, se construyeron dos camisas prototipo, una de acero 17-4Ph, que se conecta en los extremos a una válvula y a una bomba manual para inyectar la presión. La otra camisa se construyó de aleación de titanio tipo Ti-6Al-4V y se colocó fuera del horno, conectada a la salida de la válvula y en el otro extremo a un sensor de presión.

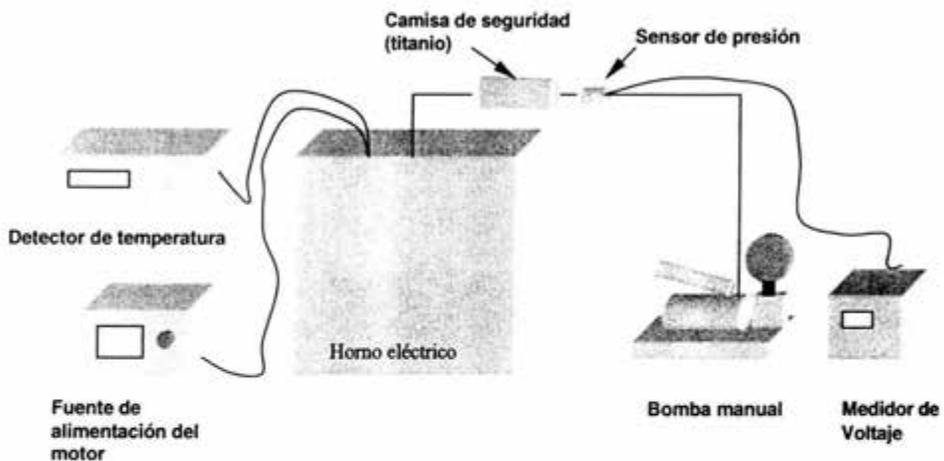


Figura 4.24. Arreglo e instrumentos empleados para el desarrollo de experimentos de la válvula

La prueba consistió en inyectar presión con la bomba manual a la camisa que se encuentra conectada a la válvula, cabe señalar que en el interior de esta camisa se encuentra un pistón que divide dos fluidos, aceite de silicón que es inyectado por la bomba y crudo de densidad  $0.89 \text{ gr/cm}^3$  (aceite pesado) con el cual se va a probar el sello de la válvula. En el experimento correspondiente, este fluido se cambiará por la mezcla de crudo con areniscas.

La válvula se encuentra abierta, cuando se inyecta la presión a las condiciones indicadas, el sensor colocado en la camisa de titanio mide la presión en el sistema, cuando el sensor detectó  $35.153 \text{ kg/cm}^2$  (500psi) menos de la presión indicada en la tabla de experimentos, se cerró la válvula para entrapar esta presión que continuará registrando el sensor, en seguida se continuó presurizando la válvula, se tomó el criterio de considerar fugas cuando el sensor detecte un valor mayor al entrapado, considerando los efectos de la temperatura del horno, objeto por el cual la camisa de titanio se colocó en el exterior del horno. La figura 4.25 muestra una fotografía del experimento.

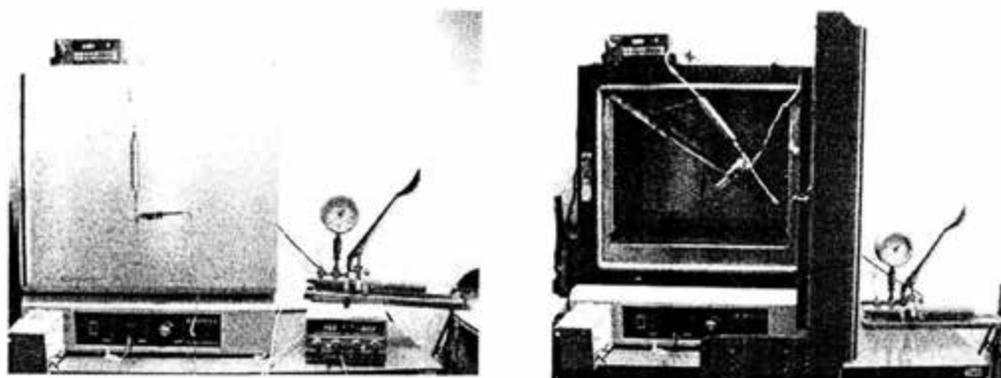


Figura 4.25. Arreglo experimental para prueba de válvula hidráulica

### 4.3.5. Análisis de resultados experimentales

Dado que el objetivo del análisis consiste en obtener cero fugas de fluido al cerrar la válvula, se utiliza la ecuación de señal de ruido del tipo *menor es mejor*.

Para  $n$  datos:  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$

$$\eta = -10 \log \frac{1}{n} (y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2) \quad (4.28)$$

La siguiente tabla recopila la estimación de la señal de ruido para cada una de las corridas.

No. exp.	Factores de control			Diferencias de presión en la salida de la válvula (psi)						$\eta$ (dB)	$\mu$ Kg/cm <sup>2</sup> (psi)
	A	B	C	1		2		3			
1	1	1	1	20.27, 37.70, 28.40 41.18, 12.24	35.85, 24.56, 29.36, 26.41, 23.57	37.35, 32.48, 27.29 27.29, 25.29	43.75, 58.93, 32.48 27.29, 21.11	-30.14	30.64		
2	1	2	2	34.47, 29.65, 28.94 27.83, 34.58	21.84, 27.14, 34.25, 36.17, 38.25	39.15, 41.25, 35.85 46.68, 30.22	54.81, 57.11, 76.81 49.58, 109.37	-19.08	42.69		
3	2	1	2	17.69, 17.36, 18.69 18.26, 20.87	31.67, 20.73, 28.37, 25.21, 21.37	16.21, 15.21, 15.60 19.96, 16.14	19.96, 16.14, 13.32 20.97, 21.11,	-26.11	19.742		
4	2	2	1	21.14, 25.86, 34.07 28.75, 31.48	40.84, 35.24, 35.17, 27.14, 34.25	56.23, 60.12, 21.19 24.78, 22.18	46.96, 44.39, 36.54 31.13, 22.46	-31.05	33.996		

Tabla 4.23. Cálculo de la relación S/N para el análisis de la válvula

Estimando el efecto de los 3 parámetros del proceso tomando los valores observados de (S/N)  $\eta$  en los 12 experimentos. El conjunto principal de la relación de señal de ruido (S/N) para la región experimental definida por los factores y sus niveles, según la tabla 4.23, está dada por:

$$m = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \eta_i = -26.595dB \quad (4.29)$$

El efecto de cada uno de los factores, está definido como la desviación que este causa en el promedio total y es estimada a través de la siguiente ecuación:

Para el factor A con nivel 1:

$$m_{A_1} = \frac{1}{2} (\eta_1 + \eta_2) \quad (4.30)$$

La tabla 4.24, muestra el efecto de los factores sobre el sistema.

Factor	Promedio de $\eta$ para cada nivel del factor (dB)		Relación entre promedios de $\eta$
	1	2	
A Alimentación del motor	-24.61	-28.58	3.97
B Diámetro del orificio de Entrada de la muestra	-28.125	-25.065	3.06
C seguridad de cierre	-30.595	-22.595	8

Tabla 4.24. Tabla de respuesta de la relación S/N para cada factor de control

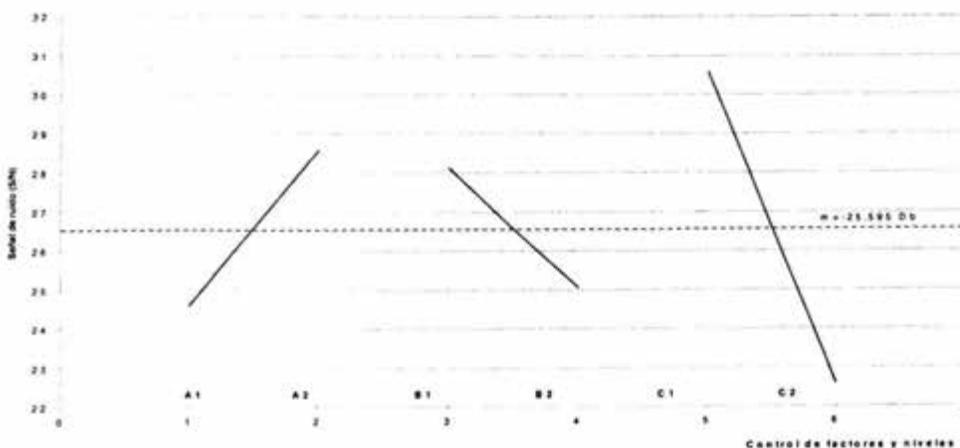


Figura 4.26. Gráfica de respuestas del experimento

### 4.3.6. Análisis de la varianza

#### *Cálculo de la suma de cuadrados*

La suma de los valores al cuadrado de  $\eta$  es llamada gran total de la suma de cuadrados (GTSC) y es calculada utilizando la siguiente ecuación:

$$GTSC = \sum_{i=1}^4 \eta_i^2 = 2918.3006dB \quad (4.31)$$

GTSC se descompone en dos partes, la suma de cuadrados con respecto al promedio (SCRP) y el total de suma de cuadrados (TSC), las cuales están calculadas por las siguientes ecuaciones:

$$SCRP = (n)m^2 = 2829.176 \quad (4.33)$$

$$TSC = \sum_{i=1}^n (\eta_i - m)^2 = 83.2725dB^2 \quad (4.32)$$

Donde  $n$  es el número de experimentos y  $m$  es el promedio de S/N.

La suma de cuadrados (SC) debido al factor A es igual al total de la desviación al cuadrado de la señal del factor A de la línea que representa el promedio general. En éste caso el experimento contiene 4 corridas, integrado por la combinación de los factores y sus niveles, para el caso de A con los niveles 1 y 2:

Para el factor A:

$$SC_A = 2(m_{A_1} - m)^2 + 2(m_{A_2} - m)^2 = 15.7609dB^2 \quad (4.34)$$

Para el factor B:

$$SC_B = 2(m_{B_1} - m)^2 + 2(m_{B_2} - m)^2 = 9.3636dB^2 \quad (4.35)$$

Para el factor C:

$$SC_C = 2(m_{C_1} - m)^2 + 2(m_{C_2} - m)^2 = 64dB^2 \quad (4.36)$$

### 4.3.7. Interpretación de resultados

La tabla 4.25, resume el análisis de los datos que se obtuvieron en los experimentos, de acuerdo al procedimiento de optimización, los factores A1, B1 y C1, maximizan la relación de la señal de ruido. El factor A1 correspondiente a la alimentación del motor, el voltaje de 20 V proporciona una

mejor respuesta según el resultado obtenido, sin embargo los resultados experimentales indican que no existe gran diferencia entre el voltaje de 15 V y éste resultado.

Factor	Promedio de $\eta$ para cada nivel del factor (dB)		Grados de libertad	Suma de cuadrados	Desviación cuadrática	F	Contribución (%)
	1	2					
A Alimentación del motor	-24.61	<b>-28.58</b>	1	15.7609	15.7609	0.1976	17.68
B Diámetro del orificio de Entrada de la muestra	<b>-28.125</b>	-25.065	1	9.3636	9.3636*		10.50
C Seguridad de cierre	<b>-30.595</b>	-22.565	1	64	64	1.246	71.82
Error			0	89.1245			
Total			3				100
(Error)			1	(79.7609)	(79.7609)		

\*error

**Tabla 4.25. Análisis de la varianza (ANOVA) para la relación de señal de ruido (SN)**

Las gráficas de los experimentos (ver apéndice C) mostraron pequeñas fugas cuando la válvula se cierra sobre el orificio de acceso a la cámara de diámetro de 1.98mm, en el resultado del análisis por el método Taguchi, muestra que la válvula tiene un óptimo funcionamiento cuando se emplea un orificio de 1.58 mm (1/16"). Tanto la suma de cuadrados del análisis de la varianza y el porcentaje de contribución de la seguridad de cierre de la válvula, indican que es un factor muy importante que debe de controlarse, el óptimo funcionamiento está dado con dos vueltas de aseguramiento en el trinquete. La diferencia de presiones en los primeros experimentos mostraron buenos resultados a temperatura cercana a 100°C y a presión de 456.99 kg/cm<sup>2</sup> (6500 psi), los cuales balancearon al sistema debido al número de experimentos realizados con los factores de ruido, sin embargo las gráficas a temperatura cercana a 150 °C y presión cerca de 703.07 kg/cm<sup>2</sup> (10500 psi), mostraron deficiencias en el sello de la válvula, aspecto muy importante en el sistema, ya que se corre el riesgo de perder la presión del sistema así como la muestra. En los experimentos realizados, esta falla se pudo corregir proporcionando un apriete mayor al proporcionado por el motorreductor. Analizando las gráficas se muestra variaciones en la presión que se encuentra dentro de la cámara que obedecen a la inestabilidad térmica del equipo utilizado y a la sensibilidad del sensor; en el prototipo final de prueba la inestabilidad deberá estar controlada electrónicamente, además de que es necesario reemplazar el motorreductor con uno de mucho mayor torque.

La tabla siguiente proporciona los factores seleccionados que proporcionan una mejor respuesta del sistema.

Factores de control	Nivel óptimo
A Alimentación del motor	20 V
B Diámetro del orificio de Entrada de la muestra	1.58 mm (1/16")
C Seguridad de cierre	2 vueltas (cambio de reductor)

Tabla 4.26. Factores que tienen mayor relación de la señal de ruido

La siguiente figura muestra el sistema propuesto para la válvula de admisión.

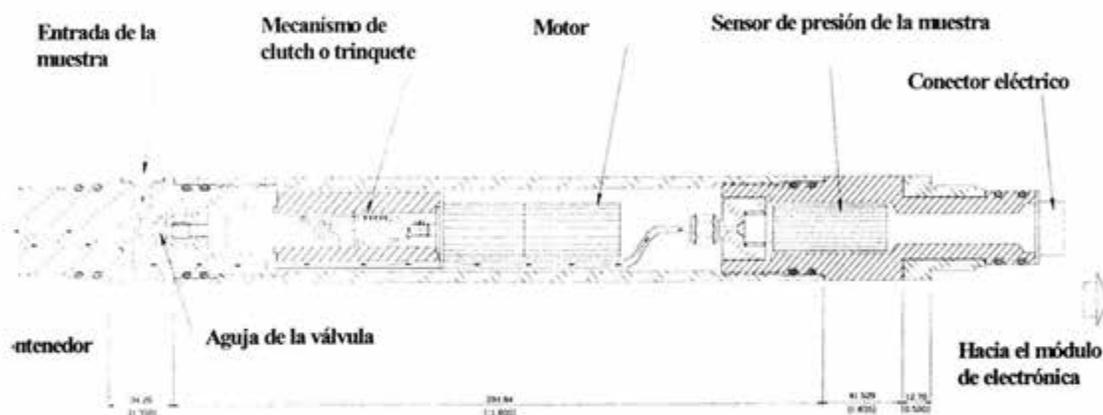


Figura 4.27. Esquema general de la válvula

#### 4.4. Caso 3: Sistema de amortiguamiento

##### 4.4.1. Análisis del Sistema de Amortiguamiento

Como se indica en la figura 2.2. del capítulo II, la herramienta está integrada por una serie de dispositivos, entre ellos se encuentra un sistema de amortiguamiento, cuya función principal es disminuir la velocidad del fluido que entra al sistema de muestreo, evitando una separación de fases.

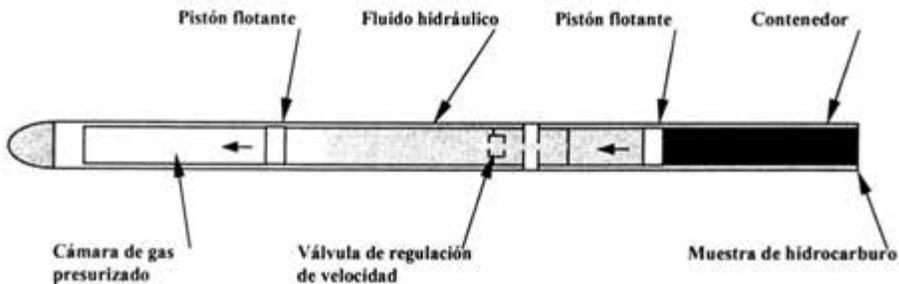


Figura 4.28. Esquema del funcionamiento del sistema de amortiguador

**Funcionamiento:** El sistema de amortiguamiento está conectado directamente con una sección denominada contenedor, funcionando de forma conjunta. El sistema consiste de dos cámaras, el contenedor y la camisa del amortiguador. El contenedor se llena con un fluido hidráulico (Paratherm NF, gran estabilidad térmica, gravedad específica 0.873, coeficiente de expansión térmica  $0.0005472/^{\circ}\text{C}$ ) antes de que la muestra entre a la cámara. El líquido permanece estático mientras la herramienta se introduce al fondo del pozo. El contenedor tiene una válvula que al abrirse permite que el hidrocarburo entre a la cámara debido a la presión del yacimiento, desplazando el fluido hidráulico hacia otra cámara, empujado por un pistón, como se muestra en la figura 4.28. La velocidad del movimiento de estos fluidos es disminuida por una válvula de regulación que se encuentra en el conector que une ambas camisas (ver dibujo SM-05 en el apéndice D), con el objeto de preservar el hidrocarburo en una sola fase y evitar la separación de gases por efectos de flasheo. Cuando la cámara que contiene el hidrocarburo está a su máxima capacidad, se considera que el fluido amortiguador ha pasado totalmente a la otra cámara en donde la presión final es mucho menor que la presión de la muestra, esto es debido a que el volumen de la cámara del amortiguador es mucho mayor al volumen del líquido amortiguador.

Como se observa en la figura 4.28, en una sección del amortiguador se tiene un gas cuya presión dentro de la cámara varía dependiendo de la temperatura del yacimiento.

#### 4.4.2. Enfoque del Método Taguchi

Este sistema en conjunto funciona como un amortiguador de velocidad. En el análisis del problema con el enfoque del método Taguchi se pretende obtener información para el diseño, de aquellos parámetros que intervienen en el funcionamiento del equipo, con el cual pueda desarrollarse un diseño robusto, la característica de calidad o señal de respuesta, como se puede ver en la figura 4.29, es la velocidad del movimiento del hidrocarburo cuando se desplaza dentro del contenedor.

Como primer paso se identifican los factores de control y de ruido que afectan al sistema auxiliados por el diagrama P.



Figura 4.29. Diagrama P para el sistema de amortiguación

Los efectos ocasionados por los factores de ruido son muy importantes, especialmente la presión y el tipo de fluido que técnicamente está relacionado con el factor viscosidad, y puede considerarse como uno solo. De igual forma el índice de producción puede considerarse dentro

del factor presión y disminuir el número de factores de ruido, que afectan directamente al número de experimentos, esta conjunción de factores William Y. Fowlkes les llama "*factores compuestos*" y es realizada con el objeto de simplificar los experimentos (William, 1995). Las tablas siguientes especifican los factores y sus niveles.

Factor	Descripción	Niveles		Grados de libertad
		1	2	
1	Temperatura del yacimiento	100 °C	150 °C	1
2	Presión del yacimiento	421.86 Kg/cm <sup>2</sup> (6000psi)	843.68 Kg/cm <sup>2</sup> (12000psi)	1
3	Tipo de fluido	Ligero*	Pesado**	1

(\*) Densidad 0.8725 gr/cm<sup>3</sup> (30 °API)

(\*\*) Densidad 0.925 gr/cm<sup>3</sup> (22 °API)

Tabla 4.27. Factores de ruido

Factor	Descripción	Niveles		Grados de libertad
		1	2	
A	Tipo de fluido hidráulico	Aceite hidráulico Comercial	Aceite térmico Pharaterm NF	1
B	Rugosidad de las superficies de rozamiento de pistones	0.4µm * (16 µpulg.)	0.80µm** (32 µpulg.)	1
C	Material de los empaques	Kalrez	Vitón 90	1
D	Diámetro del orificio regulador	1.5 mm (0.0625 pulg.)	1.98 mm (0.078 pulg.)	1
E	Volumen de la camisa del amortiguador	300 ml	350 ml	1
F	Presión inicial del sistema	Atmosférica	vacío	1
G	Tipo de gas en sección que se presuriza	Aire	Nitrógeno	1

(\*) 0.4 µm (16 µpulg.) rectificado fino con grano de 120 a 400.

(\*\*) 0.8 µm (32µpulg.) terminado de maquinado muy fino con grano de 40 a 120.

Tabla 4.28. Factores de control

El total de grados de libertad es de 7, por lo tanto según la ecuación:

$$DOF_{exp} = (\# \text{ de experimentos}) - 1 \quad (4.37)$$

El número de experimentos para los factores de control es 8. Si consideramos los factores de ruido dentro del análisis con una matriz exterior, el experimento tendrá 4 corridas. La siguiente tabla muestra la distribución ortogonal de experimentos para una matriz L8 (2<sup>7</sup>, siete factores con dos niveles cada uno) y una distribución externa L4 (2<sup>3</sup>), para los factores de ruido.

Experimento	Factores de control						Resultados				
	A	B	C	D	E	F	G	1	2	3	4
1	1	1	1	1	1	1	1				
2	1	1	1	2	2	2	2				
3	1	2	2	1	1	2	2				
4	1	2	2	2	2	1	1				
5	2	1	2	1	2	1	2				
6	2	1	2	2	1	2	1				
7	2	2	1	1	2	2	1				
8	2	2	1	2	1	1	2				

Tabla 4.29. Distribución ortogonal de experimentos

#### 4.4.3. Desarrollo experimental

Considerando la respuesta del sistema como la disminución de la velocidad del hidrocarburo que entra en la cámara cuyo valor está influenciada directamente por factores de ruido encontrados en el yacimiento. La relación de señal de ruido de tipo estática "menor es mejor", puede proporcionar un estudio de la influencia de los factores sobre el diseño del producto, llevando el diseño del sistema a ser mínimamente sensible a estos factores.

Recordando que la relación de señal de ruido es una herramienta estadística con la que se evalúa un producto, representando una relación entre la sensibilidad y la variabilidad, la siguiente ecuación muestra la forma de calcular la relación de señal de ruido (S/N *signal to noise ratio*).

Para  $n$  datos:  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$

$$\eta = -10 \log \frac{1}{n} (y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2) \quad (4.38)$$

Este problema también se podría estudiar como una señal de ruido tipo dinámica con el caso de doble señal (*Double Dynamic Signal Factors*), que es un análisis empleado para probar diseños y seleccionar el que proporcione mejores resultados. En este análisis el enfoque cambia totalmente

de tal forma que alguno de los factores de ruido tienen influencia directa en la función de respuesta. La función ideal está dada por la siguiente ecuación.

$$y = \frac{\beta M}{M^*}$$

Para el análisis se deben definir los siguientes parámetros:

*El factor de señal funcional (FSF)* que consiste en el factor de entrada que tiene una relación lineal con el valor de la respuesta y es fundamentalmente el causante de la energía de transformación y consecuentemente maneja el valor de la salida funcional del proceso de diseño. Es identificado como M.

*El proceso del factor de señal (PSF)* que es un factor de ajuste que tiene la propiedad de modificar la relación lineal de FSF con el valor de la respuesta. Es identificado como M\*.

El PSF es seleccionado de los factores de control. En este análisis la pendiente  $\beta$  de la relación dinámica puede ser controlada. El diagrama P para éste caso cambia como se podrá ver en la siguiente figura:



Figura 4.30. Diagrama P para el caso dinámico con dos factores de señal

Si consideramos como factor de ruido la temperatura con dos niveles de 100° C y 150° C, la tabla experimental quedaría de la siguiente forma:

Señal funcional (FSF)	Ruido	Factor de señal del proceso de control (PSF)	
		$M_1^* = 1.58 \text{ mm (0.0625 pulg.)}$	$M_2^* = 1.98 \text{ mm (0.078 pulg.)}$
$M_1 = 175.77 \text{ kg/cm}^2$ (2500psi)	100° C		
	150° C		
$M_2 = 351.53 \text{ kg/cm}^2$ (5000psi)	100° C		
	150° C		
$M_3 = 527.30 \text{ kg/cm}^2$ (7500psi)	100° C		
	150° C		
$M_4 = 703.07 \text{ kg/cm}^2$ (10000psi)	100° C		
	150° C		
$M_5 = 1054.6 \text{ kg/cm}^2$ (15000psi)	100° C		
	150° C		

Tabla 4.30. Tabla experimental para el análisis del sistema de amortiguamiento, considerando el caso como dinámico de doble señal de la relación de ruido

Como se muestra en el diagrama P, la señal de respuesta es la velocidad de movimiento del hidrocarburo dentro de la cámara de almacenamiento, en el desarrollo experimental es necesario tener un medidor de flujo e instalarlo en el prototipo de pruebas, para tener una medición del gasto y obtener la velocidad del movimiento de los fluidos. Éste es un problema serio debido a que el equipo que se requiere no se tiene y su adquisición para hacer pruebas no es muy rentable. Para generar la presión que se requiere se necesita una bomba que inyecte presión de forma continua, también se necesitan fabricar los prototipos para pruebas, donde las camisas tienen un costo considerable, en conjunto se requeriría un presupuesto económico importante.

Aunque el método de diseño robusto proporciona herramientas poderosas para optimizar un producto, es importante también tener los recursos y el equipo necesario para poder aplicar el método y diseñar los experimentos de forma adecuada. En este caso, el comportamiento del sistema de amortiguación puede analizarse utilizando conceptos teóricos o bien una simulación con un paquete de computo para análisis de fluidos. Se desarrollará la primer alternativa, el análisis teórico.

#### 4.4.4. Análisis teórico del sistema de muestreo

El óptimo funcionamiento de este dispositivo es realmente imprescindible, los factores tomados en cuenta en el diseño del sistema dependen de las condiciones de movimiento del fluido que entra al contenedor. Para una mejor comprensión y estudio de las condiciones empleadas para el

diseño, es importante tomar en cuenta algunos aspectos del movimiento del fluido en el yacimiento; a continuación se realiza un amplio análisis.

### ***Movimiento de fluidos de yacimiento***

La recuperación del aceite en el yacimiento se obtiene mediante un proceso de desplazamiento. El gradiente de presión obliga al aceite a fluir hacia los pozos, pero ese movimiento se verifica si otro material llena el espacio desocupado por el aceite y mantiene, en dicho espacio, la presión requerida para continuar el movimiento de los fluidos. En cierto modo el aceite no fluye del yacimiento, sino que es expulsado mediante un proceso de desplazamiento, siendo los principales agentes de desplazamiento el gas y el agua. Los sistemas de flujo en el yacimiento generalmente se clasifican de acuerdo con:

- a.- La clase de fluido*
- b.- La geometría del yacimiento o parte de éste*
- c.- La medida relativa en la que el flujo se aproxima a una condición de estado continuo después de una perturbación*

Los sistemas de fluidos se clasifican de acuerdo con su compresibilidad. Además se pueden tener movimientos de fluidos monofásicos (de una fase), bifásicos (de dos fases) o trifásicos (de tres fases). Muchos sistemas consisten de sólo gas, petróleo o agua y la mayoría de los restantes son sistemas de gas-petróleo o petróleo gas. Los dos sistemas geométricos de mayor interés práctico son los que dan origen a los flujos lineal y radial. En el flujo lineal, las líneas de flujo son paralelas y la sección transversal expuesta al flujo es constante. En el flujo radial las líneas de flujo son rectas y convergen en dos dimensiones a un centro común, por ejemplo un pozo. La sección transversal expuesta al flujo disminuye a medida que el centro se aproxima.

Los sistemas de flujo en rocas de yacimientos se clasifican de acuerdo con su estado y puede ser: invariable o continuo y variable o no continuo. En sistemas de estado continuo la presión y la velocidad del fluido en cada punto y a través del sistema, responden instantáneamente en cualquier parte del sistema a un cambio en la presión o en la relación de flujo.

La relación de flujo o gasto depende de varios parámetros, tales como la permeabilidad de las rocas, el tipo de fluido, la viscosidad así como de la presión del yacimiento. En algunos casos la producción del pozo es afectada por problemas debido a precipitación de compuestos orgánicos y tratamientos con inhibidores mal aplicados entre otros problemas.(H. Rufino Rayon,1984)

Considerando un flujo radial de un fluido incompresible hacia un pozo vertical de radio  $r_w$  en un estrato horizontal de espesor y permeabilidad uniformes, como lo indica la figura 4.31. Si el fluido es incompresible, el flujo a través de cualquier circunferencia es constante. Sea  $p_w$  la presión mantenida en el pozo cuando a éste fluyen  $q$  barriles por día a condiciones de yacimiento y una presión  $P_e$  constante en el radio exterior  $r_e$ . Sea  $p$  la presión a cualquier radio  $r$ .

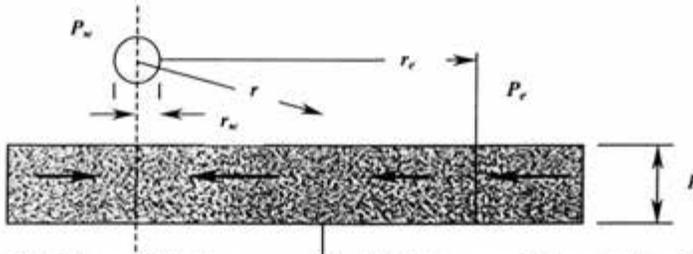


Figura 4.31. Flujo radial hacia un pozo vertical, fluido incompresible y estado continuo

A este radio  $r$ , la velocidad del fluido está dada como:

$$v = \frac{q}{A} = \frac{q}{2\pi rh} = -1.127 \frac{k}{\mu} \frac{dp}{dr} \quad (4.40)$$

$q$  es positiva en la dirección positiva de  $r$ . Separando variables e integrando entre dos radios cualesquiera,  $r_1$  y  $r_2$  donde las presiones  $p_1$  y  $p_2$  son respectivamente la presión del pozo y la presión del yacimiento, tenemos:

$$q = - \frac{7.08kh(p_2 - p_1)}{\mu \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (4.41)$$

El signo negativo, por lo general no se incluye, ya que cuando  $p_2$  es mayor que  $p_1$ , el flujo de por sí es negativo, es decir, en la dirección negativa de  $r$ , o hacia el pozo. Se acostumbra aún más, expresar  $q$  en unidades a condiciones superficiales en vez de unidades a condiciones de yacimiento, por lo tanto:

$$q_{res} = B_o x q_{sc} \quad (4.42)$$

$$q_{sc} = \frac{7.08kh(p_2 - p_1)}{\mu B_o \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (4.43)$$

Los dos radios de interés son por lo general, el radio del pozo  $r_w$  y el radio exterior o de drenaje  $r_e$ , por lo que finalmente la ecuación de flujo para un pozo productor está dado por la siguiente ecuación:

$$q_{sc} = \frac{7.08kh(p_e - p_w)}{\mu B_o \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \quad (4.44)$$

De donde  $k$  es la permeabilidad de la roca en darcys,  $B_o$  es el factor volumétrico del aceite,  $h$  es el espesor de la formación  $\mu$  es la viscosidad del hidrocarburo. (B.C. Craft, 1977)

La ecuación 4.44 puede ser utilizada para estimar la producción del pozo, sin embargo en datos estadísticos se ha encontrado que la producción promedio por pozo es de 978 Bd (Anuario est, 2002), lo que equivale a 155.49 m<sup>3</sup>/día, esto es un flujo promedio de 0.00179 m<sup>3</sup>/s sobre la tubería de producción (TP) que varía según la estructura mecánica y condiciones físicas del pozo. Considerando que el flujo es laminar en una tubería de diámetro interior de 60.325 mm (2 3/8"), empleando la Ley de Poiseuille (ec. 4.45), se puede estimar el flujo en la TP:

$$q = \frac{\pi r_o^4 (p_1 - p_2)}{8 \mu L} \quad (4.45)$$

De donde  $\mu$  es la viscosidad del fluido,  $L$  y  $r_o$  es la longitud y radio del tubo respectivamente. La siguiente tabla presenta propiedades de algunos hidrocarburos que se producen en el país.

Tipo De fluido	Relación de solubilidad [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Viscosidad Residual a cond. de Yac. [cp]	Pozo	Pb [Kg/cm <sup>3</sup> ]	Viscosidad A cond. de Yac. [cp]	Densidad a cond. STD	Temp. de Yac. [°C]	°API
Ac. Volátil	167.59	1.69	261	235	0.451	0.8425	120	36.43
Ac. Volátil	135.14	2.34	citan 101	177	0.4975 a Pb	0.8707	144	31.01
Ac. Volátil	51.05	7.8	1001-A	100	2.15	0.9409	98	18.87
Ac. Volátil	72.15	18.49	3049	124	4.87	0.9261	97.4	21.3
Ac. Volátil	215.24	2.014	117	258	0.235	0.8313	142	38.69
Ac. Volátil	127.09	4.65	3-D	130	1.23	0.903	130	25.19
Ac. Volátil	206.4	0.981	12	245	0.107	0.8333	150.2	38.29
Ac. Volátil	472.44	0.6359	3	345	0.1998	0.8431	146	36.3
Gas y cond				368	0.0394 a Pb	0.7725	156.5	51.67

Tabla 4.31. Relación de viscosidades y otras características físicas de algunas muestras de hidrocarburos.

#### 4.4.5. Caracterización del movimiento del fluido en el amortiguador del sistema de muestreo

En etapas de producción, cuando es necesario obtener información de las condiciones del pozo, se introducen herramientas de registros al interior de la tubería de producción, con las que se perturba el flujo alterando la velocidad y gasto del fluido, debido a la reducción de área dentro de la tubería; esta variación puede ser estimada utilizando la ecuación (4.46) de Hagen-Poiseuille, considerando el fluido como incompresible y laminar (Streeter, 1979).

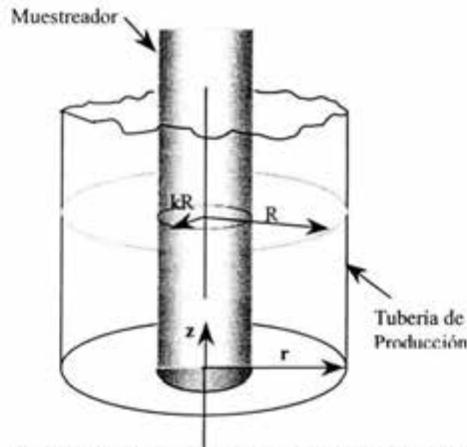


Figura 4.32. Flujo ascendente a través de dos cilindros concéntricos.

La velocidad volumétrica de flujo sobre el espacio anular puede ser estimada mediante la ecuación 4.47, donde  $k$  es una constante de proporcionalidad entre el radio interior del tubo ( $R$ ) y el radio exterior de la herramienta, como se aprecia en la figura 4.32.

$$v_z = \frac{(P_1 - P_2)R^2}{8\mu L} \left( \frac{1 - k^4}{1 - k^2} - \frac{1 - k^2}{\ln(1/k)} \right) \quad (4.46)$$

$$Q = \pi(P_1 - P_2)R^4 \left( (1 - k^4) - \frac{(1 - k^2)^2}{\ln(1/k)} \right) \quad (4.47)$$

Las figuras 4.33 y 4.34, muestran gráficamente el comportamiento de la velocidad y el gasto en una tubería de producción con flujo libre y el caso en que existe una reducción del flujo por la obstrucción de una herramienta, donde el fluido circula por el espacio anular.

Empleando las ecuaciones 4.45, 4.46 y 4.47, y considerando un tramo de tubería de una longitud de 3.80m (1149.6 pulg.) y un radio exterior de 0.0214m (0.8435 pulg.a), como cuerpo de la herramienta de muestreo (la tubería de producción más común tiene un radio interior de 0.0301m (1.187 pulg.) y suponiendo que circula un hidrocarburo de grado API de 21.3 con 4.87 cp, se puede observar el decremento del flujo así como el comportamiento de la velocidad del fluido debido a la obstrucción.

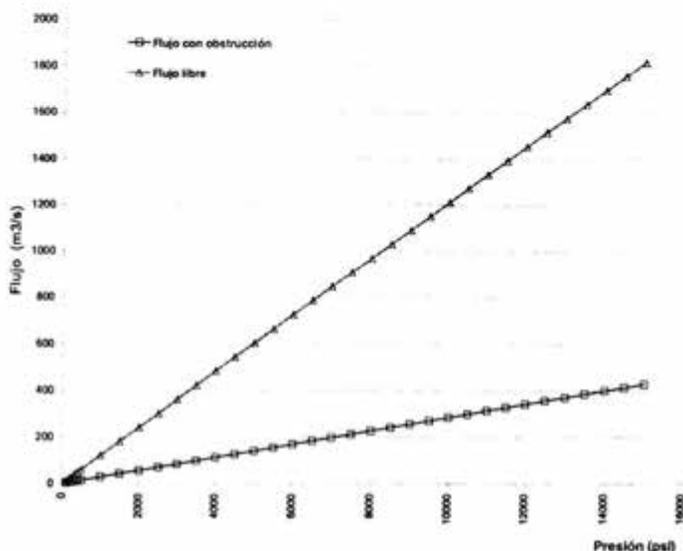


Figura 4.33. Comportamiento del flujo del fluido en una tubería de producción con diámetro libre y con obstrucción por la introducción de una herramienta.

En el caso del muestreo de hidrocarburos, donde una herramienta para toma de muestra es introducida al interior de la TP, el fluido que circula por el espacio anular presenta las condiciones dadas por las ecuaciones 4.46 y 4.47, cuando una muestra es ingresada a una cámara de almacenamiento por diferencia de presión, la velocidad de flujo en el interior de ésta debe ser retardada para disminuir el riesgo de separación de fases del hidrocarburo, esto puede ser logrado mediante la combinación de diversos elementos mecánicos como lo son:

- a.- Disposición de pistones y reducción de diámetro en conductos (absorbedor de impacto)
- b.- Disposición de arreglos con resortes de amortiguación

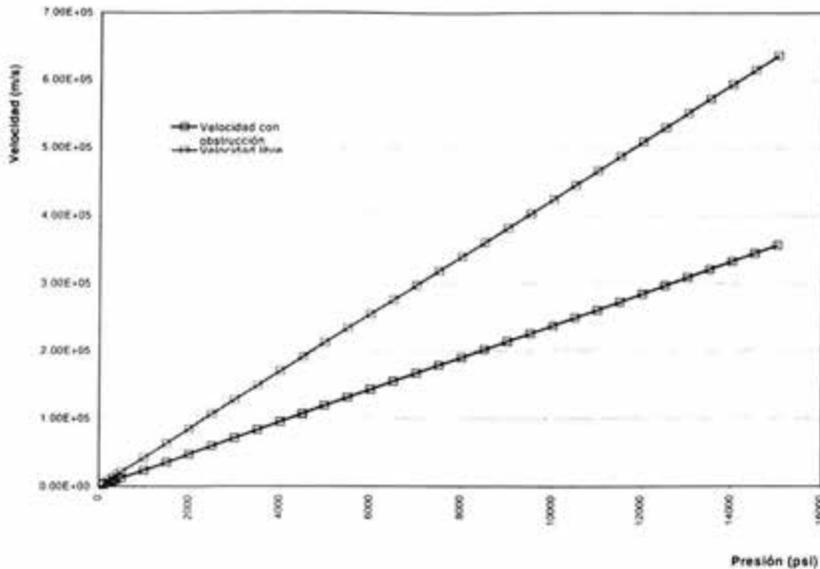


Figura 4.34. Variación de la velocidad de flujo en una tubería con flujo libre y con obstrucción debido a la introducción de una herramienta para muestreo.

Analizando el primer caso: La figura 4.35, muestra un absorbedor de impacto o amortiguador, cuya finalidad es disminuir la velocidad del fluido cuando se mueve en el interior del recipiente contenedor. Considerando que el fluido ingresa al interior a la presión de yacimiento con una velocidad  $V_1$ , velocidad del fluido sobre el espacio anular, ejerciendo una fuerza sobre el área  $A_1$  del pistón, con magnitud  $P_y A_1$ , los arosellos de los pistones ejercen una fuerza de resistencia  $F_\mu$ , producida por su deformación y ajuste. Esta fuerza se opone al movimiento y afecta el valor de la presión  $P_y$ , sin embargo, debido a la magnitud de las presiones y al acabado interior de la camisa,  $0.4 \mu\text{m}$  recomendado (Villanueva, 1983), podemos considerarla despreciable.

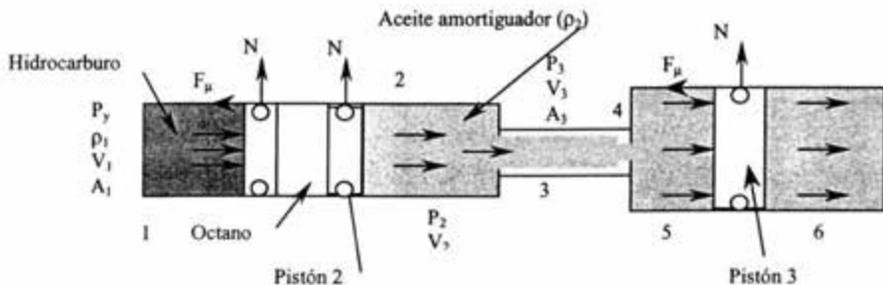


Figura 4.35. Esquema representativo del sistema de amortiguamiento.

Entre los pistones 2 y 3 se encuentra un aceite Paratherm NF, que funciona como fluido amortiguador, con densidad  $\rho_2$  diferente a la densidad del hidrocarburo  $\rho_1$ , la fuerza resultante empuja el aceite haciéndolo pasar por una reducción de área en el punto 3 y conducido hasta un orificio que se comporta como una pequeña placa de orificio donde se aumenta la velocidad del flujo y se disminuye la presión; en consecuencia, el aceite Paratherm NF pasa a una cámara con área diametral mayor al área del recipiente de almacenamiento, en esta cámara el fluido amortiguador choca con un pistón y lo empuja comprimiendo un volumen de gas. La fuerza en este punto, en teoría, es mucho menor a la fuerza de entrada de la muestra al contenedor. El sistema reduce considerablemente la presión y velocidad de admisión de la muestra, evitando que el hidrocarburo se separe en más de una fase por posibles efectos de turbulencia debido al movimiento del fluido a alta velocidad.

El comportamiento dinámico del hidrocarburo en el instante en que entra a la cámara es analizado empleando un balance de energía, basado en el viaje del pistón en una longitud  $x$  a un tiempo dado, esto es:

$$(E_k)_i - (E_k)_x = \int_0^x F dx \quad (4.48)$$

Donde  $F = A_o \Delta P$  es la fuerza de resistencia del pistón,  $M$  es la masa de la carga, el pistón es asumido sin peso, y  $V_p$  es la velocidad de la carga y el pistón después de la colisión donde se mueven juntos.

La pérdida de presión está dada por la ecuación:

$$\Delta P = k V_o^2 7.5 \times 10^{-7} \rho \quad (4.49)$$

$K$  es el factor debido a la restricción del orificio de salida del fluido,  $V_o$  es la velocidad de flujo a través del orificio y puede estar expresada según el principio de la continuidad como:

$$V_o = \frac{V_p A_p}{A_o} \quad (4.50)$$

Sustituyendo en 4.48 y evaluando la energía cinética del sistema:

$$\frac{1}{2} M (V_i^2 - V_p^2) = \int_0^x \frac{A_p^3 K V_p^2 (7.5 \times 10^{-7}) \rho}{A_o^2} dx \quad (4.51)$$

Si hacemos un cambio de variable:

$$dy/dV_p = -MV_p ; \quad dy = -MV_p dV_p$$

diferenciando la ecuación 4.51 y separando variables:

$$-\frac{dV_p}{V_p} = \frac{A_p^3 K (7.5 \times 10^{-7}) \rho}{MA_0^2} dx \quad (4.52)$$

Integrando la expresión desde  $V_i$  a  $V_p$  y de  $0$  a  $x$ :

$$\ln \frac{V_i}{V_p} = \frac{A_p^3 k (7.5 \times 10^{-7}) \rho x}{MA_0^2} \quad (4.53)$$

Despejando el valor de la velocidad del pistón  $V_p$  y dando un valor del diámetro del orificio:

$$V_p = \frac{V_i}{e^{\frac{A_p^3 k (7.5 \times 10^{-7}) \rho x}{A_0^2 M}}} \quad (4.54)$$

Lo que significa que dado el diámetro del orificio de salida y la distancia que recorre el pistón, es posible determinar su velocidad. La siguiente figura 4.36, muestra una gráfica del comportamiento de la velocidad a diversas presiones y considerando diferentes diámetros del orificio de salida.

La máxima presión es al impacto, donde  $V_p$  es igual a  $V_i$ , esto es:

$$\Delta P = \frac{A_p^3 k V_i^2 (7.5 \times 10^{-7}) \rho}{A_0^2} \quad (4.55)$$

El movimiento del fluido después de la reducción y ampliación del diámetro en los puntos 4,5 (ver figura 4.34), así como el movimiento del segundo pistón con el que se comprime un volumen de gas, está caracterizado nuevamente por las ecuaciones 4.54 y 4.55, donde el diámetro con el cual existe un mejor control de la velocidad del fluido, es de 3/64" (0.046 pulg. = 1.19 mm). Las figuras 4.36 y 4.37 muestran gráficamente la variación de la velocidad en diversos puntos del sistema y del pistón de compresión.

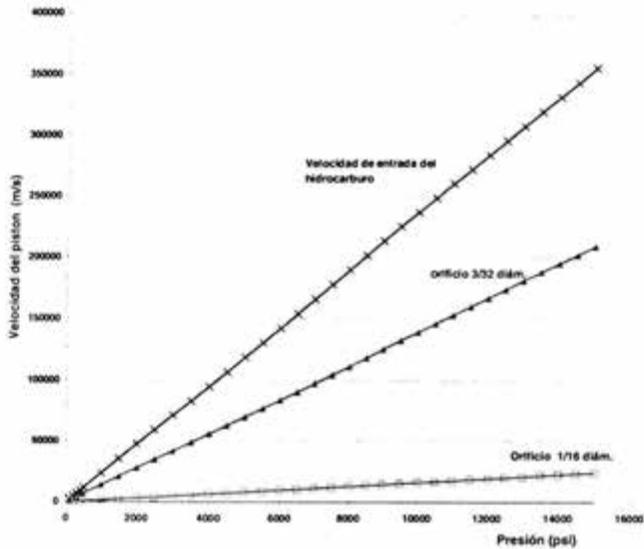


Figura 4.36. Reducción de la velocidad del pistón, calculada para diversos diámetros de orificios de escape.

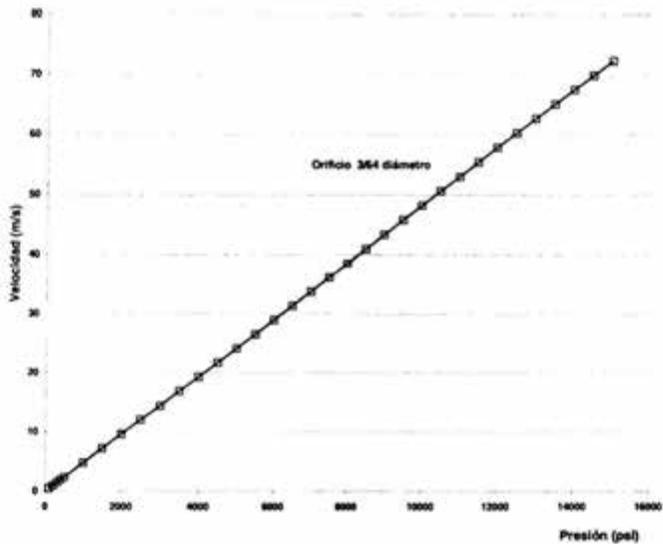


Figura 4.37. Velocidad de llenado de la cámara utilizando un orificio de salida del fluido de 1.19 mm (3/64 pulg.) de diámetro.

Analizando la figura 4.35, podemos observar que el fluido amortiguador comprime un volumen de un gas, en este caso el nitrógeno es considerado como un elemento estable a cambios de presión y temperatura, por lo que es utilizado comúnmente en sistemas presurizados.

Presión de yacimiento Kg/cm <sup>2</sup> [psi]	Velocidad del fluido de yacimiento sobre TP. m/s	Velocidad de admisión (Pistón) m/s	Velocidad del pistón de compresión de Nitrógeno m/s	Presión a la salida del orificio de 3/64 Kg/cm <sup>2</sup> [psi]	Presión en la cámara del aceite amortiguador Kg/cm <sup>2</sup> [psi]	Presión de compresión del Nitrógeno Kg/cm <sup>2</sup> [psi]
7.031 (100)	2375.10	0.482	6.685	7.011 (99.72)	7.005 (99.63)	27.065 (384.94)
14.062 (200)	4750.21	0.964	13.370	13.983 (198.88)	13.958 (198.52)	33.801 (480.74)
21.093 (300)	7125.32	1.446	20.056	20.916 (297.49)	20.859 (296.68)	40.513 (576.21)
28.124 (400)	9500.43	1.928	26.741	27.811 (395.55)	27.709 (394.10)	47.197 (671.27)
35.155 (500)	11875.54	2.410	33.427	34.666 (493.05)	34.507 (490.78)	53.846 (765.83)
70.310 (1000)	23751.08	4.821	66.854	68.356 (972.21)	67.719 (963.15)	86.472 (1229.86)
105.466 (1500)	35626.63	7.232	100.281	101.069 (1437.47)	99.636 (1417.09)	117.959 (1677.69)
140.621 (2000)	47502.17	9.642	133.708	132.805 (1888.84)	130.257 (1852.60)	148.239 (2108.35)
175.777 (2500)	59377.71	12.05	167.135	163.565 (2326.32)	159.584 (2269.70)	177.283 (2521.42)
210.932 (3000)	71253.26	14.464	200.562	193.347 (2749.90)	187.474 (2668.36)	205.072 (2916.65)
246.088 (3500)	83128.80	16.875	233.989	222.153 (3159.59)	214.350 (3048.61)	231.598 (3293.92)
281.243 (4000)	95004.34	19.285	267.416	249.982 (3555.39)	239.790 (3410.43)	256.854 (3653.12)
316.398 (4500)	106879.89	21.696	300.843	276.834 (3937.29)	263.935 (3753.83)	280.834 (3994.19)
351.554 (5000)	118755.43	24.107	334.270	302.709 (4305.30)	286.783 (4078.80)	303.539 (4317.1)
386.709 (5500)	130630.98	26.518	367.697	327.607 (4659.41)	322.259 (4385.35)	324.962 (4621.79)
421.865 (6000)	142506.52	28.928	401.124	351.528 (4999.63)	328.595 (4673.47)	345.103 (4908.25)
457.020 (6500)	154382.06	31.339	434.551	374.472 (5325.95)	347.558 (4943.17)	363.960 (5176.45)
492.176 (7000)	166257.61	33.750	467.978	396.439 (5638.38)	361.710 (5194.45)	381.533 (5426.38)
527.331 (7500)	178133.15	36.161	501.405	417.430 (5936.92)	381.598 (5427.30)	397.821 (5658.03)
562.486 (8000)	190008.70	38.571	534.832	437.443 (6221.56)	396.674 (5641.73)	412.821 (5871.38)
597.642 (8500)	201884.24	40.982	568.259	456.479 (6492.31)	410.456 (5837.74)	426.534 (6066.41)
632.797 (9000)	213759.78	43.393	601.686	474.540 (6749.17)	422.942 (6015.32)	438.960 (6243.14)
667.953 (9500)	225635.33	45.803	635.113	491.622 (6992.13)	434.132 (6174.47)	450.097 (6401.54)
703.108 (10000)	237510.87	48.214	668.540	507.728 (7221.20)	444.027 (6315.21)	459.946 (6541.62)
738.264 (10500)	249386.41	50.625	701.967	522.857 (7436.37)	452.627 (6437.52)	468.507 (6663.37)
773.419 (11000)	261261.96	53.036	735.394	537.009 (7637.65)	460.001 (6541.40)	475.778 (6766.79)
808.574 (11500)	273137.50	55.446	768.822	550.185 (7825.04)	465.940 (6626.86)	481.760 (6851.87)
843.730 (12000)	285013.05	57.857	802.249	562.383 (7998.53)	470.653 (6693.90)	486.453 (6918.61)
878.885 (12500)	296888.59	60.268	835.676	573.604 (8158.12)	474.071 (6742.51)	489.856 (6967.009)
914.041 (13000)	308764.13	62.679	869.103	583.849 (8303.83)	476.194 (6772.70)	491.969 (6997.06)
949.196 (13500)	320639.68	65.089	902.530	593.117 (8435.64)	477.021 (6784.47)	492.793 (7008.78)
984.352 (14000)	332515.22	67.500	935.957	601.407 (8553.55)	476.553 (6777.81)	492.327 (7002.15)
1019.507 (14500)	344390.76	69.911	969.384	608.721 (8657.57)	474.790 (6752.73)	490.570 (6977.17)
1054.663 (15000)	356266.31	72.322	1002.811	615.058 (8747.70)	471.731 (6709.22)	487.525 (6933.85)

Tabla 4.32. Datos de velocidades y presiones en diversos puntos del sistema.

En la fase inicial de operación de la herramienta éste se encuentra contenido dentro de una camisa con un volumen de 400 cm<sup>3</sup> (24.40 pulg.<sup>3</sup>) a la presión atmosférica y a temperatura ambiente. Cabe mencionar que en la fase de admisión de la muestra, este volumen servirá para almacenar el fluido amortiguador que se encuentra en la camisa del contenedor y que será

empujado a través de un pistón con la presión de entrada del fluido al contenedor, el volumen de  $400 \text{ cm}^3$  es mayor que el volumen real del fluido amortiguador para evitar presurizar el sistema de amortiguamiento.

Considerando que al introducir la herramienta al pozo, el gas experimentara cambios de temperatura comportándose de acuerdo a la ecuación general de los gases. Cuando la herramienta se estaciona en un punto en la profundidad, la temperatura del yacimiento en el caso más crítico puede encontrarse a  $175 \text{ }^\circ\text{C}$ , la presión del gas bajo estas condiciones puede estimarse utilizando la ecuación de Boile (William D. McCain,1990) a volumen constante, llegando hasta un valor de  $7.2346 \text{ kg/cm}^2$  ( $102.9 \text{ lb/pulg.}^2$ ).

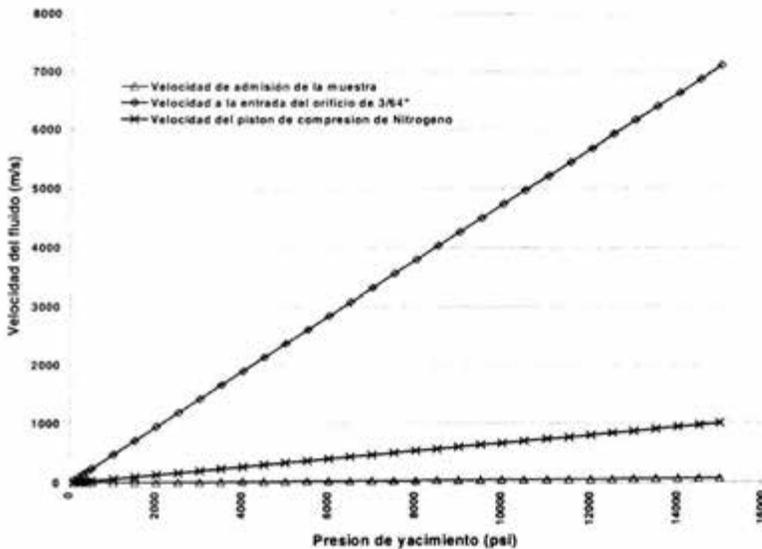


Figura 4.38. Variación de las velocidades del fluido dentro del amortiguador.

Durante el tiempo en el que se toma la muestra se considera que el flujo se comporta como estacionario, empleando la ecuación de la energía (4.56) se obtiene la presión de compresión del gas después de realizar iteraciones hasta hacer que converja la ecuación a un valor dado, que depende principalmente de las condiciones iniciales del sistema.

$$P_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 - w_s = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 + gh_L \quad (4.56)$$

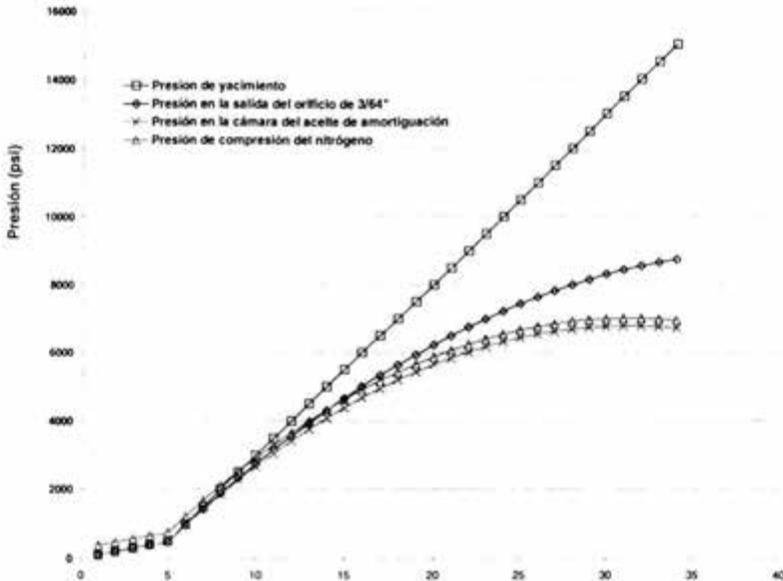


Figura 4.39. Comparación entre diversas presiones dentro del sistema de amortiguación.

Donde  $P_1$  es la presión sobre el fluido amortiguador,  $V_1 = V_2$  y son las velocidades dentro del tubo del amortiguador,  $gh_L$  son las pérdidas por fricción u obstrucciones, en esta sección se consideran como despreciables,  $gz_1 = gz_2$ ,  $w_s$  es el trabajo de compresión del gas, dado por la siguiente ecuación (4.57) en un proceso adiabático (M. Guillon, 1988):

$$W_s = P_0 v_0 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (4.57)$$

$P_2$  es la presión de compresión del gas,  $P_0$  es la presión original del gas,  $v_0$  es el volumen inicial y es un coeficiente que relaciona el calor específico y el volumen específico del gas  $Cp/Cv$ , para el nitrógeno es 1.4. sustituyendo el trabajo en la ecuación 4.56 y despejando la presión de compresión, la ecuación se reduce a la forma:

$$\frac{P_1}{\rho} + P_0 v_0 \frac{\gamma}{\gamma - 1} = \frac{P_2}{\rho} + P_0 v_0 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left( \frac{P_2}{P_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \quad (4.58)$$

La gráfica de la figura 4.40, muestra la variación del volumen de gas que se comprime por efectos de la presión  $P_2$ .

Analizando los datos de la tabla 4.30, se observa que en operaciones críticas cuando se origina una presión máxima que puede encontrarse en un yacimiento ( $1054.6 \text{ kg/cm}^2$  ( $15\ 000 \text{ psi}$ )), se tiene una reducción de la presión en el sistema de amortiguamiento de aproximadamente 41.68 % de la presión en el yacimiento, sin embargo cuando el primer pistón llega al tope, es decir cuando la muestra se ha capturado, la presión de ésta se mantiene a la presión del yacimiento. En el momento en que se cierra el conducto de entrada, la presión del aceite amortiguador se comporta de acuerdo a la ecuación 4.58, donde el gas es comprimido. Los picos de presión que se presentan cuando el sistema está en operación pueden ser reducidos ampliando el volumen original del nitrógeno.

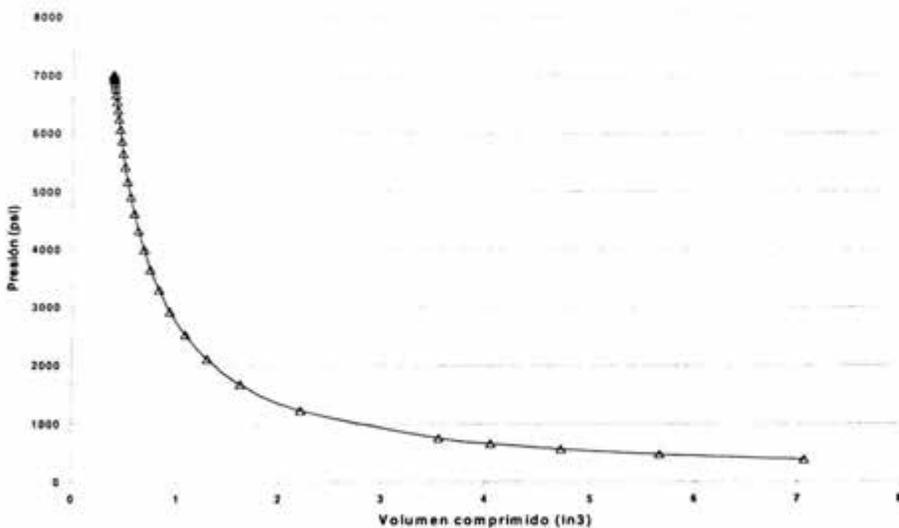


Figura 4.40. Volumen de gas comprimido debido a la presión y movimiento del aceite de compresión.

#### 4.4.6. Dimensiones y estructura del sistema de amortiguamiento

La siguiente figura 4.41, muestra un aspecto de los elementos que integran el sistema de amortiguamiento. Como se mostró en la figura 4.35, el dispositivo mecánico fue diseñado con las dimensiones adecuadas, tomando en cuenta el volumen necesario de gas con el objeto de disminuir la presión donde se encuentra el nitrógeno, esto sucede en los casos críticos donde la

presión alcanza las  $1054.6 \text{ kgf/cm}^2$  (15 000 psi). La cámara de nitrógeno alberga un volumen de gas de  $40 \text{ cm}^3$ , cuenta con un pistón que tiene dos funciones, una de ellas es comprimir el gas en el momento en que se está llenando el muestreador y la otra es empujar el fluido amortiguador hacia la cámara de admisión, cuando se está transfiriendo la muestra, previamente liberado el nitrógeno.

Un elemento muy importante en el sistema de amortiguamiento, es la boquilla que se encuentra en el conector que une dos camisas (ver dibujo SM-05 en el apéndice D), la del contenedor de gas y la de la cámara de almacenamiento. Esta boquilla actúa como un regulador de velocidad, debido a que cuenta con un pequeño orificio por donde fluye el líquido amortiguador de una cámara a otra, y puede ser cambiada por otra con un orificio de menor o mayor diámetro. El material de fabricación de la camisa del amortiguador puede ser una aleación de titanio, con el que se asegura plenamente la resistencia a los agentes corrosivos así como a las condiciones de operación del sistema, esto es a los esfuerzos originados por alta presión.

El plano SMH-01 y la figura 4.41, muestran el diseño mecánico del amortiguador y sus dimensiones, donde la boquilla, con número de parte SM-06, puede ser intercambiada para modificar la presión durante el proceso de adquisición de la muestra de fluido de yacimiento.

Los dibujos SM-01, SM-02, SM-05, SM-06, SM-07, SM-08 y SM-11, muestran con detalle cada una de las partes así como el material de fabricación. (Ver apéndice D)

**Falta página**

**N° 127**



Figura 4.41. Diseño del sistema de amortiguamiento

#### 4.5. Sistema de referencia para medición de profundidad

La necesidad de medir con exactitud la profundidad de pozos barrenados es realmente importante. Como siempre en la explotación de hidrocarburos, el estrato de interés en el pozo, reside en una estrecha banda. Los pozos son típicamente entubados con tubería de acero y cubiertos con cemento que se vierte entre la tubería y las paredes del agujero barrenado, con el objeto de sellarlo y estabilizarlo. La tubería y el cemento son perforados a la profundidad deseada para tener acceso al estrato de interés (aceite, gas, agua, etc.), mediante el uso de herramientas especiales.

En los pozos modernos, después de que han sido barrenados, se tiene como mínimo un programa de registros antes de que el pozo sea entubado. Un registro es generalmente tomado mediante la corrida de un instrumento particular en el interior del pozo, obteniendo información gráfica, en donde uno de los ejes es la profundidad. La información generada usualmente se refiere a características de las rocas, tales como radiación de rayos gamma natural, respuesta de trazadores radiactivos, resistividad, propiedades electroquímicas o transferencia de ondas acústicas.

Existen muchos otros tipos de registros y la información que presentan siempre es referenciada de acuerdo a la ubicación de la herramienta en la profundidad del pozo. Joseph A. Zierof, en la patente US6333699, "*Method and apparatus for determining position in a pipe*", realiza un análisis de algunas metodologías y aparatos más importantes para medir la profundidad del pozo. En el diseño del muestreador de hidrocarburos se utilizarán los principios establecidos por Herber C. Fagan, en su patente US2558 427, Casing Collar Locator de 1946.

##### 4.5.1. Detector de coples

El detector de coples es una herramienta utilizada para contabilizar las uniones entre tuberías, como una referencia de la profundidad, fue desarrollada en 1940 (Logwell, 2004), en el argot petrolero se conoce como "CCL", por su nombre en inglés "*Casing Collar Locator*". Se considera un artefacto relativamente simple, sin embargo es una de las herramientas más importantes en las operaciones de registros geofísicos. El CCL es un aparato magnético, muy sensible al incremento de masa de metal como la armadura de los tubos o las uniones entre tuberías. El CCL siempre se utiliza en corridas de herramientas para registros debido a la importancia de

controlar la profundidad de las herramientas. La exactitud en la medición de la profundidad puede estar complementada con un registro de rayos gamma. (Patrick L. Scholes, 1994)

La función principal del CCL es producir una señal de voltaje que se registra en superficie por un adquisitor o amplificador, esta señal se genera cuando su transductor pasa por un cople de tubería como el que se muestra en la figura 4.42, generando una *fem* según la ley de Faraday. El transductor consiste en una bobina enrollada sobre un núcleo ferromagnético. Cuando el transductor pasa con una velocidad  $v$ , de una tubería de diámetro constante a un cople, la mayor masa metálica del cople modifica el campo magnético en el que se encuentra la bobina e induce en ella un aumento en el pulso de corriente, que se incrementa en proporción directa con el número de vueltas de cable enrolladas en la bobina y la velocidad de movimiento, midiéndose típicamente como un voltaje sobre una resistencia. Cuando el transductor pasa del cople nuevamente a la tubería, se induce otro pulso de corriente en la bobina, pero esta vez en sentido contrario al que se indujo al entrar al cople. De esta forma se generan señales características, que presentan dos pulsos sucesivos de polaridades contrarias.

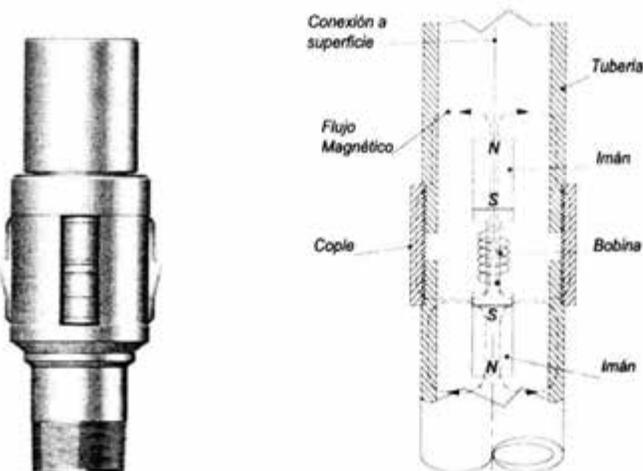
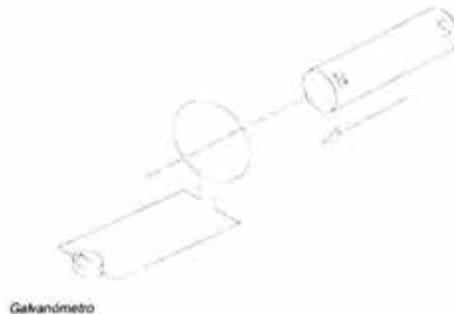


Figura 4.42. Distribución del flujo magnético sobre la masa de un cople.

Cientos de vueltas son utilizadas para obtener una corriente lo suficientemente fuerte para ser detectado en superficie.

#### 4.5.2. Análisis teórico

La figura 4.43. muestra las terminales de una bobina conectadas a un galvanómetro. En condiciones normales no se esperaría una deflexión en la aguja del instrumento debido a que no parece existir una fuerza electromotriz en el circuito; sin embargo, si se acerca un imán de barra con su polo norte hacia la bobina, ocurre un fenómeno extraordinario. Mientras se esté moviendo el imán, el galvanómetro registra una lectura, lo cual demuestra que se ha establecido una corriente en la bobina. Si se mantiene al imán en una posición fija respecto a la bobina, el galvanómetro no experimenta deflexión alguna. Si el imán se mueve alejándose de la bobina, el galvanómetro registra nuevamente una deflexión, pero en sentido opuesto, lo cual significa que la corriente en la bobina va en sentido opuesto. Si en vez del polo norte se utiliza el polo sur del imán, el experimento sigue ocurriendo tal como se ha descrito, pero se invierten los sentidos de las deflexiones. Es importante notar que en este comportamiento influye el movimiento relativo del imán y de la bobina.



**Figura 4.43. El galvanómetro experimenta una deflexión mientras el imán se mueva con respecto a la bobina.**

La corriente que se genera se llama corriente inducida y se dice que se ha establecido una fuerza electromotriz inducida (**fem**). Faraday tuvo la inspiración de intuir que el factor en la generación de este fenómeno era el cambio de flujo  $\phi_B$  en la bobina. Este flujo puede establecerse mediante un imán de barra o una espira con corriente. La Ley de Faraday establece que la **fem** inducida  $\varepsilon$  en un circuito es igual a la rapidez de cambio del flujo a través del circuito excepto por un signo negativo. Si el ritmo de cambio de flujo se expresa en webers/segundo, la fem estará expresada en volts. En forma de la ecuación 4.59.

$$\varepsilon = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad (4.59)$$

El signo indica el sentido de la **fem** inducida. Si esta ecuación se aplica a una bobina de  $N$  vueltas, en cada una de las vueltas aparece una **fem** y todas ellas deben sumarse. Si se ha hecho un embobinado "apretado", se puede decir que cada espira ocupa la misma región del espacio y que el flujo a través de cada una de ellas será el mismo. El flujo a través de cada vuelta también es el mismo en toroides y en solenoides (ideales). La **fem** inducida en estos dispositivos es, entonces:

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi_B}{dt} = - \frac{d(N\phi_B)}{dt} \quad (4.60)$$

En donde  $N\phi_B$  mide el llamado flujo eslabonado en el mismo dispositivo. (D. Halliday, 1989)

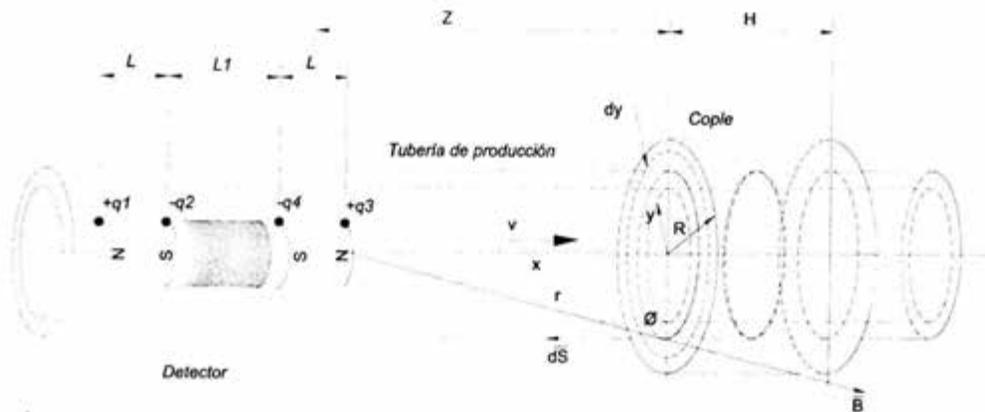


Figura 4.44. Generación de **fem** en el dispositivo para detección de golpes.

En el diseño del detector de golpes, se emplea un par de imanes colocados en los extremos de la bobina, como lo muestra la figura 4.44. Cuando la herramienta baja en el interior del tubo, todo el arreglo se mueve con la misma velocidad. Según la ley de Faraday no existe generación de corriente, sin embargo se mantienen las condiciones para generarla debido a la existencia de un campo magnético producido por los imanes.

La disposición de dos imanes hace al sistema mucho más sensible, especialmente cuando se presenta una alteración del campo magnético producida por el efecto de cambio de superficies con la presencia de un cople o la unión entre tuberías que distorsiona el campo magnético que

generan picos de corriente que pueden ser filtradas.

Considerando los imanes como cargas magnéticas iguales y opuestas colocadas en los extremos de la bobina, si la longitud del imán es  $L$  y su momento dipolar magnético es  $m$ , cada carga magnética  $q$  vale  $\pm m/L$ . El campo magnético  $B$  en las proximidades de uno de los polos magnéticos tiene una expresión de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$B = \frac{\mu_0 q}{4\pi r^2} r \quad (4.61)$$

Donde  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  es la permeabilidad magnética en el vacío. El campo tiene dirección radial y apunta hacia fuera o hacia la carga según sean las cargas  $q$  positivas o negativas, su módulo disminuye con la inversa del cuadrado de la distancia a la carga magnética. El campo magnético total en el punto del eje del imán a una distancia  $z$  de su centro, es la suma del campo magnético producido por las cargas positivas y el campo producido por la cargas negativas. Las siguientes ecuaciones proporcionan el campo magnético total, producido por la suma de cada una de las cargas.

$$B(z) = B_{q1} + B_{q2} + B_{q3} + B_{q4} \quad (4.62)$$

Considerando las cargas iguales  $q = q_1 = q_2 = q_3 = q_4$ , entonces:

$$B(z) = \frac{\mu_0 q}{4\pi} \left[ -\frac{1}{\left(z - \frac{L1}{2}\right)^2} + \frac{1}{\left(z - \frac{L1}{2} - L\right)^2} - \frac{1}{\left(z + \frac{L1}{2}\right)^2} + \frac{1}{\left(z + \frac{L1}{2} + L\right)^2} \right] \quad (4.63)$$

Midiendo el campo magnético  $B$  a una distancia  $Z$  del centro del imán, podemos determinar el momento magnético  $m$  del imán.

$$B(z) = \frac{\mu_0 m}{4\pi L} \left[ -\frac{1}{\left(z - \frac{L1}{2}\right)^2} + \frac{1}{\left(z - \frac{L1}{2} - L\right)^2} - \frac{1}{\left(z + \frac{L1}{2}\right)^2} + \frac{1}{\left(z + \frac{L1}{2} + L\right)^2} \right] \quad (4.64)$$

Si el flujo del campo magnético a través de una espira situada a una distancia  $x > 0$  de una carga magnética  $+q$  está dada como:

$$\phi_B = \int_S B \cdot dS = - \int B dS \cos \theta \quad (4.65)$$

donde  $dS = 2\pi y dy$  que es el área del anillo comprendido entre los radios  $y$  e  $y+dy$ , donde se forma el flujo magnético que induce la corriente sobre la bobina de  $N$  número de espiras.

$$\phi_{+q}(x) = - \frac{\mu_0 q N}{4\pi} \int_0^R \frac{1}{x^2 + y^2} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} 2\pi y dy \quad (4.66)$$

En términos del radio y  $=R$ . Por lo tanto:

$$\phi_{+q}(x) = - \frac{\mu_0 q}{2} \left( 1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + R^2}} \right) \quad (4.67)$$

Cuando  $x < 0$ , el flujo cambia de signo:

$$\phi_{+q}(x) = \frac{\mu_0 q}{2} \left( 1 - \frac{|x|}{\sqrt{x^2 + R^2}} \right) \quad (4.68)$$

Calculando el flujo producido por las cargas; considerando que  $z$  es la distancia entre el centro de las  $N$  espiras apretadas de la bobina y el centro de los imanes en el momento en que se genera la **fem** y que varía en función del tiempo  $t$ , la distancia entre la carga negativa y el centro de las espiras en uno de los imanes es  $x = z + L1/2$  y la distancia entre la carga positiva y el centro de las espiras es  $x = z + L1/2 + L$ . Para el otro extremo, la distancia entre la carga negativa y el centro de las espiras en uno de los imanes es  $x = z - L1/2$  y la distancia entre la carga positiva y el centro de las espiras es  $x = z - L1/2 - L$ , calculando el flujo magnético para cada carga tenemos:

$$\phi_{+q1}(z) = - \frac{\mu_0 Nq}{2} \left( 1 - \frac{\left( z + \frac{L1}{2} + L \right)}{\sqrt{\left( z + \frac{L1}{2} + L \right)^2 + R^2}} \right) \quad (4.69)$$

$$\phi_{+q2}(z) = \frac{\mu_0 Nq}{2} \left( 1 - \frac{\left( z + \frac{L1}{2} \right)}{\sqrt{\left( z + \frac{L1}{2} \right)^2 + R^2}} \right) \quad (4.70)$$

$$\phi_{-q_4}(z) = \frac{\mu_0 Nq}{2} \left( 1 - \frac{\left( z - \frac{L1}{2} \right)}{\sqrt{\left( z - \frac{L1}{2} \right)^2 + R^2}} \right) \quad (4.71)$$

$$\phi_{+q_3}(z) = -\frac{\mu_0 Nq}{2} \left( 1 - \frac{\left( z - \frac{L1}{2} - L \right)}{\sqrt{\left( z - \frac{L1}{2} - L \right)^2 + R^2}} \right) \quad (4.72)$$

$$\phi_B(z) = \phi_{+q_1}(z) + \phi_{-q_2}(z) + \phi_{-q_4}(z) + \phi_{+q_3}(z) \quad (4.73)$$

El flujo total es la suma de todos los flujos que se encuentran en el arreglo.

Para calcular la **fem** derivamos el flujo con respecto al tiempo y lo cambiamos de signo:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B(z)}{dt} = -\frac{d\phi_B(z)dz}{dt} \quad (4.74)$$

Donde la derivada de la posición  $z$  de los imanes respecto al tiempo  $t$  es la velocidad  $v$  con la que se mueven los imanes y el arreglo en sí (imanes y bobina). De esta forma derivando las ecuaciones 4.60 a 4.73, se tiene la siguiente ecuación (4.60):

$$\frac{\mu_0 m R^2}{2L} \left\{ \frac{1}{\left[ \left( z + \frac{L1}{2} + L \right)^2 + R^2 \right]^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{\left[ \left( z + \frac{L1}{2} \right)^2 + R^2 \right]^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{\left[ \left( z - \frac{L1}{2} \right)^2 + R^2 \right]^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{\left[ \left( z - \frac{L1}{2} - L \right)^2 + R^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right\} \quad (4.60)$$

Que es la ecuación que proporciona el valor de la fem, cuando se tienen dos imanes y una bobina. La carga  $q$  se ha sustituido por el momento dipolar magnético del imán  $m=qL$ . La **fem** inducida es la diferencia entre la fem producida por el movimiento de las cargas positivas y la producida por el movimiento de las cargas negativas, como se aprecia en la siguiente figura.

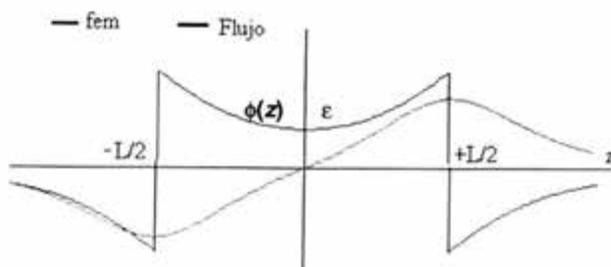


Figura 4.45. Cuando la pendiente del flujo es positiva le fem es negativa y viceversa

Como vemos en la representación gráfica de la figura 4.45, el flujo  $\phi(z)$  es una función discontinua en  $z=0$ , o bien, cuando las cargas positiva y negativa pasan por el centro del cople donde las espiras actúan induciendo la corriente. La fem  $\varepsilon$  es una función continua.

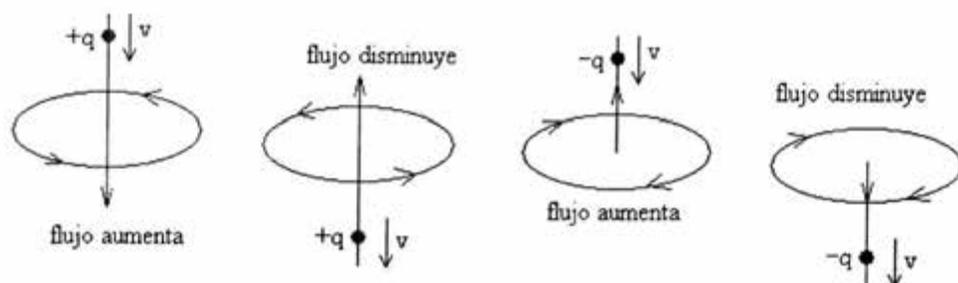


Figura 4.46. Caracterización del flujo

Cuando representamos la fem  $\varepsilon$  en función del tiempo  $t$ , para dos velocidades distintas, comprobamos que el área bajo cada una de las mitades es la misma, tal como se aprecia en la figura 4.47 A menor velocidad la fem disminuye.

Con el análisis teórico y tomando como base la patente de Herbert C. Fagan, USA 2 558 427, establecemos que el diseño más común de un CCL, consiste de una bobina localizada entre dos imanes, que son dos piezas cilíndricas colocadas de forma polarizada uno contra otro, ya sea norte contra norte o sur contra sur, con la finalidad de enfocar las líneas de flujo hacia fuera en un plano perpendicular a los ejes del CCL, como se muestra en la figura 4.44.

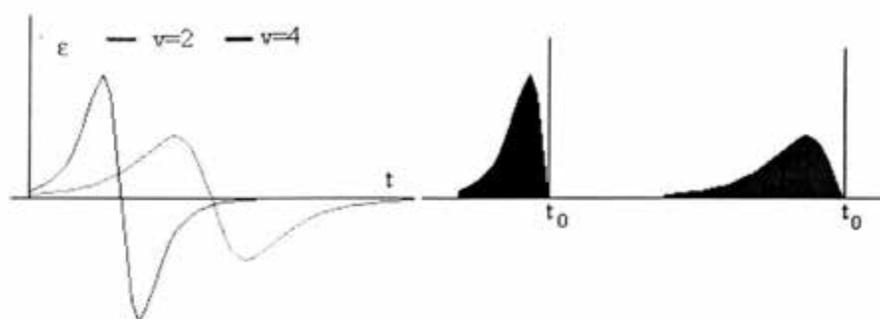


Figura 4.47. Variación de fem inducida en función de la velocidad

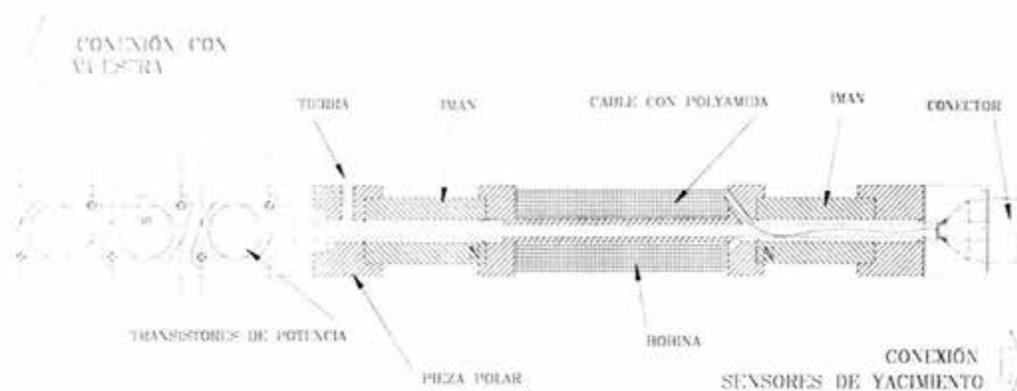


Figura 4.48. Esquema del detector de coples

El arreglo de la figura 4.44, produce en el CCL mas sensibilidad a pequeños cambios en la masa del metal, debido a la integración de dos imanes, creando mejores oportunidades de detectar pequeños huecos en las uniones de las tuberías o coples con pesadas incrustaciones de corrosión en el cuerpo del cople. Un detector de coples puede trabajar en forma separada o ser diseñado para instalarse con otro equipo, como es el caso que se presenta.

La figura 4.48, muestra el diseño de un CCL que se acopla a la electrónica de control del sistema de muestreo. El CCL está formado por una bobina y dos imanes permanentes; la bobina está construida de un metal ferromagnético de bajo contenido de carbono, calidad 1006. El alambre magneto se enrolla sobre la superficie de la bobina. Se requiere soldar el cable al cuerpo de la

bobina, con el objeto de hacer tierra en el circuito, después se coloca una fina capa de teflón para continuar enrollando el cable; para el caso de detectores de coples de 1 11/16" de diámetro, la resistencia final debe tener un valor de 3.5 k $\Omega$ . El alambre magneto que se emplea puede ser de calibre 37 o 38 AWG, con recubrimiento de poliamida (resistente a temperaturas de hasta 180 °C) (Logwell,2004). La figura 4.49, muestra una fotografía del equipo acoplado a la parte de control electrónico de fondo.



Figura 4.49. Instalación del detector de coples

Los imanes empleados están fabricados de ALNICO, con un pequeño orificio en el centro para permitir el paso de cables a través de la bobina y los imanes, cuando éstos se encuentran ensamblados. El alnico deriva sus propiedades magnéticas de los elementos que lo forman (aluminio-niquel-cobalto). El alnico tiene un amplio rango de estabilidad a la temperatura, más que cualquier otro material magnético, pueden mantener su estabilidad magnética de 85 a 90% a temperaturas de hasta 537 °C (1000 °F). Estos imanes son fabricados en diversos grados 2, 5 y 8, sin embargo el más apropiado es el grado 5, debido a su orientación o isotropía. El alnico 5 puede adquirir magnéticamente una energía de 1.3 a 10 gauss-oersteds  $\times 10^6$ . Al igual que el núcleo los extremos son fabricados del mismo material, y éstos se utilizan para guiar las líneas de flujo, cerrar el campo y hacer al detector más sensible.

En el sistema de muestreo, el detector de coples se encuentra en el extremo superior, debido a la facilidad de atravesar los cables de comunicación de la herramienta junto con el conector de los sensores de yacimiento y el conector para cabeza, que se convierte al sistema en monoconductor. En la mayoría de las veces el detector trabaja con un amplificador en fondo, en nuestro caso no fue necesario acondicionarlo, el sistema envía el pulso a través del circuito "pic", y el pulso es contabilizado en superficie por el sistema de adquisición de datos, que se verá en los siguientes capítulos.

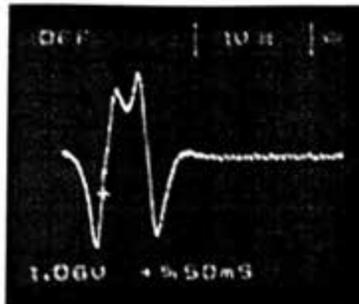


Figura 4.50. Flujo magnético del CCL instalado

La figura 4.50. muestra el flujo magnético de un CCL construido bajo los fundamentos descritos e instalado en la herramienta de muestreo, como lo muestra el plano general SMH-01. La generación del campo magnético que se muestra se realizó conectando la herramienta a un simulador de cable para 4 km de profundidad. La señal que se presenta en la figura 4.50 se obtuvo en un osciloscopio, sin embargo la *fem* inducida en realidad, será registrada solo en un contador y puesta en la pantalla de un programa donde se almacenará la información que genera la herramienta. Más adelante se explica el funcionamiento y detalles generales de este programa.

Los dibujos SM-28, SM-30, SM-31, SM-32, SM-33, SM-36, SM-37 (ver apéndice D) y el plano general SMH-01, muestran con detalle las partes que integran el CCL y su ensamble con la sección de electrónica.

***Capítulo V***  
***Diseño de Detalle***

## 5. Diseño de detalle

Una vez definidas las características de cada uno de los elementos que forman parte de esta herramienta y tomando en cuenta los resultados obtenidos como consecuencia de la aplicación del Método de diseño robusto; la etapa inmediata es determinar la problemática que gira alrededor del diseño de los elementos, cabe señalar que esta parte es considerada como una etapa que requiere la mayor atención posible, así como una de las más costosas, en donde el proyectista pasa la mayor parte del tiempo buscando y analizando soluciones. Es muy común encontrarse con interrogantes como: *¿ cuánto resistirá?, ¿ Será seguro el funcionamiento?, ¿ será demasiado ruidoso ?, ¿ será confiable para el operario ?,* etc. ; la respuesta a estas preguntas, se encuentra después de evaluar cada una de las posibles soluciones utilizando los conocimientos adquiridos durante la formación profesional, que en la mayoría de las veces es apoyada por el uso de catálogos, manuales, información técnica, etc., en otras ocasiones es válido aplicar los conocimientos adquiridos a través de la experiencia, proporcionando soluciones menos complejas y más efectivas, puesto que son el resultado de anteriores aplicaciones.

Partiendo de los resultados obtenidos del capítulo anterior, donde se definió el volumen de gas en el amortiguador, el volumen de muestra en el contenedor, la capacidad calorífica del calentador, el arreglo necesario en la válvula de admisión, la necesidad de instalar sensores de presión y temperatura, la adaptación del sistema de referencia para medir la profundidad y todas las conexiones mecánicas necesarias para integrar la herramienta con cada una de sus partes y además considerando las especificaciones de diseño establecidas en el inciso 2.6. a continuación se presentan los cálculos más importantes efectuados en el diseño de las partes que componen la herramienta de muestreo de hidrocarburos y que complementan el diseño.

### 5.1.- Selección de materiales de fabricación

Existe una amplia gama de materiales que pueden ser utilizados para la fabricación de las partes que integrarán esta herramienta, sin embargo si se atienden los requerimientos técnicos especificados, es posible encontrar que sólo algunos materiales cumplen con estas características.

Se ha encontrado en la experiencia propia, que los usuarios prefieren tener una herramienta o dispositivo del mismo material del que han sido fabricadas otras herramientas que utilizan para realizar otras operaciones como sondas de flujo, por mencionar alguna. Esto se debe a que las

herramientas han sido de procedencia extranjera y no reconocen un cambio en el material de fabricación por más justificaciones técnicas que se presenten. En este caso se tratará de evaluar este criterio conjuntamente con las especificaciones del material.

Si se analiza cada uno de los dispositivos que se utilizarán, se puede establecer que están divididos en diversas clasificaciones:

- a.- Elementos sometidos directamente a las condiciones externas de operación.*
- b.- Elementos que se encuentran protegidos por recipientes que forman parte del inciso anterior y que requieren ciertas propiedades para operar adecuadamente.*
- c.- Elementos que además de estar sometidos a condiciones externas de operación requieren ser ligeros o permitir el flujo magnético.*

A continuación se presentan las características de los materiales que han sido seleccionados para la fabricación de los elementos mecánicos. Cada uno de estos materiales cumple con los criterios anteriores y con las necesidades demandadas por los elementos a diseñar.

#### **a.- Acero Inoxidable tipo ASTM 316-L**

Los aceros inoxidable son aleaciones de hierro con un mínimo de un 10,5% de cromo. Sus características se obtienen mediante la formación de una película adherente e invisible de óxido de cromo. La aleación 316 es un acero inoxidable austenítico de uso general con una estructura cúbica de caras centradas. Es esencialmente no magnético en estado recocido y sólo puede endurecerse en frío. Se añade molibdeno para aumentar la resistencia a la corrosión especialmente en entornos que contienen cloruros. El bajo contenido en carbono de la aleación 316L otorga una mejor resistencia a la corrosión en estructuras soldadas.

Propiedades mecánicas :

Resistencia a la tracción	5624 kg/cm <sup>2</sup> (80 000 lb/pulg <sup>2</sup> )
Resistencia a la fluencia	2109 kg/cm <sup>2</sup> (30 000 lb/pulg <sup>2</sup> )
Dureza	80 Rb
Densidad	0.007950 kg/cm <sup>3</sup> (0.287 lb/plg <sup>3</sup> )
Conductividad térmica (100 °C)	16.3 W/m °K (113 Btu-in/ ft <sup>2</sup> h °F)

#### **b.- Acero tipo 17-4Ph**

Es un acero considerado dentro de las super aleaciones. Es un acero al cromo-níquel, que es endurecido con un tratamiento a baja temperatura. Tiene buena resistencia al ataque de agentes

corrosivos mejor que los aceros tipo 400 endurecidos. Su composición química es la siguiente:

C	0.07 %máx.	Cr	15.00/17.50%
Mn	1.00% máx.	Ni	3.00/5.00%
P	0.04% máx.	Cu	3.00/5.00%
Si	1.0% máx.	Columbio y Tantalio	0.15/0.45%

Propiedades mecánicas:

Esfuerzo a la fluencia	13 915.73 kg/cm <sup>2</sup> (187 925 lb/pulg <sup>2</sup> )
Esfuerzo de cedencia	12 865.68 kg/cm <sup>2</sup> (182 990 lb/pulg <sup>2</sup> )
Dureza	36-38 Rc
Densidad	0.00778 kg/cm <sup>3</sup> (0.281 lb/pulg <sup>3</sup> )
Coefficiente de expansión térmica, $\alpha$	$= 10.8 \times 10^{-6} \frac{mm}{mm^{\circ}C}$ ( $6.2 \times 10^{-6} \frac{pulg}{pulg^{\circ}F}$ )
Relación de Poisson	0.272

### c.- Titanio 6Al-6V-2Sn

Es un material muy noble puesto que tiene excelente maquinabilidad, su permeabilidad magnética es buena, tiene buenas propiedades mecánicas en comparación con los aceros inoxidable, tiene buena resistencia a agentes corrosivos como el ácido clorhídrico. Este material es usado actualmente para la fabricación de prototipos de sondas para la industria petrolera, el costo de adquisición es alto. Tiene la siguiente composición química:

C	0.05 %	N <sub>2</sub>	0.04%	O	0.20% max
Al	5.0/6.0%	Sn	1.5/2.5%	Fe	0.35/1.0%
H <sub>2</sub>	0.0150%	Ti	Balaceado	V	5.0/6.0 %

Propiedades mecánicas:

Esfuerzo a la fluencia	10 568.2 kg/cm <sup>2</sup> (150 000 lb/pulg <sup>2</sup> )
Esfuerzo de cedencia	9 863.6 kg/cm <sup>2</sup> (140 000 lb/pulg <sup>2</sup> )
Dureza	38 Rc
Densidad	0.00454 kg/cm <sup>3</sup> (0.164 lb/pulg <sup>3</sup> ).
Conductividad térmica	4.2 Btu-in/ft <sup>2</sup> h °F

La tabla siguiente resume las características más importantes de éstos materiales:

PROPIEDADES	TITANIO ALEACIÓN 6-6-2	ACERO 17-4 ph	ACERO INOXIDABLE 316
Densidad $\text{kg/cm}^3$ ( $\text{lb/pulg.}^3$ )	0.00454 (0.164)	0.0077 (0.281)	0.00803 (0.290)
Dureza	38 Rc	33 Rc (44 Rc c/tt)	80 Rb
Esfuerzo de Cedencia $\text{kg/cm}^2$ ( $\text{lb/pulg.}^2$ )	9 863.6 (140 000)	12 865.68 (182 990)	2460.5 (35 000)
Esfuerzo a la fluencia $\text{kg/cm}^2$ ( $\text{lb/pulg.}^2$ )	10 568.72 (150 000)	13 915.73 (187 925)	5624 (80 000)

Tabla 5.1. Propiedades de algunos materiales utilizados para la construcción de elementos mecánicos de herramientas de prospección geofísica.

### Justificación de la selección de materiales

Los materiales fueron seleccionados tomando en cuenta principalmente la resistencia mecánica, la resistencia a la temperatura, así como la resistencia al ataque de agentes corrosivos. En aquellas piezas que están expuestas al medio y requieren resistencia mecánica el acero 17-4Ph y el titanio 6-6-2, ofrecen una excelente posibilidad de usarse ya que ambos tienen características mecánicas que los hacen hacerse notar ante otros aceros. En el caso del contenedor y su sistema de calentamiento, el coeficiente de conductividad térmica fue el parámetro técnico que definió el empleo de ambos materiales en la matriz de experimentos en el proceso de optimización. El método Taguchi definió la conveniencia de emplear uno y otro material en la integración del sistema, como resultado del análisis del comportamiento de la temperatura.

La tabla 5.1. presenta en forma resumida algunas características importante de estos materiales comparados con el acero inoxidable 316, se puede apreciar que el acero 17-4Ph, tiene mayor resistencia mecánica incluso que el titanio, sin embargo cuando se requiere que el material fuese antimagnético el titanio es el adecuado ya que permite el paso de flujo magnético a través de su masa, que fue el caso de la camisa de circuitería donde se instaló el detector de coples; la tabla de los materiales que se emplearon para cada una de las partes se encuentra en el plano general SMH-01.

Por lo que respecta a las piezas internas, se considera que no están sometidas a ningún esfuerzo que pueda considerarse como importante, técnicamente se proponen los siguientes materiales para la fabricación de las partes.

**Bronce SAE 62 ( C.D.A. 905 ASTM B-143 (1A))**

Este bronce al estaño tiene resistencia a la tensión de  $2812 \text{ kg/cm}^2$  ( $40\ 000 \text{ lb/pulg}^2$ ), una densidad de  $0.00873 \text{ kg/cm}^3$  ( $0.315 \text{ lb/plg}^3$ ), se utiliza en la fabricación de chumaceras, bujes, anillos de pistón, accesorios para trabajo en vapor, etc.

**Bronce ALMENA B-2 ( C.D.A. 932, SAE 660, ASTM B-144 (3B))**

Este bronce al plomo tiene una resistencia a la tensión de  $2320.67 \text{ kg/cm}^2$  ( $33\ 010.9 \text{ lb/pulg}^2$ ), una densidad de  $0.0089 \text{ kg/cm}^3$  ( $0.322 \text{ lb/pulg}^3$ ), tiene buena conductividad eléctrica. Es buen metal antifriccionante, resistente al desgaste bajo presiones, es utilizado para fabricar bujes, cojinetes, partes para bombas hidráulicas, chumaceras, equipo eléctrico.

**Teflón Blanco (PTFE)**

Se utiliza para elaborar aislantes, es un plástico resistente a altas temperaturas, hasta  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , así como también al ataque de sustancias corrosivas como ácidos.

**Viton-90**

Es un material empleado para fabricar arosellos, es resistente a altas temperaturas, tiene una dureza de 90 grados Shore, se utiliza principalmente para sellar equipo a altas presiones y temperaturas.

**Kalrez**

Es un material empleado en la fabricación de arosellos, con mejores propiedades que el viton-90. Tiene la capacidad de resistir un poco más de  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  así como el ataque de ácidos, tiene buena estabilidad a cambios de temperatura. Este material será empleado solamente en los arosellos que se instalan en el contenedor de la muestra y el pistón, debido a que se encuentran sometidos por un periodo largo a condiciones extremas, más que cualquier otro elemento.

**5.2.- Análisis de esfuerzos sobre la herramienta de muestreo**

Como se puede observar en la figura 5.1., las herramientas que se introducen en el interior de los pozos petroleros, viajan hacia el fondo por acción de la gravedad. En la mayoría de las veces se acoplan a aditamentos especiales con la finalidad de aumentar el peso de la herramienta y facilitar el descenso. Este equipo especial es identificado comúnmente como contrapesos que se

puede encontrar en acero aleado cuando se requiere de una carga ligera o rellenos de plomo y tungsteno, cuando los requerimientos de carga son mayores, tienen un peso de entre 28 y 30 Kg.

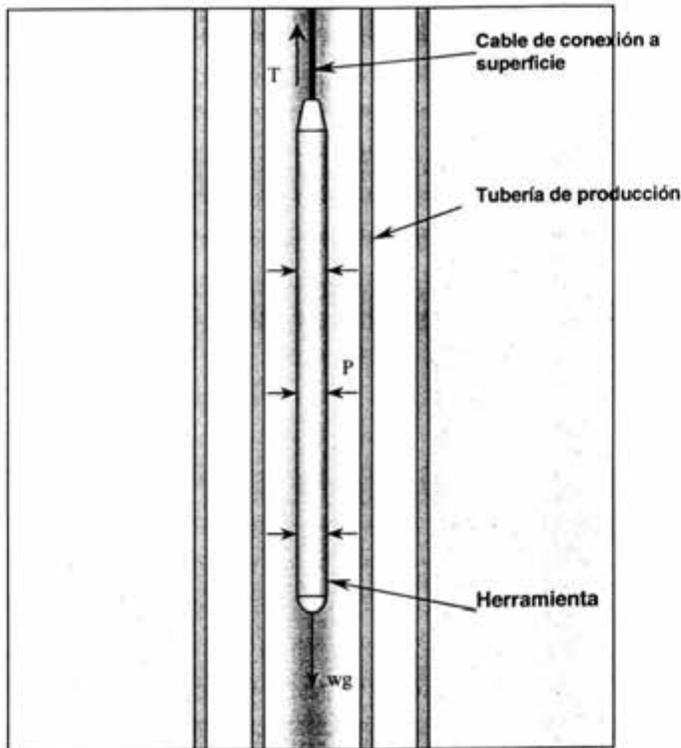


Figura 5.1. Análisis de fuerzas sobre la herramienta de muestreo

En un análisis de las condiciones de trabajo de la herramienta se detectaron dos tipos de esfuerzos:

*a.- Esfuerzo radial*

Este esfuerzo se presenta por la acción de la presión exterior cuyo valor máximo es de  $1054.5 \text{ kg/cm}^2$  ( $15\ 000 \text{ lb/pg}^2$ ), así como los esfuerzos que se originan por el movimiento de la herramienta cuando se encuentra inmerso en un medio viscoso, que pueden ser despreciables en este caso.

*b.- Esfuerzo axial*

Este esfuerzo está definido en el caso más crítico, cuando la herramienta llega a atorarse en el interior del pozo por cualquier deformación, estrangulación o cualquier

otro problema que impida el movimiento ascendente de la herramienta, el esfuerzo máximo que se origina en este instante es el valor en el cual el cable electromecánico sufre la ruptura, que es aproximadamente de 11 000 kg (4994 lb) siendo el cable de 5.556 mm (7/32") de diámetro, monoconductor.

### 5.3- Cálculo de esfuerzos sobre espesores de pared de elementos sometidos a presión.

Utilizando las ecuaciones desarrolladas en el Apéndice E, se determina la distribución de esfuerzos en las paredes de las camisas que están sometidas a presión exterior, presión del yacimiento. Según el plano SMH-01, los elementos más críticos son las camisas cuyas características se mencionan a continuación: (Tabla 5.2.)

No. De parte	Descripción	Material	Diámetro exterior mm (pulg)	Diámetro Interior mm (pulg)	Longitud Mm (pulg)
SM-03	Camisa del amortiguador	Ti-6Al-6V-2Sn	42.84 (1.687)	31.80 (1.252)	614.68 (24.200)
SM-14	Camisa del contenedor	Ac. 17-4 Ph	43.18 (1.700)	35.56 (1.400)	1318.26 (51.900)
SM-12	Contenedor	Ti-6Al-6V-2Sn	27.94 (1.100)	0.750 (19.05)	
SM-20	Camisa para motor y sensor.	Ac. 17-4Ph	43.18 (1.700)	1.350 (34.29)	294.64 (11.600)
SM-55	Camisa para Circuitería	Ti-6Al-6V-2Sn	42.849 (1.687)	1.250 (31.75)	1313.815 (51.725)

Tabla 5.2. Relación de piezas con esfuerzos críticos por presión de trabajo.

Aplicando las ecuaciones E.1 a E.4. establecemos el criterio para considerar el recipiente como de pared delgada o gruesa, la tabla siguiente (tabla 5.3)., proporciona en resumen los resultados:

No. De parte	Criterio					Tipo de pared
	Shigley $Pd \text{ si } e < (di/20)$	Pisarenko $Pg \text{ si } e > (r \text{ med}/10)$	Durr y Wachter $Pd \text{ si } de > 10e$	Gere y Timosenko $Pd \text{ si } (r/e) < 10$	ASME $Pd \text{ si } (e/di) < 0.10$	
1-03	5.511 > 1.590	5.511 > 1.8643	42.84 < 55.118	2.88 < 10	0.173 > 0.10	Gruesa
1-14	3.81 > 1.778	3.81 > 1.955	43.18 > 38.1	5.66 > 10	0.107 > 0.10	Gruesa
1-12	4.318 > 0.9652	4.318 > 1.181	27.94 < 43.18	3.23 < 10	0.12 > 0.10	Gruesa
1-20	4.445 > 1.7145	4.318 > 1.935	43.18 < 44.45	4.85 < 10	0.129 > 0.10	Gruesa
1-55	5.537 > 1.574	5.537 > 1.8542	42.84 < 55.37	3.86 < 10	0.174 > 0.10	Gruesa

Tabla 5.3. Evaluación de las camisas utilizando los criterios de diversos autores para considerar los recipientes como de pared delgada o gruesa.

Como se puede analizar en la tabla anterior Gere y Timoshenko son más conservadores y consideran todos los recipientes como si fueran de pared delgada, sin embargo la teoría de ASME toma otro criterio relacionando el diámetro interior y el espesor proporcionando un valor más razonable, por lo que se toma este criterio para el análisis de esfuerzos.

Considerando las camisas como un cilindro con los extremos cerrados y empleando las ecuaciones E.26. y E.27., se calculan los esfuerzos más importantes como son el radial y el tangencial, a continuación se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los casos.

#### a.) **Parte SM-03 Camisa del amortiguador**

La camisa del amortiguador tiene una longitud de 614.68 mm (24.200) y está sometida a esfuerzos bajo las siguientes condiciones:

1. Cuando la presión interna llega a la presión máxima del Nitrógeno por efectos de la temperatura y la presión de trabajo exterior que en el caso más importante llega a ser de hasta  $1055.72 \text{ kg/cm}^2$  (15 000 psi).
2. Cuando la presión externa es la presión atmosférica y la presión interna es la presión del gas encerrado en la cámara enfriándose, momentos después de sacar la herramienta del pozo.
3. Cuando la presión externa es la presión atmosférica y la presión interna llega al valor de  $1054.6 \text{ kg/cm}^2$  (15 000 psi), debido a las operaciones de transferencia.

En estos casos la aleación de Titanio 6-6-2, tiene buena respuesta mecánicamente, además de resistir el ataque de agentes corrosivos. Considerando el primer caso como el más importante; los datos para el cálculo son:

Coefficiente de expansión térmica, $\alpha$	=	$2.88 \times 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{mm}^\circ\text{C}}$ ( $5.2 \times 10^{-6} \frac{\text{pu lg}}{\text{pu lg}^\circ\text{F}}$ )
Módulo de elasticidad,	E	= $1\ 195\ 284.76 \text{ kg/cm}^2$ ( $16.5 \times 10^6 \text{ PSI}$ )
Relación de Poisson,	$\nu$	= 0.32
Presión externa,	$p_o$	= $1054.66 \text{ kg/cm}^2$ (15 000 PSI)
Presión interna,	$p_i$	= $487.525 \text{ kg/cm}^2$ (6933.85 PSI)
Temperatura exterior		= $175^\circ\text{C}$ ( $347^\circ\text{F}$ )
Temperatura interior		= $160^\circ\text{C}$ ( $320^\circ\text{F}$ )

La figura 5.2 muestra la gráfica representativa de la variación de los esfuerzos de tensión y cedencia de la aleación de titanio 6-6-2, donde se puede observar los siguientes datos en función de la temperatura:

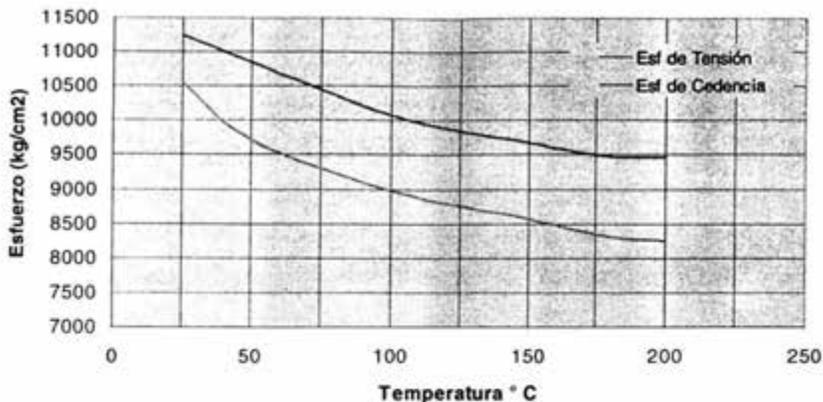


Figura 5.2. Relación de esfuerzos de la aleación de titanio 6-6-2 a diferentes temperaturas ( Down Corning Materials for High Technology Applications, 1986).

Temperatura °F (°C)	Esfuerzo de Tensión kg/cm <sup>2</sup> (10 <sup>3</sup> lb/pulg <sup>2</sup> )	Esfuerzo de Cedencia kg/cm <sup>2</sup> (10 <sup>3</sup> lb/pulg <sup>2</sup> )
77 (25)	11249.38 (160)	10545 (150)
122 (50)	10845.88 (154.28)	9721.084 (138.28)
212 (100)	10082.42 (143.42)	8977.31 (127.70)
302 (150)	9680.31 (137.70)	8575.89 (121.99)
347 (175)	9479.95 (134.85)	8315.08 (118.28)
392 (200)	9459.56 (134.56)	8254.62 (117.42)

Tabla 5.4. Esfuerzos de tensión y cedencia para aleación de titanio 6Al-6V-2Sn en función de la temperatura.

La tabla anterior fue determinada obteniendo los datos gráficamente e interpolando valores de la figura 5.2., en donde se puede observar que los esfuerzos de tensión y cedencia disminuyen cuando la temperatura aumenta, en este caso a 175 °C el esfuerzo a la cedencia es de 8315.08 kg/cm<sup>2</sup> (118 280 lb/pulg<sup>2</sup>), aproximado.

El cilindro y la mayoría de las piezas estarán sometidas a variaciones de temperatura desde 29°C (84.2F) hasta un máximo de 175°C (347°F), aunque debido a la electrónica la temperatura máxima de operación será de 150°C (302°F), consideramos el valor de 175°C (347°F) como valor de diseño. El tiempo en el que las piezas estén sometidas a éstas condiciones, depende del tiempo de operación y sus condiciones, durante el cual el mecanismo se homogeneizará a la máxima temperatura; si se tomara la diferencia de temperatura en este instante, los esfuerzos térmicos serían nulos, según las ecuaciones E.26 y E.27. Sin embargo, considerando el caso

extremo, cuando la temperatura en el interior del cilindro es 160°C (320°F) y en el exterior de 175°C (347°F), se obtienen los siguientes esfuerzos sobre un espesor de pared propuesto de 0.55245 cm (0.217 pulg) (tabla 5.5). Debido a que la presión exterior es un poco mayor que la presión que se encuentra en el interior del sistema, los esfuerzos radial y tangencial son de compresión, siendo el esfuerzo tangencial ( $\sigma_t$ ) siempre mayor al esfuerzo radial ( $\sigma_r$ ), el máximo esfuerzo tangencial es de compresión 2974.948 kg/cm<sup>2</sup> (42 311.353 Psi) y tiene lugar en la superficie interior en donde el diámetro tiene un valor de 31.75 mm (1.250 pulg). El esfuerzo radial ( $\sigma_r$ ) tiene el valor de la presión exterior 1054.66 kg/cm<sup>2</sup> (15 000 Psi) y también es de compresión. El apéndice E, se encuentra el dibujo de esta pieza con el número de parte SM-03.

Radio Interior (a)	Variación del radio (r)	Radio Exterior (b)	Espesor (e)	Suma de Esfuerzos Térmicos y Normales Radial	Tangencial
15.875	15.875	21.4249	5.5495	-487.525	<b>-2974.948</b>
	16.05		5.3745	-514.509	-2949.815
	16.225		5.1995	-540.644	-2925.512
	16.4		5.0245	-565.966	-2902.001
	16.575		4.8495	-590.509	-2879.250
	16.75		4.6745	-614.306	-2857.227
	16.925		4.4995	-637.386	-2835.902
	17.1		4.3245	-659.779	-2815.246
	17.275		4.1495	-681.513	-2795.232
	17.45		3.9745	-702.613	-2775.834
	17.625		3.7995	-723.104	-2757.027
	17.8		3.6245	-743.010	-2738.789
	17.975		3.4495	-762.354	-2721.098
	18.15		3.2745	-781.157	-2703.931
	18.325		3.0995	-799.439	-2687.269
	18.5		2.9245	-817.220	-2671.093
	18.675		2.7495	-834.518	-2655.385
	18.85		2.5745	-851.352	-2640.126
	19.025		2.3995	-867.737	-2625.301
	19.2		2.2245	-883.691	-2610.894
	19.375		2.0495	-899.228	-2596.889
	19.55		1.8745	-914.363	-2583.272
	19.725		1.6995	-929.110	-2570.030
	19.9		1.5245	-943.484	-2557.148
	20.075		1.3495	-957.496	-2544.614
	20.25		1.1745	-971.159	-2532.417
	20.425		0.9995	-984.484	-2520.545
	20.6		0.8245	-997.484	-2508.986
20.775	0.6495	-1010.169	-2497.729		
20.95	0.4745	-1022.549	-2486.766		
21.125	0.2995	-1034.634	-2476.085		
21.3	0.1245	-1046.434	-2465.679		
Mm	21.4245	Mm	0	<b>-1054.660</b>	-2458.436
	Mm		Mm	kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>

Tabla 5.5. Distribución de esfuerzos sobre el espesor de la camisa del amortiguador a 347°F (175°C)

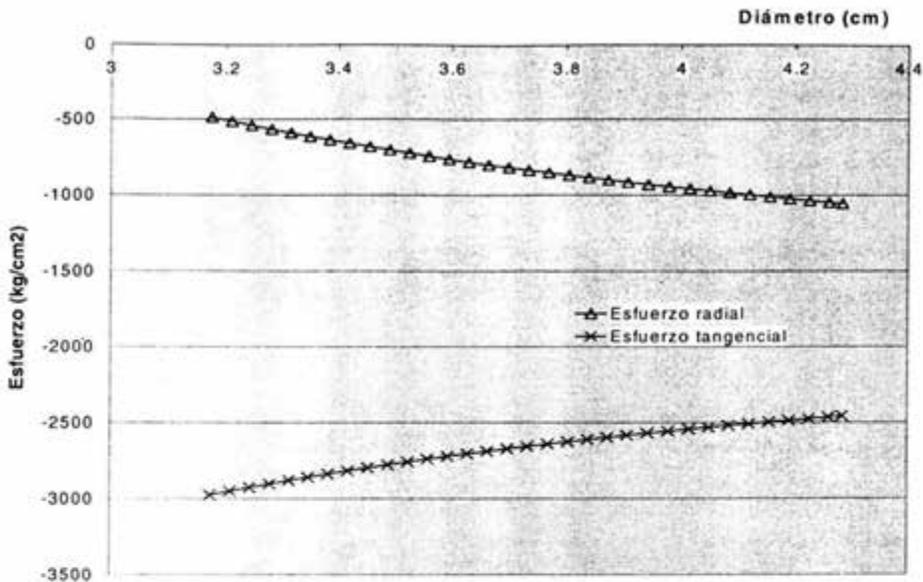


Figura 5.3. Distribución de esfuerzos sobre el espesor de la camisa del amortiguador (No. de parte cuando SM-03), cuando es sometido a temperatura y presión sobre el exterior.

#### b). Parte SM- 12 Contenedor

Esta pieza es una de las más importantes del sistema, ya que constantemente estará sometida a esfuerzos tanto térmicos como mecánicos. Tiene una longitud de 119.90 cm (47.200 plg), un diámetro interior de 1.9304 cm (0.760 plg), un diámetro exterior de 2.794 cm (1.100 plg). En condiciones extremas esta pieza trabaja con una presión máxima de 1054.62 Kg/cm<sup>2</sup> (15 000 psi) en el interior, cuando contiene la muestra de hidrocarburo. También se encuentra sometida a una temperatura interior máxima de 175°C y en el exterior aproximadamente 200°C, debido a la resistencia eléctrica que se utiliza para calentar la muestra.

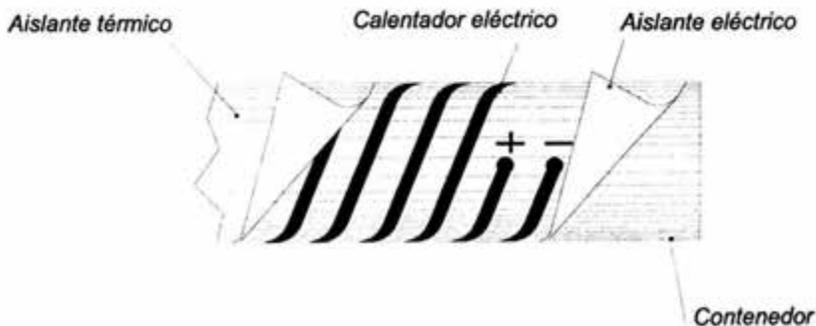


Figura 5.4. Constitución del contenedor de muestra

Cabe señalar que esta resistencia se encuentra envolviendo la camisa por el exterior como se muestra en la figura 5.4, donde se aprecia con detalle el arreglo de los materiales empleados. La gráfica siguiente muestra la distribución de esfuerzos que se generan bajo estas condiciones.

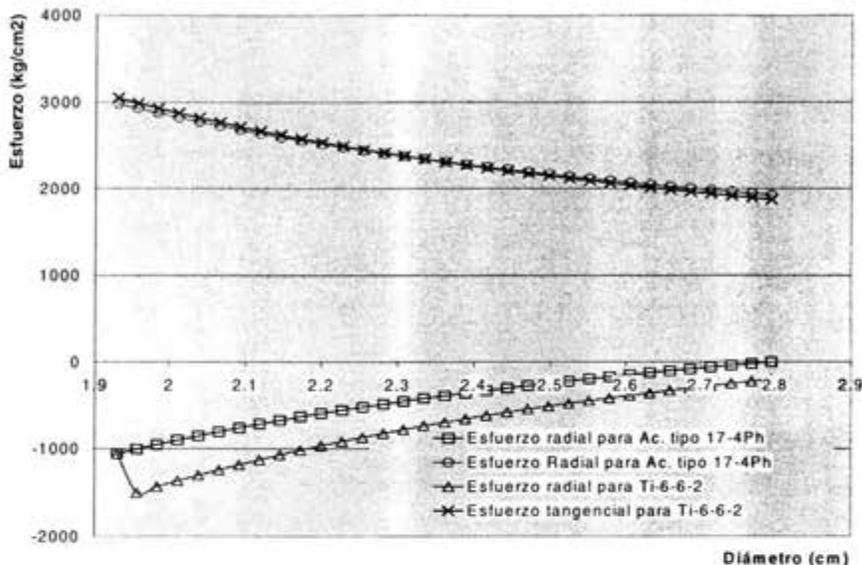


Figura 5.5. Distribución de esfuerzos sobre el espesor del contenedor, comparando el Acero Inox. 17-4Ph y la aleación de titanio 6Al-6V-2Sn.

Según el Método Taguchi aplicado para obtener el diseño en las mejores condiciones de operación del contenedor y sus aditamentos, el mejor material para fabricar el contenedor fue el acero inoxidable tipo 17-4 Ph debido a que tiene un índice de conductividad térmica de  $17.9 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$  ( $124 \text{ Btu in/hr ft}^2 \text{ }^{\circ}\text{F}$ ), un poco más de dos veces mayor que la aleación de Titanio 6-6-2, que es de  $6.6 \text{ w/m}^{\circ}\text{K}$  ( $45.8 \text{ Btu in/hr ft}^2 \text{ }^{\circ}\text{F}$ ). En la sección siguiente se analizarán los valores de los esfuerzos empleando la teoría de fallas. El dibujo del contenedor se encuentra en el apéndice D con el número de parte SM-12.

Radio Interior (a)	Variación del radio (r)	Radio Exterior (b)	Espesor (e)	Suma de Esfuerzos Térmicos y Normales	
				Radial	Tangencial
9.652 (0.380")	9.652	13.97 (1.100")	4.318	-1056.456	2983.310
	9.787		4.183	-1004.305	2927.942
	9.922		4.048	-951.108	2874.819
	10.057		3.913	-900.039	2823.820
	10.192		3.778	-850.986	2774.834
	10.327		3.643	-803.844	2727.756
	10.462		3.508	-758.516	2682.488
	10.597		3.373	-714.910	2638.939
	10.732		3.238	-672.939	2597.023
	10.867		3.103	-632.523	2556.659
	11.002		2.968	-593.585	2517.771
	11.137		2.833	-556.056	2480.289
	11.272		2.698	-519.867	2444.145
	11.407		2.563	-484.956	2409.276
	11.542		2.428	-451.263	2375.623
	11.677		2.293	-418.731	2343.131
	11.812		2.158	-387.310	2311.746
	11.947		2.023	-356.947	2281.419
	12.082		1.888	-327.597	2252.102
	12.217		1.753	-299.215	2223.751
12.352	1.618	-271.758	2196.325		
12.487	1.483	-245.188	2169.783		
12.622	1.348	-219.466	2144.088		
12.757	1.213	-194.556	2119.205		
12.892	1.078	-170.425	2095.098		
13.027	0.943	-147.040	2071.737		
13.162	0.808	-124.372	2049.091		
13.297	0.673	-102.390	2027.131		
13.432	0.538	-81.068	2005.829		
13.567	0.403	-60.380	1985.161		
13.702	0.268	-40.301	1965.099		
13.837	0.133	-20.806	1945.622		
13.972	0	-1.874	1926.707		
Mm	mm	mm	mm	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>

Tabla 5.6. Distribución de esfuerzos sobre el espesor del contenedor fabricado en Aleac. 17-Ph.

### c). Parte SM-14 Camisa exterior del contenedor

Según el análisis que se realizó en el inciso 4.2, en esta pieza la aleación de titanio tiene mejor respuesta al sistema. Como se vio en el estudio anterior, se requiere disminuir las pérdidas de energía calorífica emanadas desde el contenedor de la muestra y su sistema de calentamiento. Técnicamente se requiere en la cubierta exterior un material que tenga bajo índice de conductividad térmica, la aleación de titanio 6Al-6V-2Sn, cuenta con esta característica 6.6 W/m<sup>2</sup>K (45.8 BTU in/hr ft<sup>2</sup> °F), además de ofrecer buenas propiedades mecánicas con las cuales

es posible soportar el ataque de agentes corrosivos. Para el análisis de los esfuerzos sobre esta pieza, se tomó como referencia uno de los experimentos realizados en el estudio del inciso 4.2; la gráfica de la figura 5.6. muestra el comportamiento de las temperaturas dentro y fuera de la camisa que protege al contenedor, la temperatura en la superficie interior ( $T_a$ ) de la camisa fue de  $69.86\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la temperatura en el exterior ( $T_b$ ), fue de  $119.17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , esto es cuando la herramienta se encuentra en operación a las condiciones más críticas del yacimiento. En donde  $\Delta T = T_a - T_b = 69.86 - 119.17 = -49.31\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

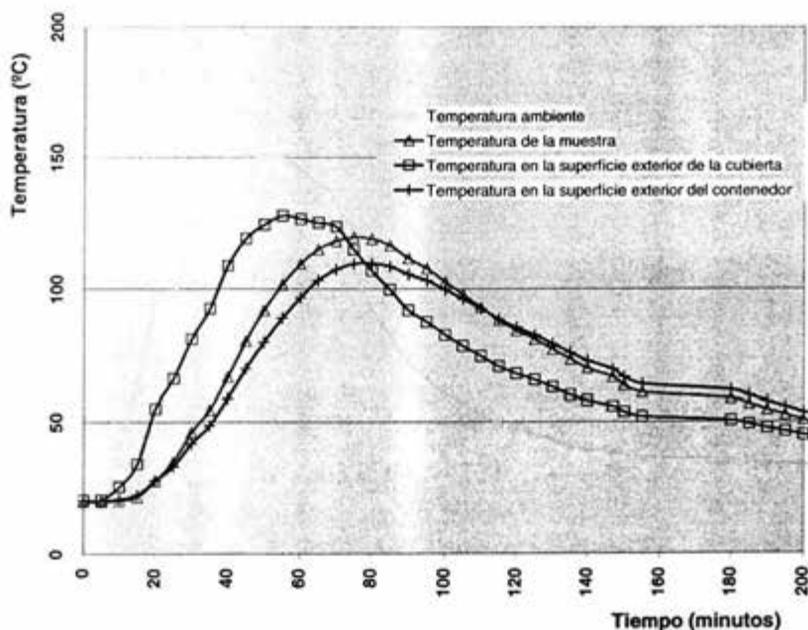


Figura 5.6. Comportamiento de temperaturas de la cubierta exterior del contenedor en el caso crítico.

Las características técnicas de la aleación de Titanio 6-6-2 se dan a continuación:

Módulo de elasticidad,  $E = 1\,195\,284.76\text{ kg/cm}^2$  ( $17\,000 \times 10^3\text{ PSI}$ )

Coefficiente de conductividad térmica a  $149^{\circ}\text{C} = 6.6\text{ W/m}^{\circ}\text{K}$  ( $45.8\text{ Btu in/ft}^2\text{ h }^{\circ}\text{F}$ )

Calor específico  $= 670\text{ J/kg}^{\circ}\text{K}$  ( $0.16\text{ Btu/lb }^{\circ}\text{F}$ )

Relación de Poisson  $= 0.32$

Empleando las ecuaciones E.26 y E.27, se calculan los esfuerzos a diferentes radios, considerando un diámetro interior 35.56 mm (1.400plg) y un diámetro exterior de 43.18 mm (1.700 plg), a las condiciones de presión exterior de 1054.6 kg/cm<sup>2</sup>, considerando como presión de vacío la presión interior. La siguiente tabla y la figura 5.7. muestran los resultados.

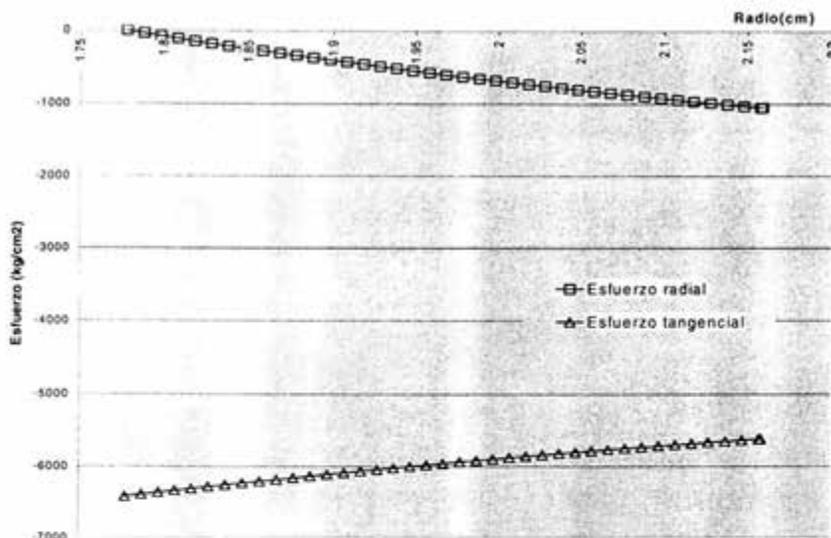


Figura 5.7. Distribución de esfuerzos sobre el espesor de la camisa exterior del contenedor (No. De parte SM-14), cuando es sometido a temperatura y presión sobre el exterior.

El esfuerzo tangencial ( $\sigma_t$ ) máximo se encuentra cuando  $d$  toma el valor del diámetro interior y es de 6421.652 Kg/cm<sup>2</sup> (91 332.28 psi) y es compresión, mientras que el máximo esfuerzo radial ( $\sigma_r$ ) se encuentra cuando  $d$  toma el valor del diámetro exterior. En este caso el esfuerzo radial corresponde a la presión máxima de trabajo que es de 1054.6 Kg/cm<sup>2</sup> (15 000 psi), también es un esfuerzo de compresión.

En la sección siguiente se realiza un análisis para establecer el coeficiente de seguridad y las condiciones de resistencia según las teorías de falla. El dibujo de la parte (SM-14) se encuentra en el anexo D.

Radio Interior (a)	Variación del radio (r)	Radio Exterior (b)	Espesor (e)	Suma de Esfuerzos Térmicos y Normales	
				Radial	Tangencial
17.78 (1.400")	17.78	21.59 (1.700")	3.81	0.000	-6421.652
	17.88		3.71	-35.835	-6393.028
	17.98		3.61	-71.114	-6364.919
	18.08		3.51	-105.848	-6337.316
	18.18		3.41	-140.050	-6310.206
	18.28		3.31	-173.730	-6283.578
	18.38		3.21	-206.901	-6257.421
	18.48		3.11	-239.572	-6231.726
	18.58		3.01	-271.754	-6206.482
	18.68		2.91	-303.458	-6181.679
	18.78		2.81	-334.693	-6157.308
	18.88		2.71	-365.470	-6133.360
	18.98		2.61	-395.797	-6109.824
	19.08		2.51	-425.684	-6086.694
	19.18		2.41	-455.140	-6063.959
	19.28		2.31	-484.173	-6041.611
	19.38		2.21	-512.792	-6019.643
	19.48		2.11	-541.006	-5998.046
	19.58		2.01	-568.822	-5976.813
	19.68		1.91	-596.249	-5955.936
	19.78		1.81	-623.293	-5935.408
	19.88		1.71	-649.963	-5915.222
	19.98		1.61	-676.266	-5895.370
	20.08		1.51	-702.209	-5875.846
	20.18		1.41	-727.798	-5856.643
	20.28		1.31	-753.042	-5837.755
	20.38		1.21	-777.946	-5819.175
	20.48		1.11	-802.516	-5800.898
	20.58		1.01	-826.760	-5782.917
	20.68		0.91	-850.683	-5765.226
20.78	0.81	-874.291	-5747.819		
20.88	0.71	-897.591	-5730.692		
20.98	0.61	-920.587	-5713.838		
21.08	0.51	-943.286	-5697.253		
21.18	0.41	-965.693	-5680.931		
21.28	0.31	-987.813	-5664.866		
21.38	0.21	-1009.652	-5649.055		
21.48	0.11	-1031.215	-5633.492		
21.58	0.01	-1052.506	-5618.173		
21.59	0	-1054.620	-5616.654		
Mm	mm	Mm	mm	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>

Tabla 5.7. Distribución de esfuerzos sobre el espesor de la camisa exterior del contenedor a 347°F (175°C)

## d). Parte SM-20 Camisa para motor y sensor

Esta pieza corresponde a una camisa muy corta, comparada con las demás piezas, que protege al módulo que contiene los sensores de presión, (ver plano SMH-01). Tiene una longitud de 29.46 cm (11.600 pulg.), su diámetro interior es de 3.429 cm (1.350 pulg.) y su diámetro exterior es de 4.318 cm (1.700 pulg.). Las condiciones más críticas son similares a la camisa de circuitería, con una presión exterior máxima de 1054.6 Kg/cm<sup>2</sup> (15 000 psi), en el interior no se tiene presión por lo que se considera solo la presión atmosférica. En condiciones críticas la temperatura exterior puede estar a 175°C y en el interior a 160°C, utilizando de igual forma las ecuaciones del apéndice E, a continuación se muestra la variación de los esfuerzos que se presentan en el espesor de la camisa. El material de fabricación es el acero 17-4Ph.

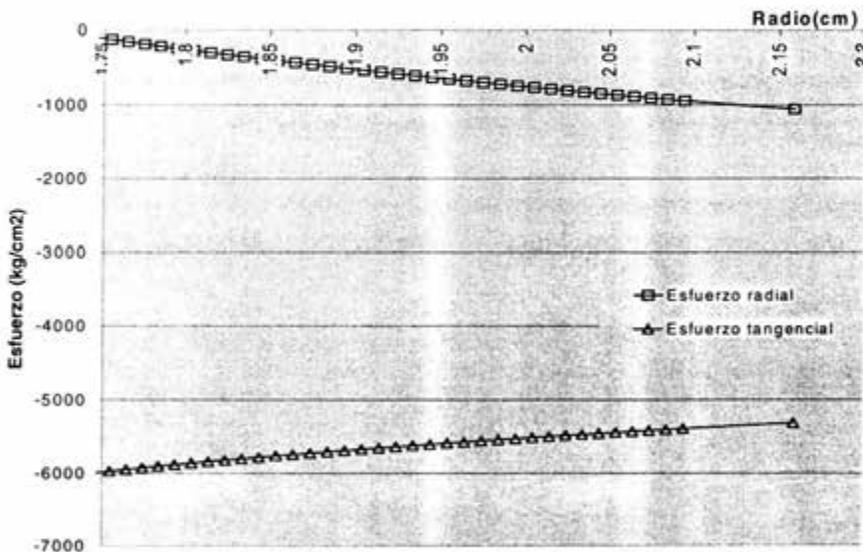


Figura 5.8. Distribución de esfuerzos sobre el espesor de la camisa para sensores y motor.

El esfuerzo tangencial más alto se encuentra sobre el diámetro interior y tiene un valor de  $\sigma_t = -6064.290 \text{ kg/cm}^2$  (86 249.68 psi) y comprime al recipiente debido al valor de la presión exterior cuyo valor afecta al esfuerzo radial siendo máximo sobre el diámetro exterior, con un valor de  $\sigma_r = -1054.933 \text{ kg/cm}^2$  (15 000 psi). La tabla siguiente muestra numéricamente el valor de los esfuerzos.

Radio Interior (a)	Variación del radio (r)	Radio Exterior (b)	Espesor (e)	Suma de Esfuerzos Térmicos y Normales	
				Radial	Tangencial
17.145 (1.350 *)	1.7145	21.59 (1.700*)	4.445	-1.000	-6059.363
	1.7245		4.345	-33.496	-6034.491
	1.7345		4.245	-65.050	-6010.518
	1.7445		4.145	-96.106	-5986.999
	1.7545		4.045	-126.675	-5963.924
	1.7645		3.945	-156.768	-5941.283
	1.7745		3.845	-186.395	-5919.064
	1.7845		3.745	-215.567	-5897.260
	1.7945		3.645	-244.294	-5875.860
	1.8045		3.545	-272.584	-5854.855
	1.8145		3.445	-300.448	-5834.236
	1.8245		3.345	-327.895	-5813.995
	1.8345		3.245	-354.933	-5794.123
	1.8445		3.145	-381.571	-5774.612
	1.8545		3.045	-407.818	-5755.455
	1.8645		2.945	-433.681	-5736.642
	1.8745		2.845	-459.169	-5718.167
	1.8845		2.745	-484.290	-5700.022
	1.8945		2.645	-509.050	-5682.201
	1.9045		2.545	-533.457	-5664.695
	1.9145		2.445	-557.519	-5647.500
	1.9245		2.345	-581.242	-5630.607
	1.9345		2.245	-604.633	-5614.010
	1.9445		2.145	-627.700	-5597.704
	1.9545		2.045	-650.447	-5581.682
	1.9645		1.945	-672.882	-5565.937
	1.9745		1.845	-695.011	-5550.465
	1.9845		1.745	-716.839	-5535.260
	1.9945		1.645	-738.373	-5520.316
	2.0045		1.545	-759.618	-5505.628
	2.0145		1.445	-780.580	-5491.190
	2.0245		1.345	-801.264	-5476.998
2.0345	1.245	-821.676	-5463.047		
2.0445	1.145	-841.820	-5449.331		
2.0545	1.045	-861.702	-5435.846		
2.0645	0.945	-881.327	-5422.587		
2.0745	0.845	-900.699	-5409.550		
2.0845	0.745	-919.823	-5396.731		
2.0945	0.645	-938.704	-5384.124		
2.159	0	-1054.933	-5307.660		
Mm	Mm	Mm	mm	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>

Tabla 5.8. Distribución de esfuerzos sobre el espesor de la camisa para motor y sensor a 347°F (175°C)

### e). Parte SM-40 Camisa para circuitería.

La camisa para circuitería es una pieza importante en la constitución de los elementos que componen la herramienta de muestreo. Tiene dos objetivos importantes el primero es proteger la electrónica y los circuitos de control de la herramienta de las condiciones de operación, el segundo es permitir el flujo magnético emanado del sistema de referencia de profundidad, que se encuentra en esta sección. Cubriendo ambos aspectos, la camisa puede ser fabricada en aleación de titanio 6-6-2, puesto que es un material totalmente antimagnético además de tener excelentes propiedades mecánicas que permiten resistir la presión y el ataque de agentes altamente corrosivos.

El dibujo de la camisa se encuentra en el apéndice D y está identificado con el No. de parte SM-40. La camisa tiene una longitud de 131.44 cm (51.725 pulg.), un diámetro exterior de 4.285 cm (1.687 pulg.), y un diámetro interior de 3.175 cm (1.250 pulg.). La figura 5.9, muestra el comportamiento de los esfuerzos sobre el espesor de pared a las condiciones más críticas de presión exterior de  $1054.66 \text{ kg/cm}^2$  (15 000 psi), la tabla 5.9, muestra de forma numérica el valor calculado utilizando las ecuaciones que se describen en el apéndice E.

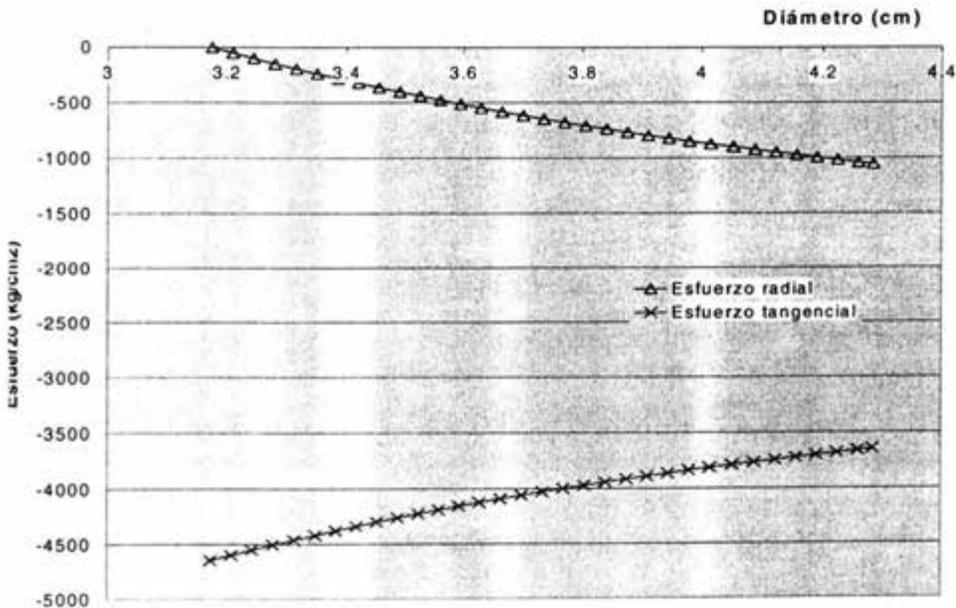


Figura 5.9. Distribución de esfuerzos sobre el espesor de la camisa de circuitería.

El esfuerzo más importante se sitúa sobre el diámetro interior con un valor de  $\sigma_r = -4646.165$  kg/cm<sup>2</sup> (66080.32 psi), a compresión; mientras que el valor del esfuerzo radial se encuentra sobre el diámetro mayor con un valor de  $\sigma_r = -1054.66$  kg/cm<sup>2</sup> (15 000 psi).

Radio Interior (a)	Variación del radio (r)	Radio Exterior (b)	Espesor (e)	Suma de Esfuerzos Térmicos y Normales	
				Radial	Tangencial
15.875 (1.250")	15.875	21.424 (1.687")	5.5495	-1.000	<b>-4646.165</b>
	16.05		5.3745	-51.382	-4597.635
	16.225		5.1995	-100.163	-4550.685
	16.4		5.0245	-147.409	-4505.250
	16.575		4.8495	-193.186	-4461.266
	16.75		4.6745	-237.554	-4418.671
	16.925		4.4995	-280.572	-4377.409
	17.1		4.3245	-322.293	-4337.425
	17.275		4.1495	-362.770	-4298.667
	17.45		3.9745	-402.052	-4261.087
	17.625		3.7995	-440.187	-4224.637
	17.8		3.6245	-477.219	-4189.274
	17.975		3.4495	-513.190	-4154.954
	18.15		3.2745	-548.142	-4121.638
	18.325		3.0995	-582.113	-4089.288
	18.5		2.9245	-615.140	-4057.866
	18.675		2.7495	-647.257	-4027.338
	18.85		2.5745	-678.499	-3997.672
	19.025		2.3995	-708.897	-3968.834
	19.2		2.2245	-738.482	-3940.796
	19.375		2.0495	-767.282	-3913.528
	19.55		1.8745	-795.326	-3887.002
	19.725		1.6995	-822.640	-3861.192
	19.9		1.5245	-849.250	-3836.074
	20.075		1.3495	-875.180	-3811.623
	20.25		1.1745	-900.454	-3787.815
	20.425		0.9995	-925.093	-3764.629
	20.6		0.8245	-949.119	-3742.044
20.775	0.6495	-972.552	-3720.039		
20.95	0.4745	-995.412	-3698.595		
21.125	0.2995	-1017.719	-3677.693		
21.3	0.1245	-1039.489	-3657.316		
21.424	0	<b>-1054.660</b>	<b>-3643.129</b>		
Mm	mm	mm	mm	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>

Tabla 5.9. Distribución de esfuerzos sobre el espesor de la camisa de circuitería.

#### 5.4. Deformación del diámetro de cilindros debido al esfuerzo por presión

La deformación de los cilindros puede darse debido al esfuerzo de trabajo producido tanto por la presión interna como la externa, las siguientes ecuaciones son empleadas para estimación de la variación del diámetro de las piezas de la herramienta que están sometidas a estas condiciones:

$$\Delta d_i = \frac{p_i d_i}{E} \left( \frac{d_o^2 + d_i^2}{d_o^2 - d_i^2} \right) + \mu \quad (5.1)$$

Para aquellas piezas sometidas a presión interna, a la que pertenece el caso del contenedor. De donde  $d_i$  es el diámetro interior,  $d_o$  es el diámetro externo,  $p_i$  es la presión interior, calculando para la pieza SM-13, correspondiente al contenedor cuya presión interior puede llegar hasta  $1054.6 \text{ kg/cm}^2$  (15 000 psi), según la presión de diseño. Sustituyendo en la ecuación 5.1 el diámetro puede deformarse  $0.274 \text{ cm}$  (0.1078 pulg). Lo que significa que aumentará su diámetro en un 9.83%, valor que es considerable en comparación con su diámetro interior.

Para las piezas sometidas solo a presión externa  $p_o$  se utiliza la siguiente ecuación:

$$\Delta d_o = \frac{p_o d_o}{E} \left( \frac{d_o^2 + d_i^2}{d_o^2 - d_i^2} \right) - \mu \quad (5.2)$$

La tabla siguiente muestra el grado de deformación de las camisas sometidas a presión externa:

No. de parte	Descripción	Diámetro Exterior cm (pulg)	% de deformación	Diámetro deformado cm (pulg)
SM-03	Camisa para amortiguador	4.318 (1.700)	6.13	4.052 (1.595)
SM-14	Camisa exterior del contenedor	4.318 (1.700)	6.48	4.038 (1.589)
SM-20	Camisa para motor y sensor	4.318 (1.700)	6.27	4.047 (1.593)
SM-40	Camisa para circuitería	4.285 (1.687)	6.69	3.998 (1.574)

Tabla 5.10. Deformación del diámetro de las camisas sometidas a presión exterior.

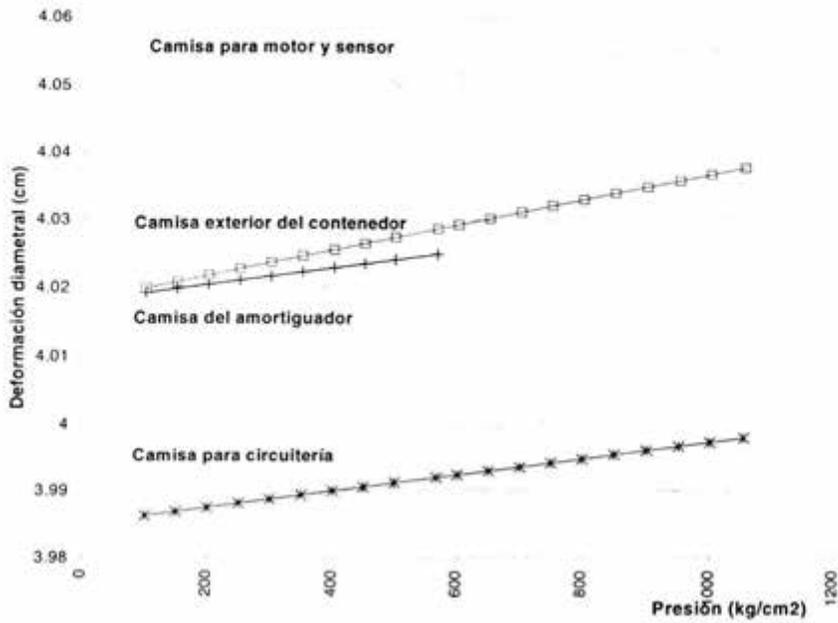


Figura 5. 10. Deformación del diámetro de las piezas sometidas a presión externa.

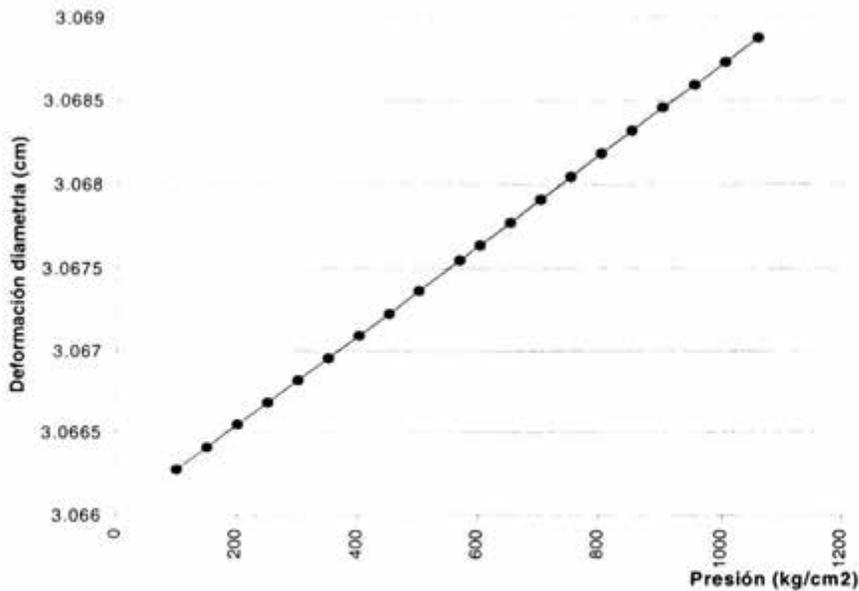


Figura 5. 11. Expansión diametral del contenedor por esfuerzos debido a presión interna.

### 5.5. Evaluación de esfuerzos utilizando teoría de fallas.

A continuación se presenta un análisis de los esfuerzos utilizando las diversas teorías de fallas en cada una de las camisas de la herramienta, estimando también el factor de seguridad.

#### a.- Teoría del esfuerzo normal máximo

Esta teoría expresa que la falla se produce siempre que el mayor esfuerzo principal sea igual al valor de la resistencia a la fluencia, o bien a la resistencia última del material, en un estado de esfuerzos el mayor corresponde a  $\sigma_1$  de tal forma que  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ , por lo tanto la falla se producirá si  $\sigma_1 = S_y$  ó si  $\sigma_1 = S_u$ , de donde  $S_y$  es el esfuerzo a la cedencia y  $S_u$  es el esfuerzo último. La falla por ruptura se producirá siempre que:

$$\sigma_1 = -S_{uc} \quad (5.3)$$

El factor de seguridad a la falla por ruptura puede ser estimado por:

$$n = \frac{S_{uc}}{\sigma_1} \quad (5.4)$$

La falla por fluencia ocurrirá siempre que:

$$\sigma_1 = -S_{yc} \quad (5.5)$$

Por lo que el factor de seguridad a la falla por fluencia está dado como:

$$n = \frac{S_{yc}}{\sigma_1} \quad (5.6)$$

La tabla 5.11, muestra la evaluación de los esfuerzos y la estimación del factor de seguridad.

Descripción	Esfuerzo máximos (kg/cm <sup>2</sup> )			Material	Esfuerzo a la cedencia S <sub>y</sub> * (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo último S <sub>u</sub> * (kg/cm <sup>2</sup> )	Factor de seguridad	
	σ <sub>1</sub>	σ <sub>2</sub>	σ <sub>3</sub>				Falla por fluencia	Falla por ruptura
Camisa para amortiguador	-2974.94	-1054.66		Ti-6Al-6V-2Sn	9479.95	8315.08	3.18	7.8
Contenedor	2983.31	1926.86	-1056.45	Ac. 17-4 Ph	10194.68	12093	3.41	6.27
Camisa ext. Del contenedor	-6421.65	-1054.66		Ti-6Al-6V-2Sn	9479.95	8315.08	1.47	7.88
Camisa para motor y sensor	-6059.36	-1054.66		Ac. 17-4Ph	10194.68	12093	1.68	11.46
Camisa para circuitería	-4646.16	-1054.66		Ti-6Al-6V-2Sn	9479.95	8315.08	2.040	7.88

\*Valor tomado a la temperatura cercana a 200°C

Tabla 5.11. Cálculo de factores de seguridad utilizando la teoría del esfuerzo normal máximo.

### b.- Teoría del esfuerzo cortante máximo

Esta es una teoría fácil de emplear y siempre proporciona predicciones seguras aplicándose a materiales dúctiles, que se definen como aquellos cuyo porcentaje de alargamiento es mayor de 5%, la aleación de titanio empleada en estos casos posee un coeficiente de alargamiento en 50.8 mm de 10 %, por lo que se considera como un material dúctil. La teoría del esfuerzo cortante máximo afirma que se inicia la fluencia siempre que el esfuerzo cortante máximo se vuelve igual a la mitad del esfuerzo máximo:

$$\tau_{max} = \frac{S_y}{2} \quad (5.7)$$

de donde:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (5.8)$$

El coeficiente de seguridad de acuerdo con esta teoría, esta dado por:

$$n = \frac{S_y}{2\tau_{max}} \quad (5.9)$$

La siguiente tabla muestra la evaluación de los esfuerzos y el correspondiente factor de seguridad.

No. de arte	Descripción	Esfuerzo máximos (kg/cm <sup>2</sup> )			Material	Esfuerzo a la cedencia S <sub>y</sub> * (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo ultimo S <sub>u</sub> * (kg/cm <sup>2</sup> )	τ <sub>max</sub>	Factor de seguridad
		σ <sub>1</sub>	σ <sub>2</sub>	σ <sub>3</sub>					
f-03	Camisa para amortiguador	-2974.94	-1054.66		Ti-6Al-6V-2Sn	9479.95	8315.08	-1920.28	2.46
f-12	Contenedor	2983.31	1926.86	-1056.45	Ac. 17-4 Ph	10194.68	12093	4039.76	1.26
f-14	Camisa ext. del contenedor	-6421.65	-1054.66		Ti-6Al-6V-2Sn	9479.95	8315.08	-5366.99	0.88
f-20	Camisa para motor y sensor	-6059.36	-1054.66		Ac. 17-4Ph	10194.68	12093	-5004.7	1.01
f-40	Camisa para circuitería	-4646.16	-1054.66		Ti-6Al-6V-2Sn	9479.95	8315.08	-3591.5	1.32

\*Valores tomados a temperatura cercana a 200°C.

Tabla 5.12. Cálculo de factores de seguridad utilizando la teoría del esfuerzo cortante máximo.

### c.- Teoría de Energía de distorsión

Esta teoría se emplea para definir el principio de la fluencia al igual que la teoría del esfuerzo cortante máximo y afirma que la fluencia se inicia cuando la energía total de deformación, almacenada en el elemento esforzado, llega a ser igual a la energía elástica que hay en un elemento contenido en una probeta de tensión en el punto de cedencia, el criterio de energía de distorsión predice una resistencia de fluencia al cortante, sensiblemente mayor que la predicha por la teoría del esfuerzo cortante máximo.

Para el análisis se calcula el esfuerzo de Von Moises:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (5.10)$$

de donde:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_t + \sigma_r}{2} + \left[ \left( \frac{\sigma_t - \sigma_r}{2} \right)^2 + S_s^2 \right]^{1/2} \quad (5.11)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_t + \sigma_r}{2} - \left[ \left( \frac{\sigma_t - \sigma_r}{2} \right)^2 + S_s^2 \right]^{1/2} \quad (5.12)$$

$S_s$  es el esfuerzo cortante dado por:

$$S_s = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (5.13)$$

La falla por fluencia queda predicha por la teoría de la energía de distorsión, siempre que:

$$\sigma' = S_y \quad (5.14)$$

El coeficiente de seguridad por lo tanto está dado como:

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (5.15)$$

La tabla 5.13, presenta la evaluación de los esfuerzos de cada pieza utilizando estas ecuaciones. Analizando los factores de seguridad obtenidos por las tres teorías, se aprecia que la teoría del esfuerzo cortante máximo proporciona valores más cerrados, en el caso de la camisa exterior del contenedor (No. de parte SM-14) se predice una deformación debido a que el factor de seguridad es menor que 1, en este caso es posible utilizar la aleación de titanio o aumentar el espesor de la camisa, tomando en cuenta que debe haber un espacio entre el diámetro exterior del contenedor y el diámetro interno de la camisa exterior, para colocar los aislantes térmicos que requiere el sistema.

e	Descripción	Esfuerzo máximos (kg/cm <sup>2</sup> )			Material	Esfuerzo a la cedencia S <sub>y</sub> * (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo ultimo S <sub>u</sub> * (kg/cm <sup>2</sup> )	σ' (kg/cm <sup>2</sup> )	Factor de seguridad a Falla por fluencia
		σ <sub>1</sub>	σ <sub>2</sub>	σ <sub>3</sub>					
3	Camisa para amortiguador	-2974.94	-1054.66		Ti-6Al-6V-2Sn	9479.95	8315.08	4229.41	2.24
2	Contenedor	2983.31	1926.86	-1056.45	Ac. 17-4 Ph	10194.68	12093	3307.91	3.08
1	Camisa ext. Del contenedor	-6421.65	-1054.66		Ti-6Al-6V-2Sn	9479.95	8315.08	7504.90	1.26
3	Camisa para motor y sensor	-6059.36	-1054.66		Ac. 17-4Ph	10194.68	12093	7104.96	1.43
3	Camisa para circuitería	-4646.16	-1054.66		Ti-6Al-6V-2Sn	9479.95	8315.08	5551.92	1.7

\*Valor tomado a la temperatura cercana a 200°C

Tabla 5.13. Cálculo de factores de seguridad utilizando la teoría de la energía de distorsión.

## 5.6. Esfuerzos en uniones roscadas.

La figura 5.1 muestra la existencia de esfuerzos de tipo axial, originados por el peso de la herramienta y la tensión del cable que la sostiene, cuando la herramienta se atora por alguna obstrucción o deformación de la tubería, el esfuerzo de tensión del cable se incrementa para poder liberarla, en esta situación los elementos roscados deben soportar los esfuerzos que se originan, sin embargo, dadas las características del cable electromecánico que normalmente se utiliza, se considera que los elementos roscados sometidos a esta fuerza deben soportar más de 2270 kg (5000 lb), ya que el cable debe romper antes que se deforme o rompa cualquier parte de la herramienta.

Las especificaciones del cable empleado son las siguientes:

### **Cable Camesa**

*Manufacturado para operar en ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) y condiciones severas en pozos de aceite.*

*5.55 mm de diámetro (7/32") Monocable*

*Código IN22SAZ-S75*

*12 cables en capa interior de 0.787 mm (0.031") de diámetro*

*18 cables en capa exterior de 0.787 mm (0.031") de diámetro*

*Diámetro total del cable 5.689 ± 0.127 mm (0.224" ± 0.005").*

*Esfuerzo de ruptura de 2359 kg = 22261.09 N (5200 lb) mínimo.*

*Peso aproximado de 44.090 kg ± 4.473 kg/Km ( 97 lb.± 3 lb/Mft).*

*Resistencia eléctrica 78 Ω/Km .*

La tabla siguiente muestra los esfuerzos sobre las cuerdas, calculados mediante las ecuaciones que se presentan en la teoría del apéndice F.

Descripción	Tipo de Cuerda Cm (pulg)	d cm (pulg)	d <sub>r</sub> cm (pulg)	L cm (pulg)	Esfuerzo de Corte		Fuerza requerida Para que ceda la cuerda		Esfuerzo Por tensión en la garganta o salida de la cuerda
					Kg/cm <sup>2</sup> (lb/pulg <sup>2</sup> )	o (tuerca)	o (tornillo)	F(tuerca)	
Tapón cubre Roscas	(3.492-12 UNF) (1.375-12 UNF)	3.492 (1.375)		2.2225 (0.875)	205.28 (2917.14)		136 454.50 1.9x10 <sup>8</sup>		
Válvula del Amortiguador	3.492-12 UNF (1.375-12UNF)		3.1826 (1.253)	2.2225 (0.875)		204.30 (2903.30)		82903.3 (242825.9)	
	3.7846-18UNF (1.490-18UNF)		3.6367 (1.4318)	2.286 (0.900)		173.83 (2470.20)			
Camisa para Amortiguador	3.7846-18UNF (1.490-18UNF)	3.7846 (1.490)		2.286 (0.900)	167.03 (2373.67)		116619.4 (1657161.6)		716.81 (10185.91)
Conector AM- Contenedor	3.810-18UNF (1.500-18UNF)		3.6367 (1.4318)	2.2225 (0.875)		178.79 (2540.78)		108248.67 (1538213.7)	
Válvula de admisión	3.810-18UNF (1.500-18UNF)		3.6367 (1.4318)	2.2225 (0.875)		178.79 (2540.78)		108248.67 (1538213.7)	
Camisa ext. Del contenedor	3.7846-18UNF (1.490-18UNF)	3.7846 (1.490)		2.286 (0.900)	167.03 (2373.67)		116619.4 (1657161.6)		716.81 (10185.91)
Camisa p/motor y Sensor	3.810-18UNF (1.500-18UNF)	3.810 (1.500)		2.286 (0.900)	165.92 (2357.84)		153456.05 (2180610.5)		716.81 (10185.91)
Conector MS-ME	3.492-12UNF (1.375-12UNF)		3.1826 (1.253)	2.2225 (0.875)		204.30 (2903.30)		82903.3 (242825.9)	
Camisa para Circuitería	3.492-12UNF (1.375-12UNF)	3.492 (1.375)		2.286 (0.900)	181.03 (2572.56)		107603.164 (1529040.9)		468.93 (6663.50)
Porta Sensores	3.492-12UNF (1.375-12UNF)	3.492 (1.375)		2.286 (0.900)	181.03 (2572.56)		140353.20 (1994419)		
Conector o/cuerda loca	3.492-12UNF (1.375-12UNF)		3.1826 (1.253)	2.159 (0.850)		210.31 (2988.69)		82903.3 (242825.9)	
	2.832-12UNF (1.125-12UNF)		2.5019 (0.985)	2.3495 (0.925)		245.84 (3493.58)		51232.73 (728017.16)	

Tabla 5.14. Esfuerzos de tensión en elementos roscados.

Como se puede analizar en la tabla 5.14, la carga necesaria para que la cuerda de cualquiera de las partes ceda o se "barra", es mucho mayor que la carga producida por la tensión en operación, de acuerdo con el valor del esfuerzo de cedencia del material de fabricación de cada elemento, es posible que el elemento sufra una ruptura antes de que las cuerdas puedan fallar. Realmente en campo el cable rompe a 2270 kg (5000 lb) de tensión; esta resistencia está limitada por la disminución en número de los cables de acero que son conectados a la "cebolla" que es el dispositivo utilizado para unir el cable con las partes mecánicas; es decir, si para tener el 100%

de resistencia en el cable se conectan los 12 ó 18 torones o cables de acero, para tener un 40% de resistencia sólo se sujetan 7 u 8 cables. Por lo tanto es posible asegurar que realmente las dimensiones de las cuerdas calculadas resistirán la tensión de operación. Cabe mencionar que la cebolla forma parte de un aditamento más complejo empleado para ensamblar el cable con la herramienta denominado comúnmente *Cabeza*, existente en dos modelos MH-21 y MH-22; esta herramienta está diseñada para ser conectada a una cabeza del tipo MH-22.

Los esfuerzos calculados en la garganta o salida de la cuerda, última columna de la tabla 5.14, están dentro del esfuerzo de cedencia del material, en el caso de que la herramienta quede atorada por alguna razón dentro del pozo, se romperá primero el cable antes de que la herramienta sufra alguna ruptura debido a esfuerzos de tensión.

### 5.7. Consideraciones para selección de arosellos.

Existe una gran variedad de empaques y sellos para diversas aplicaciones, los arosellos también conocidos como o-rings, junta tórica, sello y/o empaque, son empleados ampliamente en la industria y su uso dependen de las condiciones de operación donde sea colocado. El o-ring es uno de los elementos más sencillos usado para el sellado de diversas partes, generalmente se encuentran dos aplicaciones:

#### ***Sellado estático***

#### ***Sellado dinámico***

El primero se caracteriza por un pequeño o inexistente movimiento entre las superficies de contacto, el segundo se caracteriza por la existencia de un movimiento entre las superficies de contacto, tal es el caso de los pistones hidráulicos, flechas de motor, etc. Dadas las características de operación de los mecanismos que se encuentran en este proyecto, el sello que se requiere es totalmente estático, a excepción del sello que se encuentra en la flecha de transmisión, del cual se proporcionarán datos posteriormente.

Según el manual de Parker para arosellos, el diseño del alojamiento para un o-ring, deberá ser de la siguiente forma (Parker, 1991):



Figura 5.12. Detalle típico del alojamiento de arosellos.

Dadas las condiciones de diseño y dimensiones en el diámetro exterior de la herramienta, se considera que es apropiado utilizar arosellos delgados, esto es con diámetros desde 2.38 mm (3/32") a 3.175 mm (1/8"), en su sección transversal.

La siguiente tabla muestra las dimensiones que deberá tener el alojamiento y el aplastamiento propuesto según el diámetro seleccionado y número de parte (según catálogo de Parker, 1991):

No.de Arosello (Catálogo Parker)	Diámetro (W) de la Sección transversal O grueso.		Profundidad del alojamiento L	Aplastamiento		Claro Diámetral E	Ancho del Alojamiento G	Radio del Alojamiento R
	Nominal mm (pulg)	Real mm(pulg)		Real	%			
2-110 al 2-178	2.38 (3/32)	2.61 ± 0.076 (0.103±0.003)	2.057 a 2.108 (0.081 a 0.083)	0.431 a 0.635 (0.017 a 0.025)	17 a 24	0.05 a 0.127 (0.002 a 0.005)	3.556 a 3.683 (0.140 a 0.145)	0.127 a 0.381 (0.005 a 0.015)
2-210 al 2-284	3.175 (1/8)	3.50 ± 0.101 (0.138±0.004)	0.558 a 0.812 (0.022 a 0.032)	0.558 a 0.812 (0.022 a 0.032)	16 a 23	0.076 a 0.152 (0.003 a 0.006)	4.749 a 4.876 (0.187 a 0.192)	0.254 a 0.635 (0.010 a 0.025)

Tabla 5.15. Características generales para alojamiento de arosellos en estado estático.

Como se ha mencionado con anterioridad las condiciones de operación son extremadamente severas, para lo cual es necesario utilizar un material que resista los ataques de agentes corrosivos, alta temperatura además de la presión, en la actualidad existen una infinidad de materiales que pueden ser empleados en la fabricación de arosellos. El libro Parker O-Ring Handbook, 1991, proporciona amplia información sobre compuestos y características más apropiadas para el uso de estos elementos.

En herramientas para registros geofísicos generalmente se utiliza el arosello en Viton con dureza 90, también probado experimentalmente dando buenos resultados en el sellado de partes a alta presión. La experiencia del personal operativo y las recomendaciones del fabricante, indican que es apropiado realizar un cambio de arosellos en cada operación, (bajada al pozo) para asegurar el sello de los elementos mecánicos. Los arosellos que se utilizarán en la sección que corresponde al contenedor, serán de "Kalrez" (marcados en la tabla 6.15. como \*\*\*), que es un material con una duración de vida mucho mayor que el vitón-90, además de resistir alta presión y temperatura (<http://www.marcorubber.com>). La siguiente tabla especifica el número de o-ring según el número de parte (ver plano SMH-01).

No. de referencia de la pieza (**)	No de arosello según catalogo (*)	Cantidad
SM-02	2-218	2
	2-214	2
SM-07	2-214	2
SM-05	2-219	4
SM-09	2-115***	2
SM-13	2-115***	2
	2-219	4
SM-13a	2-113***	4
SM-23	2-219	2
	2-214	2
SM-43	2-214	2
SM-50	2-214	2

**Tabla 5.16. Relación de arosellos empleados en la Herramienta para muestreo de Hidrocarburos. ( ver catalogo de Parker)**

### 5.8. Descripción general del equipo de superficie.

El equipo complementario de la herramienta en cuestión, consiste en un *Sistema de adquisición de datos* cuya principal función es obtener información en tiempo real del comportamiento de los sensores de la herramienta, además de ofrecer la posibilidad de introducir en superficie los datos necesarios para el control y registro de operaciones en el pozo (ver figura 5.13).

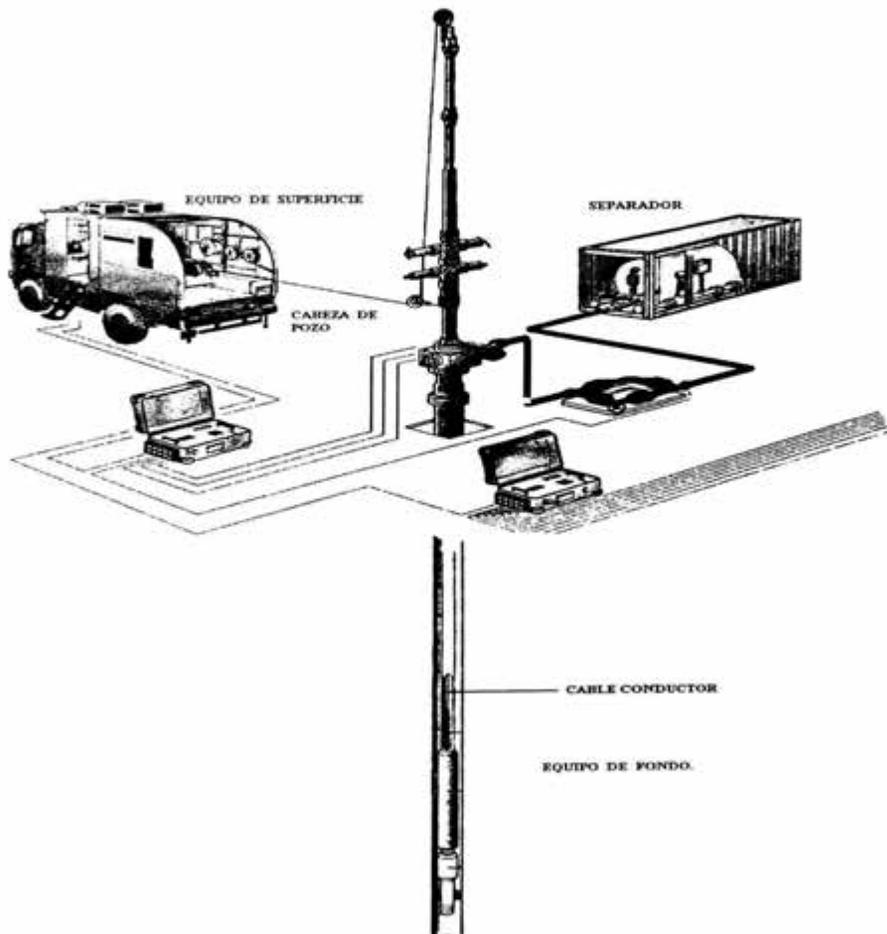
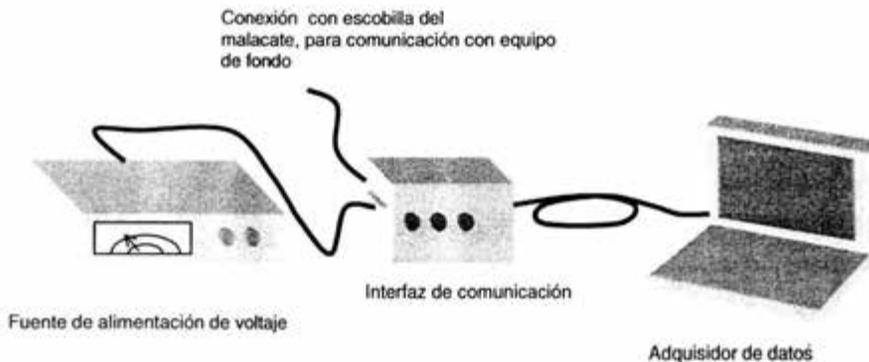


Figura 5.13. Esquema de la interacción del equipo de fondo y el equipo de superficie

Aunque el diseño de este equipo no está dentro de los objetivos del presente trabajo, resulta interesante conocer información general sobre su operación, con el que es posible tener en conjunto un "Sistema Integral de toma de muestras de hidrocarburos a condiciones de yacimiento", que bien podría utilizarse en una línea de negocios ofreciendo servicio a Pemex.

Como se muestra en la figura 5.13, el equipo de fondo se encuentra en comunicación a través de un cable monoconductor, (cuyas características se han especificado en incisos anteriores) con el equipo de superficie.



**Figura 5.14. Esquema del equipo de superficie**

El equipo está integrado por tres elementos: una fuente de alimentación, una interfaz de comunicación y una computadora (lap top) considerada como una unidad de adquisición y procesamiento de datos. La fuente de alimentación proporciona el voltaje necesario para alimentar la herramienta, más del 80% de la energía que transmite ésta fuente se pierde debido a la longitud del cable monoconductor que puede tener longitudes de 4 000, 6000 y hasta 9000m, de tal forma que al equipo de fondo solo llega aproximadamente el 20% de la energía. Dadas las condiciones técnicas del cable la fuente de alimentación debe proporcionar una corriente de no más de 1 A, por lo que la fuente de alimentación debe de tener un control manual del voltaje y corriente.

La interfaz de comunicación es el puente de enlace entre la herramienta y el adquisidor de datos, la información que se maneja hacia uno y otro equipo es transmitida con un montaje de pulsos sobre el voltaje que alimenta la herramienta. Éste equipo tiene como objetivo decodificar la información que recibe y envía. Cabe señalar que los equipos de superficie están comunicados a través de un vía RS-232.

La unidad de adquisición y procesamiento de datos, es básicamente una computadora que tiene como función recopilar los datos y presentarlos al operario de forma visual y gráfica. La unidad contiene un programa de comunicación y control para la herramienta de fondo, con el cual es posible programar la apertura de la válvula y recibir en tiempo real la información proporcionada por los sensores de presión y temperatura, tanto del yacimiento como de la muestra. Es importante hacer notar que la elaboración de éste programa así como el diseño de la electrónica de fondo y de superficie fue realizada por otro grupo de trabajo, la información que se presenta es desde un punto de vista general.

El programa de adquisición de datos fue realizado en LabWindows/CVI que es un lenguaje manejado principalmente por la compañía *Nacional Instruments* y se utiliza ampliamente para la elaboración de programas de control de señales, datos y cálculos matemáticos, permitiendo la interacción con un usuario a través de opciones que se visualizan de forma fácil en la pantalla. Éste programa cuenta con una pantalla principal, que se muestra a continuación, figura 5.15.

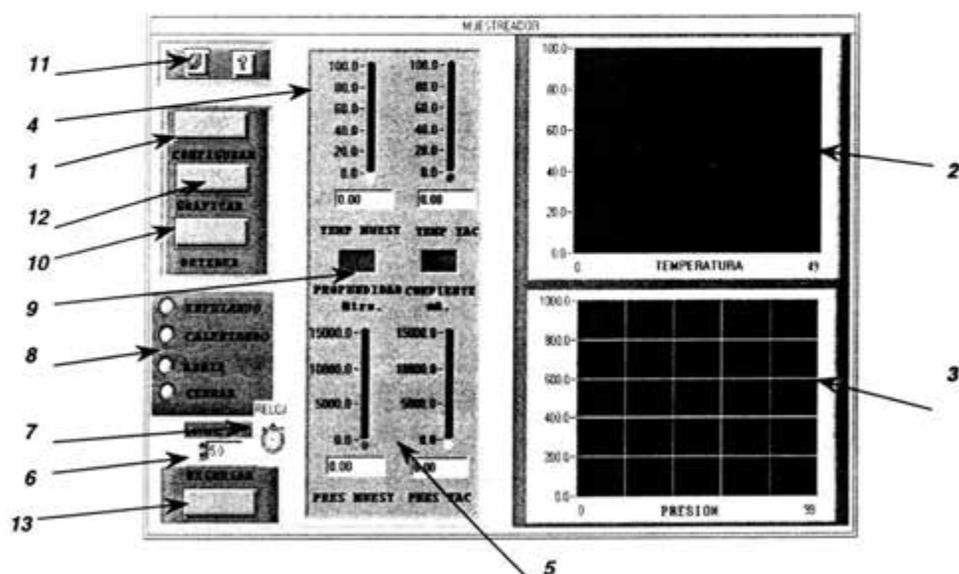


Figura 5.15. Pantalla principal del programa de adquisición de datos del muestreador.

Este es un programa basado en abrir y cerrar paneles, el panel activo es la ventana que se visualiza en la figura anterior. Con el botón (1) *Configurar*, se abre el panel de configuración serial, dentro del cual se tienen algunos iconos que modifican los parámetros de comunicación,

una vez modificados se cierra el panel con la tecla (13) *Regresar*, localizada en la parte inferior izquierda de la pantalla. El botón (11) *Guardar* abre un menú donde es posible introducir el nombre del archivo a ser guardado, así como su ubicación en algún directorio. El registro de datos se hace iniciar seleccionando el botón (12) *Graficar*, los datos que se reciben son visualizados en el instante en los cuadros (2) para la temperatura y (3) para la presión, los valores reales se pueden observar en los bloques (4) y (5) donde se presentan los datos de presión y temperatura de la muestra y del yacimiento, respectivamente. El botón (6) proporciona la opción para seleccionar el tiempo en que se toman las lecturas, una entre otra. El reloj que se presenta en el icono (7) proporciona la referencia en tiempo de la duración del registro u operación. El bloque de iconos que se presentan en el recuadro (8), nos dan información del proceso que se sigue, cuando el sistema se encuentra calentando a cierta temperatura, un círculo rojo se coloca sobre a la izquierda del texto *Calentando*, los que nos indica que el sistema está demandando energía para operar el calentador; si el círculo rojo se cambia a la izquierda del texto *Enfriando*, nos señala que el sistema de calentamiento esta sobre el valor de la temperatura que se necesita, por lo que no es necesario suministrar energía. En éste mismo recuadro se visualizan las opciones de abrir o cerrar, que indican la posición de la válvula, también mediante el movimiento del círculo rojo.

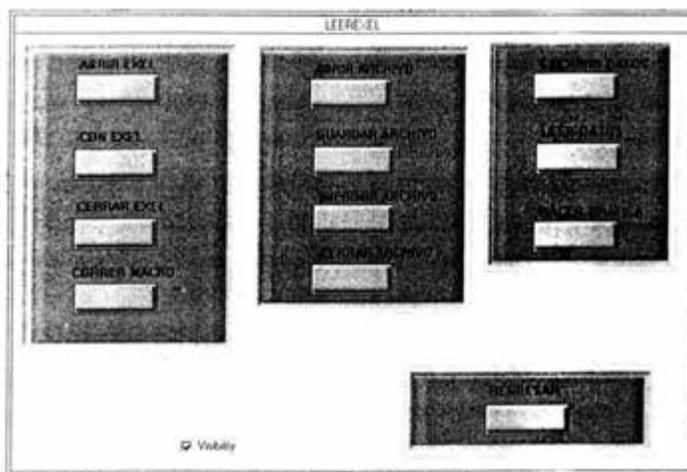


Figura 5.16. Panel para introducción de datos y análisis gráfico con Excel.

La casilla (9) indica la profundidad a la que se encuentra la herramienta, esto se realiza mediante el conteo de los coples que se registran con el CCL. A un costado de este recuadro se encuentra

el valor de la corriente con la que se está alimentando la herramienta. El programa se detiene seleccionando el botón (10) *Detener* y después el botón (6) *Regresar*, que nos regresará al panel inicial, que contiene las opciones para análisis de información, ya sea gráficas en Excel, datos en tablas con formato de Word o Excel, etc., las figuras 15.16 y 15.17 muestran los paneles respectivos.

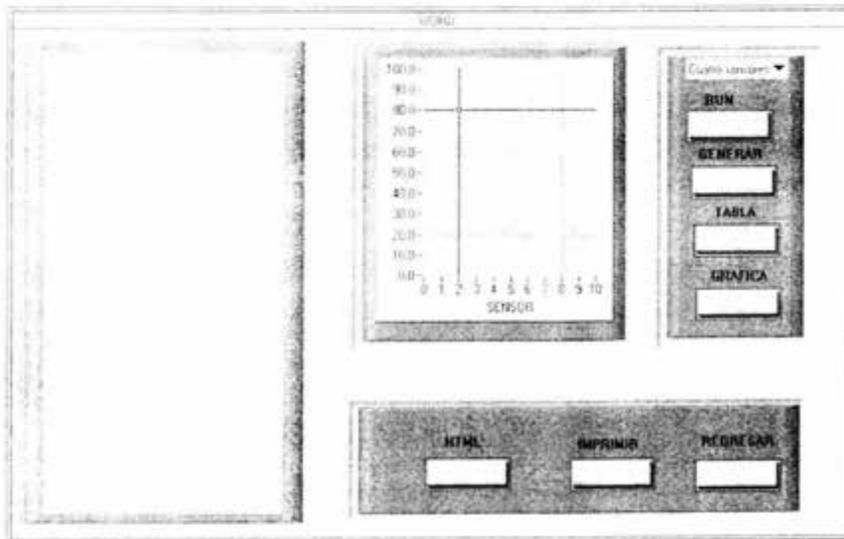


Figura 5.17. Panel de análisis en Word

### 5.9. Descripción general del control electrónico de la herramienta de fondo.

La figura 5.18, muestra el módulo de control electrónico de la herramienta de fondo, que está integrado por componentes resistentes a la temperatura, junto con las tarjetas de circuito impreso, se probaron por el autor de este trabajo y el especialista encargado del diseño electrónico, hasta 150°C debido a que los componentes empleados no mantienen su estabilidad por especificaciones dadas por el fabricante, corriendo el riesgo de quemarse si se probaban a mayor temperatura. De acuerdo con las especificaciones planteadas en el inciso 2.6 se requería que el sistema soportara una temperatura máxima de 175°C, éste requisito puede cumplirse si se fabrican las tarjetas con materiales y recubrimientos de mejor calidad que proporcionen la resistencia requerida así como la adquisición de componentes más resistentes, especialmente los microcontroladores.



Figura 5.18. Módulo de control electrónico

La electrónica está dividida en los siguientes bloques:

a.-) *Reguladores de voltaje*: Debido a las características técnicas del cable monoconductor, que soporta un voltaje máximo de 1200 V, una corriente máxima de 1 A y que tiene una resistencia de carga de 0.078 Ohm/m, si normalmente el cable que se encuentra enrollado en el malacate de la unidad de registros tiene una longitud de 6 hasta 9 km, la resistencia de carga total llega a tener un valor mínimo de 468 ohm, por lo que la mayoría de las herramientas de registros requieren ser alimentadas con alto voltaje. Con esta resistencia la pérdida de energía es considerable, el voltaje que llega al fondo depende del voltaje que se suministre en superficie, cálculos realizados en base a la ley de Joule, estimaron que para la herramienta de muestreo es necesario tener un voltaje a la entrada de la herramienta de 87 Volts con la corriente máxima que resiste el cable de 1 A.

Como se ha descrito, la herramienta está integrada con diversos elementos como son: sensores, resistencia de calentamiento, motor que opera una válvula, además de circuitos necesarios para el envío de señales a superficie; todos ellos requieren de alimentación con voltajes de diferente magnitud. Para cubrir ésta necesidad fue necesario subdividir el voltaje que llega a la herramienta en varios reguladores, la figura 5.19 muestra un diagrama general de los reguladores de voltaje

que alimentan a éstos componentes. La herramienta cuenta con un regulador de voltaje que disminuye de 85 V a 45 V, con el cuál se alimenta el calentador eléctrico, la resistencia de carga por donde se monta la seña y el circuito de conmutación. Un regulador de voltaje de 45 V a 25V alimenta al motor y al control de temperatura. El voltaje de 25V a 5V se realiza en dos etapas, una de 25 a 15V y de 15 a 5v, para alimentar a un microcontrolador y a un convertidor analógico digital; del voltaje de 15V también se reduce a 6.4 V positivo para alimentar al amplificador instrumental y a través de una fuente de conmutación se obtiene un voltaje de -6.4V que es la referencia de amplificador.

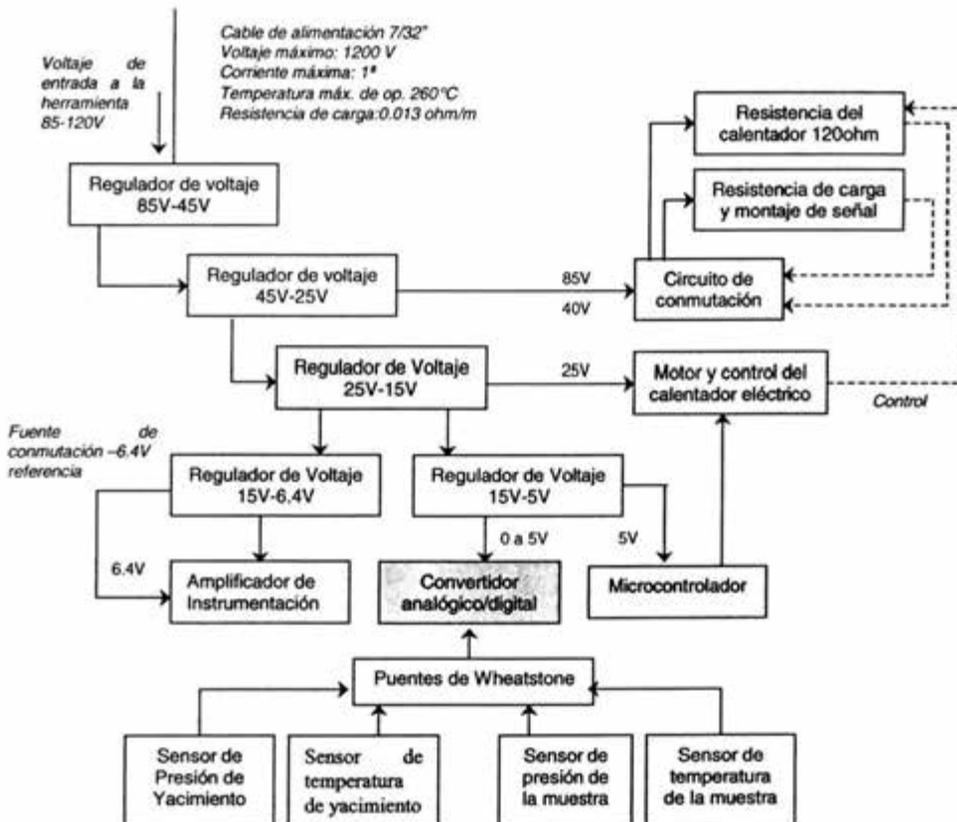


Figura 5.19 Reguladores de voltaje

b.-) *Control y administración de energía del calentador.* La temperatura de las muestras puede estar en diversos rangos, ya sea alta o baja temperatura, cuando una muestra se encuentra a alta temperatura (más de 100° C) se emplea la máxima energía para alimentar el calentador

utilizando el voltaje de salida del primer regulador, sin embargo cuando la muestra se encuentra a baja temperatura es necesario reducir el voltaje y la corriente para proporcionar la energía necesaria, bajo éstas condiciones se diseñó un circuito de conmutación junto con una resistencia de carga que conectada en paralelo con la resistencia del calentador, divide la corriente proporcionando la energía necesaria en cualquiera de los casos.

*c.-) Acondicionamiento de señales* La herramienta cuenta con cuatro sensores, dos para medir temperatura identificados comercialmente como RTD y dos para medir presión, un juego de ellos están ubicados en el contenedor y miden las condiciones de la muestra; el otro par está colocado en la pieza SM-43 (Portasensores de yacimiento) y se encargan de medir las condiciones del yacimiento. Las lecturas de los sensores, son registrados por un convertidor analógico digital con un intervalo de voltaje de 0 a 5 Volts. Debido al principio de funcionamiento fue necesario diseñar un circuito para acondicionar las señales y obtener una correlación entre el voltaje de referencia y el rango de voltaje de los sensores. El RTD que se utiliza presenta una resistencia de 100 Ohm a una temperatura de 0°C y aumenta de forma directamente proporcional presentando una resistencia de 161.05 Ohm a una temperatura de 160 °C. El arreglo para medir una variación de voltaje por el incremento de la temperatura es por medio de un puente de Wheatstone. Para el caso de los sensores de presión, cuyo principio de funcionamiento está basado en la variación de una resistencia debido a la deformación de un diafragma, se utiliza también un puente de Wheatstone, éste tipo de sensores tiene una sensibilidad de 31.533 mV a plena escala con un intervalo de medición de 0 a 1054.6 kg/cm<sup>2</sup> (15000 psi), si se alimenta con un voltaje de 10 V; en este caso se alimenta con un voltaje de 6.9 Volts, presentando un voltaje diferencial de 0 V a 21.75777 mV a plena escala de 0 a 1054.6 kg/cm<sup>2</sup> (15000 psi), ambos voltajes, el emitido por el arreglo de puentes para los sensores de presión y de temperatura son amplificados y medidos por un convertidor analógico/digital.

*d.-) Control electrónico de sensores.* El módulo de control es la parte central de la herramienta porque controla el funcionamiento de todos los elementos que forman parte de la herramienta. Este módulo está formado por un Microcontrolador PIC16F876-04E/P, que es un dispositivo que cuenta con memoria flash, en donde se guarda el programa de control, donde es posible manejar el funcionamiento de cada elemento de forma independiente. Las funciones a desempeñar por el PIC son las siguientes:

- Adquirir la información de los 4 sensores ( $T_M$ ,  $T_Y$ ,  $P_M$  y  $P_Y$ ).
- Controlar la apertura y cierre de la válvula del contenedor.
- Controlar la temperatura de la muestra.
- Adquirir la señal del CCL
- Codificar y enviar la información hacia el modulo de montaje de señal.

El microcontrolador, adquiere las señales analógicas provenientes de los cuatro sensores para luego convertirlas a números digitales de 10 Bits. Basándose en los parámetros que se establecieron para la toma de muestra, verifica si es tiempo de la toma de muestra o no, si las condiciones se cumplen abre la válvula para que el petróleo se deposite en el contenedor, una vez que se ha llenado el depósito espera para que la temperatura y presión se estabilicen y la vuelve a cerrar. Tomada la muestra se controla la temperatura del contenedor.

El microcontrolador recibe un pulso que envía un CCL cada determinada distancia, después manda la información de los 4 sensores y del detector de coples, hacia el módulo de comunicación, posteriormente adquiere otra vez la información de los sensores y el ciclo se repite cada segundo. La señal de los sensores de presión y temperatura está acondicionada a un voltaje de 0 a 5 V, para recibir estos parámetros se utiliza el microcontrolador que se encarga de la adquisición de datos a través de convertidores analógico/digital de 10 Bits de resolución. Estos parámetros son monitoreados en forma periódica cada minuto codificados en un formato Serial asincrono (bidireccional). Aunque aquí solo se envía la información en un sentido (de fondo hacia superficie).

e.- Control de válvula de admisión: La válvula es controlada por la acción de un motorreductor que funciona con 25V y 450mA, llegando hasta 750 mA en plena carga. El motor debe funcionar en dos sentidos para abrir o cerrar la válvula ; un circuito integrado por transistores de tipo pnp y npn que se polarizan permitiendo el paso de la corriente para operar el motor según sea el caso. El funcionamiento es controlado por el programa del microcontrolador que toma de referencia la temperatura del yacimiento para abrir y la estabilización de la temperatura del yacimiento y la muestra para cerrar.

f.-) *Comunicación a superficie:* Por requerimientos de Pemex, el cable que se utiliza para bajar la herramienta al pozo es de tipo monoconductor a través del cual se alimenta la herramienta y se transmite la información que despliega la herramienta desde el fondo del pozo, mediante el acoplamiento de señales sobre el voltaje.

En un análisis del cable se encontró que presenta arreglos de dos resistencias (23 y 56 ohm/Km) en serie y un capacitor (0.165  $\mu$ F/Km) en paralelo comportándose como un filtro pasabajos con una frecuencia de corte de 2 Khz. La herramienta se alimenta con una fuente de corriente, el voltaje en el fondo está en función a la resistencia de carga del cable. Cuando la resistencia varía, repercute en el voltaje de fondo y por consecuencia el de superficie. Si la variación de voltaje se fija entre dos niveles en forma de pulsos, en superficie se reciben con menor amplitud y distorsionadas.

Para acoplar la señal de comunicación sobre el voltaje de alimentación, se tienen dos niveles de voltaje que definen los estados alto y bajo de una comunicación serial. Para disminuir el voltaje se energiza una resistencia de conmutación ( $R_M$ ), que se conmuta para variar entre los estados alto y bajo a través del funcionamiento de un MOSFET de potencia, que hace que pase de su estado de corte a saturación. Cuando el MOSFET se encuentra en saturación se energizan dos resistencias ( $R_M$  y  $R_C$ ) teniendo un voltaje bajo ( $V_{BC}$ ) y cuando el MOSFET está en corte se energiza solo la resistencia ( $R_C$ ) teniendo un voltaje para operar el calentador normalmente con ( $V_{AC}$ ). Dos niveles de voltaje en el fondo  $V_{AC}$  y  $V_{BC}$  (85 V y 40 V) se utilizan para enviar pulsos de 45V, en cualquiera de los estados se fija el voltaje a 85 V ( $V_{AC}$ ) y se conmuta la resistencia ( $R_M$ ). Una vez que se ha enviado la información, se restablece el nivel de la energía para el calentador que se tenía inicialmente. Cuando la información se envía a la superficie, sufre cambios de amplitud, deformación y defasamiento, recuperándose a niveles muy bajos. Como se mencionó anteriormente el PIC envía la información por una línea con un formato serial en niveles TTL de 0 a 5 V, excitando al circuito de conmutación. Los pulsos se acoplan durante el estado de calentamiento máximo y mínimo con una amplitud igual, conectando una resistencia para generar el estado de comunicación que se necesite. El circuito de conmutación del MOSFET es el mismo que se utilizó en el módulo de calentamiento.

### 5.10. Descripción detallada del funcionamiento del muestreador

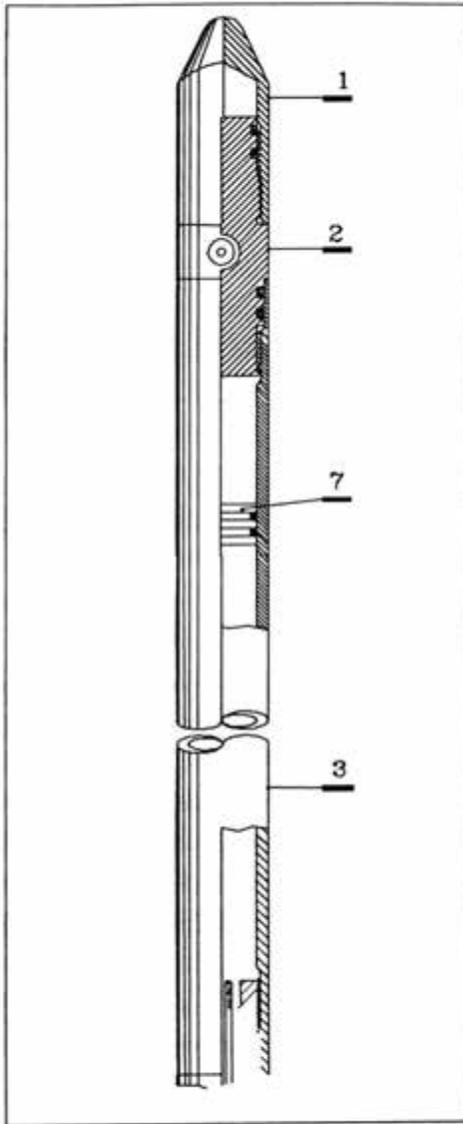
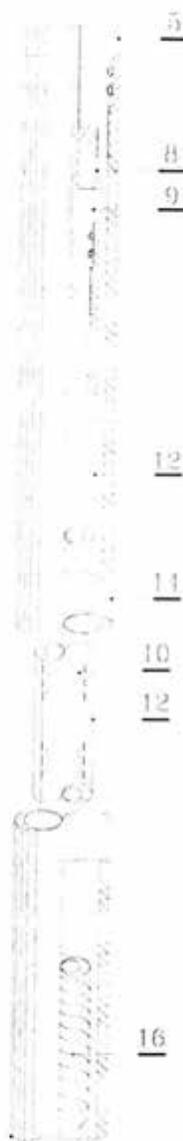


Figura 5.20. Vista parcial del sistema de amortiguamiento.

Como se aprecia en las figuras 5.20, 5.21, 5.22, 5.23 y 5.24, la herramienta para toma

de muestras que preserva la presión y temperatura del yacimiento (equipo de fondo) está integrado por diferentes secciones, tiene un diámetro exterior promedio de 42.85mm (1.687") y una longitud de 3.98 m; para su funcionamiento debe estar conectada al cable monoconductor como se muestra en la figura 5.16. Las partes 1, 2, 3, 5 y 7, comprenden la sección (1) identificada como **sistema de amortiguamiento**; las partes 8, 9, 10, 12, 13, 14 y 16, integran la sección (2) identificada como la **cámara de almacenamiento y sistema de calentamiento**; la sección (3) está integrada por las partes 11, 42, 4, 18, 19, 20, denominadas como **sistema de admisión**; la sección (4), está integrada por las partes 22, 41, 23, 44 y 38, y se denomina **módulo de sensores de la muestra**; las figuras 39, 27, 40, 30, 31 y 32, comprenden la sección 5 y se identifica como **módulo de electrónica**. Finalmente la sección 6, denominada como **módulo de sensores de fondo**, está integrada por las partes 41, 44, 48, 43, 50 y 56. Todas estas piezas constituyen las partes más importantes de la herramienta, el plano general SMH-01 contiene las partes adicionales. La interrelación, funcionamiento e importancia se describen con detalle a continuación:



**Figura 5.21. Sección de la cámara de almacenamiento y sistema de calentamiento.**

La pieza (1) se identifica como tapón cubre rosca que protege la conexión de la válvula (2), diseñada para acoplarse con otra

herramienta no eléctrica, así como contrapesos utilizados en la toma de registros. La válvula (2) es de tipo de bola y es utilizada para realizar la carga de un volumen de Nitrógeno una vez realizado el vacío, es utilizada también para la liberación del gas cuando la herramienta se encuentra en superficie. Esta válvula es removida una vez que el Nitrógeno es liberado, en su lugar se conecta un conector tipo TF (ver plano TF-01 en el anexo) utilizado para conectar el equipo de presurización del sistema de transferencia de la muestra.

En la parte opuesta de la válvula (2) se encuentra la camisa del amortiguador (3) que contiene un volumen de nitrógeno y un volumen de fluido hidráulico separados por el pistón (7), la camisa está diseñada para soportar la presión ocasionada por la compresión de los fluidos generada por el movimiento del hidrocarburo al entrar en la cámara de almacenamiento. Cuando la cámara de almacenamiento (12) está vacía de hidrocarburo, el volumen está ocupado de aceite hidráulico (aceite de silicon) el pistón (7) se encuentra en un estado inicial presionado sobre el conector (5) solo por la presión del nitrógeno que se expande por efecto de la temperatura. La camisa del amortiguador (3), el contenedor (12) y la camisa exterior de éste (14) se encuentran unidos por una válvula de admisión especialmente diseñada (13), en ella se encuentra alojado el sensor que mide la



Figura 5.22. Sección de sistema de Admisión.

temperatura de la muestra, así como los orificios por donde pasan los cables de

alimentación de un calentador eléctrico (16), además de los conductos para conectar un sensor de presión (41) para monitorear las condiciones de la muestra. La válvula de admisión es operada por un motor (18) acoplada a un reductor de velocidad (19) que mueven un vástago de aguja (42), este sistema es controlado electrónicamente, actuando con el registro de un parámetro preestablecido, éste puede ser la presión del yacimiento, la temperatura en el interior del pozo o su profundidad. Cuando se abre la válvula el fluido del yacimiento entra al contenedor por el orificio (11), en este momento los pistones (10) que contienen un volumen de octano entre ellos, son empujados hacia el extremo opuesto, desplazando el volumen de líquido amortiguador que ocupaba el espacio; la velocidad de entrada del hidrocarburo es regulada por el movimiento del líquido que pasa del contenedor (12) al amortiguador (3), atravesando por un pequeño conducto de la pieza (9) que conecta ambas cámaras, el movimiento y velocidad del hidrocarburo es regulado también por una pequeña válvula instalada en el conector (5) y por la compresión del nitrógeno a través del pistón (7). Este movimiento considerado como de amortiguación tiene la finalidad de evitar que la muestra se separe en fases de gas y líquido, ya que uno de los objetivos es preservar la muestra en una sola fase, cabe señalar que la herramienta no tiene sensores para detectar fases, la operación debe ser

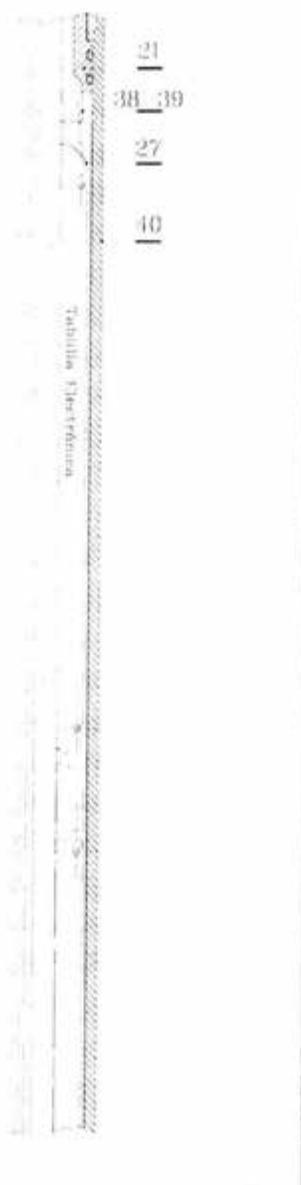


Figura 5.23. Sección del módulo de electrónica.

guiada por registros del pozo además del diagrama de fase del yacimiento. Cuando los

sensores que monitorean las condiciones de la muestra comienzan a emitir datos de presión y temperatura del interior de la cámara, se considera que el hidrocarburo se encuentra en el interior del contenedor por consiguiente la válvula está en posición de abierto. Los registros de los sensores de yacimiento, sensor de presión (41) y de temperatura (48), deberán medir valores similares a los que monitorean la muestra, esta situación definirá en que momento la válvula se cierra. El dispositivo mecánico (4) que se encuentra acoplado a la aguja de la válvula (42) y el motor (18) es un trinquete que permite cerrar o abrir la válvula evitando que se forcé el motor en el caso de que siguiera girando en ambas operaciones.

Cuando la muestra es atrapada las condiciones del instante en que se atrapó deben prevalecer durante su viaje hacia la superficie hasta el momento en que se analice en un laboratorio, por consiguiente la temperatura y la presión deben mantenerse. La presión en esta herramienta es controlada por temperatura, la figura 5.19, muestra una parte de la herramienta donde se encuentra un calentador eléctrico (16) de 120 W, que proporciona la energía necesaria para mantener la muestra a la temperatura del yacimiento previamente registrada por los sensores montados en la válvula de admisión (13).

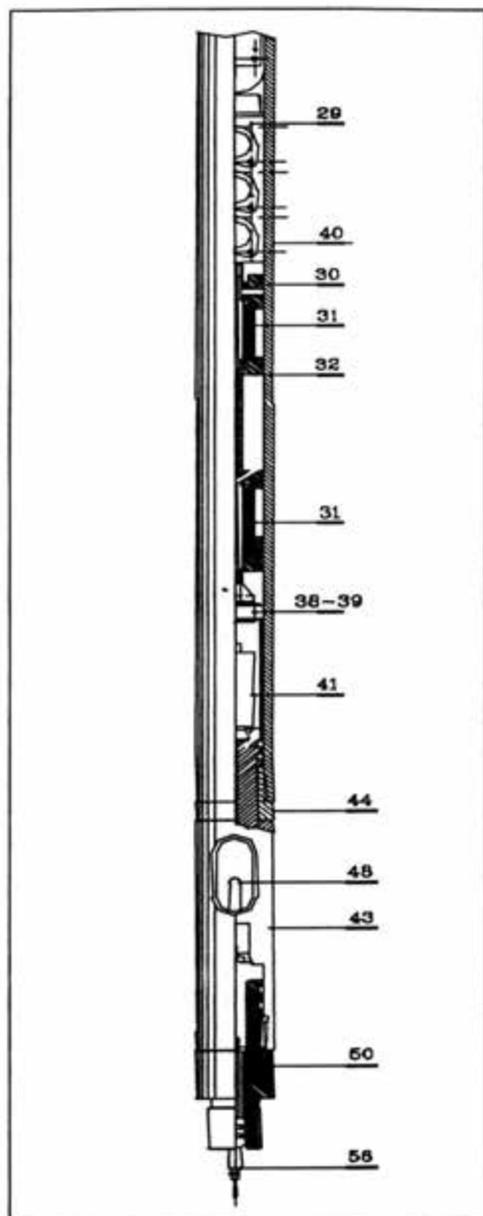


Figura 5.24. Sección del módulo de sensores de fondo y conexión para cabeza MH-22.

El conector (5), la camisa exterior del calentador (14) y la válvula de admisión

(13), forman un "termo" con la finalidad de retardar las pérdidas de calor emitido por el calentador. Entre la camisa interior (12) y la exterior (14) se encuentra un aislante térmico que ayuda a mantener la temperatura de la muestra reduciendo la rapidez de emisión de energía calorífica en forma radial. La energía que se suministra al calentador es controlada por el módulo de electrónica en referencia al valor de temperatura registrado por el sensor interno.

La presión en el contenedor es transmitida de la muestra al sensor a través de un tubing (22), que se conecta a la válvula, en la cual existe un orificio que comunica directamente con el hidrocarburo, el medio de transmisión es un aceite de silicon que llena completamente el tubing,

El conector (23) une mecánicamente el sistema de admisión con el módulo de electrónica, protegiendo el sensor de presión (41) y albergando el conector eléctrico (38) que unido al conector (39) se enlazan eléctricamente ambos sistemas. El módulo de electrónica, integrado por las piezas: soporte para tablilla (27), tablillas electrónicas, disipador de temperatura (29), controla y administra la información de los sensores de presión y temperatura tanto de la muestra como del yacimiento, la apertura de la válvula controlando el motor, así como el calentador eléctrico y el detector

de coples. Su funcionamiento general es el siguiente:

Cuando la muestra ingresa a la cámara ocupando el máximo volumen se considera que su presión se encuentra en equilibrio con la presión del yacimiento, para esto se comparan las presiones tanto del yacimiento como del interior de la cámara a través de los sensores (41), cuando éstas son iguales dado un margen de tolerancia, el valor es registrado por el sistema electrónico que acciona el motor para cerrar la válvula, cabe mencionar que la herramienta de muestreo ingresa al interior de la tubería de producción con la válvula cerrada. En el momento en que la válvula se cierra la muestra queda atrapada en el interior de la cámara (12), en este instante se considera la temperatura del yacimiento como referencia con la cual el sistema electrónico controlará la temperatura de la muestra alimentando eléctricamente el calentador, esto es a través del uso de un circuito integrado (PIC), La temperatura se mantiene en un rango de variación de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , controlando simultáneamente la presión por control de temperatura, de acuerdo con las ecuaciones de estado. Toda la información que se genera se envía hacia la superficie por un solo cable que proviene desde una unidad móvil de registros, donde el cable está conectado a una lap top a través de una Interfaz de comunicación. La energía eléctrica para la operación de la electrónica y el calentador, se envía por este cable que es de tipo monoconductor cuyas especificaciones se han dado en incisos anteriores.

Dentro de la camisa que protege la electrónica (40) se encuentra instalado un detector de coples integrado por las piezas siguientes: piezas polares (30), bobina (32) e imanes (31). Este dispositivo ha sido integrado al módulo de electrónica para facilitar su operación, ya que la bobina y los imanes generan una corriente eléctrica, de acuerdo con la teoría presentada en el inciso 4.5, que se intensifica cuando se encuentra con uniones entre tuberías llamadas coples en el movimiento de la herramienta en el interior de la tubería de producción. La corriente inducida es registrada y amplificada por el módulo de electrónica; el conteo de estos coples se utiliza como referencia para estimar la ubicación de la herramienta en el fondo del pozo.

Las partes (38) y (39) son conectores que permiten la comunicación eléctrica entre la pieza (43) portasensores de yacimiento y el módulo de electrónica, de igual forma la pieza (43) permite la unión mecánica por un extremo con la camisa de la electrónica (40) mediante la tuerca loca (44) y por el otro extremo con el conector SM-cabeza MH22 (50), donde se recibe la energía a través del conector simple de un polo (56), empleado para comunicar eléctricamente el cable monoconductor con la herramienta de muestreo de hidrocarburos, utilizando la cabeza MH-22 (equipo de Pemex). Es importante mencionar que este conector simplifica el sistema

**Faltan páginas**

**N° 186-187**

electrónico a un solo conductor por donde sale y entra tanto la información de la herramienta de muestreo como la alimentación a la misma.

Una vez que la muestra ha sido capturada se lleva a superficie, la herramienta puede ser almacenada en un estabilizador de temperatura (Solicitud de patente No. PA/a/1999/011927), que protege la herramienta en la fase de transporte, ayudando a disminuir las pérdidas de calor de la muestra, que también puede ser transferida a un contenedor utilizando un sistema de transferencia adecuado para bombeo de aceite hidráulico. Como una mejora en esta herramienta, la transferencia no se realiza con mercurio.

### 5.11. Especificaciones técnicas de la herramienta de muestreo.

- Volumen de muestra 300 cc
- Diámetro exterior 42.85 mm (1.687 pulg)
- Longitud total 3.989 m
- Voltaje de alimentación en superficie 850 V
- Corriente máxima 1 A
- Sistema eléctrico de acoplamiento Monoconductor compatible con cabeza tipo MH-22 (Especificación Pemex)
- Diámetro de cable 5.55 mm (7/32 pulg)
- Temperatura máxima de operación 150 °C
- Presión máxima de operación 703.07 kg/cm<sup>2</sup> (10 000 psi)
- Presión máxima de diseño 1054.6 kg/cm<sup>2</sup> (15 000 psi)
- Rango de sensores de presión 0 -1054 kg/cm<sup>2</sup> (0 -15 000 psi)
- Control de temperatura ±1°C
- Detector de coples integrado
- Construido en acero 17-4 Ph y Titanio aleación Ti-6Al-6V-2Sn
- Libre de mercurio
- Opción de conectar contrapesos con o sin conductor
- Control automático de temperatura de la muestra
- Amortiguador instalado para reducir riesgos de separación de fases

Las características técnicas de los sensores de presión y temperatura así como las especificaciones del motor empleado para operar la válvula, se encuentran en el apéndice G.

## 5.12. Plano general de ensamble.



***Capítulo VI***  
***Pruebas de laboratorio***

## 6.0 Pruebas de laboratorio

Partiendo del diseño conceptual para resolver la necesidad de obtener muestras de hidrocarburos, el desarrollo de ésta herramienta ha pasado por diversas etapas, algunas de ellas han involucrado la fabricación de prototipos de laboratorio y su prueba con base en la tabla experimental planteada por el Método Taguchi. Un ejemplo de esta etapa fue la fabricación de las camisas que se utilizaron para realizar los experimentos y caracterizar el sistema de calentamiento, la figura 6.1 muestra el ajuste realizado a una de éstas camisas. Se puede decir que el diseño de las partes ha sido de forma evolutiva, cubriendo los problemas que se presentan en las pruebas de las partes, el sistema de admisión (válvula), el módulo de electrónica y el detector de coples son ejemplos reales de este tipo de diseño.

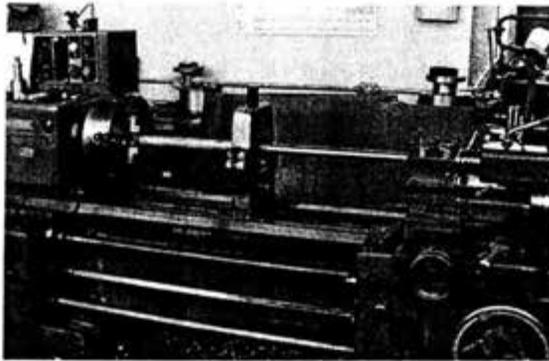


Figura 6.1. Maquinado de la camisa exterior del sistema de calentamiento

### 6.1. Pruebas de la válvula de admisión

Como se analizó en el capítulo IV, el problema consistió en eliminar el peligro de taponar el conducto por donde entra el hidrocarburo con la presencia de parafinas o asfaltenos, la figura 6.2 muestra la constitución de la válvula, aunque el sistema funciona como se puede apreciar en la prueba a alta presión utilizando diversos tipos de hidrocarburos, la válvula se cierra soportando presión de hasta  $1054.6 \text{ Kg/cm}^2$  (15 000 psi). El principio de sellar la entrada con una válvula de aguja está probado sin embargo el riesgo de obstrucción queda latente. El diseño que se presenta después de evaluar las opciones, analizado en el inciso 4.3, donde se elimina el tubing y conectando la válvula directamente a la cámara de almacenamiento, requiere ser probado a las condiciones más severas, esto es temperatura y presión, la figura 6.3 muestra una de las

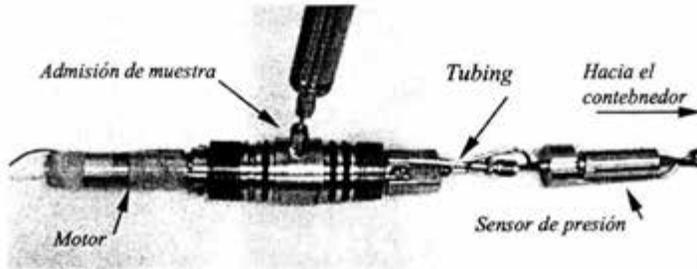


Figura 6.2. Válvula de admisión con tubing para conexión al contenedor

pruebas, en donde el prototipo de válvula se ha conectado al contenedor junto con la camisa exterior, se puede observar que el sistema se encuentra dentro de un equipo estabilizador de temperatura, se realizaron pruebas con aceite ligero y con aceite de silicon tipo M-100 cuya viscosidad es 100 Sc, en pruebas realizadas por el autor, en el laboratorio y durante el desarrollo del proyecto, se sabe que se dilata alrededor de 0.2% del volumen inicial por cada grado Celsius de temperatura (ver anexo G), por lo que al aumentar la temperatura del estabilizador se incrementa la presión dentro del contenedor, se cierra la válvula accionando el motor y se revisa el sellado, como la presión puede subir en este momento sin control, se encuentra conectado en la salida de la válvula una bomba manual, con manómetro de hasta  $1054.6 \text{ Kg/cm}^2$  (15 000 psi), para liberar la presión. En el caso de que existiera fuga al cerrar la válvula el manómetro registraría movimiento en su indicador, lo que no ocurrió, probando de esta forma el sellado de la válvula, que es uno de los mecanismos más importantes de la herramienta.

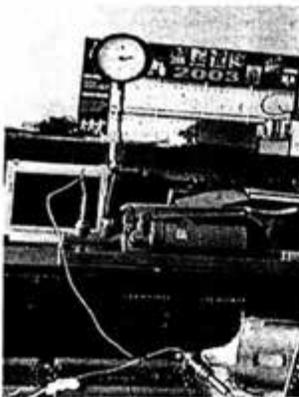


Figura 6.3. Inicio de prueba de válvula a presión

En el caso de fugas a pequeña escala, se conectó al sistema un sensor de presión con el que después de analizar la información se encontró que existía una variación de presión que correspondía a la interacción del medio ambiente, esto se debió a que el sensor y el líquido utilizado son muy sensibles; el líquido responde rápidamente a cambios de temperatura y como el volumen que se encontraba en la línea era muy pequeño, se alteraba por cambios de temperatura de los alrededores.

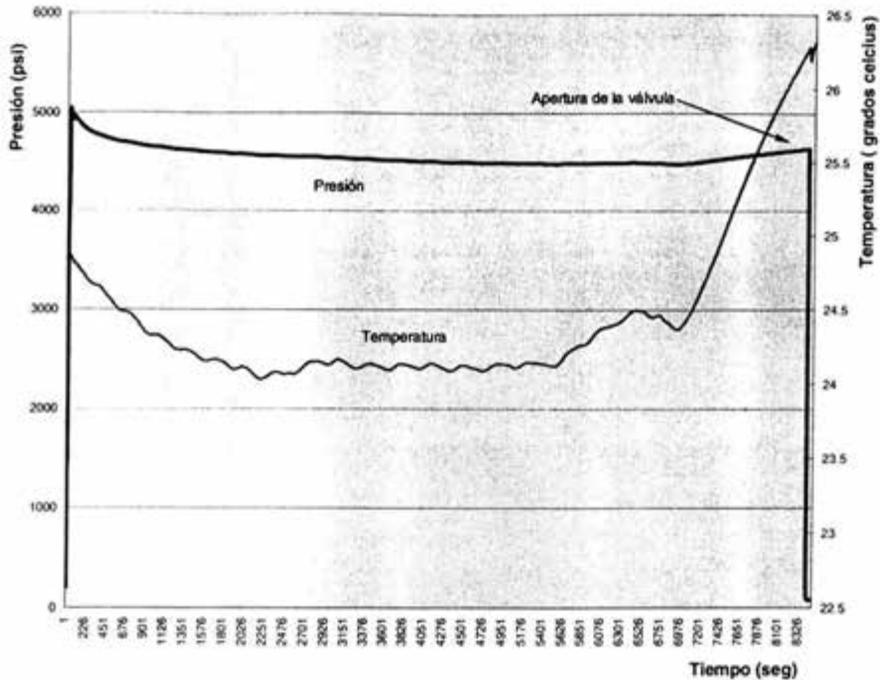


Figura 6.4. Prueba a  $351.53 \text{ kg/cm}^2$  (5000psi) de presión de la válvula y variación de temperatura

El problema se solucionó aislando las conexiones con trozos de colchoneta de fibra cerámica. Finalmente se comprobó la eficiencia en el sellado de la válvula al no encontrar variaciones considerables. La gráfica de la figura 6.4, muestra las variaciones de presión ocasionadas por el medio ambiente. La figura 6.5 muestra la válvula que se empleó en las pruebas finales de laboratorio; con las piezas que la integran, el motor, y el trinquete con el que se asegura que la válvula cierre o abra.

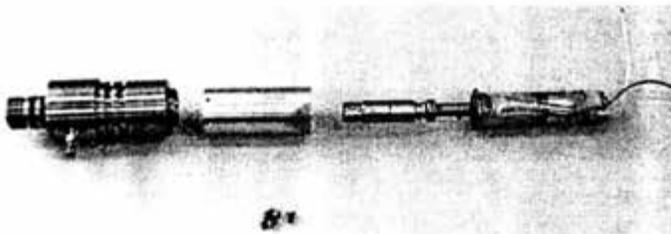


Figura 6.5. Válvula utilizada en las pruebas de laboratorio.

## 6.2. Prueba de laboratorio de las camisas del sistema de calentamiento

Como se ha descrito, la herramienta está integrada por diversos módulos, cada uno de ellos tiene una particularidad al realizar pruebas de funcionamiento. Se han descrito algunas de las pruebas que se realizaron a la válvula y al detector de coples, sin embargo un módulo importante también lo es el sistema de calentamiento y almacenamiento de la muestra, que fue analizado en el capítulo IV. Los experimentos efectuados definieron las condiciones óptimas del sistema de calentamiento, así como los materiales de fabricación. En el capítulo V, se analizaron los esfuerzos y se determinó el coeficiente de seguridad de cada uno de los elementos, especialmente las camisas que soportan presión tanto interna como externa, una fase del desarrollo de esta herramienta fue probar los elementos a presión. Se utilizó un simulador de pozo, fabricado con una barra hueca de acero que puede resistir hasta 12 000 psi de presión interna; las camisas junto con los sellos de vitón fueron probadas, especialmente la camisa exterior del contenedor debido a que en el análisis presenta un factor de seguridad pequeño. La figura 6.6 muestra el simulador de pozo, la figura 6.7 muestra la tapa roscada para serrar el tubo, mientras que la figura 6.8 muestra el simulador en una prueba a presión. Cabe señalar que el manejo de alta presión resulta ser muy peligroso, por lo que la mayoría de las pruebas se realizan a presiones cuyo desarrollo fue totalmente controlado, en este caso se ha probado plenamente que el simulador soporta 12 000 psi, por lo que no fue posible probar la camisa hasta 15 000 psi. La camisa del contenedor fue probada utilizando una balanza de pesos muertos hasta la presión de 15 000 psi, la duración de la prueba para la camisa exterior fue de alrededor 8 horas y en el caso de la camisa del contenedor solo de 2 horas, sin temperatura. Al final de las pruebas las camisas no presentaron deformación y los sellos trabajaron de acuerdo a lo esperado.



Figura 6.6. Simulador de pozo.

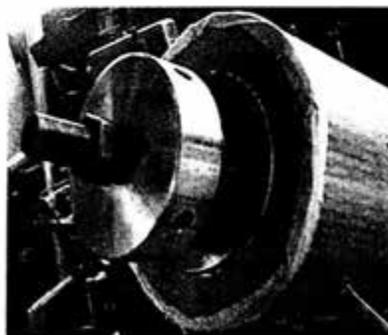


Figura 6.7. Tapa roscada para cerrar el tubo.

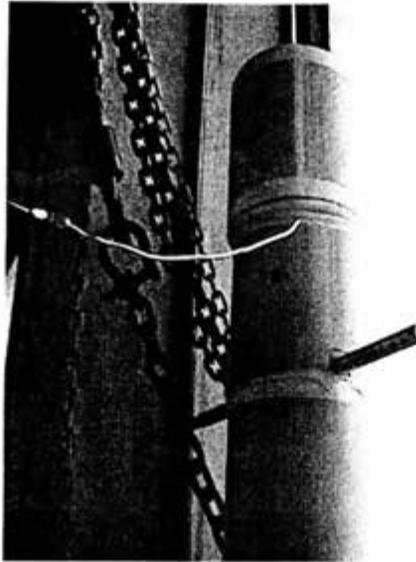


Figura 6.8. Prueba de presión en el simulador.

### 6.3. El sistema de calentamiento

Como se analizó en el capítulo IV, el sistema de calentamiento es otro de los elementos importantes en la herramienta, se ha pasado la mayor parte del tiempo en su caracterización y de igual forma el diseño se ha desarrollado por evolución. El problema más complicado fue implementar la instrumentación, ya que los sensores deben estar en contacto con la muestra, las dimensiones en las piezas y el tamaño de los sensores, fue el principal problema, como puede verse en el plano general de ensamble SMH-01, el sensor de presión se sacó de la cámara, colocándose en otro módulo junto con el motor para abrir la válvula, el tubing de comunicación entre la cámara y el sensor debe estar soldado a una parte de la válvula, (como lo muestra el análisis de la válvula, inciso 4.3), donde termina un conducto que se comunica directamente al interior del contenedor. El medio de transmisión es aceite de silicon que se encuentra llenando el tubing y el orificio de conexión, de esta forma se evita que el hidrocarburo y sus componentes dañen el diafragma del sensor.

Otro problema fue pasar los cables de alimentación eléctrica del calentador hacia el módulo de electrónica, debido a que las conexiones mecánicas entre una y otra parte se realiza a través de uniones roscadas, la solución fue guiar los cables de la alimentación por orificios que atraviesan

la válvula, esto es después de conectar la camisa del contenedor a la válvula. La figura 6.9 muestra la unión entre estas dos partes.



Figura 6.9. Conexión entre válvula y contenedor.

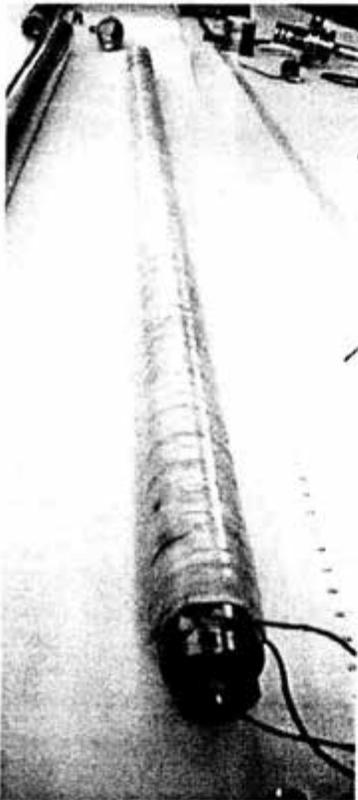


Figura 6.10. Contenedor con el calentador eléctrico.

Uno de los objetivos de trabajar el problema del calentador fue disminuir el consumo de corriente utilizando la máxima potencia posible para calentar la muestra, tomando en cuenta la temperatura que puede tener la muestra cuando es capturada. Primero se pensó en colocar dos resistencias de 60 ohm sobre el contenedor, con la finalidad de ocupar una de ellas para calentar la muestra a bajas temperaturas utilizando la mínima energía, cuando la temperatura fuera mayor se podían combinar las resistencias conectándolas en serie para tener una resistencia total de 120 ohm, con un circuito de conmutación se podía realizar esta operación, sin embargo el manejo de la corriente complicaba el funcionamiento de la electrónica debido a los rangos de corriente que maneja el microprocesador. Finalmente se decidió utilizar la resistencia de 120 ohm y colocar una resistencia de carga y un circuito de conmutación, que controla el suministro de corriente al calentador, cuando la temperatura es alta, el calentador se alimenta con la máxima corriente, cuando la temperatura es baja, actúa el circuito de conmutación conectando la resistencia

de carga en paralelo, dividiendo la corriente para disminuir la potencia del calentador, la cual está controlada por el microprocesador.

La resistencia del calentador se fabricó utilizando una cinta de Nicromel de aproximadamente 6.8 Ohm por metro, que ocupó alrededor de 17.5 m enrollados en el contenedor como se puede apreciar en la figura 6.9. La figura 6.10 muestra el contenedor con el calentador aislado eléctricamente.

Para caracterizar el sistema de calentamiento y probar los resultados obtenidos en el inciso 4.2, se implementó un arreglo como se muestra en la figura 6.11, donde se midieron el comportamiento de la temperatura, esta vez se acopló la electrónica para controlar el calentador y analizar la demanda de energía. Se colocaron 7 sensores de temperatura, uno midiendo directamente la temperatura de la muestra, 3 sobre la superficie exterior del contenedor, para verificar que el calentador distribuya uniformemente la energía en la muestra, dos sensores más se colocaron en la camisa exterior del calentador, uno en el interior tocando la pared y otro en el exterior sobre la superficie, uno más monitoreaba las condiciones ambientales. Se empleó aceite ligero con densidad  $0.8892 \text{ gr/cm}^3$  (22.79°API).



Figura 6.11. Camisa exterior del contenedor instrumentada con sensores de temperatura.

La prueba consistió en incrementar la temperatura del exterior utilizando un estabilizador de temperatura, con lo que se simula la temperatura del pozo cuando la herramienta está en el interior, se observa en la figura 6.12, que la temperatura del aceite dentro de la cámara también

incrementa, sin embargo existe una diferencia de temperaturas de aproximadamente 20°C, se deja de suministrar energía calorífica al sistema apagando el estabilizador, simulando que la herramienta va hacia arriba y que la muestra necesita mantenerse a la supuesta temperatura del yacimiento, en este caso fue de 72.94°C, se inicia con una potencia de 51.9 W, la temperatura baja, el sistema comienza a regular la temperatura enviando mas energía subiendo ésta a 103.8W, se observa en la gráfica que el sistema responde al incremento de energía del calentador, las variaciones que se pueden observar corresponden a pruebas de comportamiento de la temperatura de la muestra a variaciones de energía suministrada. Analizando la gráfica se observa que la distribución de temperaturas de la cámara de almacenamiento no es uniforme existiendo una diferencia de aproximadamente de 8 a 9 °C de un extremo a otro, también se aprecia la diferencia de temperaturas entre el medio ambiente y la temperatura de la muestra, en este caso es de 40°C, lo que nos indica que los aislantes térmicos están dando buenos resultados.

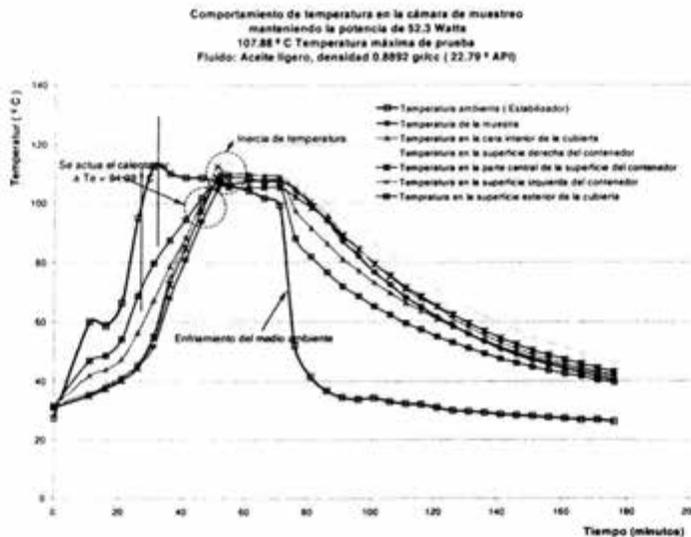
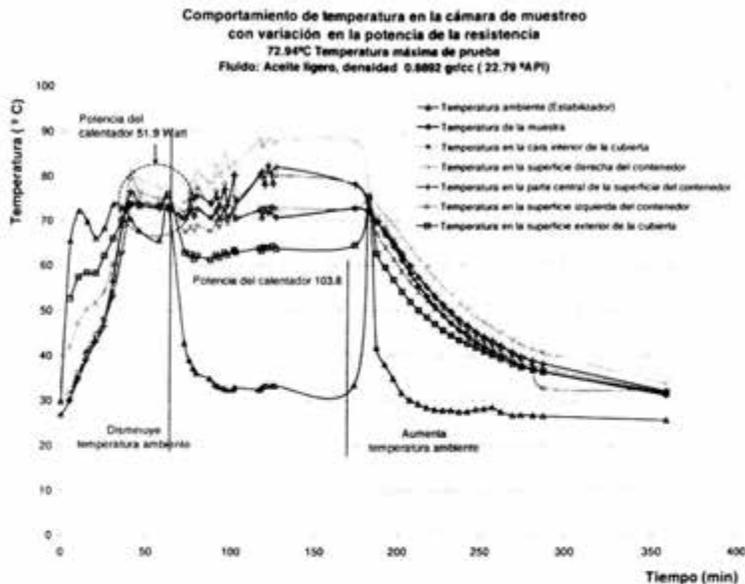
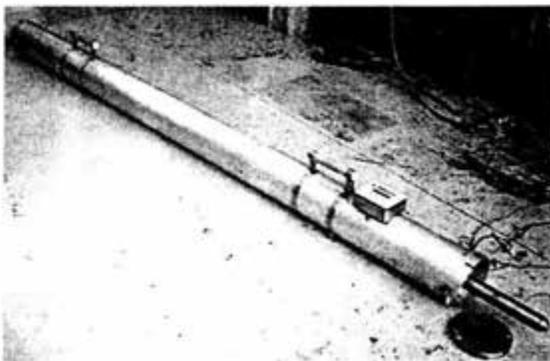


Figura 6.12. Comportamiento de temperaturas en función del incremento de energía en el calentador.

Otra prueba se llevó a cabo con las mismas condiciones, ahora incrementando la temperatura del estabilizador a 107.88 °C, la figura 6.13 muestra los resultados.



Se observa el trabajo del aislamiento mediante la diferencia de la temperatura entre la muestra y el exterior, también se observa la inercia de la temperatura, que es de aproximadamente 2°C en dos minutos, esto es el retardo que sufre la muestra a cambios de energía, de igual forma se observa la variación de temperatura en el contenedor, que seguramente se refleja en variaciones de temperatura en el interior de la cámara. Este problema se solucionó redistribuyendo el calentador sobre la superficie del contenedor, cargando mas energía hacia los extremos para que



**Figura 6.14. Estabilizador de temperatura..**

por efectos de la conducción del material de la camisa se distribuya la temperatura. La figura 6.14 muestra el estabilizador de temperatura, con el que se simularon las condiciones del medio ambiente.

#### 6.4. Prueba general de funcionamiento en laboratorio

Estas pruebas consistieron en probar las piezas prototipo a nivel de laboratorio, principalmente el sistema que contiene la muestra y su control. Para hacer posible la prueba fue muy importante el contar con un sistema de control electrónico que se desarrolló en forma paralela al presente trabajo por otro grupo de trabajo especializado en electrónica de control y programación. Una visión general de la parte electrónica y su desarrollo se presentó en los incisos 5.8 y 5.9. Al igual que la parte mecánica el diseño se basó en el cumplimiento de requerimientos, sin embargo las limitaciones económicas afectaron ambas partes. La parte electrónica y la parte mecánica, objeto de este trabajo estuvieron relacionadas una con la otra, al grado de modificar una y otra parte debido a cambios en el diseño, un ejemplo es el montaje de las tablillas, en una parte del diseño se pensó que estuvieran pegadas en forma de emparedado, con el objeto de recortar las camisas, que para la fase de fabricación resultaba conveniente. Este diseño presentó problemas debido, por una parte al arreglo para fijarla que consistió en dos varillas con travesaños para fijar las tablillas con tornillos, y por otra parte la necesidad de atravesar cables de alimentación del calentador que requieren ser de calibre más grueso, impedía la fijación de las tablillas con las dimensiones requeridas, además de que el soporte de las varillas hacía que se pandearan las tablillas rompiendo las pistas, recordando que deben de introducirse dentro de una camisa de 31.8 mm (1.252") de diámetro interior, como se puede ver en el plano general SMH-01. La figura 6.15, presenta el diseño.

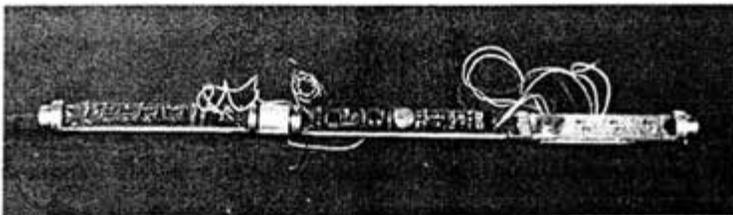
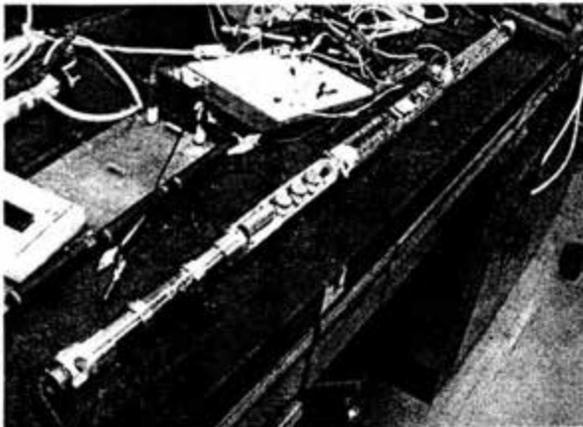


Figura 6.15. Diseño del arreglo para soporte de las tablillas electrónicas sobre varillas de acero

En la figura se aprecia que no se había contemplado el espacio para la resistencia de carga que se mencionó anteriormente, tanto el diseño mecánico como el electrónico cambiaron dando lugar a un diseño más reforzado, utilizando una media caña fabricada de un tubo de acero inoxidable 304 que proporcionó mayor libertad para colocar las tarjetas, aunque la longitud cambió, el problema quedó para el área de manufactura en fabricar la camisa, recordando también que se acopló el detector de coples, la camisa deberá tener una longitud de 1313 mm (51.725") como

lo muestra el dibujo número SM-40.

Al integrar esta parte importante junto con un programa de control también mencionado de forma general en incisos anteriores se procedió a ensamblar las partes para realizar una serie de pruebas con la mira de cumplir con uno de los objetivos del proyecto que es el de preservar una muestra a condiciones controladas de presión y temperatura. Cabe señalar que aunque la herramienta mecánicamente está integrada por varias piezas, no fue posible ensamblar todas y realizar una prueba en forma, la herramienta en total mide 3.98 m, se requiere de un equipo especial con dimensiones semejantes, lo que se hizo fue probar por secciones como se ha estado reportando en párrafos anteriores. Las pruebas de integración consistieron en conectar el sistema electrónico con el sistema que contiene la muestra y el calentador, la muestra que se manejo fue de aceite de silicon y se introdujo al contenedor de forma manual y se colocó dentro del estabilizador para simular la temperatura del pozo, a una temperatura dada se desconectó el estabilizador para comenzar a controlar la temperatura utilizando el sistema electrónico, es importante mencionar que el equipo que se ha estado nombrando como estabilizador y que se puede apreciar en la figura 6.14, es un dispositivo que tiene un sistema de calentamiento aislado térmicamente y un control electrónico con el que se fija y regula la temperatura a un valor dado, puede controlar la temperatura con buena estabilidad hasta 175°C.



**Figura 6.16. Sistema de control electrónico de la herramienta de muestreo**

La figura 6.16 muestra el sistema electrónico de la herramienta en su diseño final, la figura 6.17 muestra el equipo antes de realizar la prueba, la figura 6.18 muestra el inicio de una de las pruebas, donde se aprecia la herramienta en el interior del estabilizador, la electrónica está conectada a lo que es el equipo de superficie (computadora) que tiene el programa para recepción de datos, la herramienta se alimentó con 650V y 0.9 A a través de un simulador de cable de 4000 m, se probó la comunicación y sin ningún problema se recibieron los datos de los sensores que monitorean las condiciones de la muestra, los sensores del yacimiento se encontraron a la intemperie por lo tanto median la presión y temperatura del medio ambiente. La figura 6.19 muestra la pantalla del sistema de adquisición de datos con datos de la prueba. La gráfica de la figura 6.20 muestra los resultados, se aprecia la estabilidad y control de la temperatura así como sus efectos en la presión. Aunque es una prueba a baja temperatura se pudo comprobar el funcionamiento de los sistemas.

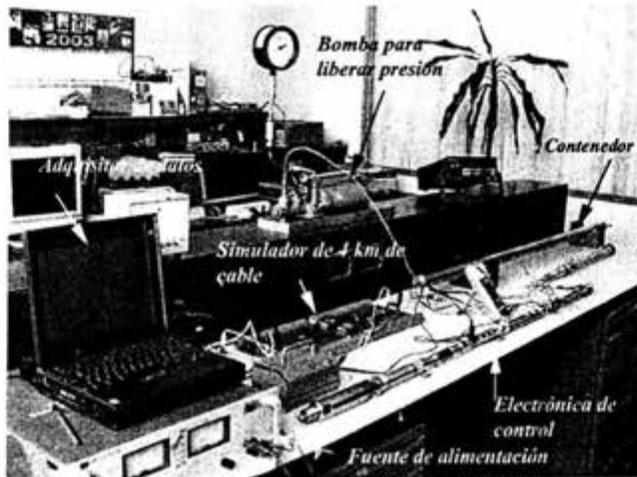


Figura 6.17. Equipo de pruebas.



Figura 6.18. Inicio de prueba de integración del equipo y su funcionamiento.

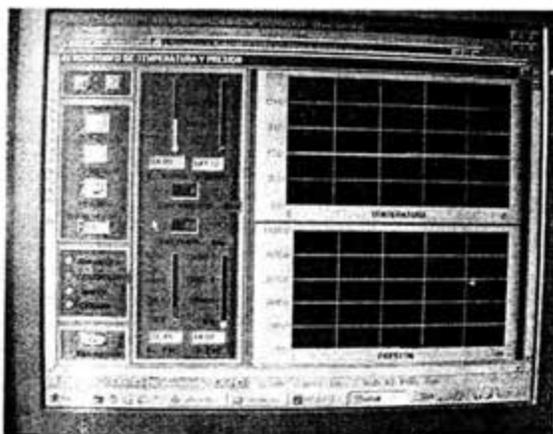


Figura 6.19. Pantalla del sistema de adquisición de datos.

La figura 6.20a, muestra una de las primeras pruebas que se realizaron para verificar el funcionamiento de cada elemento. Se puede apreciar la sensibilidad del sensor de presión que obedece a cambios de temperatura, se aprecia también en ésta gráfica la filtración de ruido en el circuito que controla la información del sensor de temperatura que provoca un descontrol en la medición que puede ocasionar que el sistema de calentamiento aumente la energía para compensar la temperatura y modificar las condiciones de presión.

Se utilizó una muestra de aceite de silicon atrapada dentro del contenedor, la máxima temperatura registrada fue de 142 grados centígrados, que elevó la presión fuera del rango del sensor, la pendiente de la recta de la presión hace notar que se abrió la válvula para liberar la sobre presión, en esta gráfica se nota claramente el comportamiento de la presión por efectos de la temperatura.

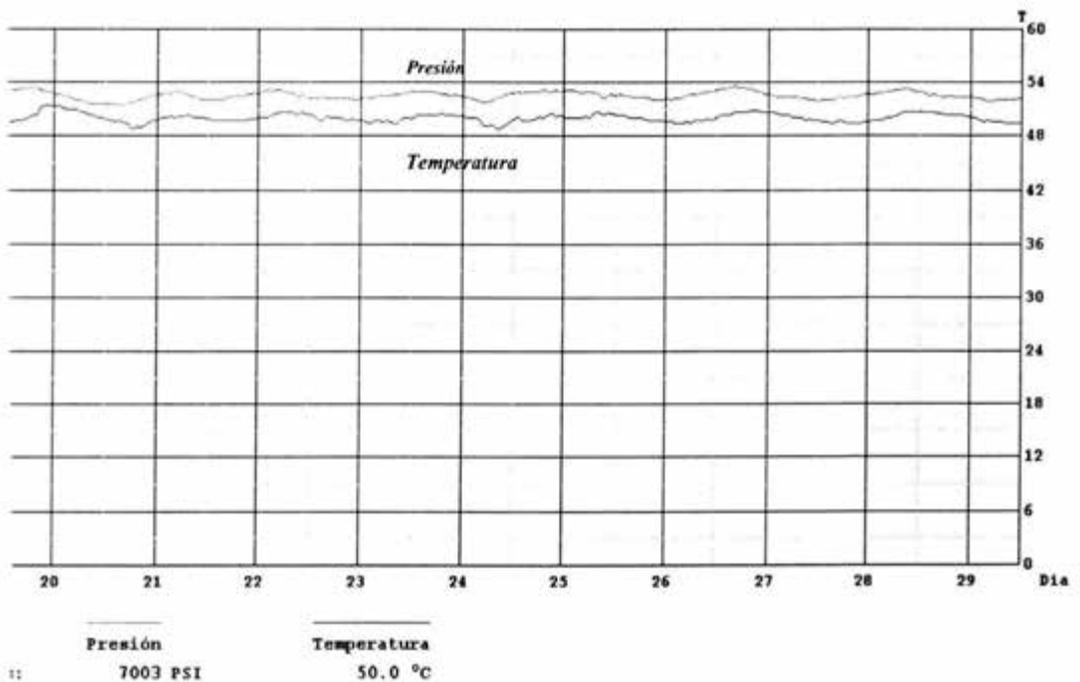


Figura 6.20. Resultados del control de temperatura y presión de la herramienta de muestreo .

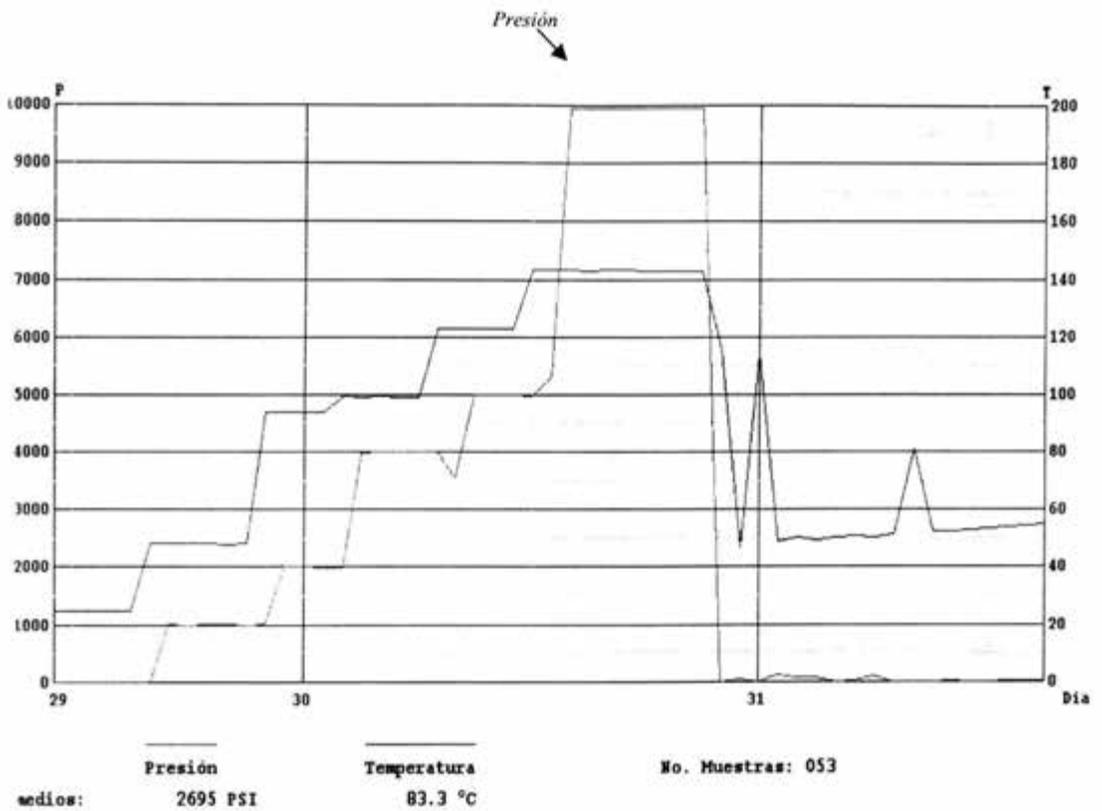
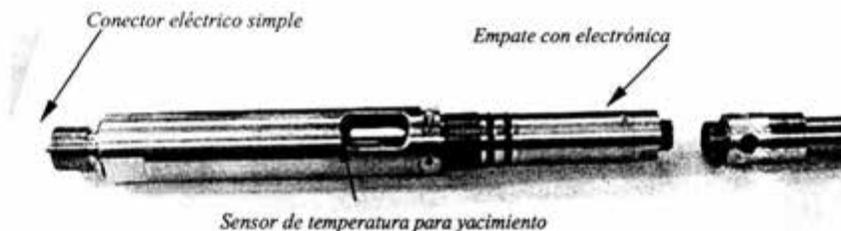


Figura 6.20a. Variación de presión por efectos de temperatura

## 6.5. Evaluación de resultados

Los resultados obtenidos en cada prueba han demostrado que el diseño de la herramienta a nivel laboratorio funciona, la gráfica presentada en la figuras 6.20, es un ejemplo del control de la temperatura que se logra, el sistema controla  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  la temperatura de un volumen de 300cc de muestra dentro del contenedor, simulando que se transmite a 4 km, el sistema electrónico como ya se ha mencionado fue diseñado por el área indicada, el sistema de calentamiento también funciona bien, retardando la pérdida de temperatura. Los sensores de yacimiento que se encuentran montados en la pieza denominada, portasensores, en su momento fue probada para evitar la penetración del aceite al interior de la herramienta, ya que el montaje de los sensores permite que estén en contacto con las condiciones del yacimiento. La figura 6.21 muestra la parte indicada, se aprecia en un extremo, el conector eléctrico con el que se empata con la parte electrónica, y por el lado contrario se puede ver el conector eléctrico simple con el que se conecta la herramienta con la cabeza MH-22, que convierte a la herramienta en un sistema monoconductor.



**Figura 6.21. Portasensores de yacimiento.**

Aunque esta prueba se realizó con aceite de silicon de 100Sc de viscosidad, puede repetirse con un volumen de hidrocarburo, sin mayor problema. La simulación del sistema en fase de admisión no se ha podido realizar, aunque se cuenta con el simulador de pozo que se mostró en la figura 6.9, hace falta conectar un sistema de presurización continua, para simular que la presión del yacimiento se mantiene una vez que la válvula se ha abierto y que la muestra está en el interior del contenedor, sin este sistema el simulador se puede presurizar utilizando la bomba manual y al abrir la válvula la presión caería, por la disminución en el volumen de fluido en el interior del simulador. Aquí solo se podrían hacer pruebas de apertura y cierre de la válvula, lo que se ha probado en varias ocasiones sin utilizar el simulador de pozo.

# ***Capítulo VII***

## ***Conclusiones***

## Conclusiones

A través del desarrollo de éste trabajo fue posible proporcionar una solución diferente al problema de la toma de muestras, donde la preservación de las condiciones originales del yacimiento es de vital importancia en el análisis de las muestras, enfocado al estudio los fenómenos de depositación de compuestos orgánicos, ofreciendo al mismo tiempo un diseño con una visión original y presentando innovaciones en los procedimientos para toma y conservación de las muestras, con lo que se cumple uno de los objetivos planteados en el comienzo de este trabajo.

En el desarrollo de éste trabajo se comprobó que el método Taguchi proporciona los elementos necesarios para la mejora y optimización de un producto, pudiendo comprobar la hipótesis que se planteo en el inciso 2.3, desarrollando partes y sistemas que integran finalmente el diseño de una herramienta para muestreo de hidrocarburos.

La válvula de admisión, el sistema de calentamiento y el sistema de amortiguamiento, fueron tomado como casos de aplicación de la metodología. En el análisis de la válvula se realizaron experimentos apegados a una distribución ortogonal tipo L4; se empleó una distribución interna que contenía aquellos factores que son controlados por el diseñador, conocidos como factores de control y una distribución externa que introduce al experimento la combinación de factores de ruido que no pueden ser controlados y que dependen del medio ambiente de operación de la válvula. La relación de señal de ruido (signal to noise ratio) de tipo STB (smaller the better) estática, fue utilizada para obtener un parámetro de medida de la robustez, recordando que ésta refleja la variabilidad en la respuesta de un sistema causado por los factores de ruido. El análisis estadístico de los datos a través del análisis de la varianza llevaron a concluir que ciertos parámetros de control como el diámetro de orificio de entrada y la manera de cerrar la válvula, tienen influencia directa en el óptimo funcionamiento del sistema de admisión de la herramienta de muestreo de hidrocarburos, los cuales definieron el diseño final de la válvula.

El sistema de calentamiento fue analizado de la misma forma, empleando una distribución ortogonal L18, donde se combinaron diferentes factores de control con tres niveles diferentes. La temperatura y el tipo de fluido considerados como factores de ruido fueron integrados dentro de la tabla de experimentos con el objeto de cuantificar su influencia en el funcionamiento del sistema para hacerlo robusto, es decir insensible a la influencia de éstos y otros factores de ruido. De igual forma se utilizó una relación de señal de ruido de tipo estática, STB para medir la robustez y un análisis de la varianza para identificar aquellos factores que maximizan la relación S/N.

Estos resultados proporcionaron información importante para definir el diseño mejorado del sistema así como los materiales de fabricación que toman un papel muy importante en el sistema si consideramos el valor del coeficiente de conductividad térmica. El plano SMH-01 muestra el diseño final del sistema, integrado por una camisa exterior de titanio, un calentador eléctrico con una resistencia de 120 ohm, un contenedor para un volumen de muestra de 300cc, fabricado en acero tipo 17-4Ph. Aunque el análisis concluyó que el vacío proporcionaba un margen aceptable de aislamiento térmico, se utilizó una fibra cerámica debido a que la obtención del vacío al nivel requerido dentro del espacio anular de la herramienta, demandaba el diseño de elementos que hacían al sistema más complejo, complicando la manufactura y el mantenimiento del sistema.

El sistema de amortiguación empleado para regular la velocidad de admisión de la muestra de hidrocarburos, fue analizado de forma teórica debido a que el planteamiento del método Taguchi, exigía la medición de las condiciones de flujo dentro del sistema, requiriendo la adquisición de un medidor de flujo y una bomba de presión de inyección continua. Uno de los postulados de la aplicación del método Taguchi especifica que el diseño de experimentos debe realizarse a un costo bajo, sin embargo en éste caso el costo para realizar los experimentos se incrementaría por la adquisición del equipo, provocando una de las limitaciones en la aplicación del método Taguchi. Ranjit K. Roy en su libro "*A prime on the Taguchi method*" explica que bajo este tipo de limitaciones es mejor utilizar otro tipo de técnicas. El problema fue resuelto analizando el sistema de forma teórica, donde se obtuvieron las velocidades del fluido al ingresar a la cámara de almacenamiento. La ecuación de Hagen-Poiseuille proporcionó el comportamiento del gasto en el interior de la tubería de producción y el desarrollo de la ecuación de la energía proporcionó el comportamiento en velocidad del fluido dentro del sistema de amortiguamiento.

El diseño de éstos sistemas junto con la adaptación de sistemas complementarios como la electrónica de control, el sistema de referencia de profundidad, hicieron posible la realización de pruebas de laboratorio y proporcionar la factibilidad de contar con un sistema de muestreo de hidrocarburos que preserva las condiciones del yacimiento. Este trabajo proporciona en sus capítulos V y apéndice D, la información necesaria para la construcción e integración de una herramienta de fondo. Con lo que se cumple con uno de los objetivos planteados en la etapa inicial.

El capítulo VI, proporciona resultados con los que se comprueba el funcionamiento robusto de los sistemas más importantes de la herramienta de muestreo. El inciso 6.5. muestra la integración del sistema, en donde se utilizaron elementos de prueba, en un experimento final se comprobó que

es posible obtener muestras de hidrocarburo y mantenerla a las condiciones de yacimiento, con el objeto de que puedan ser analizadas más tarde en el laboratorio, con el fin de estudiar, en principio, fenómenos relacionados a la depositación de compuestos orgánicos en tuberías de producción. La gráfica de la figura 6.23, muestra el control de temperatura y presión dentro de la cámara de almacenamiento, demostrando que la herramienta controla la temperatura de forma automática y que los resultados obtenidos por la aplicación del método Taguchi, integrados aquí, proporcionan un sistema robusto.

En éste trabajo se proporcionan las bases para poder fabricar el equipo de muestreo mecánicamente. Para su integración total es necesario sumar la parte electrónica, tarjetas de circuito impreso, los equipos de superficie mencionados al inicio del trabajo, además del soft ware de operación y control de la herramienta, ofreciendo la ventaja de poder tener información en tiempo real de las condiciones del pozo en el momento en que se toma la muestra, eliminando también la realización de un registro previo al muestreo cuyo costo es alto (de varios miles de pesos).

Con los resultados obtenidos y reportados en el capítulo VI, se cumplen los objetivos y alcances propuestos en el capítulo II, sin embargo para que ésta herramienta pueda operar al 100% se requiere un presupuesto para su puesta en operación en campo, además de afinar algunos detalles. A continuación se proporcionan algunas recomendaciones referentes a la operación y validación de la herramienta.

Finalmente a través de la aceptación para publicación del trabajo "*Redesign Improvement of a Hydrocarbon Sampling Tool Using Robust Design*", en *Journal of Engineering Design*, se da constancia de que el método de diseño robusto puede ser aplicado en problemas asociados al desarrollo de tecnología para la industria petrolera.

## Recomendaciones y Trabajo a futuro

Un aspecto que debe tomarse en cuenta para continuar con éste proyecto es sin duda la planeación detallada de las relaciones entre áreas de desarrollo involucradas. En éste tipo de proyectos donde intervienen electrónicos, físicos, programadores y petroleros, es necesario que cada área fije sus requerimientos de diseño y su relación con otras áreas, esto beneficiaría el desarrollo del proyecto y ayudaría a llegar a los objetivos con más rapidez. El establecimiento de las metas para cada uno tomando en cuenta las necesidades del otro, puede ser una buena forma de trabajar con la mira de cumplir las metas. A continuación se plantean algunos detalles que deberán ser tomados en cuenta para complementar éste proyecto:

- Es importante contar con los recursos necesarios para lograr la experimentación, que incluyan los equipos e instalaciones adecuadas. El costo de desarrollo de éste tipo de proyectos es realmente alto, dado que las condiciones de prueba y operación son extremadamente fuera de las condiciones ambientales, lo que incrementa el costo de investigación.
- Técnicamente la herramienta es capaz de obtener una muestra de 300 cm<sup>3</sup> a las condiciones establecidas; una muestra de mayor volumen requeriría de un nuevo diseño, ya que en ésta herramienta se utiliza de forma óptima la energía necesaria para controlar la temperatura de una muestra de éste volumen, que dependen de la características técnicas del cable monoconductor.
- Aunque la mayoría de elementos fueron probados a nivel de laboratorio, es necesario fabricar una herramienta para realizar pruebas en campo y validar la tecnología.
- Para validar el proceso de toma de muestra y la preservación del estado original de la muestra hasta su transferencia a un laboratorio, es necesario realizar estudios a éstas muestras y verificar si los cambios de presión y temperatura realmente afectan en el comportamiento de las parafinas y asfáltenos, y comparar los resultados con estudios de muestras tomadas del mismo pozo sin preservar la temperatura, para verificar que en realidad el control de la temperatura en las muestras es necesario.
- Como se sabe, éste diseño no es único, el diseño en ingeniería ofrece diversas alternativas con las que se puede resolver el problema de la toma de muestras. En una evolución del diseño, se piensa en eliminar la dependencia de los reguladores de voltaje en el módulo de electrónica utilizando una batería dentro de la herramienta, que pueda alimentar a los circuitos de control electrónico, de tal forma que la energía que llega desde superficie sea utilizada óptimamente por el sistema de calentamiento, con lo que se podría aumentar quizás el volumen de muestra de la herramienta.

- El sistema de referencia de profundidad podría rediseñarse utilizando el método Taguchi, con objeto de obtener diseño optimizado, además de incluir en el programa de control una gráfica de la señal enviada desde el fondo cuando el dispositivo encuentre una unión entre tuberías. Actualmente solo se tiene un contador.
- En la fase de transferencia de la muestra es necesario que el equipo utilizado tenga un control de temperatura similar al de la herramienta, con el objeto de mantener la originalidad de las condiciones de la muestra.
- Esta herramienta puede ser tomada como referencia e incluso tomar el diseño de algunos elementos para construir una herramienta de muestreo que no requiera control de temperatura, lo que facilita su operación. Con la modificación de algunos conectores, la eliminación de la camisa del contenedor, así como la válvula de admisión proporcionarían un diseño de una herramienta con capacidad de obtener muestras con un volumen mayor, para realizar análisis de caracterización de fluidos de yacimiento, donde no es necesario el control de la temperatura.

Con una visión a corto plazo ésta herramienta junto con el equipo de superficie, puede ser ofrecida a Pemex, como un servicio de toma de muestras y su análisis, contando con el apoyo del Laboratorio de Termodinámica de Fluidos del Instituto Mexicano del Petróleo, servicio que actualmente es ofrecido por compañías extranjeras a un costo muy elevado.

## Referencias Bibliográficas

- API, 1966, "Recommended Practice for Sampling Petroleum Reservoir Fluids", American Petroleum Institute, New York
- Aguayo González Francisco, Soltero Sánchez Víctor M., 2000, "metodología del Diseño Industrial: Un Enfoque desde la Ingeniería Concurrente", Ed. Alfaomega, México, D.F.
- A.H. Akram, A.V.Fitzpatrick, F.R.Halford, 1998, "A Model to Predict Wireline Formation Tester Sample Contamination", SPE 48959.
- Alex Dufrene, 1977, "Collar Locating Apparatus", Patent USA4044470, Aug.
- Alexandra Van D. Et al, 2000, "Determination of Hydrocarbon Properties by Optical Analysis During Wireline Fluid Sampling", SPE 63252
- A.R. Solaimany Nazar, B. Davir, M.R. Islam, 2001, "Measurement and Modeling of Wax Deposition in Crude Oil Pipelines", SPE 69425, March 2001.
- B.C. Craft, M. F. Hawkins, 1977, "Ingeniería Aplicada de Yacimientos Petrolíferos", Técno Madrid, 1ª. Edición.
- B.H. Sage, B.I. Hicks, W.N. Lacey, 1940, "Phase Equilibrium in Hydrocarbon Systems", California Institute of Technology, Pasadena Cal. P. 1085-1092
- Bern, P.A., Winthers, V.R. and Cairns, J.R., 1980, "Wax Deposition in Crude Oil Pipelines", Presented at European Offshore Petroleum Conference and Exhibition, London, October 21-24 Banff, Albert
- Bjorn D. Hans P, 2001, "A Systematic Approach to Sampling During Well Testing", SPE 69427.
- Burger, E.D., Perkins, T.K. and Striegler, J.H., "Studies of Wax Deposition in the Trans Alaska Pipeline", JPT 1075, June
- C. Avila, A. Russo, E. Flores, O. Hidalgo, 2001, "A Field Methodology to Estimate the Zone of Maximum Probability of Asphaltene Precipitation Occurrence", SPE 69531, March
- Chavez-Alcaraz, J.L. y Lory-Mendoza, A., 1991, "Estudio Sobre la Deposición del Material Orgánico en Instalaciones de Producción del Area Marina de Campeche". Revista del Instituto Mexicano del Petróleo, XXIII, Enero-Marzo.
- C.U. Witt, A.P. Crombie, S. Vaziri, 1999, "A comparison of Wire line and Drills tern Test Fluid Samples from a Deepwater Gas-Condensate Exploration Well", SPE 56714
- Cooney, D. O.,Shin-Seung Kim and Davis, J., 1974, "Analysis of Mass Transfer in Homogenous Dialysis", Chem. Eng. Sci. V.29, p. 1735
- Cosultchi, M.A., Leon, C., Perez-Ortiz, J.A., Muñoz-Herrera, A. and C. Lira-Galeana 1997, "Characterizing Organic Deposits from Mexican Oil Fluids", presented at the 2<sup>nd</sup> SPE-ISCOPE Congress, Rio de Janeiro, Brazil, Sept.

- Czernichow Jean, Schlumberger Technology B.V, 1983, "Sampler for Obtain a Sample Representative of the Fluid in a Well and Corresponding Method", Pat. 572616, Australia.
- Down Corning Materials for High Technology Applications, 1986, December
- Durr, O. Wachter, Blume, 1975, "Hidráulica Aplicada a las Maquinas Herramientas", Barcelona
- Escobedo J., Mansoori G.A., 1992, "Heavy Organic Deposition and Plugging of wells Analysis of Mexico's Experience", SPE23696 p. 349.
- Escobedo J., Mansoori G.A., 1995, "Asphaltene Particle Deposition During Transfer and Production Operations", SPE30672, October 22-25
- E. Ramírez Jaramillo, 2001, "Modelación Matemática de la Deposición de Orgánicos Pesados en Tuberías de Producción y Transporte de Hidrocarburos", Tesis Doctoral, UNAM, México, Noviembre
- Ferworn, K.A., Hammami, M. y Rawluk, M. 1997, "Modeling Asphaltene Precipitation with Comprehensive Crude Oil Characterization and Vapor-Liquid-Solid Phase Behavior Data" Paper 14 presented at ISCO'97, Rio de Janeiro, Brazil, Ago 31- Sep 3.
- Fink, Ross L., 1993, "Quality Improvement Technology Using the Taguchi Method", CPA Journal, 14903851, Dec.
- Firoozabadi A. 1999, "Thermodynamics of Hydrocarbons Reservoirs" Ed. McGraw-Hill, New York, Cap. 5
- García Hernández, F. 1989, "Estudio sobre el Control de la Deposición Orgánica en pozos del Area Cretácica Chiapas-Tabasco (un método correctivo)", Ing. Petrolera, Julio p. 39
- Gary D., Zunkel, Chickasha, 1989, "Delayed Opening Fluid Sampler", Patent US4903765, Halliburton Company, Feb.
- Gary K. Baird, 1989, "Three Magnet Casing Collar Locator", Patent USA4808925, Halliburton Company, Feb.
- Genichi Taguchi, Subir Chowdhury, Shin Taguchi, 1999, "Robust Engineering", Ed. McGraw Hill, New York
- Gere-Timoshenko, 1984, "Mecánica de Materiales", Grupo Editorial Iberoamericana
- Glen Peterson, Delaware Corporation, 1961, "Casing Joint Locator", Patent USA2967994, Jan.
- Goldman, M.S. and C.C. Nathan, 1957, "Prevention of Paraffin Deposition and Plugging", U.S. Patent No. 2 817 635, Dec 24.
- Hammami, M., Ferworn, K.A., and Nighswander, J. 1995, "Review of Experimental Techniques for the Measurement of Petroleum Solid Deposition", Presented at the ISCO'95, Nov 26-29, Rio de Janeiro, Brazil.

Hansen, A.B., Larsen, E., Pedersen, W.B., Nielsen, A.B. and H.P. Ronningsen, 1991, "Wax Precipitation from North Sea Crude Oils 3 Precipitation and Dissolution of Wax Studied by Differential Scanning Calorimetry", *Energy & Fuels*, vol. 5, p 914

Halliburton Company, 1987, "Well Fluid sampling Apparatus", Int. Pat. E21B 049/08

Harold L. Becker Jr., 2000, Unichem A Division of BJ Services Company, "Asphaltenes: to Treat or Not", SPE 59703, Texas, March

Heber C. Fagan, Schlumberger Well Surveying Corporation, 1951, "Casing Collar Locator", Patent. US2558427, June.

H., Rufino Rayón Casiano, Antonio Valderrabano, 1984, "Evaluación de la producción", UNAM, Facultad de Ingeniería, Departamento de Explotación del Petróleo, Méx.

Huanquan Pan, A. Feroozabadi, 1998, "Thermodynamic Micellization Model for Asphaltene Aggregation and Precipitation in Petroleum Fluids", SPE 36741

Hunt, E. B. 1962 "Laboratory Study of Parafin Deposition", *J. Petr. Tech.*, November, pp.1259-1269.

<http://www.udc.es/dep/mate/estadistica2/cap2.html>

<http://www.gtweed.com/oilfield/oilOTU2002Marchsealfriiction.htm>

[http://www.marcorubber.com/kalrez\\_design\\_guide.htm](http://www.marcorubber.com/kalrez_design_guide.htm)

[http://www.pemex.com/files/dcpe/anuario\\_es2002\\_cap2.pdf](http://www.pemex.com/files/dcpe/anuario_es2002_cap2.pdf)

<http://voodooengineering.home.comcast.nt/AxiomaticDesignandInventor.htm>

Holder, G.A. and Winkler, J., 1965, "Wax Crystallization from Distillate Fuels", Part. 1, *Inst. Of Petr.*, vol. 51, p. 499, July.

Hefin Rowlands, Fuju Antony, Graeme Knowles, 2000, "An Application of Experimental design for Process Optimization", *The TQM Magazine*, Vol. 12, No. 2, MCB University Press, pp 78-83

Henk Kool, Mehdi Azari, M.Y. Soliman, Mark A. Proett, SPE, Halliburton Energy Services, Inc., 2001, "Testing of Gas Condensate Reservoirs - Sampling, Test Design and Analysis ", SPE68668, Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition held in Jakarta, Indonesia, 17-19 April

Henrique Sestren Marcelo, M. Fiod Neto, 2001, "The Application of Process Management for Reliability Enhancement of the Taguchi Method", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, Vol. 23 No. 2, Rio de Janeiro, Bra.

Huanquan P., Feroozabadi A., Fotland P., Hydro N., 1996, "Pressure and Composition Effect on Wax Precipitation: Experimental and Model", SPE36740.

Informe interno de actividades STDP-PEP (Subdirección de Tecnología y Desarrollo Profesional, PEMEX Exploración y Producción). 1999

James G. Wilson, 1986, "Method of Plasing Magnetic Markers on Collarless Cased Wellbores", Patent USA4572293, Feb.

Jersey Production Research Company, 1960, "Fluid Sampler", Pat. 846 586

Jhy-Ping et al., 2001, "Apliaction of the Taguchi Method to Improve the Process Yield Rate For Air Cleaners in Toyota Corona Vehicles", International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, Vol. 8, No. 3 (2001) 219-231, World Scientific Publishing Company

Joseph A. Zierolf, Marathon Oil Company, 2001, "Method and Apparatus for Determining Position in a Pipe", Patent USA6333699, Dec.

J. Cruz-Hernández, R. M. Amador-Hernández, C. Pérez-Rosales, H. S. Salgado-Castro, A. Pineda-Muñoz, 1999, " Deposition of Organic and Inorganic Material on the Production facilities, Ek Balam Field , Mexico", Third International Symposium on Colloid Chemistry in Oil Production, Asphaltenes & Wax Deposition, IS COP'99, México

Jou B., Christensen, Duncan, 1987, " Well Fluid Sampling Apparatus", Patent US4787447, Halliburton Company, Nov.

Kai Yang, Hongwei Zhang, 2000, "Compatibility Analysis and Case Studies of Axiomatic Design and Triz", Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Wayne State University, Detroit, MI 48202, USA

Katz, D.L. and K.E. Bew, 1945, "Nature of Asphaltic Substances", I&EC, v. 37, No. 2, p. 195.

Kawanaka, S., S.J. Park, Mansoori, G.A. 1987, "Organic Deposition From Reservoir Fluids: A Thermodynamic Predictive Technique", SPE Reservoir eng., May, p.185.

Kemthorne, O. 1979, "The design and Analysis of Experiments", New York: Robert E. Krieger Publishing Co.

Kevin N. Otto, Erik K. Antonosson, 1991, "Extensions to the Taguchi Method of Product Design", Engineering design Laboratory, ASME Journal of Mechanical Design, January 6

Langseth B. Jom, et al, 2000, "Method and Apparatus for Continuosly Testing a Well", Pat. WO0065199.

Laura R, 1999, "The Farbequé Commercial for experimental design: Design of experiments and the Taguchi Method", Alkali Biosystems PCR Review - October

Leontaritis, K.J., and G.A. Mansoori, 1987, "Asphaltene Flocculation During Oil Production and Processing: A Thermodynamic-Colloidal Model", SPE 16258.Prs. at SPE International Symposium, San Antonio, Tx, Feb 4-6.

Leontaritis K.J. 1996, "The Asphaltene and Wax Deposition Envelopes", Fuel Science and Tech. v. 14, No. 1 & 2, p. 13.

Lichaa, P.M. and L. Herrera, 1975, "Electrical and Other Effects Related to the Formation and Prevention of Asphaltene Deposition", SPE paper 5304 Pres. at SPE Intl. Symp. on Oilfield Chemistry, Dallas, Tx, Jan 16-17.

Lijian Dong, Huizhuan Xie, Fusheng Zhang, Oilfield Chemistry Department of RIPED, CNPC, 2001, "Chemical Control Techniques for the Paraffin and Asphaltene Deposition", SPE65380, International Symposium on Oilfield Chemistry held in Houston, Texas, February 13-16. Beijing, China

Lindeloff, N. 1999 "Formation of Solid Phases in Hydrocarbon Mixtures", PhD. Thesis, Department of Chemical Engineering, Technical University of Denmark, Denmark, chapter II, 4-6.

Lira-Galeana, C., Firoozabadi, A. and J.M. Prausnitz 1996, "Thermodynamics of Wax Precipitation in Petroleum Mixtures", *AIChE Journal*, Vol. 42, No. 1, 239-248.

Lira-Galeana, C., Ramírez-Jaramillo, E., Buenrostro-Gonzalez, E., Mendoza-de la Cruz, J.L., Aquino-Olivo, M.A. 1997. Reporte interno proyecto IMP: "Análisis del Comportamiento de la Deposición Orgánica de una Muestra de Fondo del Pozo KANAAB-101, PEP-Región Marina Suroeste".

Lira-Galeana, C. and A. Hammami, 1998a, "Wax Precipitation from Petroleum Fluids. A Review", in: *Asphaltenes and Asphalts II*, T.F. Yen and G. Chilingarian (Eds.), Chapter II., Elsevier Science Publishers, Holland (in press). *Chapter co-Author*.

Lira-Galeana, C., Strausz, O.P. and T.F. Yen, 1998b, "Asphaltenes and Asphalts III", Elsevier Science Publishers, Holland (in Review). *Book co-Editor*.

Lira-Galeana, C., Ramírez-Jaramillo, E., Buenrostro-Gonzalez, E., Mendoza-de la Cruz, J.L., Aquino-Olivo, M.A. 1998c, Reporte interno proyecto IMP: "Estudio Termodinámico de Mezclas Nitrogeno-Aceite para el Complejo Cantarel".

Lira-Galeana, C., Ramírez-Jaramillo, E., Buenrostro-Gonzalez, E., Mendoza-de la Cruz, J.L., Aquino-Olivo, M.A. 1998d. Reporte interno proyecto IMP: "Estudio de Precipitación de Asfaltenos en Pozos del Campo Artesa, Región Sur".

Lira-Galeana, C., Ramírez-Jaramillo, E., Buenrostro-Gonzalez, E., Mendoza-de la Cruz, J.L., Aquino-Olivo, M.A., Ríos-Reyes, A. 1998e. Reporte interno proyecto IMP: "Estudio del Comportamiento de Fases PVT y Miscibilidad Composicional en el Yacimiento Jujo-Tecominoacan".

Lira-Galeana, C., Ramírez-Jaramillo, E., Buenrostro-Gonzalez, E., Mendoza-de la Cruz, J.L., Aquino-Olivo, M.A., Ríos-Reyes, A. 1999a. Reporte interno proyecto IMP: "Comportamiento de Inhibidores de Deposición Orgánica en Aceites Crudos del Activo Bellota-Chinchorro a condiciones de Yacimiento".

Lira-Galeana, C., Ramírez-Jaramillo, E., Buenrostro-Gonzalez, E., Mendoza-de la Cruz, J.L., Aquino-Olivo, M.A., Ríos-Reyes, A. 1999b. Reporte interno proyecto CODICID: "Prueba de Inhibidores de Deposición Orgánica en Muestras de Aceites Vivas a Condiciones de Yacimiento".

Lira-Galeana, C., Ramírez-Jaramillo, E., Mendoza-de la Cruz, J.L., Ríos-Reyes, A. 2000. Reporte interno proyecto IMP: "Transferencia de Tecnología y Precipitación de Asfaltenos en Pozos Petroleros".

- Madhav S. Phadke, 1989, "Quality Engineering Using Robust Design", ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632I
- Madsen, H.E.L., and R. Boistelle. 1976 "Solubility of LongChain n-Parafins in Pentane and Heptane", J. Chem. Soc. Faraday Trans., vol. 72, p.1078
- Madsen, H.E.L., and R. Boistelle. 1979 "Solubility of Octacosane and Hexatriacontane in Different n-Alkane Solvents", J. Chem. Soc. Faraday Trans., vol. 75, p.1254
- Marion D. Kilgore, 1994, "Slick Line Casing and Tubing Locator Apparatus and Associated Method", Patent USA5361838, Nov.
- Mark A. Coker, Aurelio Mendoza, 2000, "Integrated Study Workflows for Field Development and Rehabilitation in the Burgos Basin", SPE74366
- Matthew Hu, Kai Yang, Shin Taguchi, 2000, "Enhancing Robust design with the Aid of TRIZ and Axiomatic Design", Part I, <http://www.triz-journal.com>
- Mieulet, P. and M. Peinado, 1965, "Prevention of Paraffin Deposition in the Champ De Chailly-EN-Bierre Field" Bull. 11804, French Pet. Inst., June.
- Merle C. Potter, David C.Wiggert, 1977, "Mecánica de Fluidos", Prentice Hall, México, Segunda Edic.
- M. E. Newberry, Baker Petrolite, 2000, "Organic Formation Damage Control and Remediation", SPE58723, Luisiana, Feb.
- Michaels J. Moody M, Shwe T., 1995, "Wireline Fluid Sampling", SPE 30610
- Mizuno S. And Y. Akao, 1994, "QFD: The Customer-Driven Approach to Quality Planning and development", Asian Productivity Organization, Tokyo, Japan.
- M.E. Newberry, K.M. Barker, Baker Petrolite, 2000, "Organic Formation Damage Control and Remediation", SPE58723, International Symposium on Formation Damage Control held in Lafayette, Louisiana, February
- M. Ghanei, M. Edalat and M.R. Islam, 2002, "Introduction to Reversibility of Asphaltenes Precipitation", EEC Innovation Magazine
- M. Guillon, 1988, "Hydraulic Servo Systems Analysis and Design", Butterworth, London.
- Montgomery Douglas C., 1991, "Diseño y Análisis de Experimentos", Grupo Editorial Iberoamérica, México, D.F.
- Nguyen Phung Tung, 2001, "Studying the Mechanism of Magnetic Field Influence on Paraffin Crude Oil Viscosity and Wax deposition Reduction", SPE68749, Indonesia, August
- Oivind Fevang, Curtis H., U. Trondhelm, 1994, "Accurate In situ Compositions in Petroleum Reservoirs", SPE 28829
- Pacheco-Sanchez, J.H. y Mansoori, G.A., 1997, "In Situ Remediation of Heavy Organic Deposits Using Aromatic Solvents." SPE 38966, presented at the Fifth Latin American and Caribbean

Petroleum Engineering Conference and Exhibition, in Rio de Janeiro, Brazil, 30 August-3 September.

Patrick L. Scholes, 1994, "Method for Wireline Operation Depth Control In Cased Wells", Patent USA5279366, Jan.

Parker O-Ring Handbook, 1991, Parker Production Information Center

Pisarenko, A.P. Yakovlev, V.V. Metvée, 1979, "Manual de Resistencia de Materiales", Ed. Mir

Phillip J. Ross, 1996, "Taguchi Techniques for Quality Engineering", McGraw Hill, USA

Plackett, R. L., and J. P. Burnan, 1980, "The Design of Multifactor Experiments", *Biometrika*, Vol. 33, 305-325

P. Gerhart, R. Gross, J Hochstein, 1995, "Fundamentos de Mecánica de Fluidos", Addison-Wesley Iberoamericana, México, Segunda Edición.

Prakash R. Apte, 1999, "Introduction to Triz: Innovative Problem Solving", Solid State Electronics Group, Tata Institute of Fundamental Research, Homi Bhabha Road, Colamba, Mumbai, <http://www.ee.iitb.ac.in/>

Ramos Watanave J, 2000, "Diseño Mecánico", Instituto Politécnico Nacional, Sección de Est. de Posgrado e Inv. Ing. Méc.

Ranjit K. Roy, 1990, "A prime on the Taguchi method", Society of Manufacture Engineers, January

Ranjit K. Roy, 2001, "Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement", John Wiley & Sons Inc., January

Reid, R.C., Prausnitz, J.M. and Sherwood, T.K., 1977, "The Properties of Gases & Liquids", McGraw Hill Book Comp.

Reyes-Reza, PG. and I.M. Méndez-López, 1999, "Kanaab-101 Well. A Downhole Application of Magnetic Fluid Conditioners (MFC'S) Offshore Mexico", IS COP'99, Nov 13-17, Huatulco Oax., México.

Ribeiro, F. S., Souza Mendez, P.R., Braga, S. L. 1997, "Obstruction of Pipelines Due to Paraffin Deposition During the Flow of Crude Oils". *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1-10.

R. Byron Bird, Warren E. Stewart, 1998, "Fenomenos de Transporte", Editorial Reverté, S.A., México, Quinta Edición.

Robert O. Wilson, Paul Lorenzino, Halliburton Company, 1969, "Electronic Borehole Casing Collar Locator", Patent USA3434046, March .

Rojas S. Raúl, 1990, "El proceso de la Investigación Científica", Ed. Trillas, Méx.

Roger L. Schlutz, Richardson, William L. Bohan, 1993, "Downhole Fluid Property measurement Tool", Patent US5329811, Halliburton Company, Jul.

- Roger L., Schlutz, Stillwafer, 2000, "Non Flashing Downhole Fluid Sampler and Method", Patent US6065355, Halliburton Company, May.
- Sangwoo Bae, Jang Moo Lee, Won Jun Choi, Jung Rak Yun, Tae Oh tak, 2003, "Axiomatic Approach to the Kinematic Design of an Automotive Suspension System with the McPherson Strut Type", Int. J. Of Vehicle design, Vol 31, No.1
- Sapescio Measurement Services, <http://www.sapescio.com>
- Sergio A. Villanueva Pruneda, Jorge Ramos Watanave, 1983, "Manual de Métodos de Fabricación Metal mecánica, México, D.F., Tercera Edic.
- Simkin, E.M., A.I., Sergeer and A.B. Skeinmann, 1967, "Experimental Studies of Operating Characteristics of a Downhole Electric Heater" Neft. Khoz., No. 6, June, p.39
- Shigley Joseph E., Charles R. Mischeke, 1986, "Standard Handbook of Machine Design", McGraw Hill
- Streeter L. Victor, E. Benjamin Wyle, 1975, "Mecánica de los Fluidos", McGraw-Hill, México, 6ª Edic., p.265
- Solicitud de Patente No. PA/a/1999/011927, Hernández R. Marco A., Volodymyr Sabelkin, T. Ramírez M., E. Baez, "Equipo Contenedor Transportador y Preservador de Temperatura para una Sonda de Muestreo de Hidrocarburos de Yacimientos Petrolíferos", IMP
- Terninko John, 1997, "The QFD, TRIZ and Taguchi Connection: Customer-Driven Robust Innovation, The Ninth Symposium on Quality Function deployment, June
- Towler, B.F., U. of Wyoming, 1989, "Reservoir Engineering Aspects of Bottomhole Sampling of Saturated Oil for PVT Analysis", SPE 19438
- Tuttle, R., 1983, "High Pour Point and Asphaltic Crude Oils and Condesates", J. Petr. Tech., June.
- V. Guedez, P. Mondelo, A. Hernández, L. Mosquera, 2001, "Ergonomic Design of Small containers using QFD", CAES2001, Ergonomic Design, Venezuela
- Varolsis N., Gaganis V. Guieze P., 1999, "A Novel Non-Iterative Method for the Prediction of the PVT Behaviour of Reservoir Fluids", SPE 56745
- Vijayan N. Nair, 1992, "Taguchi's Parameter Design: A Panel Discussion", American Statistical Association and Society for Quality Control, Technometrics, Vol. 34, No. 2, May.
- Walter E., Hyde, Duncan, 1983, "Well Sampling Method and Apparatus", Patent US4417622, Halliburton Company, Nov.
- W. Amyx James, M. Bass, Jr. L. Whitin Robert, 1960, "Petroleum Reservoir Engineering", Ed. McGraw-Hill Book Co., Cap.5-7
- Wei Chen, J.K. Allen, Kwok-Leung Tsui, F. Mistree, 1996, "A Procedure for Robust Design: Minimizing Variations Caused by Noise Factors and Control Factors", ASME Journal of Mechanical Design, Vol.118, December

- William D. McCain, 1990, "The properties of Petroleum Fluids", Second Edition, Penwell Book, Tulsa.
- William .D. McCain Jr, 1991, "Reservoir-Fluid Property Correlations-State of the Art", SPE Reservoir Engineering, May, P.266-272.
- William Y. Fowlkes, Clyde M. Creveling, 1995, " Using Taguchi Methods in Technology and Product Development", Prentice Hall PTR, August.
- Won K. W., 1986, "Thermodynamics for Solid Solution Liquid-Vapor Equilibria: Wax Phase Formation from Heavy Hydrocarbon Mixture", Fluid Phase Equilibria, v. 30, p 265.
- Won K. W., 1989, "Thermodynamic Calculation of Cloud Point Temperatures and Wax Phase Compositions of Refined Hydrocarbon Mixtures", Fluid Phase Equilibria, v. 53, p. 377.
- W. Smith, 2000, "Fast and Accurate Reservoir Fluid Information, An End to Compromise, Cased Hole Services", The Expro Group, UK.
- Y. H. Chain, S.C. Tam, W . I. Chen, H.Y. Zheng, 1996, " Application of Taguchi Method in the Optimization of Lazer Micro-engraving of Photomask", International Journal of Materials and Product Technology, Vol. II, No. 3, 4, pp 333-344
- Yuin Wu, Alan Wu, 1997, "Diseño Robusto Utilizando los Métodos Taguchi", Ed. Díaz De Santos, Juan Bravo 3 A. Madrid, p.39
- Zapata-Gonzalez, C., C. Lira-Galeana, C. Firó-Reyes, Lucero-Aranda, F., y García-Hernández, F. 1999, "Metodología para la predicción y Control de la Deposición de Asfaltenos en Pozos" Ingeniería Petrolera, vol. 38, No. 1, p.58.

## *Apéndice A*

*Modelos matemáticos que describen el comportamiento de ceras y asfaltenos*

### A. 1. Modelo matemático que describe el comportamiento de las ceras

Muchos estudios se han realizado para definir el comportamiento de las ceras y **asfáltenos**, diversos autores de artículos han desarrollado modelos matemáticos, A. R. Solaimany y E. González (A. R. Solaimany, 2001; E. Gonzalez, 2001), han sido algunos de los autores que presentan modelos matemáticos que describen el comportamiento de las ceras, estableciendo la existencia de diversos mecanismos de depositación de ceras en tuberías que transportan hidrocarburos como son la difusión molecular, dispersión molecular y difusión Browniana, sin embargo mediciones experimentales han mostrado que el mecanismo de la dispersión molecular no tiene una importante contribución en la depositación de ceras, especialmente a altas temperaturas y condiciones de flujo de calor. El efecto de la difusión Browniana es también insignificante. Por consiguiente, la difusión molecular es el mecanismo dominante y mediante la aplicación de la ley de Fick, se ha generado un modelo termodinámico para dos fases (Huanquan, 1998).

Las constantes de equilibrio sólido-líquido para una mezcla de  $n$  hidrocarburos están determinadas por el modelo termodinámico propuesto por Won, en el que las relaciones de los coeficientes de actividad de los componentes, se determinan utilizando una modificación a la teoría de la solución sólida (Won, 1986). La distribución de cada componente entre las fases sólida y líquida puede ser derivada por ecuaciones de fugacidad de cada componente en dos fases, expresada por la siguiente ecuación:

$$K_i = \frac{S_i}{X_i} = \exp \left\{ \frac{\Delta H_i^f}{RT} \left( 1 - \frac{T}{T_i^f} \right) + \frac{V_i}{RT} \left[ \delta - \delta_{i,l}^2 - |\delta - \delta_{i,s}^2| \right] \right\} \quad (A.1)$$

Donde  $\Delta H^f$  es el calor de fusión.  $T_i^f$  es la temperatura en el punto de sublimación del componente  $i$ ,  $R$  es la constante de los gases y  $V_i$  es el volumen molar del componente.

El parámetro de solubilidad en la fase líquida  $\delta_l^i$ , y en la fase sólida  $\delta_s^i$ , puede ser calculado basado en la densidad de la energía de cohesión como sigue:

$$\delta_l^i = \left[ \frac{\Delta H^v - RT}{V} \right]_{i,l}^{1/2} \quad (A.2)$$

$$\delta_s^i = \left[ \frac{\Delta H^v + \Delta H^f - RT}{V} \right]_{i,s}^{1/2} \quad (A.3)$$

Donde  $\Delta H^v$  es la entalpía de vaporización.  $\delta$  es la solubilidad definida como:

$$\delta = \sum \phi_i \delta_i \tag{A.4}$$

Donde  $\phi_i$  es la fracción de volumen del componente  $i$  definido como:

$$\phi_i^l = \frac{x_i V_i}{\sum x_i V_i} \tag{A.5}$$

$$\phi_i^s = \frac{s_i V_i}{\sum s_i V_i} \tag{A.6}$$

$x_b, s_i$  son fracciones molares del componente  $i$  en las fases líquido y sólida, respectivamente. Las correlaciones para estimar la temperatura de sublimación, la entalpía de fusión, el volumen molar y la entalpía de vaporización pueden encontrarse en la bibliografía (Firoozabadi A. 1999; Reid R.,1977; Cooney, 1974).

Se asume que la difusión molecular es el mecanismo predominante para la depositación de ceras, por lo tanto el flujo de masa radial de una mezcla de  $n$  componentes de hidrocarburos, utilizando la ley de Fick y considerando la fase en equilibrio sólido-líquido, puede ser expresada como:

$$J = \sum_{i=1}^n j_i = -D_m \frac{\partial \rho_r}{\partial r} = -D_m \rho_m \left[ \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \xi_i) \right] \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial r} \tag{A.7}$$

Donde  $D_m$  es el promedio de la constante de difusión y  $\rho_x, \rho_m$  son la densidad del líquido y la densidad de la mezcla respectivamente. Para aceite  $\rho_m$  es aproximadamente una función lineal de temperatura y también puede asumirse que la densidad de los depósitos de cera  $\rho_w$ .

Las funciones dimensionales  $\sigma_i, \xi_i$  están expresadas como:

$$\sigma_i = \frac{w_i \left[ T(1+\theta)^{\gamma} \frac{\partial L_i}{\partial T} + \theta \frac{\Delta H_i^l}{RT} \right]}{(1+\theta k_i)^2} k_i \tag{A.8}$$

$$\xi_i = \frac{w_i T \alpha_i}{1+\theta k_i} \tag{A.9}$$

Donde el coeficiente de expansión térmica para la mezcla a presión constante, está dado como:

$$\alpha_i = -\frac{1}{\rho_m} \left[ \frac{\partial \rho_m}{\partial T} \right] \quad (\text{A.10})$$

$W_i$  es el peso de la fracción del componente  $i$  en la alimentación,  $L_x$  es el número de moles en la fase líquida por número de moles de la mezcla y  $\theta$  es expresado como:

$$\theta = \frac{1 - L_x}{L_x} \quad (\text{A.11})$$

Mediciones experimentales han mostrado que el coeficiente de difusión molecular y la viscosidad del aceite  $\mu$ , pueden expresarse de la forma (Burguer et al, 1993; Bern et al, 1980):

$$D_m = \frac{C}{\mu} \quad (\text{A.12})$$

$C$ , es una constante a determinar para cada aceite, esta constante puede ser estimada experimentalmente en alta temperatura y condiciones de flujo de calor en un régimen de flujo laminar. A estas condiciones, el número de partículas de cera fuera de la solución es muy bajo y solo la difusión molecular es el mecanismo dominante y también el esfuerzo cortante en las paredes es bajo por lo que el efecto de canal no es considerado. La dependencia de la viscosidad de la temperatura puede ser expresada ampliamente por la ecuación :

$$\mu = E \exp\left(\frac{F}{T}\right) \quad (\text{A.13})$$

Donde  $E$  y  $F$ , son constantes que dependen del aceite bajo estudio.

La cantidad de depósito de ceras por unidad de tiempo  $t$  a una distancia del diámetro interno  $z=0$  a  $z=z$ ,  $M_w(t, z)$ , puede ser expresada como:

$$M_w(t, z) = \sum_{i=1}^n M_{w_i}(t, z) = \sum_{i=1}^n 2\pi \int_0^r \int_0^z R_{w_i} j_i dz dt \quad (\text{A.14})$$

Por lo tanto la variación de la masa depositada a lo largo de la tubería al tiempo  $t$ , está expresada por:

$$\frac{\partial M_w}{\partial z} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial M_{w_i}}{\partial z} = \sum_{i=1}^n 2\pi \int_0^r R_{w_i} j_i dt \quad (\text{A.15})$$

$R_w$  es el radio interior de la tubería con depósitos, el espesor de la cera depositada  $h(r,z)$  es calculada de la siguiente ecuación:

$$h=R_0 - R_w \tag{A.16}$$

donde  $R_0$  es el radio interior de la tubería limpia de depósitos,  $R_w$  puede expresarse como:

$$R_w = \left[ R_0^2 - \frac{1}{\pi \rho_{wa}} \frac{\partial M_w}{\partial z} \right]^{1/2} \tag{A.17}$$

donde  $\rho_{wa}$  es el promedio de la densidad de la cera.

### A.2. Modelo matemático que describe el comportamiento de los asfáltenos

El modelo termodinámico ha sido desarrollado para describir el comportamiento del asfalto y los asfáltenos en yacimientos de crudo bajo cambios de presión, temperatura o composición del aceite. Para proyectos específicos los investigadores pueden usar experimentos para investigar el proceso de floculación, pero éste requiere de un gran número de experimentos a condiciones de yacimiento de presión y temperatura. La predicción de precipitación de asfáltenos puede ser estimada experimentalmente, sin embargo no es un camino muy práctico en el caso de precipitación con inyección de gas. Durante la inyección, el crudo entra en contacto con el gas fresco y mas tarde con gas enriquecido resultado de múltiples contactos. Experimentos realizados por Stalkup (1978) y Gader (1981) demostraron que un contacto simple no proporciona alguna información del comportamiento de los asfáltenos en múltiples contactos.

Una descripción teórica usando solo una cantidad limitada de experimentos para predecir el fenómeno, puede ser muy útil.

Los modelos termodinámicos solo son aplicables a procesos reversibles, por lo que la precipitación de los asfáltenos debe ser reversible. Después de la precipitación, adicionando solventes en aceite crudo, los asfáltenos son redisoluertos en una cantidad limitada. Podemos decir que el proceso de redisolución no es el proceso de reversibilidad de la precipitación, la redisolución de los asfáltenos puede requerir un tiempo considerable, solo así podría considerarse como un proceso reversible.

El modelo termodinámico mostrado aquí, es una combinación del modelo líquido-vapor y del modelo líquido-líquido, se utilizan ecuaciones de estado para calcular primero la composición de la fase líquida sin precipitación de asfaltenos y después se emplea la teoría modificada de Flory-Hildenbrand, para calcular la cantidad de asfaltenos precipitados desde la fase líquida con la suposición de que esta precipitación no cambia el equilibrio vapor-líquido.

Si consideramos que el aceite está compuesto por mezclas binarias de dos pseudo componentes:

*Asfaltenos (a)*

*Solventes (b)*

Al comienzo de la floculación, la fracción de volumen  $\Phi_a$  de los asfaltenos disueltos es igual a la fracción máxima de volumen soluble en el solvente  $(\Phi_a)_{\max}$ .

Esto significa que al comienzo de la floculación solo los componentes polares pesados corresponden a asfaltenos que se precipitan de acuerdo a la ecuación:

$$(\Phi_a)_{\max} = \exp \left[ \frac{v_a}{v_l} \left( 1 - \frac{v_l}{v_a} - \frac{v_l}{RT} (\delta_a - \delta_l)^2 \right) \right] \quad (\text{A.18})$$

Donde :

$v_l$  es el volumen molar de la fase líquida obtenida de calcular la separación vapor- líquido del aceite crudo ( o del aceite crudo y la mezcla de solventes) a la presión y temperatura considerada.

$v_a$  es el volumen molar de los asfaltenos obtenido experimentalmente.

$\delta_a$  es el parámetro de solubilidad de los asfaltenos.

$\delta_l$  es el parámetro de solubilidad de la fase líquida.

Este modelo puede predecir la influencia de la presión y la disolución de depósitos de asfaltenos (M. Ghanei et al., 2002)

## ***Apéndice B***

*Ecuaciones de los casos de la relación de la  
señal de ruido dinámica y estática*

**B.- Ecuaciones de los casos de la relación de la señal de ruido dinámica y estática**

**Tipos básicos de relaciones S/N estáticas**

Tipo de problema	Rango para las observaciones	Valor ideal	Ajuste	Relación S/N
Menor es mejor (small-the-better) STB	$0 \leq y < \infty$	0	Ninguno	$\eta = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$
Nominal es mejor (nominal-the-better) NTB	$0 \leq y < \infty$	Diferente de cero, finito	Escalado	$\eta = 10 \log_{10} \frac{\mu^2}{\sigma^2}$ $\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ $\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2$
Mayor es mejor (large-the-better) LTB	$0 \leq y < \infty$	$\infty$	Ninguno	$\eta = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{y_i} \right)^2 \right]$

Tabla A.1. Relaciones de señal de ruido ( S/N Signal to Noise Ratio) para problemas estáticos.

**Tipos básicos de relaciones S/N dinámicas para variables continuas**

**a.- Ecuación proporcional por el origen**

Relación señal-ruido:

$$\eta = 10 \log \frac{\beta^2}{\sigma^2} = 10 \log \frac{r_0 r (S_\beta - V_\varepsilon)}{V_\varepsilon}$$

En el caso de una ecuación proporcional, cuando una señal es cero, la salida debe de ser cero. En un sistema de medida, si la muestra no tiene contenido, la medida resultante debe de ser cero. La función ideal se expresa como:

$$Y = \beta M$$

Donde M es la señal, y es la salida y  $\beta$  es la pendiente de la línea de respuesta o coeficiente de regresión.

Considerando el error:

$$y_{ij} = \beta M_i + e_{ij}$$

Donde :

$$\begin{aligned} i &= 1, 2, \dots, k \\ j &= 1, 2, \dots, r_0 \end{aligned}$$

$r_0$  = número de medidas bajo  $M_i$   
 $k$  = número total de datos

El valor seleccionado de  $\beta$  es aquel que minimiza la suma de los cuadrados de los errores (mínimos cuadrados).

$$S_e = (y_{11} - \beta M_1)^2 + (y_{12} - \beta M_1)^2 + \dots + (y_{kr_0} - \beta M_k)^2$$

El valor de  $\beta$  que minimiza la ecuación está dado por:

$$\beta = \frac{1}{r_0 r} (M_1 y_1 + M_2 y_2 + \dots + M_k y_k)$$

Donde  $r$  es:

$$r = M_1^2 + M_2^2 + \dots + M_k^2$$

Variación total de cuadrados de los  $kr_0$  datos.  $f$  denota los grados de libertad.

$$S_T = y_{11}^2 + y_{12}^2 + \dots + y_{kr_0}^2 \quad (f=kr_0)$$

La variación causada por el efecto lineal, llamada  $S_\beta$ , está dada por:

$$S_\beta = \frac{1}{r_0 r} (M_1 y_1 + M_2 y_2 + \dots + M_k y_k)^2 \quad (f=1)$$

La variación del error, incluyendo la desviación de la linealidad,  $V_e$ , es:

$$S_e = S_T - S_\beta \quad (f=kr_0-1)$$

La varianza del error es la variación del error dividida por los grados de libertad:

$$V_E = \frac{S_e}{kr_0 - 1}$$

### b.- Ecuación proporcional

Utilizada para sistemas de medida.

En la calibración en un punto de referencia se utiliza un estándar como punto de referencia  $M_0$ . Se realizan las medidas y se obtienen las observaciones, y se calcula la media  $y_0$ . La relación ideal entre las lecturas y la señal es:

$$y - y_s = \beta(M - M_s)$$

Donde  $y_s$ , esta dada por:

$$y_s = \frac{(y_{s1} + y_{s2} + \dots + y_{s_{k_0}})}{r_0}$$

La pendiente o coeficiente lineal,  $\beta$ , también es denominado coeficiente de sensibilidad y está dado por la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{1}{r_0 r} [y_1(M_1 - M_s) + y_2(M_2 - M_s) + \dots + y_k(M_k - M_s)]$$

Donde :

$$r = [(M_1 - M_s)^2 + (M_2 - M_s)^2 + \dots + (M_k - M_s)^2]$$

La ecuación proporcional es:

$$(y - y_s) = \beta(M - M_s)$$

Para determinar la relación S/N, se calcula la variación total  $S_T$  (suma de cuadrados):

$$S_T = \sum_{i=1}^{i=k} \sum_{j=1}^{j=k_0} (y_{ij} - y_s)^2$$

El efecto lineal de la señal  $S_\beta$  es:

$$S_\beta = \frac{1}{r_0 r} [y_1(M_1 - M_s) + y_2(M_2 - M_s) + \dots + y_k(M_k - M_s)]^2$$

$$(f=1)$$

la varianza del error  $S_e$ , es, para  $f=kr_0-1$ :

$$S_e = S_T - S_\beta$$

la varianza del error,  $V_e$  es :

$$V_e = \frac{1}{kr_0 - 1} S_e$$

La relación S/N es:

$$\eta = 10 \log \frac{1}{r_0 r} \frac{(S_\beta - V_e)}{V_e}$$

### c. Ecuación Lineal

No existe restricción específica en la relación lineal entrada/salida, la ecuación lineal está dada por:

$$y = m + \beta(M + Med) + e$$

Donde  $e$  es el error. Los parámetros  $m$  y  $\beta$  son:

$$m = y_{med}$$

$$\beta = \frac{1}{r_0 r} [y_1(M_1 - Med) + y_2(M_2 - Med) + \dots + y_k(M_k - Med)]$$

donde:

$$Med = \frac{(M_1 + M_2 + \dots + M_k)}{k}$$

$$r = [(M_1 - Med)^2 + (M_2 - Med)^2 + \dots + (M_k - Med)^2]$$

y  $r_0$  es el número de repeticiones en cada nivel del factor señal. La relación S/N se calcula como sigue,  $f = kr_0 - 1$ :

$$S_T = y_{11}^2 + y_{12}^2 + \dots + y_{kr_0}^2 - S_m \qquad S_m = \frac{(\sum y_{ij})^2}{kr_0}$$

En el caso de una ecuación lineal, la variación total,  $S_T$  se calcula restando  $S_m$  de la suma de los cuadrados de los datos. En este caso,  $S_T$  muestra la variación en torno a la media.  $f = 1$

$$S_\beta = \frac{1}{r_0 r} [y_1(M_1 - Med) + y_2(M_2 - Med) + \dots + y_k(M_k - Med)]^2$$

Para  $f = kr_0 - 2$

$$S_e = S_T - S_\beta$$

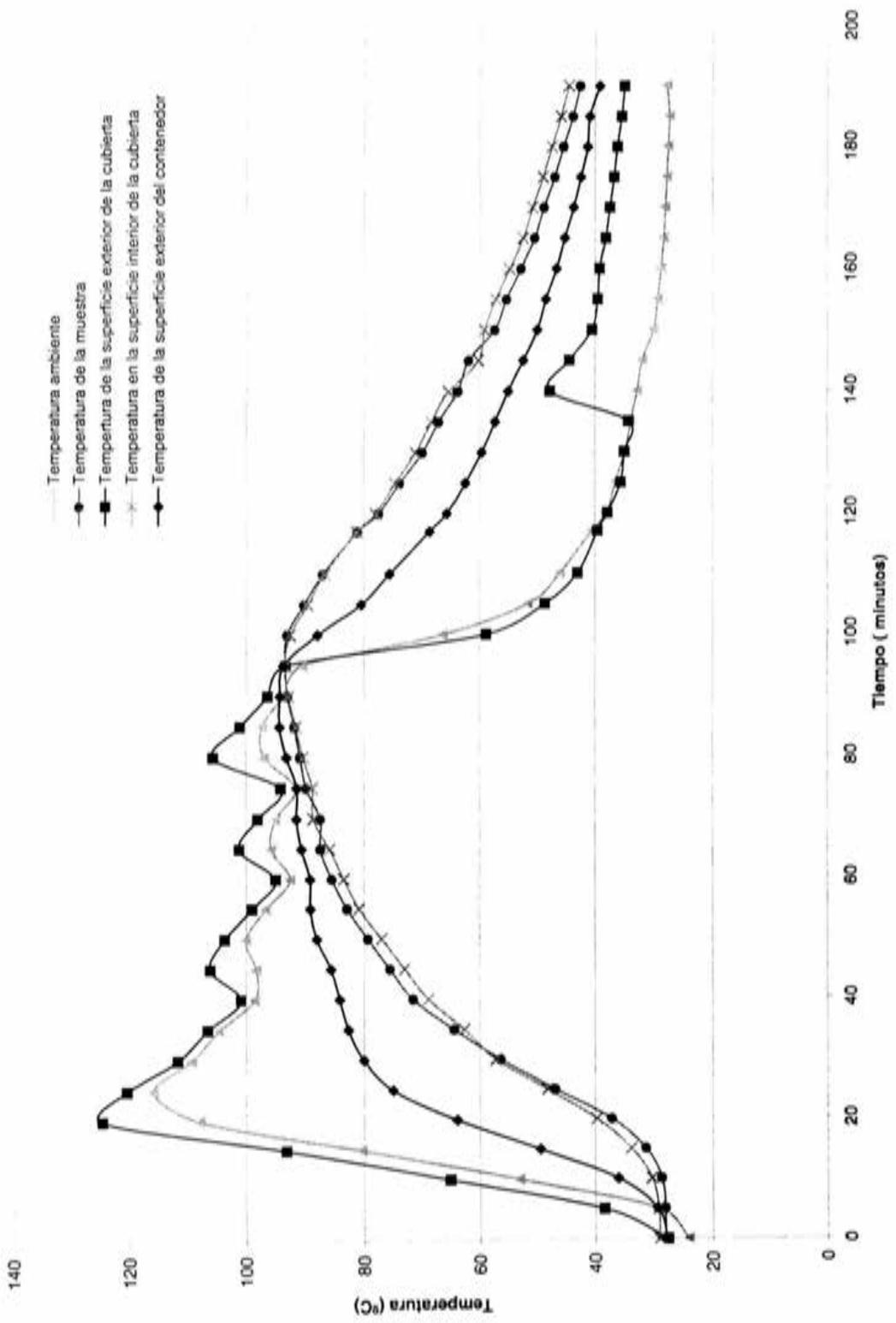
$$V_e = \frac{1}{kr_0 - 2} S_e$$

$$\eta = 10 \log \frac{1}{r_0 r} \frac{(S_\beta - V_e)}{V_e}$$

La relación S/N es :

## ***Apéndice C***

*Gráficas de experimentos de la  
optimización de la cámara de  
almacenamiento y el calentador*



**Experimento No.1**

Temperatura de trabajo 25 °C ( se calienta el horno a 100°C)

Se utiliza una camisa interior de aleación de titanio

Se utiliza una camisa exterior de aleación de titanio

Se utiliza aire como aislante

Se utiliza una muestra de crudo de 0.8892 gr/cc

Resistencia del calentador de 60 ohm

tempo	Temp. amb. °C	Temp. de la muestra	Temp. de la sup. ext. de la cubierta	Temp. de la sup. int. de la cubierta	Temp. de la sup. Cent. ext. del contenedor	Voltaje del sensor de presión mV	Presión en el sensor Psi	Presión manom. Psi	Dif. De temperatura Tm-Text	Dif. De temperatura Tm-Tamb
0	24.1	28.04	27.61	29.06	27.75	99	5.54	100	0.43	3.94
5	29.28	28.09	38.46	29.22	29.37	97	0	100	-10.37	-1.19
10	53.09	28.68	65.13	30.33	36.06	97	0	100	-36.45	-24.41
15	80.44	31.39	93.13	33.83	49.48	127	83.1	200	-61.74	-49.05
20	107.99	37.2	124.63	39.72	63.99	297	554	600	-87.43	-70.79
25	115.98	46.86	120.44	48.17	75	620	1448.71	1500	-73.58	-69.12
30	109.39	56.4	111.82	57.19	79.98	1005	2515.16	2500	-55.42	-52.99
35	104.64	64.45	106.67	62.75	82.58	1258	3215.97	3140	-42.22	-40.19
40	98.56	71.54	100.92	68.9	84.06	1400	3609.31	3700	-29.38	-27.02
45	98.24	75.52	106.26	73.02	85.51	1620	4218.71	3920	-30.74	-22.72
50	100.04	79.33	103.77	76.95	87.89	1860	4883.51	4200	-24.44	-20.71
55	96.6	82.83	99	80.83	89.01	2012	5304.55	5070	-16.17	-13.77
60	92.48	85.41	94.95	83.4	89.04	2114	5587.09	5300	-9.54	-7.07
65	95.72	87.28	101.23	85.77	90.5	2203	5833.62	5570	-13.95	-8.44
70	94.96	87.33	98.04	88.49	91.37	2270	6019.21	5700	-10.71	-7.63
75	91.47	89.7	94.11	88.7	91.31	2318	6152.17	5850	-4.41	-1.77
80	96.88	90.77	105.81	90.26	93.12	2370	6296.21	6000	-15.04	-6.11
85	97.27	91.7	101.13	91.47	94.28	2414	6418.09	6150	-9.43	-5.57
90	93.64	92.87	96.33	92.74	94.2	2463	6553.82	6200	-3.46	-0.77
95	90.37	93.27	93.25	93.41	93.63	2488	6623.07	6300	0.02	2.9
100	66.34	92.96	58.93	92.4	87.77	2469	6570.44	6300	34.03	26.62
105	51.57	90.07	48.65	89.46	80.41	2367	6287.9	6000	41.42	38.5
110	46.02	86.84	42.99	86.51	75.59	2254	5974.89	5700	43.85	40.82
117	40.52	81.1	39.56	81.2	68.72	2050	5409.81	5200	41.54	40.58
120	38.02	77.49	37.83	78.03	65.72	1920	5049.71	4900	39.66	39.47
125	36.51	73.94	35.59	74.69	62.61	1791	4692.38	4550	38.36	37.43
30	34.82	70	34.97	71.17	59.73	1646	4290.73	4150	35.03	35.18
35	33.87	67.15	34.25	68.42	57.35	1540	3997.11	3900	32.9	33.28
40	32.75	63.88	47.79	65.46	55.09	1414	3648.09	3600	16.09	31.13
45	31.88	62.05	44.39	60.26	52.47	1210	3083.01	3200	17.66	30.17
50	29.99	57.43	40.56	59.19	49.99	1175	2986.06	2925	16.87	27.44
55	29.29	55.4	39.56	57.23	48.49	1096	2767.23	2750	15.84	26.11
60	28.71	52.9	39.21	54.81	46.66	1002	2506.85	2500	13.69	24.19
65	28.24	50.49	38.13	52.5	45.18	911	2254.78	2200	12.36	22.25
70	27.97	48.82	37.43	50.82	43.68	810	1975.01	2000	11.39	20.85
75	27.7	46.92	36.7	48.99	42.44	768	1858.67	1900	10.22	19.22
80	27.47	45.4	36.13	47.4	41.26	707	1689.7	1750	9.27	17.93
85	27.23	43.8	35.4	45.83	40.9	643	1512.42	1550	8.4	16.57
90	27.71	42.58	34.93	44.51	39.19	593	1373.92	1400	7.65	14.87

Fluido: Aceite de densidad 0.925 gr/cc, R= 120 , 60 Ohm, Vacio

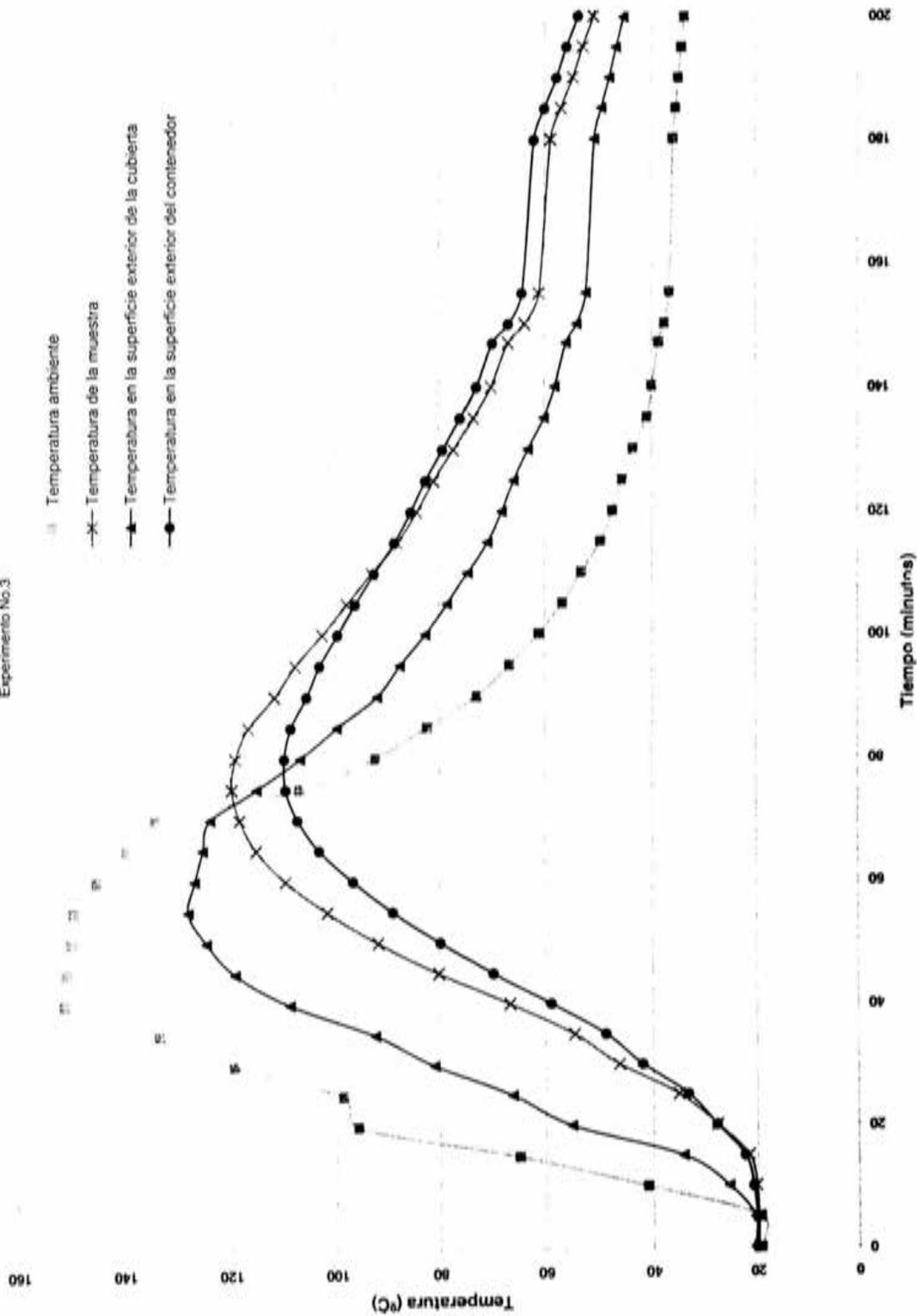
Experimento No.3

□ Temperatura ambiente

× Temperatura de la muestra

▲ Temperatura en la superficie exterior de la cubierta

● Temperatura en la superficie exterior del contenedor



## Experimento No.2

Prueba a 100 °C

Se utiliza una camisa interior de titanio

Se utiliza una combinación de aislantes: base teflon, papel cerámico y micanita

Se utiliza una muestra de crudo ligero de 0.8725 gr/cc

Jo	Temp. ambiente	Temp. de la muestra	Temp. de la sup. exterior de la cubierta	Temp. de la sup. interior de la cubierta	Temperatura de la superficie exterior del contenedor	Voltaje del sensor de presión mV	Presión en el sensor PaI	Presión manométrica PaI	Dif. De temp. Tmuest.-Texti	Dif. De temp. Tmuest.-Tamb
	27.22	29.5	30.96	29.44	32.17	106	0	100	-1.48	2.28
	33.52	29.8	31.19	31.4	39.36	107	-2.7	100	-1.39	-3.72
	62.37	33.17	33.86	42.76	62.61	109	2.7	100	-0.69	-29.2
	78.45	37.75	37.55	52.67	74.22	120	32.4	150	0.2	-40.7
	88.27	45.16	43.72	62.74	82.27	179	191.7	300	1.44	-43.11
	90.61	52.32	50.19	69.47	84.3	345	639.9	740	2.13	-38.29
	88.24	58.61	56.44	72.96	83.6	570	1247.4	1350	2.17	-29.63
	88.18	64.06	62.06	75.46	84.75	785	1827.9	1880	2.01	-24.12
	91.64	67.6	65.74	77.7	87.26	945	2259.9	2290	1.86	-24.04
	101.9	72.3	70.44	83.31	94.63	1102	2683.8	2700	1.86	-29.6
	102.38	78.27	76.36	88.15	95.99	1330	3299.4	3300	1.91	-24.11
	100.71	81.2	79.68	89.8	95.83	1456	3639.6	3600	1.52	-19.51
	97.6	83.97	82.42	90.5	94.71	1563	3928.5	3875	1.55	-13.63
	96.39	86.62	85.41	91.25	96.13	1678	4239	4200	1.21	-9.77
	101.15	88.46	87.49	93.68	98.92	1752	4438.8	4340	0.97	-12.69
	100.2	91.02	87.25	95.7	98.36	1900	4838.4	4850	-6.23	-9.18
	104.29	118.53	139.82	110.94	108.6	3460	9060.4	8850	-21.29	14.24
	111.63	117.9	131.95	118.37	115.42	3310	8645.4	8700	-14.05	6.27
	109.43	118.58	127.74	119.76	114.67	3160	8240.4	8400	-9.16	9.15
	105.55	118.41	125.18	118.32	112.28	3060	8024.4	8600	-6.77	12.86
	101.53	117.52	122.67	115.8	109.36	3010	7835.4	7550	-5.15	15.99
	111.21	116.57	120.4	116.2	115.88	2940	7646.4	7450	-3.83	5.36
	112.48	116.81	119.25	116.17	106.42	2900	7538.4	7400	-2.44	4.33
	61.15	112.55	115.76	102.81	92.36	2800	7268.4	7000	-3.21	51.4
	50.17	108.077	112	95.37	85.89	2678	6939	6800	-3.923	57.907
	43.83	102.83	107.34	88.73	80.36	2515	6498.9	6300	-4.51	59
	39.8	97.05	101.99	82.92	75.32	2317	5964.3	5900	-4.94	57.25
	36.53	89.16	94.4	76.15	69.47	2036	5205.6	5250	-5.24	52.63
	35.31	84.68	88.38	71.3	65.29	1808	4590	4700	-3.7	49.37
	33.69	79.8	84.87	68.54	62.94	1673	4225.5	4200	-5.07	46.11
	32.43	74.91	79.88	64.64	59.69	1486	3720.6	3700	-4.97	42.48
	31.1	70.27	75.15	61.09	56.7	1309	3242.7	3225	-4.88	39.17
	30.74	67.03	71.74	58.68	54.81	1180	2894.4	2925	-4.71	36.29
	30.55	64.51	69.06	56.85	53.66	1076	2613.6	2625	-4.55	33.96
	29.5	60.34	64.67	53.56	51.27	806	1884.6	2250	-4.33	30.84
	29.16	57.75	61.77	51.49	49.38	704	1609.2	1960	-4.02	28.59
	28.99	55.3	59.11	49.71	47.59	610	1355.4	1700	-3.81	26.31
	28.93	53.21	56.81	48.23	46.28	538	1161	1490	-3.6	24.28
	28.9	51.25	54.65	46.81	44.84	461	963.1	1250	-3.4	22.35
	28.85	49.49	52.7	45.51	43.71	395	774.9	1025	-3.21	20.64
	28.75	47.81	50.82	44.24	42.7	339	623.7	890	-3.01	19.06
	28.54	46.47	49.33	43.21	41.81	290	491.4	700	-2.86	17.93
	28.13	45.29	48.02	42.21	41.05	224	313.2	600	-2.73	17.16
	27.8	43.68	46.25	40.92	39.94	185	207.9	450	-2.57	15.88
	27.64	42.73	45.19	40.16	39.27	89	-51.3	325	-2.46	15.09
	26.95	39.96	42.15	37.9	37.35	89	-51.3	100	-2.19	13.01
	26.84	38.92	41	37.07	36.64		-291.6	100	-2.08	12.08

Se enciende

resistencia

Se apaga

Se apaga

el horno

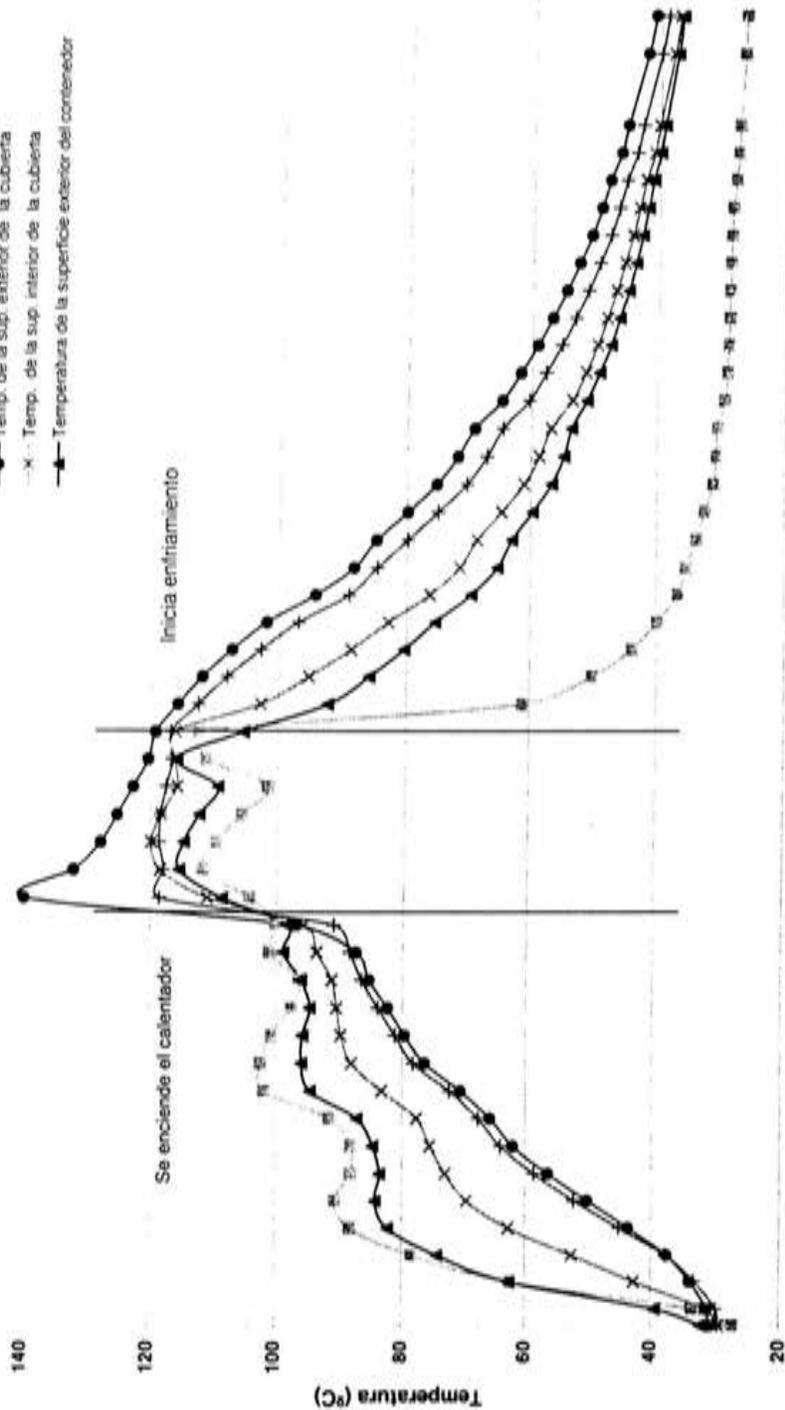
enfriamiento

Experimento No. 2

160

- Temp. ambiente
- Temp. de la muestra
- Temp. de la sup. exterior de la cubierta
- Temp. de la sup. interior de la cubierta
- Temperatura de la superficie exterior del contenedor

Potencia del calentador: 120 W



0

50

100

150

200

0

**Experimento No. 3**

Temperatura de trabajo 150 °C

Se utiliza una camisa interior de aleación de Titanio 6-6-4

Se utiliza una camisa exterior de acero 17-4 Ph

Se utiliza vacío como aislante (50 cm Hg)

Se utiliza una muestra de crudo de 0.925 gr/cc

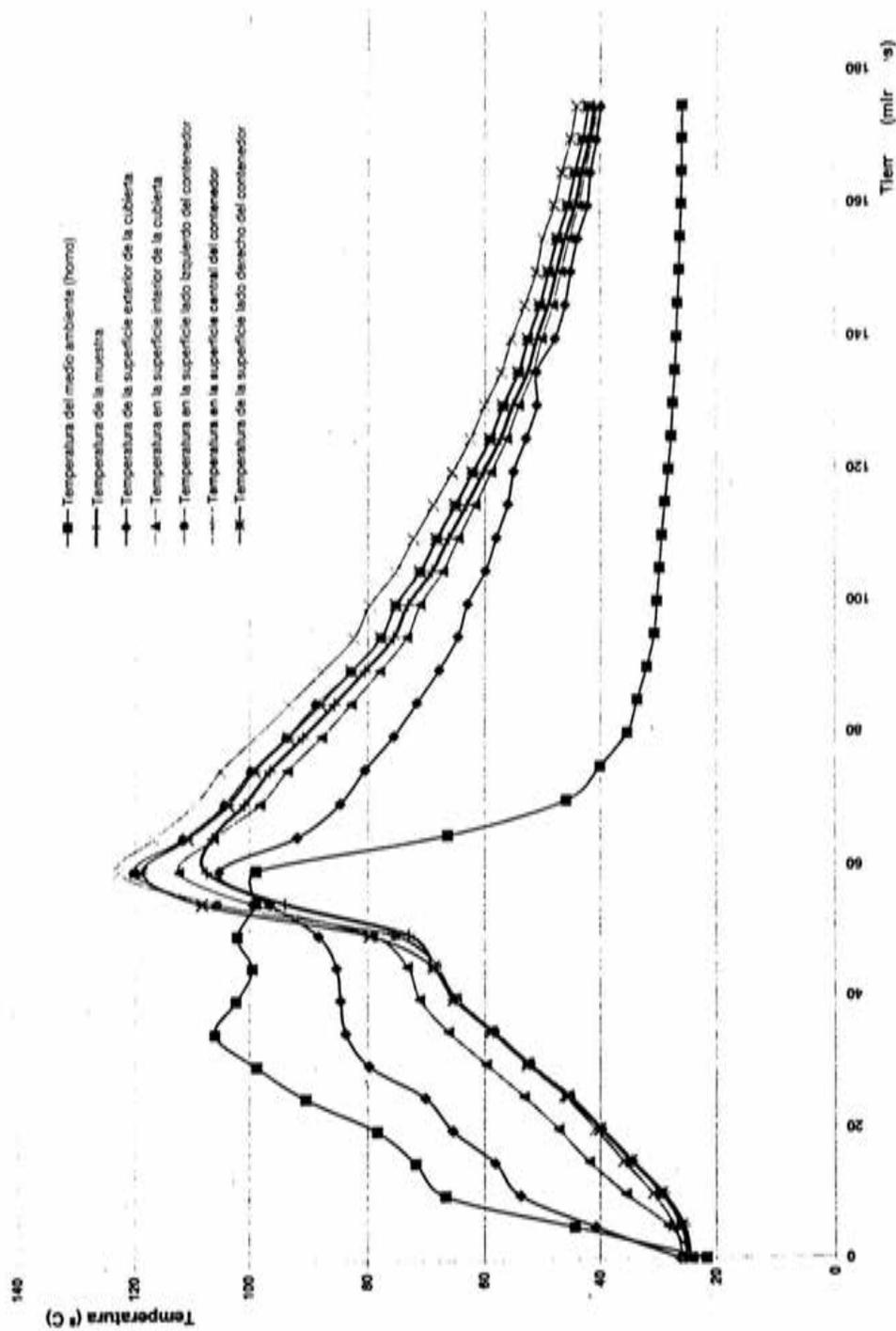
Resistencia del calentador de 120 y 60 Ohm

Tiempo	Temp. amb. °C	Temp. de la muestra	Temp. de la sup. ext. de la cubierta	Temp. de la sup. Cent. del contenedor	Voltaje del sensor de presión mV	Presión en el sensor Psi	Presión manom. Psi	Dif. De temperatura Tm-Text	Dif. De temperatura Tm-Tamb
0	19.25	19.81	20.56	20.24	102	24.93	100	-0.75	0.56
5	19.31	19.85	20.62	20.26	103	27.7	100	-0.77	0.54
10	40.94	20.27	25.59	20.87	107	38.78	100	-5.32	-20.67
15	64.85	21.67	34.28	22.48	112	52.63	100	-12.61	-43.18
20	95.78	27.83	55.05	27.9	136	119.11	100	-27.22	-67.95
25	98.71	35.11	66.16	33.35	196	285.31	100	-31.05	-63.6
30	119.35	46.19	80.98	41.93	315	614.94	150	-34.79	-73.16
35	133.39	54.54	92.49	48.65	447	980.58	400	-37.95	-78.85
40	151.35	66.72	108.85	58.86	802	1963.93	1525	-42.13	-84.63
45	150.92	80.16	119.17	69.86	1259	3229.82	2750	-39.01	-70.76
50	150.09	91.89	124.5	79.8	1898	4999.85	3850	-32.61	-58.2
55	149.64	101.7	127.97	88.96	2133	5650.8	4800	-26.27	-47.94
60	145.3	109.56	126.71	96.69	2430	6473.49	5700	-17.15	-35.74
65	139.55	115.13	125.2	103.23	2709	7246.32	6400	-10.07	-24.42
70	134.13	118.28	123.78	107.36	2866	7681.21	6850	-5.5	-15.85
75	106.99	119.74	115.07	109.57	2964	7952.67	7200	4.67	12.75
80	92.37	119.06	106.87	109.84	2981	7999.76	7400	12.21	26.71
85	82.25	116.59	99.78	108.59	2934	7869.57	7400	16.81	34.34
90	72.93	111.61	91.94	105.59	2812	7531.63	7100	19.67	38.68
95	66.57	107.73	87.49	103.14	2708	7243.55	6900	20.24	41.16
100	61.05	102.61	82.58	99.65	2556	6822.51	6500	20.03	41.56
105	56.65	97.89	78.44	96.21	2413	6426.4	6100	19.45	41.24
110	53.02	93.05	74.82	92.55	2261	6005.36	5700	18.43	40.03
115	49.46	88.02	70.8	88.53	2083	5728.3	5300	17.22	38.56
120	47.2	84.21	68.05	85.37	1959	5468.82	4950	16.16	37.01
125	45.42	80.94	65.75	82.54	1842	4944.73	4600	15.19	35.52
130	43.47	77.21	63.09	79.24	1704	4462.47	4300	14.12	33.74
135	40.9	73.5	60.08	75.96	1580	4118.99	3450	13.42	32.6
140	39.94	70.09	58.03	72.87	1453	3767.2	3650	12.06	30.15
147	38.72	66.83	55.92	69.81	1332	3432.03	3250	10.91	28.11
150	37.63	63.69	53.86	66.79	1208	3088.55	3100	9.83	26.06
155	36.71	61.08	52.15	64.22	1107	2908.78	2700	8.93	24.37
180	35.97	58.83	50.61	61.97	1016	2556.71	2500	8.22	22.86
185	35.39	56.87	49.3	60	940	2346.19	2300	7.57	21.48
190	34.9	54.65	47.82	57.75	851	2099.66	2000	6.83	19.75
195	34.31	52.83	46.57	55.85	771	1878.06	1850	6.26	18.52
200	33.76	50.82	45.18	53.73	691	1656.46	1650	5.64	17.06
205	33.37	49.58	44.33	52.42	640	1515.19	1500	5.25	16.21
210	33.15	48.31	43.43	51.07	586	1385.61	1400	4.88	15.16
215	32.61	46.93	42.47	49.59	526	1199.41	1200	4.46	14.32
220	32.15	45.75	41.63	48.3	478	1066.45	1000	4.12	13.6
225	31.78	44.5	40.78	46.97	425	919.64	980	3.72	12.72
230	31.36	43.31	39.94	45.68	375	781.14	850	3.37	11.85
235	31.07	42.4	39.29	44.68	335	670.34	700	3.11	11.33
240	30.8	41.52	38.68	43.73	301	576.16	600	2.84	10.72
245	30.46	40.42	37.88	42.51	259	459.82	550	2.54	9.96
250	30.2	39.51	37.23	41.52	217	343.48	400	2.28	9.31

# Comportamiento de temperatura en la cámara de muestreo

Fluido: Aceite densidad: = 0.925 gr/cc, R=120 ohm, Aire

Experimento No. 4



**Experimento No.4**

Temperatura de trabajo 100 °C

Se utiliza una camisa interior de acero tipo 17-4 PH

Se utiliza un camisa exterior de titanio

Se utiliza aire como aislante térmico

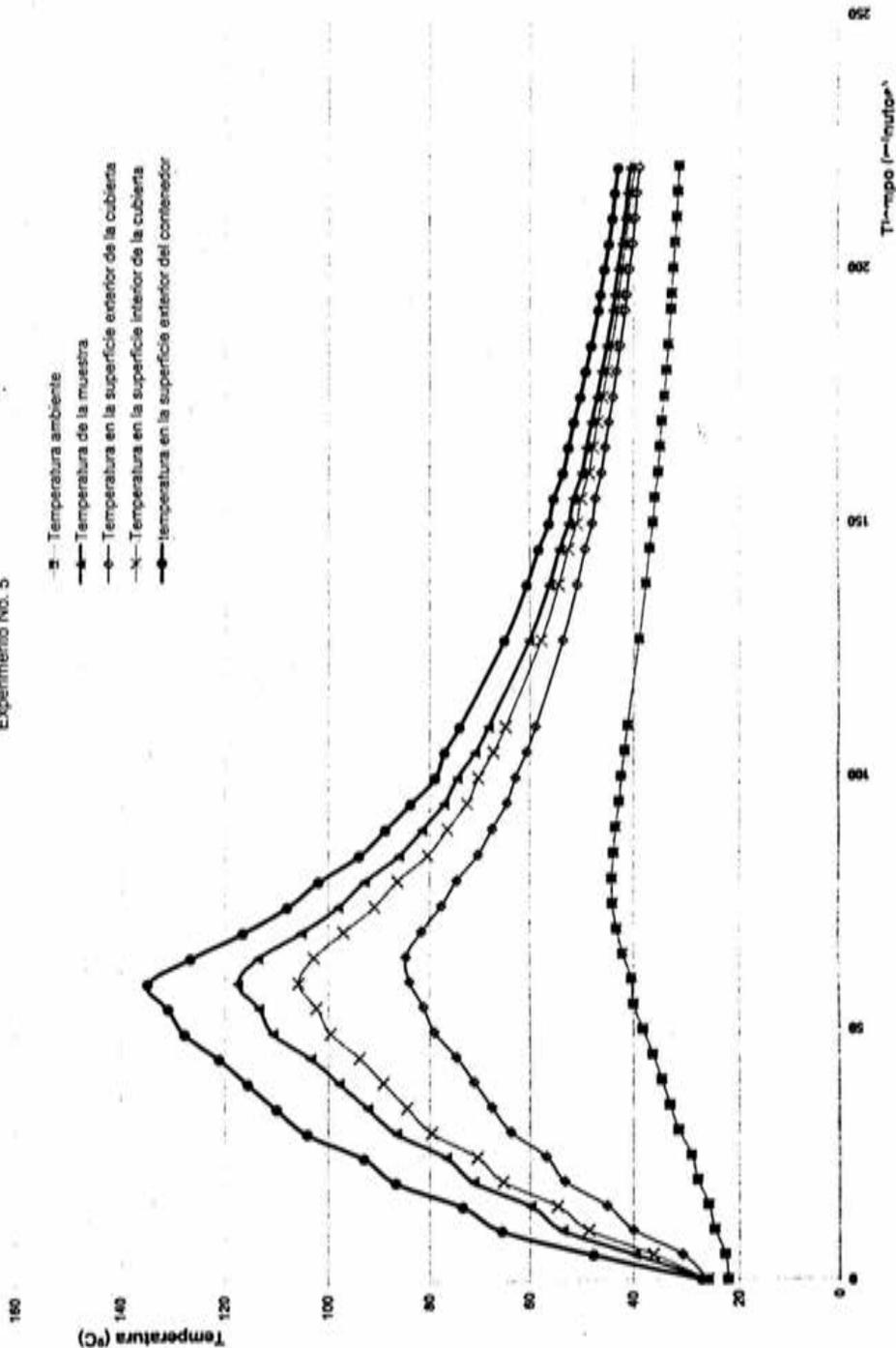
Se utiliza una muestra de crudo de 0.925 gr/cc

Resistencia del calentador de 120 ohm

Tiempo	Temp. amb. °C	Temp. de la muestra	Temp. de la sup. de la cubierta	Temp. de la sup. Int. de la cubierta	Temp. de la sup. Int. del contenedor	Temp. de la sup. Cent. ext. del contenedor	Temp. de la sup. Der. ext. del contenedor	Voltaje del sensor de presión mV	Presión en el sensor Pa	Presión manom. Pa	Diff. De presión Pa	Diff. De temperatura Tmues-Text	Diff. De temperatura Tmues-Tamb
0	21.6	24.21	26.01	23.94	24.88	25.59	24.46	0.1	0	100	-1.8	-1.8	2.61
5	44.36	25.43	40.77	28.03	26.01	27.08	25.78	0.1	0	100	-15.34	-15.34	-18.93
10	66.6	28.86	53.77	35.22	29.23	30.67	29.23	0.108	21.6	100	-24.91	-24.91	-37.74
15	71.68	34.17	58.16	41.89	34.28	35.68	34.42	0.118	51.3	110	-23.99	-23.99	-37.51
20	78.34	39.83	65.41	47.16	39.79	40.86	40.03	0.14	108	120	-25.58	-25.58	-36.51
25	80.46	45.35	70.06	53.11	45.2	46.17	45.55	0.195	296.5	220	-24.73	-24.73	-45.11
30	86.73	52.3	79.75	59.7	52.05	52.72	52.55	0.38	756	700	-27.45	-27.45	-46.43
35	106.18	58.56	83.71	65.13	58.24	58.86	58.89	0.607	1368.9	1270	-25.15	-25.15	-47.62
40	102.31	65.06	84.6	71.06	64.71	64.89	65.27	0.851	2027.7	1950	-19.54	-19.54	-37.25
45	99.53	68.49	85.31	73.17	68.17	68.14	68.71	0.991	2405.7	2300	-16.82	-16.82	-31.04
50	102.08	72.82	88.35	79.13	75.2	75.69	79.68	1.221	3026.7	2850	-15.43	-15.43	-29.16
55	96.92	83.99	86.58	89.49	105.78	105.73	106.52	2.282	5891.4	5450	-2.59	-2.59	-4.93
60	86.87	107.73	105.41	112.55	120.28	122.84	118.87	3.001	7832.7	7720	2.32	2.32	8.86
65	66.32	106.79	91.94	106.37	111.84	116.88	111.02	2.891	7535.7	7450	14.85	14.85	40.47
70	45.81	100.86	84.64	98.18	104.44	109.88	103.72	2.63	6831	6750	16.22	16.22	54.95
75	40.04	86.53	80.44	93.51	99.7	105.11	99.13	2.454	6355.8	6250	16.09	16.09	56.49
80	35.09	80.86	75.52	87.78	93.76	99.05	93.44	2.235	5764.5	5700	15.44	15.44	55.87
85	33.34	85.69	71.54	82.8	88.79	93.35	88.07	2.02	5184	5150	14.15	14.15	52.35
90	31.7	80.54	67.72	77.89	82.81	87.77	82.77	1.805	4603.5	4600	12.82	12.82	48.84
95	30.42	75.58	64.57	73.26	77.71	82.4	77.79	1.607	4068.9	4100	11.02	11.02	45.17
100	30.04	73.1	62.94	70.97	75.15	79.73	75.23	1.505	3783.5	3800	10.16	10.16	43.06
105	29.59	68.97	58.88	67.13	70.91	75.25	71.09	1.336	3337.2	3400	9.09	9.09	39.38
110	29.22	66.17	58.07	64.53	68.04	72.2	68.25	1.225	3037.5	3100	8.1	8.1	36.95
115	28.71	63.08	56.06	61.63	64.84	68.8	65.06	1.095	2696.5	2750	7.02	7.02	34.37
120	28.16	60.27	55.06	58.96	61.95	65.58	62.16	0.975	2362.5	2450	5.21	5.21	32.11
125	27.68	57.37	52.81	56.21	58.98	62.48	58.15	0.855	2038.5	2100	4.46	4.46	29.69
130	27.45	55.25	51.03	54.19	56.77	60.11	56.87	0.786	1798.2	1800	4.22	4.22	27.8
135	27.06	52.67	51.12	51.72	54.12	57.24	54.28	0.696	1501.2	1600	1.55	1.55	25.61
140	26.83	51.08	47.83	50.21	52.47	55.46	52.64	0.59	1303	1400	3.15	3.15	24.25
145	26.63	48.1	46.21	48.28	50.4	53.21	50.55	0.501	1082.7	1200	2.89	2.89	22.47
150	26.39	47.66	45.25	46.92	48.92	51.16	49.06	0.441	820.7	1050	2.41	2.41	21.27
155	26.22	46.24	44.08	45.54	47.46	50	47.57	0.377	747.9	870	2.16	2.16	20.02
160	26.01	44.54	42.38	43.9	45.71	48.09	45.79	0.307	558.9	650	2.16	2.16	18.53
165	25.9	43.4	41.81	42.77	44.51	46.79	44.57	0.267	450.9	550	1.89	1.89	17.5
170	25.85	42.1	40.72	41.54	43.18	45.32	43.21	0.208	291.6	400	1.38	1.38	16.25
175	25.79	41.21	39.97	40.68	42.26	44.32	42.27	0.173	197.1	300	1.24	1.24	15.42

Comportamiento de temperaturas de una muestra de aceite con densidad 0.8892 gr/cc  
 Se calienta la muestra con R=60 y 120 ohm hasta 100°C

Experimento No. 5



- Temperatura ambiente
- Temperatura de la muestra
- ▲ Temperatura en la superficie exterior de la cubierta
- × Temperatura en la superficie interior de la cubierta
- ◆ Temperatura en la superficie exterior del contenedor

Temperatura (°C)

0

20

40

60

80

100

120

140

160

180

0

50

100

150

200

250

Time (min)

**Experimento No.5**

Temperatura de trabajo 150 °C

Se utiliza una camisa interior de acero tipo 316

Se utiliza una camisa exterior de acero inox. 17-4Ph

Se utiliza papel cerámico

Se utiliza una muestra de crudo de 0.8892 gr/cc

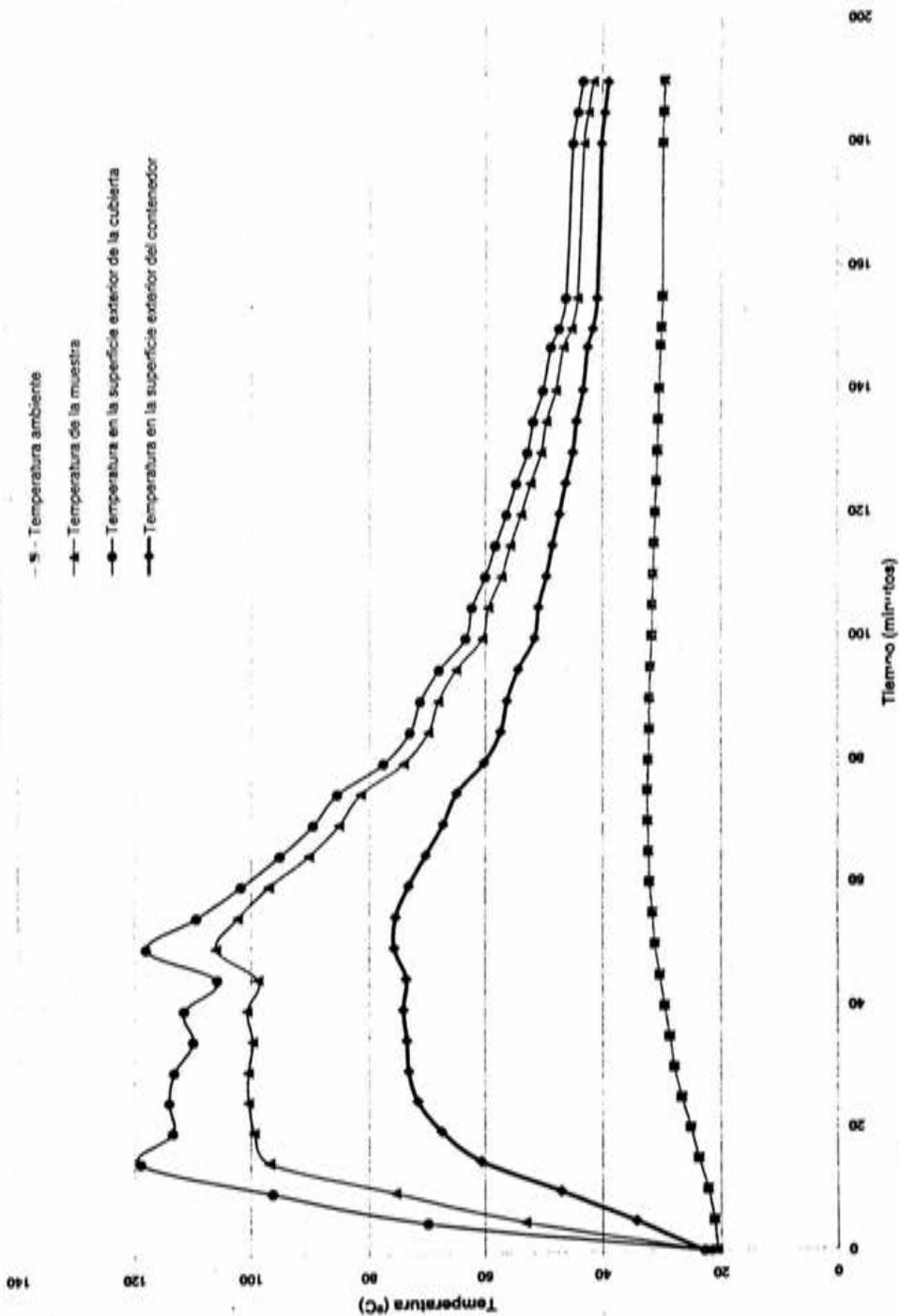
Resistencia del calentador de 60 y120 ohm

Tiempo	Temp. amb. °C	Temp. de la muestra	Temp. de la sup. ext. de la cubierta	Temp. de la sup. int. de la cubierta	Temp. de la sup. Cent. ext. del contenedor	Voltaje del sensor de presión mV	Presión en el sensor Psi	Presión manom. Psi	Dif. De temperatura Tm-Text	Dif. De temperatura Tm-amb
3	25.94	29.43	29.48	29.43	30.55	116	0	110	-0.05	3.49
5	27.19	29.46	31.22	29.67	30.61	116	0	110	-1.76	2.27
10	42.94	29.99	42.61	34.16	31.46	118	5.54	110	-12.62	-12.95
15	69.91	32.5	60.62	43.88	34.48	133	47.09	150	-28.12	-37.41
25	122.9	46.54	96.78	70.33	48.07	454	936.26	1000	-50.24	-76.34
30	131.2	56.54	105.66	80.63	56.98	795	1880.83	1950	-49.12	-74.61
35	141.5	68.65	114.53	91.35	67.82	1222	3063.62	3025	-45.88	-72.8
40	139	77.43	115.87	96.3	75.67	1553	3980.49	3880	-38.44	-61.59
45	146.7	86.35	124.46	103.86	84.17	1890	4913.98	4700	-38.11	-60.37
50	146.2	93.76	125.46	108.67	91.14	2165	5675.73	5550	-31.7	-52.39
55	146.3	100.54	128.29	113.07	97.57	2430	6409.78	6100	-27.75	-45.76
60	144.8	106.48	129.53	116.53	103.41	2665	7060.73	6700	-23.05	-38.31
65	148	111.9	134.07	120.98	109.03	2887	7675.67	7250	-22.17	-36.07
70	145.8	117.72	133.87	124.62	115.04	3121	8323.85	7875	-16.15	-28.05
72	144	119.2	133.34	126.35	118.67	3190	8514.98	8000	-14.14	-24.81
75	142.2	126.53	134.83	130.26	127.97	3470	9290.58	8850	-8.3	-15.7
77	143.5	131.65	137.79	133.96	134.26	3710	9955.38	9400	-6.14	-11.85
80	144.2	133.82	139.37	135.4	134.48	3820	10260.08	9675	-5.55	-10.42
85	142.3	134.94	139.91	136.95	135.82	3870	10398.58	9800	-4.97	-7.35
90	142.3	136.27	140.91	137.91	137.04	3920	10537.08	9900	-4.64	-6.06
95	143.2	137.48	141.14	138.78	138.14	3960	10647.88	10000	-3.66	-5.74
100	141.7	138.77	139.95	139.04	139.24	4000	10758.68	10150	-1.18	-2.95
105	109.7	136.48	121.91	129.03	136.75	3940	10592.48	10000	14.57	26.8
110	90.01	129.4	110.14	119.11	130.77	3730	10010.78	9475	19.26	39.39
125	56.42	123.54	96.33	110.26	125.62	3520	9429.08	9000	27.21	67.12
130	40.45	114.14	86.78	100.19	117.72	3220	8596.08	8200	27.36	73.69
135	36.22	106.61	81.15	93.8	111.28	2960	7877.88	7525	25.46	70.39
140	34.31	99.5	76.66	88.23	105	2713	7193.69	6900	22.84	65.19
146	33.68	94.74	73.93	84.69	100.71	2553	6750.49	6500	20.81	61.06
151	33.31	90.03	71.31	81.3	96.31	2381	6274.05	6050	18.72	56.72
155	32.42	84.1	67.47	76.65	90.57	2155	5648.03	5500	16.63	51.68
160	31.5	79.3	64.43	72.97	85.78	1968	5130.04	5000	14.87	47.8
165	30.59	75.25	61.8	69.64	81.64	1811	4695.15	4600	13.45	44.66
170	30.83	70.96	59.19	66.21	77.26	1642	4227.02	4150	11.77	40.13
175	30.67	68.48	57.49	64.17	74.66	1540	3944.48	3900	10.99	37.81
180	30.15	64.99	55.29	61.29	70.94	1399	3553.91	3500	9.7	34.84
185	30.12	62.7	53.73	59.17	68.49	1306	3296.3	3275	8.97	32.58
190	29.57	59.73	51.76	56.86	65.26	1184	2958.36	3000	7.97	30.16
195	29.24	57.45	50.17	54.86	62.75	1089	2695.21	2675	7.28	28.21
200	28.83	55.41	48.73	53.09	60.48	1003	2456.99	2500	6.68	26.58

# Comportamiento de temperatura en la cámara de muestreo

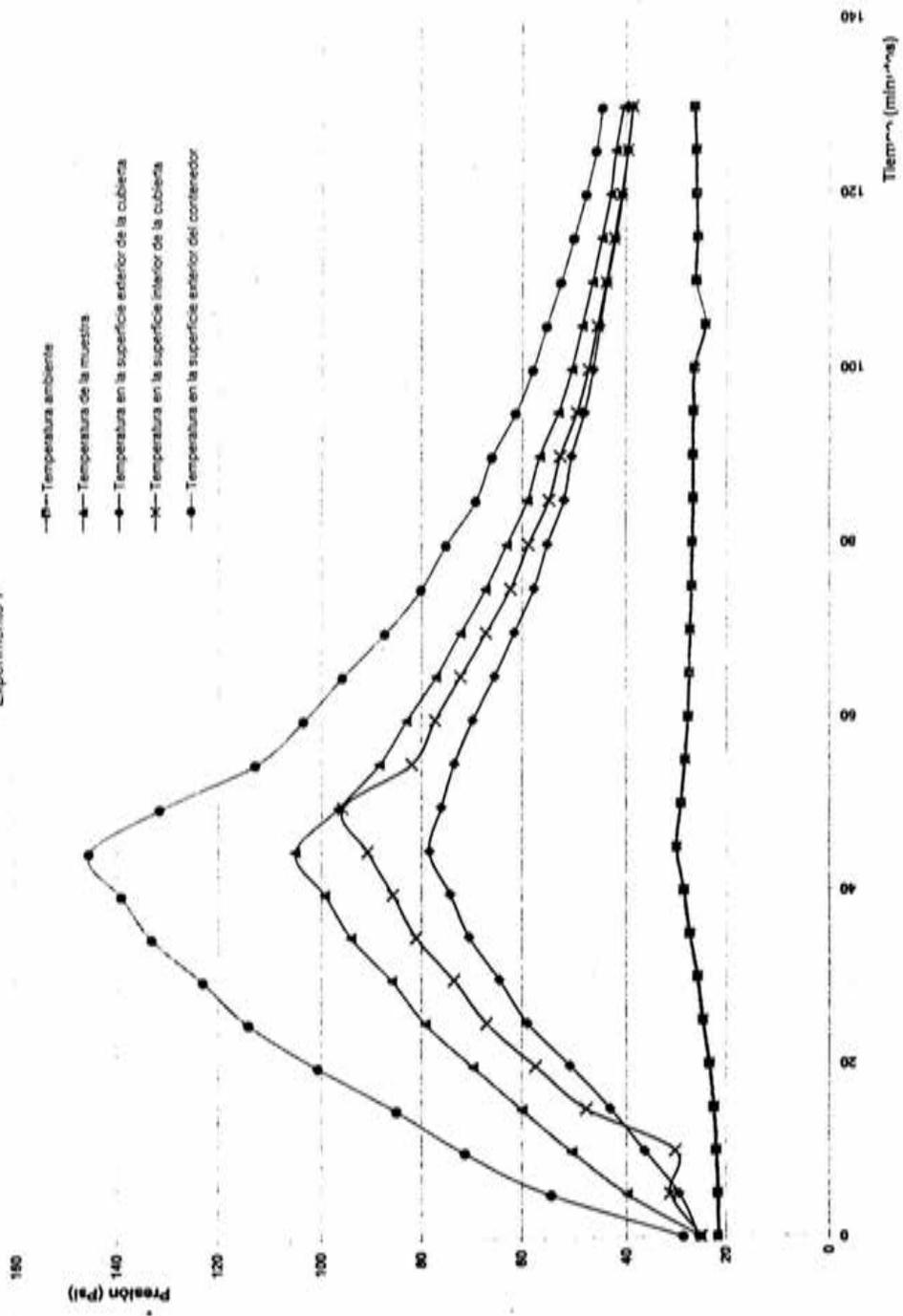
Fluido: Aceite de densidad 0.8725 gr/cc, R= 120 Ohm, Vacío

Experimento No. 6





Comportamiento de temperatura calentando con R=60 Ohm  
 Aceite densidad 0.925 gr/cc  
 Experimento 7



### Experimento No.7

Temperatura de trabajo 150 °C

Se utiliza una camisa interior de titanio

Se utiliza una camisa exterior de titanio

Se utiliza aire como aislante térmico papel cerámico

Se utiliza una muestra de crudo de 0.925 gr/cc

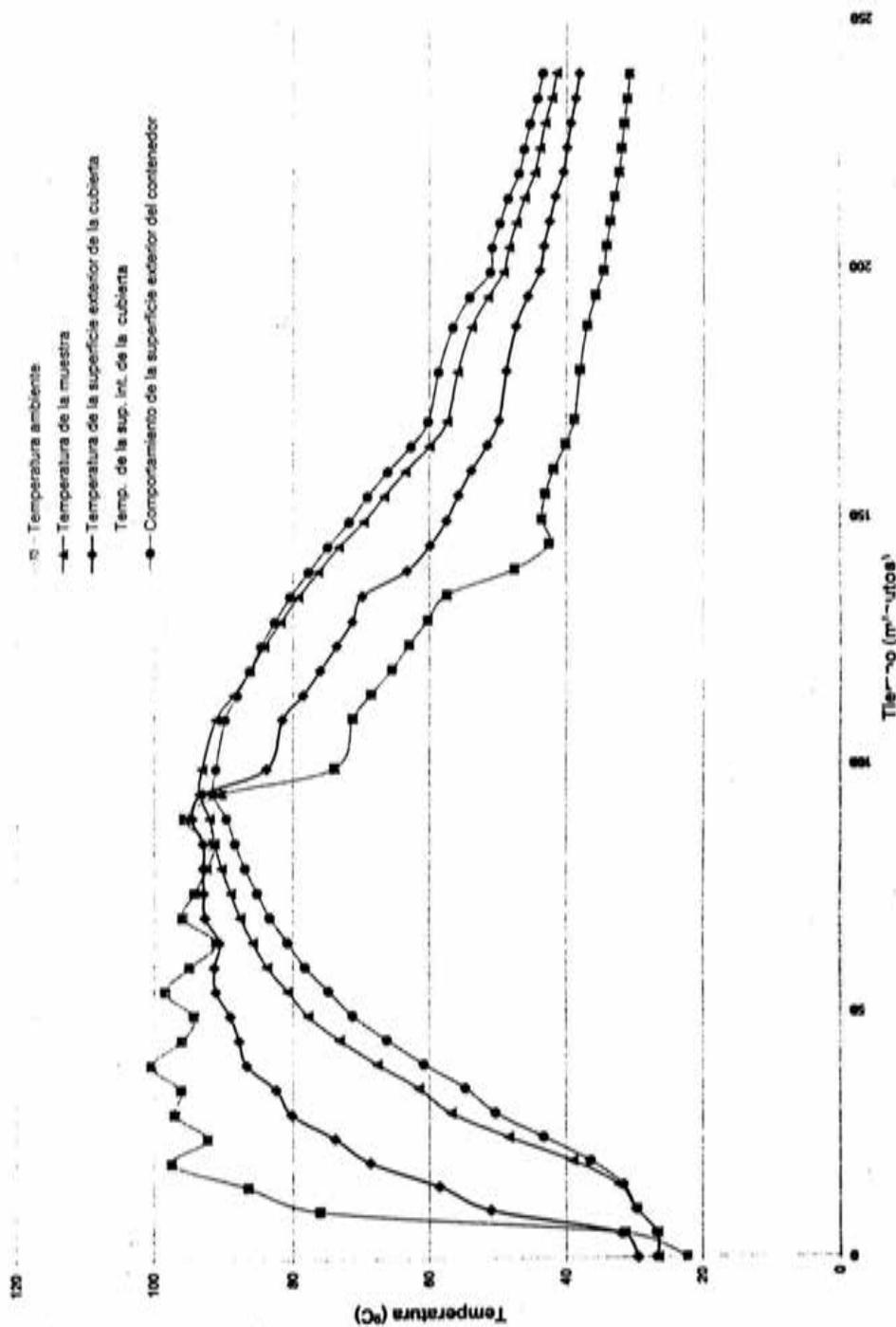
Resistencia del calentador de 60 ohm

Tiempo	s4		s3		s2 <sup>o</sup>		Voltaje del sensor de presión mV	Presión en el sensor Paí	Presión manom. Paí	Dif. De temperaturas Tm-Text	Dif. De temperaturas Tm-Tamb
	Temp. amb. °C	Temp. de la muestra	Temp. de la sup. ext. de la cubierta	Temp. de la sup. int. de la cubierta	Temp. de la sup. Cent. ext. del contenedor	Temp. de la sup. Cent. ext. del contenedor					
0	27.66	32.6	30.56	31.93	33.74	130	13.85	150	2.04	4.94	
5	32.18	33.33	31.64	31.65	31.94	129	11.06	150	1.69	1.15	
10	27.91	32.03	31.55	31.77	33.05	125	0	150	0.48	4.12	
15	47.81	32.62	40.14	36.6	33.72	130	13.85	160	-7.52	-15.19	
20	79.85	36.05	55.97	49.32	37.05	176	141.27	275	-19.92	-43.8	
25	107.84	42.69	73.03	64.99	43.13	336	584.47	700	-30.34	-65.15	
30	133.47	53.17	92.7	83.16	52.49	651	1457.02	1550	-39.53	-80.3	
35	131.43	70.95	110.73	90.88	68.71	1325	3324	3300	-39.78	-60.48	
40	140.23	81.19	118.26	103.13	78.33	1698	4357.21	4250	-37.07	-59.04	
45	144.07	90.73	125.1	111.21	87.3	2068	5382.11	5175	-34.37	-53.34	
50	141.8	100.51	127.34	117.49	96.11	2446	6429.17	6125	-26.83	-41.29	
55	146.38	107.65	133.87	122.53	103.88	2754	7282.33	6900	-26.22	-38.73	
60	146.57	114.73	135.52	127.58	111.02	3030	8046.85	7575	-20.79	-31.84	
65	152.15	121.15	142.63	132.61	117.68	3290	8767.05	8225	-21.48	-31	
70	154.54	127.12	145.12	137.89	123.82	3520	9404.15	8800	-18	-27.42	
73	152.47	134.34	144.09	140.48	137.22	3830	10262.85	9500	-9.75	-18.13	
75	151.15	137.22	144.45	141.67	136.96	3990	10706.05	9900	-7.23	-13.93	
80	67.65	132.37	111.47	120.12	133.18	3930	10539.85	10200	20.9	64.72	
85	52.68	125.05	100.09	108.12	127.68	3760	10068.95	9700	24.96	72.37	
90	45.71	115.47	91.31	97.72	120.14	3480	9293.35	8975	24.16	69.76	
96	40.85	104.14	81.73	87.21	110.98	3090	8213.05	7900	22.41	63.29	
105	37.43	91.15	72.35	76.71	97.31	2604	6866.83	6650	18.8	53.72	
115	36.22	84.54	68.08	71.74	90.65	2340	6135.55	6000	16.46	48.32	
125	32.59	72.85	59.89	68.6	78.28	1847	4789.94	4700	12.96	40.26	
135	31.41	64.91	55.04	56.81	70	1520	3864.15	3875	9.87	33.5	
145	30.33	57.74	50.19	51.522	62.32	1211	3008.22	3025	7.55	27.41	
155	29.66	52.66	46.78	47.66	56.79	988	2390.51	2450	5.88	23	
165	28.63	48.46	43.45	44.46	52.17	801	1872.52	1950	5.01	19.83	
175	27.82	44.86	40.87	41.65	48.17	625	1385	1500	3.99	17.04	
185	27.16	42.19	39.01	39.57	45.18	519	1091.38	1200	3.18	15.03	
195	26.7	39.61	37.22	37.52	42.3	402	767.29	900	2.39	12.91	
201	26.34	38.4	36.43	36.55	40.93	345	609.4	750	1.97	12.06	
219	25.52	35.57	34.46	34.24	37.72	216	252.07	400	1.11	10.05	

# Comportamiento de temperatura de una cámara de muestreo

Aceite densidad : 0.8892 gr/cc, R=120 Ohm, Vacío: 1e-4 torr

Experimento No. 8



### Experimento No. 8

Temperatura de trabajo 25 °C

Se utiliza una camisa interior de aleación de titanio

Se utiliza una camisa exterior de acero 17-4Ph

Se utiliza vacío a 1x10<sup>-4</sup> torr

Se utiliza una muestra de crudo de 0.8892 gr/oc

Resistencia del calentador de 120 ohm

s4 s3 s2\*

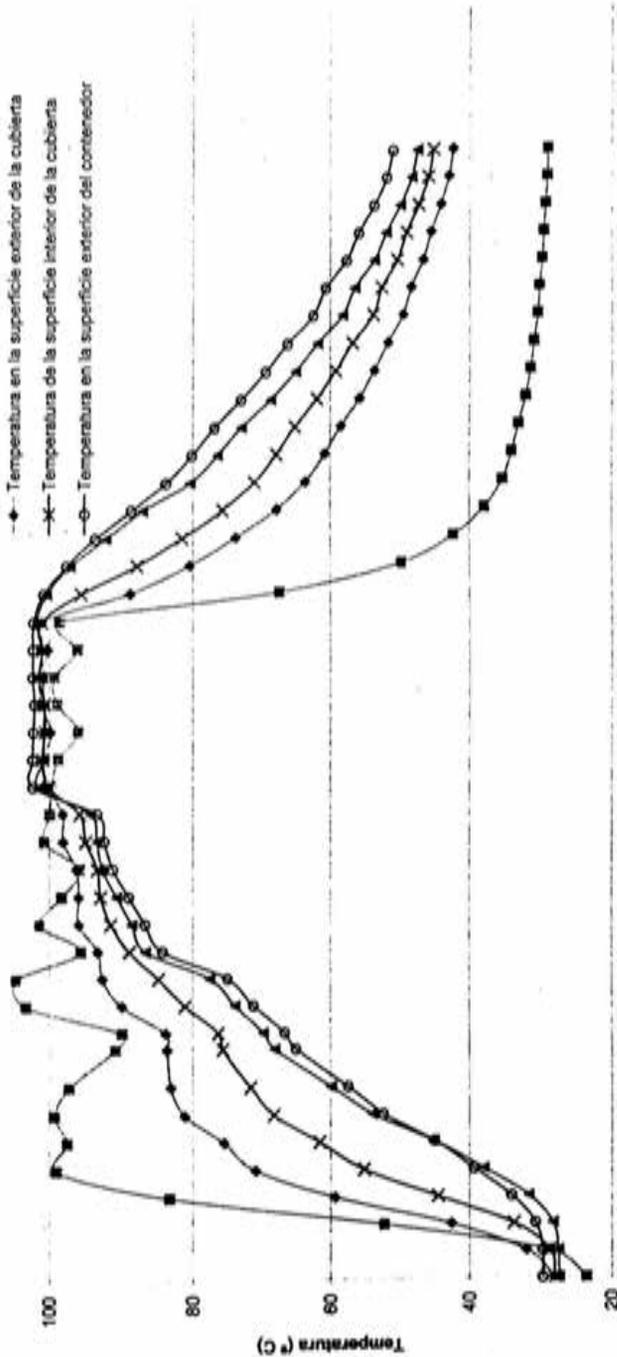
Tiempo	Temp. amb. °C	Temp. de la muestra	Temp. de la sup. ext. de la cubierta	Temp. de la sup. int. de la cubierta	Temp. de la sup. Cent. ext. del contenedor	Voltaje del sensor de presión mV	Presión en el sensor Psi	Presión manom. Psi	Dif. De temperaturas Tm-Text	Dif. De temperaturas Tm-Tamb
0	20.69	24.54	24.68		25.12	99	0	50	-0.14	3.85
5	20.75	52.4	26.9		73.78	1547	4010.96	4000	23.5	31.65
10	21.23	87.79	40.55		115.01	3063	8210.28	7800	47.24	66.56
15	25.5	96.77	52.86		112.91	3290	8839.07	8400	45.91	73.27
20	24.44	101.36	60.43		114.39	3370	9060.67	8500	40.95	76.94
25	25.17	101.67	62.09		114.94	3370	9060.67	8500	39.58	76.5
30	26.86	100.87	64.26		117.81	3400	9143.77	8600	36.61	74.01
35	27.16	101.01	64.5		111.97	3330	8949.87	8400	36.51	73.85
40	27.96	101.21	65.08		116.63	3400	9143.77	8500	36.13	73.25
45	29.06	101.03	65.75		114.61	3360	9032.97	8500	35.28	71.97
50	26.09	92.42	63.42		100.51	2970	7952.67	7500	29	66.33
55	25.09	86.61	62.24		94.11	274	484.75	6800	24.37	61.52
60	24.46	80.46	58.45		87.4	2490	6623.07	6400	22.01	56
65	24.16	73.47	54.68		79.93	2120	5598.17	5500	18.79	49.31
70	24.03	68.77	52.37		75	2025	5335.02	5000	16.4	44.74
75	23.91	64.61	49.96		70.67	1896	4977.69	4550	14.63	40.7
81	23.83	59.98	47.79		65.73	1672	4357.21	4100	12.19	36.15
85	23.76	56.74	45.96		62.31	1539	3998.8	3800	10.76	32.96
90	23.74	52.93	44.01		58.25	1383	3556.68	3400	8.92	29.19
95	23.73	50.96	43.56		56.06	1295	3312.92	3100	7.4	27.23
100	23.65	48.98	42.72		53.91	1211	3080.24	2900	6.26	25.33
105	23.59	46.95	41.48		51.74	1127	2847.56	2600	5.48	23.37
110	23.41	44.79	40.36		49.57	1043	2614.88	2400	4.43	21.38
115	23.36	42.67	38.96		47.32	959	2382.2	2250	3.71	19.31
120	23.28	41.04	37.55		45.21	875	2148.52	2100	3.49	17.76
125	23.36	38.88	36.36		42.74	780	1896.37	1800	2.52	15.52
130	23.42	37.82	35.42		41.49	734	1758.95	1750	2.4	14.4

# Comportamiento de temperaturas de una cámara de muestreo

Fluido : aceite de densidad 0.8725 gr/cc, Aire, R= 60 y 12' Ohm  
Experimento No. 9

120

- - Temperatura ambiente
- - Temperatura de la muestra
- ◆ - Temperatura en la superficie exterior de la cubierta
- × - Temperatura de la superficie interior de la cubierta
- - Temperatura en la superficie exterior del contenedor



0

25

50

75

100

125

150

175

200

225

Tiempo (min)

**Experimento No.9**

Temperatura de trabajo 100 °C ( se calienta el horno a 100°C)

Se utiliza una camisa interior de aleación de titanio

Se utiliza una camisa exterior de acero 17-4Ph

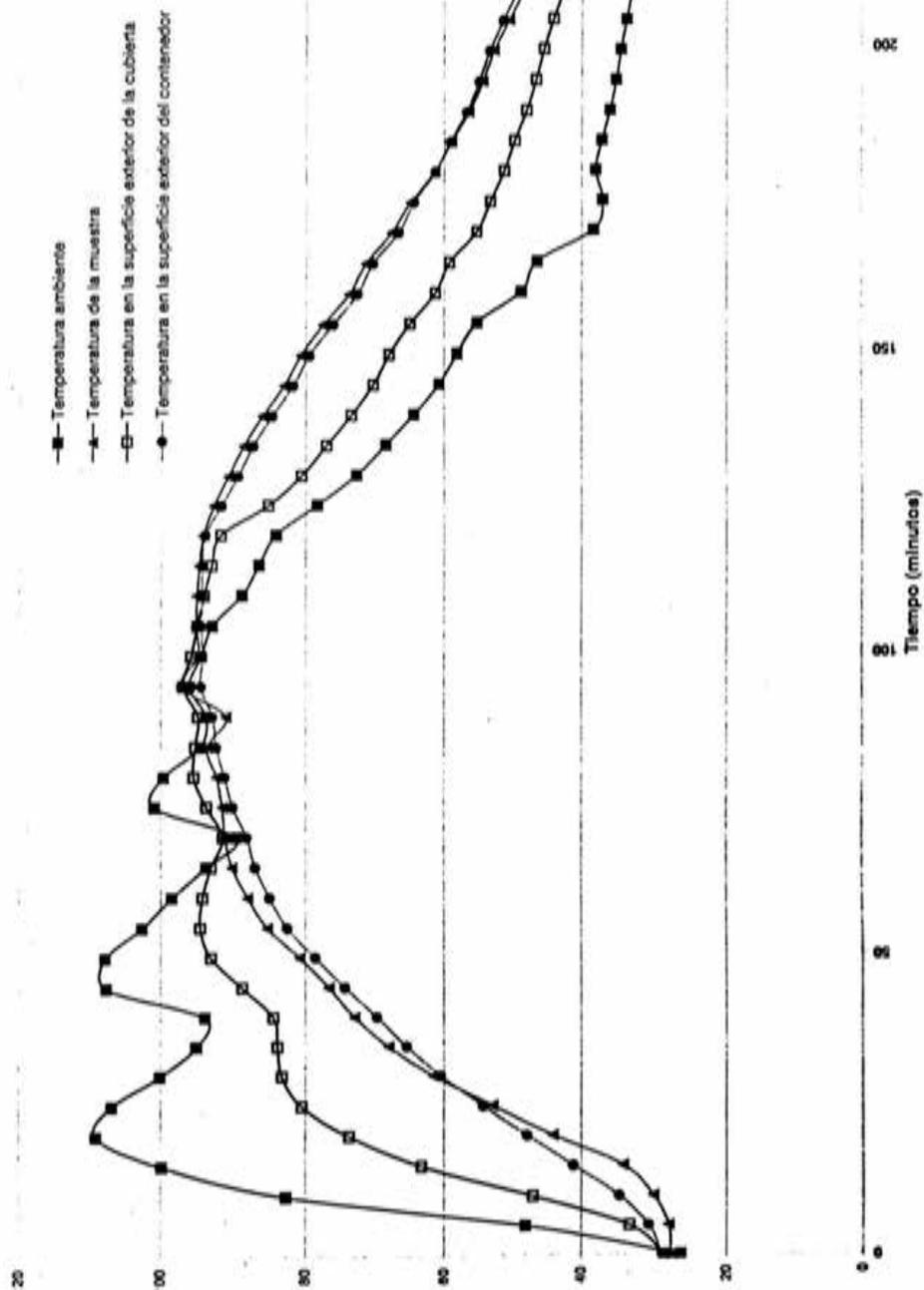
Se utiliza aire como aislante

Se utiliza una muestra de crudo de 0.8725 gr/cc

Resistencia del calentador de 60 y 120 ohm

Tiempo	Temp. amb. °C	Temp. de la muestra	Temp. de la sup. ext. de la cubierta	Temp. de la sup. int. de la cubierta	Temp. de la sup. Cent. ext. del contenedor	Voltaje del sensor de presión mV	Presión en el sensor Psi	Presión manom. Psi	Dif. De temperatura Tm-Text	Dif. De temperatura Tm-Tamb
0	23.54	27.4	28	27.98	29.61	117	8.31	125	-0.6	3.86
5	28.75	27.48	31.95	28.64	29.65	114	0	125	-4.47	-1.27
10	52.13	28.24	42.51	33.69	30.66	115	2.77	150	-14.27	-23.89
15	83.23	31.6	59.32	44.38	34	146	88.64	230	-27.72	-51.63
20	98.99	37.94	70.89	55.12	39.36	295	501.37	600	-32.95	-61.05
25	97.47	44.99	75.51	61.58	44.88	515	1110.77	1200	-30.52	-52.48
30	99.16	53.88	81.13	68.26	52.25	832	1988.86	2000	-27.25	-45.28
35	97.2	59.86	83.04	71.58	57.45	1058	2614.88	2625	-23.18	-37.34
42	90.79	68.14	83.57	75.69	65.05	1378	3501.28	3450	-15.43	-22.65
45	89.84	69.77	83.75	76.35	66.71	1446	3689.64	3600	-13.98	-20.07
50	103.21	73.85	89.95	81.1	71.2	1618	4166.08	4200	-16.1	-29.36
55	104.62	77.53	92.63	84.79	74.97	1760	4559.42	4400	-15.1	-27.09
60	95.6	86.62	93.24	88.9	84.23	2129	5581.55	5350	-6.62	-8.98
65	101.31	88.53	95.87	91.5	86.65	2218	5828.08	5600	-7.34	-12.78
70	98.28	90.67	95.88	92.88	88.96	2308	6077.38	5800	-5.21	-7.61
75	95.77	92.61	96.21	93.33	91.17	2392	6310.06	5950	-3.6	-3.16
80	100.7	93.42	98.03	94.91	92.38	2433	6423.63	6000	-4.61	-7.28
85	99.92	94.28	98.17	95.74	93.35	2469	6523.35	6050	-3.89	-5.64
90	99.67	101.51	100.12	100.11	102.28	2794	7423.6	7000	1.39	1.84
95	98.78	100.85	100.72	100.97	102.33	2793	7420.83	7000	0.13	2.07
100	95.95	100.84	99.81	100.61	102.23	2789	7409.75	7000	1.03	4.89
105	98.9	100.72	101.12	100.69	102.08	2783	7393.13	7000	-0.4	1.82
110	99.31	101	101.41	101.5	102.31	2791	7415.29	7000	-0.41	1.69
115	96.07	101.14	100.17	100.93	102.25	2792	7418.06	7000	0.97	5.07
120	98.61	101.74	101.02	101.05	102.2	2792	7418.06	7000	0.72	3.13
125	67.47	100.35	88.75	95.55	100.82	2755	7315.57	6950	11.6	32.88
130	49.68	97.05	80.47	87.74	97.62	2654	7035.8	6750	16.58	47.37
135	42.28	92.11	73.76	81.53	93.62	2499	6606.45	6400	18.35	49.83
140	37.84	86.97	67.9	75.67	88.57	2297	6046.91	5900	19.07	49.13
145	35.31	80.4	63.69	71.06	83.74	2103	5509.53	5300	16.71	45.09
150	34.04	76.45	60.79	67.93	80.18	1962	5118.96	5000	15.66	42.41
155	33.06	72.9	58.45	65.21	76.91	1834	4764.4	4700	14.45	39.84
160	32.1	68.71	55.76	62	72.96	1678	4332.28	4250	12.95	36.61
165	31.38	65.08	53.54	59.2	69.44	1539	3947.25	3900	11.54	33.7
170	30.92	61.88	51.59	56.75	66.26	1413	3598.23	3600	10.29	30.96
175	30.39	58.2	49.39	53.68	62.52	1267	3193.81	3200	8.81	27.81
180	30.15	56.42	48.21	52.49	60.67	1198	3002.68	2900	8.21	26.27
185	29.76	53.56	46.46	50.22	57.66	1082	2681.36	2650	7.1	23.8
190	29.57	51.84	45.36	48.88	55.84	1010	2481.92	2500	6.48	22.27
195	29.28	49.75	44.03	47.1	53.55	923	2240.93	2300	5.72	20.47
200	29.06	48.09	42.89	45.72	51.72	852	2044.26	2100	5.2	19.03
205	28.97	47.25	42.34	45.05	50.8	818	1950.08	2000	4.91	18.28

**Comportamiento de temperatura de una cámara de muestreo**  
Aceite de densidad 0.8692 gr/cc, R= 60 y 120, Vacío  
Experimento No. 10



**Experimento No. 10**

Temperatura de trabajo 100 °C

Se utiliza una camisa interior de aleación de titanio

Se utiliza una camisa exterior de aleación de titanio

Se utiliza vacío a 1x10<sup>-4</sup> torr

Se utiliza una muestra de crudo de 0.8892 gr/cc

Resistencia del calentador de 60 y 120 ohm

s0 s1 s3 s2

Tiempo	Temp. amb. °C	Temp. de la muestra	Temp. de la sup. ext. de la cubierta	Temp. de la sup. Cent. ext. del contenedor	Voltaje del sensor de presión mV	Presión en el sensor Psi	Presión manom. Psi	Dif. De temperaturas Tm-Text	Dif. De temperaturas Tm-Tamb
0	26.31	27.64	28.46	28.8	123	0	100	-0.82	1.33
5	47.88	27.91	33.26	30.62	118	-13.85	125	-5.35	-19.97
10	82.66	29.99	46.87	34.72	120	-8.31	150	-16.88	-52.67
15	99.88	34.14	63.38	41.13	150	74.79	200	-29.24	-65.74
20	109.19	43.99	73.89	47.68	237	315.78	450	-29.9	-65.2
25	106.98	52.63	80.46	54.12	471	963.96	1000	-27.83	-54.35
30	100.09	61.56	83.22	60.47	737	1700.78	1750	-21.66	-38.53
35	96.07	68.2	83.79	65.57	923	2216	2200	-15.59	-26.87
40	93.89	73.1	84.36	69.89	1069	2592.72	2500	-11.26	-20.79
45	107.73	76.74	88.7	74.51	1145	2830.94	2750	-11.96	-30.99
50	107.89	80.75	93.06	78.62	1246	3110.71	3000	-12.31	-27.14
55	102.62	85.23	94.55	82.5	1363	3434.8	3300	-9.32	-17.39
60	98.46	87.98	94.25	84.89	1441	3650.86	3500	-6.27	-10.48
65	93.75	90.15	93.07	86.95	1533	3905.7	3700	-2.92	-3.6
70	89.58	91.16	91.45	88.15	1592	4069.13	3900	-0.29	1.58
75	100.92	91.55	93.72	90.11	1629	4171.62	4000	-2.17	-9.37
80	99.66	92.33	95.46	91.21	1672	4290.73	4100	-3.13	-7.33
85	94.55	93.63	95.24	92.35	1730	4451.39	4220	-1.61	-0.92
90	93.78	91.01	94.86	92.89	1750	4506.79	4250	-3.85	-2.77
95	96.06	97.12	96.93	94.51	1783	4598.2	4300	0.19	1.06
100	94.44	94.89	95.81	94.28	1801	4648.06	4400	-0.92	0.45
105	92.9	95.1	94.95	94.39	1825	4714.54	4450	0.15	2.2
110	88.82	95.03	94.07	94.35	1820	4700.69	4450	0.96	6.21
115	86.43	94.7	92.98	94.31	1816	4689.61	4450	1.72	8.27
120	84.07	94.16	91.74	93.9	1804	4656.37	4450	2.42	10.09
125	78.39	92.7	85.12	91.62	1755	4520.64	4300	7.58	14.31
130	72.87	90.69	80.57	89.38	1688	4335.05	4150	10.12	17.82
135	68.65	88.57	77.12	87.23	1611	4121.76	4000	11.45	19.92
140	64.53	85.95	73.66	84.62	1513	3850.3	3700	12.29	21.42
145	60.74	83.03	70.46	81.77	1405	3551.14	3475	12.57	22.29
150	58.09	80.69	68.19	79.52	1317	3307.38	3200	12.5	22.6
155	54.99	77.58	65.08	76.2	1200	2983.29	2950	12.5	22.59
160	48.6	73.97	61.34	72.73	1066	2612.11	2500	12.63	25.37
165	46.34	71.53	59.18	70.53	975	2360.04	2450	12.35	25.19
170	38.41	67.8	55.01	66.72	840	1986.09	2000	12.79	29.39
175	37.14	65.04	52.98	64.52	741	1711.86	1650	12.06	27.9
180	38.09	61.41	50.99	61.36	610	1348.99	1400	10.42	23.32
185	37.19	58.86	49.5	59.04	515	1085.84	1150	9.36	21.67
190	36.07	56.22	47.85	56.6	411	797.76	900	8.37	20.15
195	35.2	54.12	46.51	54.68	337	592.78	700	7.61	18.92
200	34.53	52.42	45.39	53.06	212	246.53	550	7.03	17.89
205	33.7	50.26	44.03	51.07	191	188.36	275	6.23	16.56
210	33	48.13	42.61	49.07	117	-16.62	100	5.52	15.13

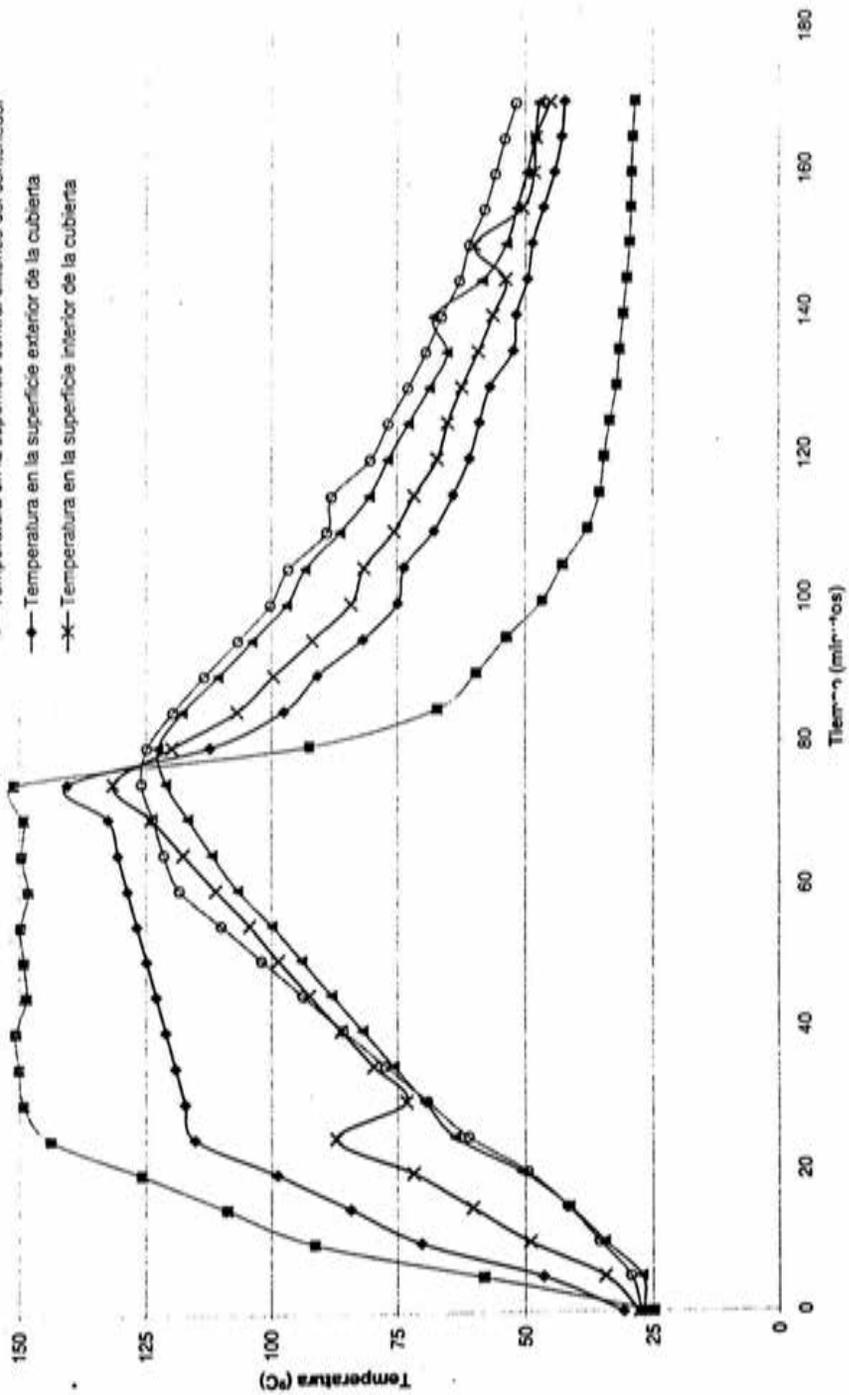
# Comportamiento de la temperatura en la cámara de muestreo

Aceite de densidad 0.8725 gr/cc, Aire, R=60 Ohm, T amb=150 °C

Experimento No. 11

175

- Temperatura ambiente
- ▲ Temperatura de la muestra
- Temperatura en la superficie central exterior del contenedor
- Temperatura en la superficie exterior de la cubierta
- × Temperatura en la superficie interior de la cubierta



180

Tiempo (minutos)

Experimento No.11

Temperatura de trabajo 150 °C

Se utiliza una camisa interior de aleación de titanio

Se utiliza una camisa exterior de acero 17-4Ph

Se utiliza aire como aislante

Se utiliza una muestra de crudo de 0.8725 gr/cc

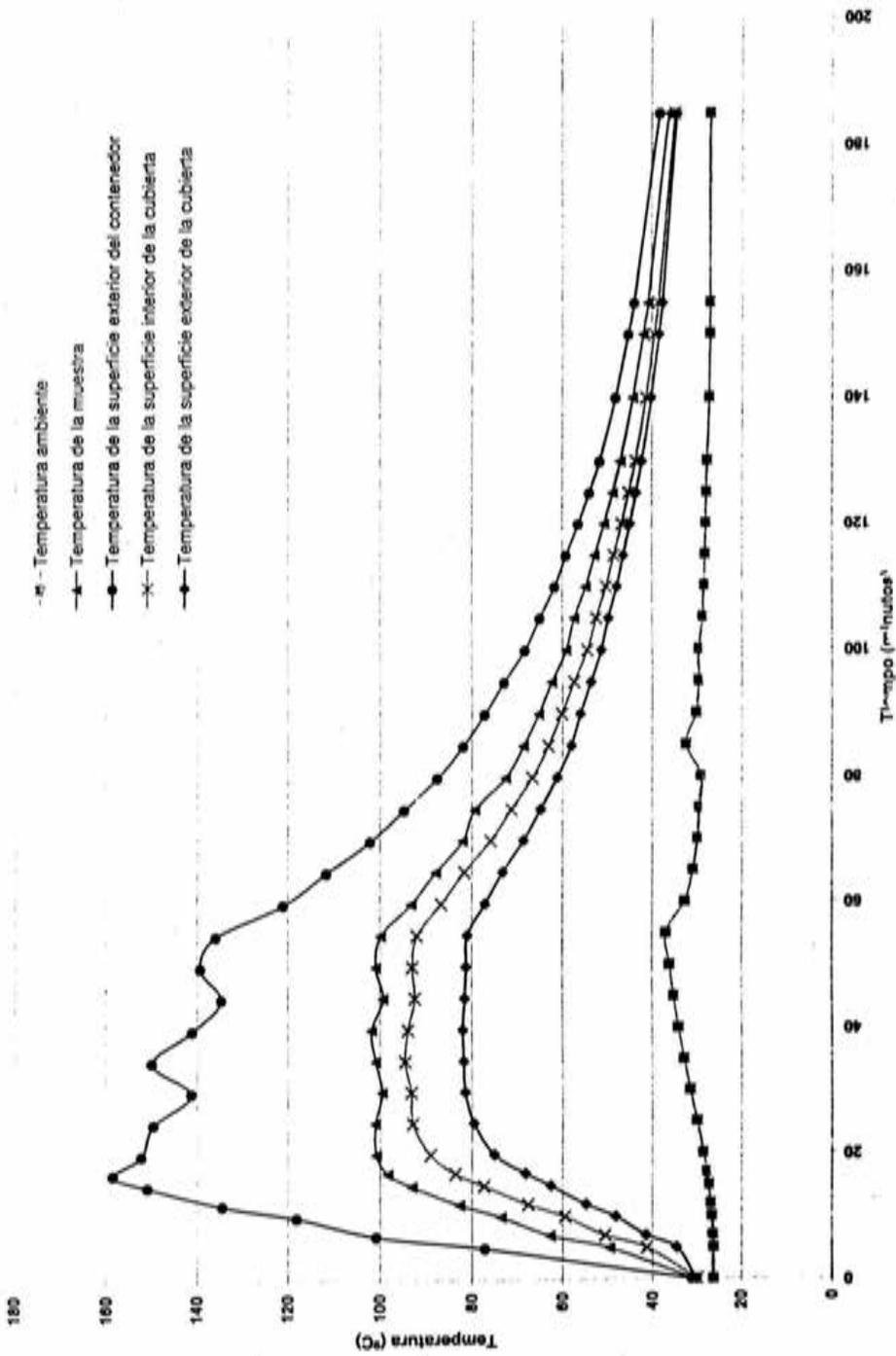
Resistencia del calentador de 60 ohm

Tiempo	Temp. amb. °C	Temp. de la muestra	Temp. de la sup. Cent. ext. del contenedor	Temp. de la sup. ext. de la cubierta	Temp. de la sup. int. de la cubierta	Voltaje del sensor de presión mV	Presión en el sensor PaI	Presión manom. PaI	Dif. De temperatura Tm-Text	Dif. De temperatura Tm-Tamb
0	24.85	26.76	27.36	30.74	27.61	103	0	100	-3.98	1.91
5	57.95	27.11	29.26	46.48	34.33	107	11.08	100	-19.37	-30.84
10	91.15	34.54	35.56	70.24	49.08	163	166.2	250	-35.7	-56.61
15	108.98	41.46	41.65	84.06	60.09	348	678.65	800	-42.6	-67.52
20	125.78	50.65	49.51	98.87	71.84	651	1517.96	1500	-48.22	-75.13
25	143.82	63.56	60.87	115.37	86.88	1121	2819.86	2750	-51.81	-80.26
30	149.17	69.69	69.09	117.27	73.22	1375	3523.44	3300	-47.58	-79.48
35	150.11	75.68	77.31	119.17	79.56	1629	4227.02	3800	-43.49	-74.43
40	150.72	81.75	85.53	121.07	85.9	1883	4930.6	4300	-39.32	-68.97
45	148.62	87.81	93.75	122.97	92.3	2130	5614.79	4900	-35.16	-60.81
50	149.12	93.88	101.97	124.87	98.64	2340	6196.49	5400	-30.99	-55.24
55	149.77	99.94	110.19	126.77	104.48	2640	7027.49	5900	-26.83	-49.83
60	148.3	106.91	118.41	128.67	111.32	2890	7719.99	6400	-21.76	-41.39
65	149.6	112.07	121.47	130.57	117.66	3450	9271.19	7800	-18.5	-37.53
70	149.11	116.78	123.69	132.54	124	3410	9160.39	8200	-15.76	-32.33
75	151.05	121.11	125.94	140.71	131.57	3580	9631.29	9100	-19.6	-29.94
80	92.35	122.67	124.91	112.48	119.96	3600	9686.69	9200	10.19	30.32
85	67.2	117.87	119.74	97.57	107.1	3430	9215.79	8700	20.3	50.67
90	59.41	110.86	113.61	90.71	99.61	3260	8744.89	7900	20.15	51.45
95	53.48	103.94	106.91	81.66	91.71	2470	6556.59	7200	22.28	50.46
100	46.63	96.96	100.22	74.85	83.94	2700	7193.69	6800	22.13	50.35
105	42.61	93.11	96.61	73.61	81.41	2490	6611.99	6400	19.5	50.5
110	37.81	86.11	88.67	67.76	75.53	2297	6077.38	5900	18.35	48.3
115	35.52	80.36	87.73	63.9	71.67	2103	5540	5000	16.46	44.84
120	34.61	76.78	80.18	60.69	67.06	1962	5149.43	4700	16.09	42.17
125	33.51	72.81	76.69	58.79	65.03	1834	4794.87	4250	14.02	39.3
130	32.18	68.66	72.91	56.79	62.21	1678	4362.75	3400	11.87	36.48
135	31.59	65.09	69.31	52.31	59	1596	4135.61	3600	12.78	33.5
140	30.86	67.76	66.16	51.76	56.2	1539	3977.72	3200	16	36.9
145	30.17	58.16	62.52	49.54	53.75	1413	3628.7	2900	8.62	27.99
150	29.61	53.64	60.66	48.59	59.68	1267	3224.28	2650	5.05	24.03
155	29.31	51.61	57.67	46.36	50.49	1198	3033.15	2500	5.25	22.3
160	29.11	49.68	55.66	44.21	48.22	1082	2711.83	2300	5.47	20.57
165	28.96	48.1	53.84	42.89	47.84	1010	2512.39	2100	5.21	19.14
170	28.5	47.28	51.72	42.34	45.1	923	2271.4	2000	4.94	18.78

# Comportamiento de temperatura de una cámara de muestreo

Aceite de densidad 0.925 gr/cc, papel cerámico, R=120 Ohm

Experimento No. 12



**Experimento No.12**

Temperatura de trabajo 25 °C ( se calienta el horno a 100°C)

Se utiliza una camisa interior de aleación de titanio

Se utiliza un camisa exterior de acero 17-4Ph

Se utiliza papel cerámico como aislante

Se utiliza una muestra de crudo de 0.925 gr/cc

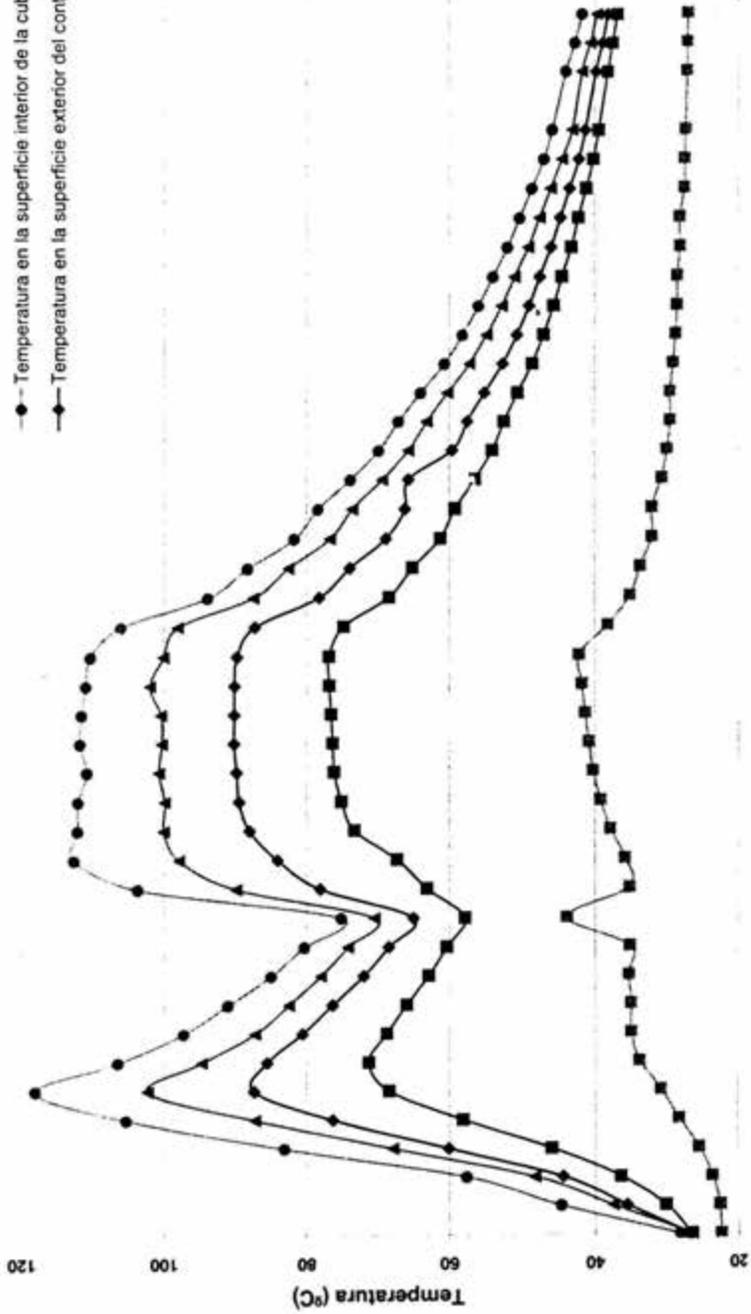
Resistencia del calentador de 120 ohm

Tiempo	Temp. amb. °C	Temp. de la muestra	Temp. de la sup. Cent. ext. del contenedor	Temp. de la sup. int. de la cubierta	Temp. de la sup. ext. de la cubierta	Voltaje del sensor de presión mV	Presión en el sensor Psi	Presión manom. Psi	Dif. De temperatura Tm-Text	Dif. De temperatura Tm-Tamb
0	26.44	30.86	31.58	30.43	30.66	99	0	50	-0.72	4.42
5	26.45	49.67	77.18	41.29	34.79	169	193.9	200	-27.51	23.22
7	26.56	62.85	100.85	50.69	41.54	280	501.37	400	-38	36.29
10	26.78	73.61	118.08	59.49	48.31	708	1686.93	1725	-44.47	46.83
12	27.09	82.64	134.45	67.64	54.88	1194	3033.15	3100	-51.81	55.55
15	27.59	93.06	150.74	77.4	62.75	1698	4429.23	4250	-57.68	65.47
17	28.03	98.26	158.48	83.58	68.25	1950	5127.27	4950	-60.22	70.23
20	28.9	100.76	152.05	89.06	75.1	2000	5265.77	5150	-51.29	71.86
25	30.35	100.98	149.4	92.88	79.55	1852	4855.81	4700	-48.42	70.63
30	31.82	99.46	141.21	93.2	81.4	1713	4470.78	4500	-41.75	67.64
35	33.16	100.88	149.73	94.53	81.74	1720	4490.17	4350	-48.85	67.72
40	34.37	101.8	141.05	93.93	81.95	1659	4321.2	4200	-39.25	67.43
45	35.34	99.31	134.69	92.44	81.54	1534	3974.95	3900	-35.38	63.97
50	36.21	100.9	139.25	92.95	81.23	1559	4044.2	3900	-38.35	64.69
55	37	99.81	135.94	91.97	80.98	1497	3872.46	3775	-36.13	62.81
60	33.02	93.19	121.01	86.7	77.11	1135	2869.72	2800	-27.82	60.17
65	31.28	87.85	111.78	81.64	73.26	853	2088.58	2050	-23.93	56.57
70	30.25	82.03	102.17	75.94	68.7	553	1257.58	1280	-20.14	51.78
75	29.73	79.33	94.77	71.34	64.91	315	598.32	650	-15.44	49.6
80	29.39	72.56	87.54	66.78	61.2	111	33.24	100	-14.96	43.17
85	32.77	68.66	81.92	63.21	58.04	95	-11.08	75	-13.26	35.89
90	30.53	65.39	77.28	60.21	56.06	92	-19.39	80	-11.89	34.86
95	30.02	62.41	73.01	57.42	53.71	91	-22.16	50	-10.6	32.39
100	29.95	59.15	68.4	54.5	51.42				-9.25	29.2
105	29	57.38	65.16	52.5	49.81				-7.78	28.38
110	28.57	54.81	61.78	50.35	47.83				-6.97	26.24
115	28.34	52.83	59.16	48.64	46.48				-6.33	24.49
120	28.07	50.73	56.46	46.82	44.9				-5.73	22.66
125	27.87	48.85	54.05	45.22	43.53				-5.2	20.98
130	27.68	47.03	51.74	43.67	42.22				-4.71	19.35
140	27.3	44.25	48.23	41.35	40.14				-3.98	16.95
150	27.15	41.91	45.29	39.44	38.44				-3.38	14.76
155	27.1	40.85	43.96	38.57	37.66				-3.11	13.75
185	26.9	36.27	38.24	34.95	34.47				-1.97	9.37

Experimento No. 13

140

- Temperatura ambiente
- ▲— Temperatura de la muestra
- Temperatura en la superficie exterior de la cubierta
- Temperatura en la superficie interior de la cubierta
- ◆— Temperatura en la superficie exterior del contenedor



0

50

100

150

200

250

Tiempo (minutos)

Temperatura (°C)

**Experimento No.13**

Temperatura de trabajo 25 °C

Se utiliza una camisa interior de acero tipo 316

Se utiliza una camisa exterior de aleación de titanio

Se utiliza aire como papel cerámico

Se utiliza una muestra de crudo de 0.8725 gr/cc

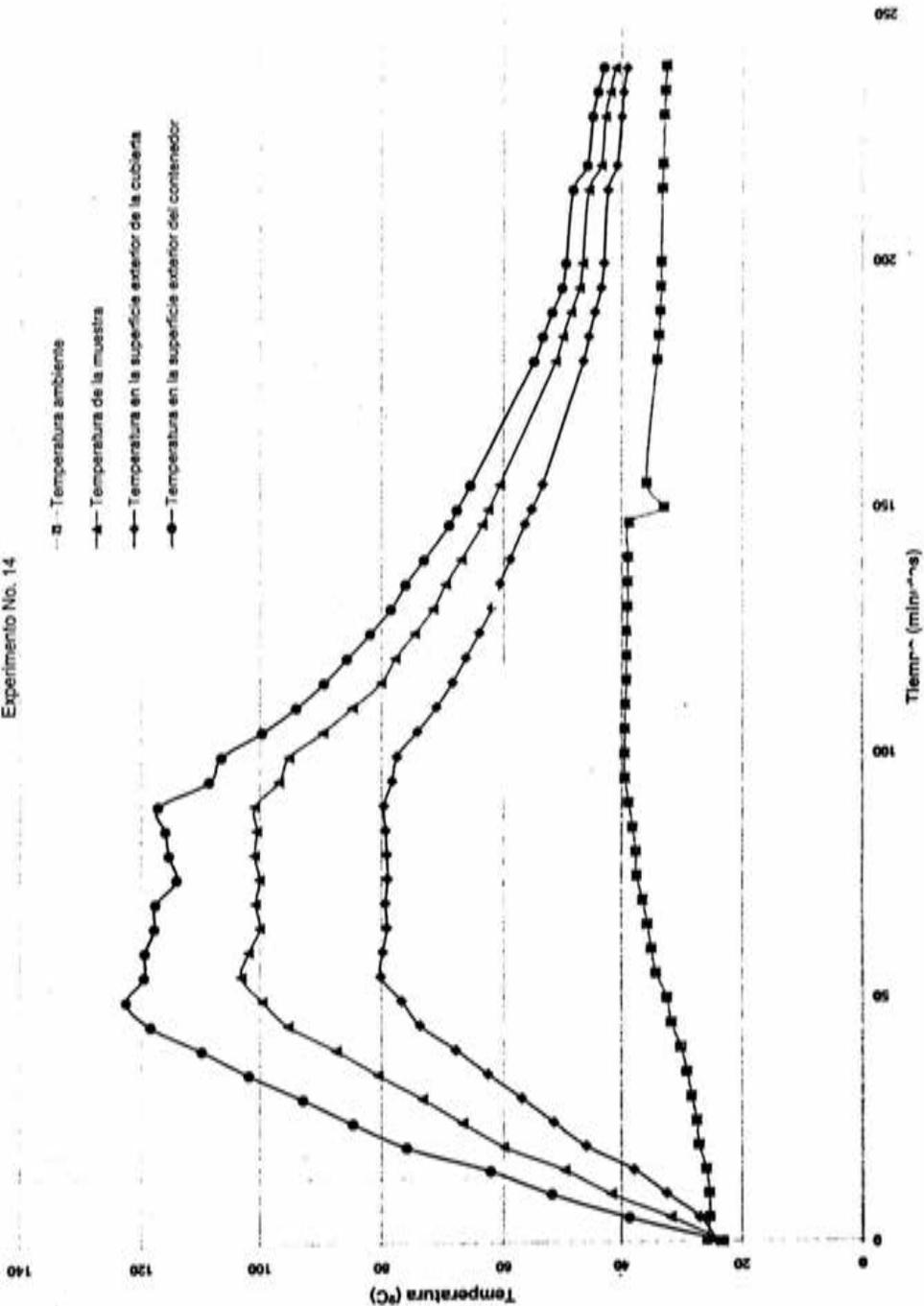
Resistencia del calentador de 60 y 120 ohm

Tiempo	Temp. amb. °C	Temp. de la muestra	Temp. de la sup. ext. de la cubierta	Temp. de la sup. int. de la cubierta	Temp. de la sup. Cent. ext. del contenedor	Voltaje del sensor de presión mV	Presión en el sensor Psi	Presión manom. Psi	Dif. De temperatura Tm-Text	Dif. De temperatura Tm-Tamb
0	22.4	26.4	26.56	28.1	26.71	125	0	100	-0.16	4
5	22.6	37.46	30.12	44.61	35.5	389	731.28	900	7.34	14.86
10	23.65	48.26	36.39	57.61	44.38	880	2091.35	2200	11.87	24.61
15	25.54	67.8	45.97	83.12	60.07	1730	4445.85	4500	21.83	42.26
20	28.36	87.25	58.13	105.26	76.28	2550	6717.25	6700	29.12	58.89
25	30.83	102.29	68.37	118.03	87.4	3089	8210.28	8000	33.92	71.46
30	33.81	94.65	71.25	106.43	85.58	2745	7257.4	7050	23.4	60.84
35	34.96	87.24	68.7	97.23	80.6	2410	6329.45	6200	18.54	52.28
40	34.94	82.55	65.9	91	76.34	2194	5731.13	5700	16.65	47.61
45	35.26	77.95	62.85	85.02	71.96	1986	5154.97	5050	15.1	42.69
50	35.08	74.18	60.35	80.31	68.42	1827	4714.54	4700	13.83	39.1
55	43.85	70.44	57.85	75.12	64.95	1669	4276.88	4250	12.59	26.59
60	35.09	89.88	63.09	103.68	78.08	2535	6675.7	6500	26.79	54.79
65	35.77	97.87	67.28	112.6	84.11	2830	7492.85	7300	30.59	62.1
70	37.83	100.01	73.24	112.07	88.03	2938	7792.01	7550	26.77	62.18
75	39.18	99.87	75.09	112.02	89.47	2913	7722.76	7450	24.78	60.69
80	40.2	100.67	76.11	110.78	89.81	2922	7747.69	7500	24.56	60.47
85	40.75	100.3	76.31	111.74	90.17	2913	7722.76	7500	23.99	59.55
90	41.29	100.41	76.51	111.52	90.14	2909	7711.68	7500	23.9	59.12
95	41.76	101.9	76.78	110.91	90.09	2917	7733.84	7500	25.12	60.14
100	42.12	100.05	76.79	110.28	89.75	2890	7659.05	7500	23.26	57.93
105	38.14	98.05	74.78	105.98	87.3	2801	7412.52	7200	23.27	59.91
110	35.05	87.46	68.35	93.78	78.18	2365	6204.8	6025	19.11	52.41
115	33.65	82.52	65.11	88.27	73.89	2167	5656.34	5500	17.41	48.87
120	32.04	76.65	61.22	81.74	68.82	1934	5010.93	4900	15.43	44.61
125	32.01	73.55	59.21	78.36	66.16	1800	4639.75	4600	14.34	41.54
130	30.63	69.36	56.45	73.8	65.66	1641	4199.32	4150	12.91	38.73
135	29.89	65.67	54.04	69.84	59.6	1489	3778.28	3750	11.63	35.78
140	29.43	63.13	52.42	67.07	57.5	1389	3501.28	3500	10.71	33.7
145	29.45	60.24	50.56	63.97	55.1	1273	3179.96	3200	9.68	30.79
150	29.03	57.19	48.53	60.68	52.6	1151	2842.02	2900	8.66	28.16
155	28.69	54.82	46.99	58.13	50.65	1054	2573.33	2600	7.83	26.13
160	28.49	52.75	45.61	55.92	48.95	970	2340.65	2400	7.14	24.26
165	28.45	50.94	44.46	53.96	47.48	897	2138.44	2175	6.48	22.49
170	28.03	49.07	43.16	51.94	45.94	822	1930.69	2000	5.91	21.04
175	28.07	47.52	42.15	50.26	44.64	758	1753.41	1800	5.37	19.45
180	27.43	45.96	41.09	48.58	43.35	693	1573.36	1675	4.87	18.53
185	27.36	44.43	40.08	46.92	42.09	631	1401.62	1500	4.35	17.07
190	27.27	43	39.35	45.8	41.22	585	1274.2	1400	3.65	15.73
200	27.06	41.66	38.1	43.9	39.75	516	1083.07	1200	3.56	14.6
205	27	40.51	37.37	42.65	38.82	469	952.88	1075	3.14	13.51
210	26.95	39.64	36.73	41.69	38.07	432	850.39	1000	2.91	12.69

# Comprtamiento de temperatura en la cámara de muestreo

Fluido: Aceite de densidad 0.925 gr/cc, R= 60 Ohm, Vacío

Experimento No. 14



**Experimento No.14**

Temperatura de trabajo 100 °C

Se utiliza una camisa interior de acero tipo 316

Se utiliza una camisa exterior de acero 17-4 Ph

Se utiliza vacío como aislante

Se utiliza una muestra de crudo de 0.925 gr/cc

Resistencia del calentador de 60 Ohm

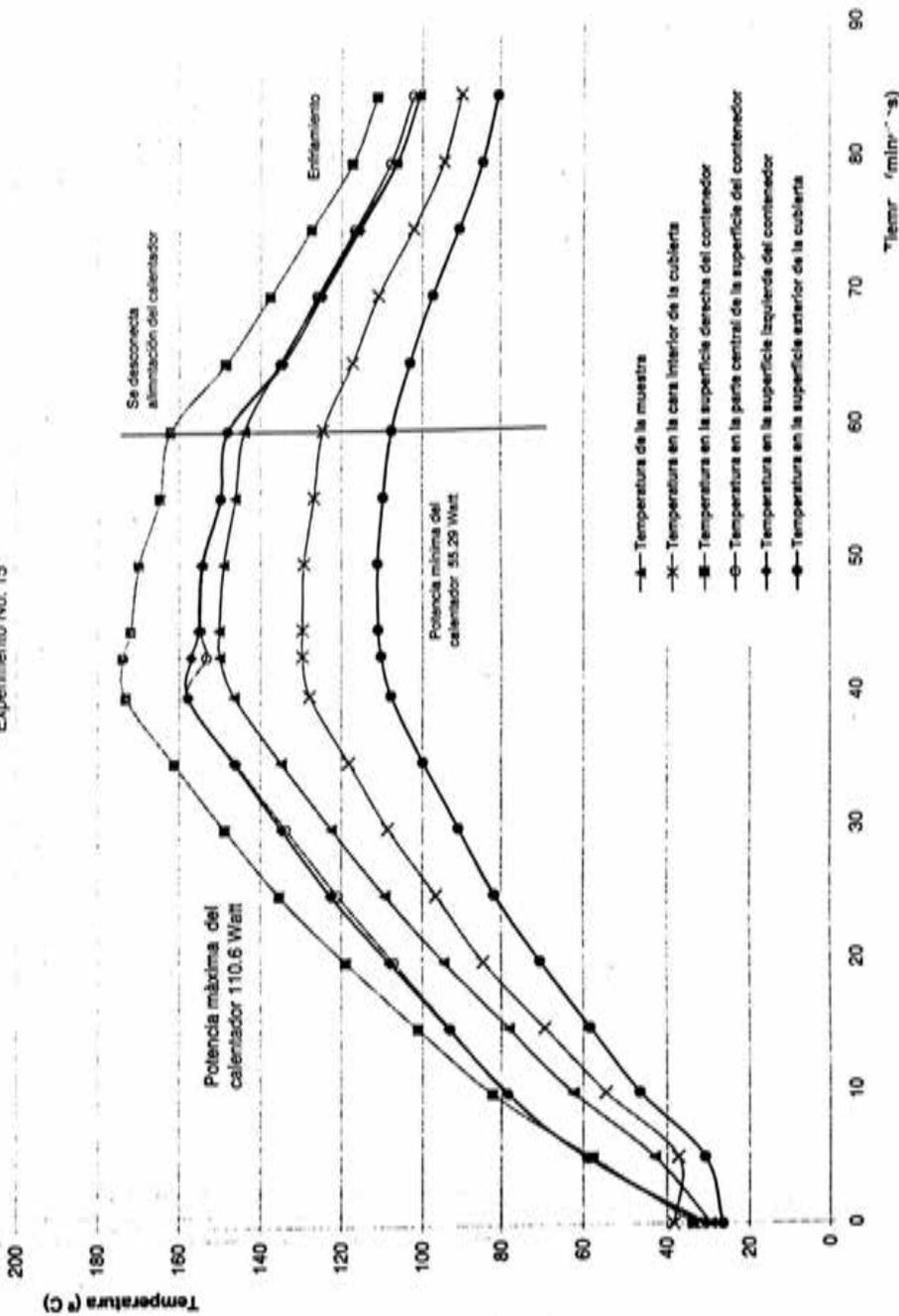
Tiempo	Temp. amb. °C	Temp. de la muestra	Temp. de la sup. ext. de la cubierta	Temp. de la sup. Cent. ext. del contenedor	Voltaje del sensor de presión mV	Presión en el sensor Psi	Presión manom. Psi	Dif. De temperatura Tm-Text	Dif. De temperatura Tm-Tamb
0	25.74	23.16	24.02	23.08	118	0	100	-0.86	-2.58
5	25.32	31.71	26.95	38.62	187	191.13	250	4.76	6.39
10	25.39	41.76	32.38	51.85	591	1310.21	1350	9.38	16.37
15	25.87	49.63	37.81	62.2	1013	2479.15	2500	11.82	23.76
20	27.09	59.91	45.99	75.84	1553	3974.95	3800	13.92	32.82
25	27.43	66.75	51.54	84.69	1887	4900.13	4600	15.21	39.32
30	28.3	73.28	56.87	92.89	2200	5767.14	5400	16.41	44.98
35	29.04	80.6	62.66	101.83	2535	6695.09	6200	17.94	51.56
40	30.09	87.42	67.88	109.79	2831	7515.01	6900	19.54	57.33
45	31.62	95.28	73.72	118.41	3458	9251.8	7800	21.56	63.66
50	32.35	99.56	76.68	122.63	3330	8897.24	8300	22.88	67.21
55	34.17	103.11	80.12	119.54	3389	9060.67	9000	22.99	68.94
60	34.94	101.86	79.79	119.41	3290	8786.44	8400	22.07	66.92
65	35.63	99.98	79.12	117.78	3210	8564.84	8100	20.86	64.35
70	36.41	100.66	79.31	117.57	3230	8620.24	8200	21.35	64.25
75	37.4	100.02	78.98	113.98	3171	8456.81	8100	21.04	62.62
80	37.58	100.85	79.09	115.3	3203	8545.45	8100	21.76	63.27
85	38.14	100.49	79.31	115.88	3205	8550.99	8100	21.18	62.35
90	38.8	100.83	79.6	117.14	3220	8592.54	8100	21.23	62.03
95	39.44	96.81	78.24	108.57	3000	7983.14	7700	18.57	57.37
100	39.47	95.16	77.44	106.53	2929	7786.47	7550	17.72	55.69
105	39.42	89.53	74.15	99.63	2679	7093.97	6700	15.38	50.11
110	39.36	84.75	71.06	94.01	2466	6503.96	6200	13.69	45.39
115	39.23	80.08	68.47	89.48	2298	6038.6	5700	11.61	40.85
120	39.2	77.77	66.3	85.68	2154	5639.72	5400	11.47	38.57
125	39.15	74.6	64.1	81.9	2008	5235.3	5000	10.5	35.45
130	38.96	71.6	62.05	78.46	1885	4894.59	4750	9.55	32.62
135	38.96	69.55	60.64	76.05	1795	4645.29	4450	8.91	30.59
140	38.89	67.04	58.87	73.08	1680	4326.74	4200	8.17	28.15
147	38.63	63.59	56.42	68.98	1525	3897.39	3800	7.17	24.96
150	32.76	62.58	55.31	67.74	1481	3775.51	3650	7.27	29.82
155	35.71	60.6	53.52	65.53	1395	3537.29	3450	7.08	24.89
180	33.94	51.37	46.57	54.99	984	2398.82	2400	4.8	17.43
185	33.64	50.1	45.63	53.53	927	2240.93	2200	4.47	16.46
190	33.44	48.73	44.63	51.93	862	2060.88	2075	4.1	15.29
195	33.32	47.27	43.56	50.25	800	1889.14	1900	3.71	13.95
200	33.28	46.68	43.12	49.57	773	1814.35	1850	3.56	13.4
215	33.09	45.67	42.38	48.37	726	1684.16	1750	3.29	12.58
220	32.91	43.56	40.79	45.9	631	1421.01	1500	2.77	10.85
230	32.74	42.88	40.01	45.01	600	1335.14	1400	2.87	10.14
235	32.58	42.06	39.68	44.14	563	1232.65	1300	2.38	9.48
240	32.45	41.2	39.05	43.13	524	1124.62	1150	2.15	8.75
245	32.29	40.5	38.51	42.31	492	1035.98	1100	1.99	8.21

Comportamiento de temperatura en la cámara de muestreo  
con variación de la resistencia

150.2 °C Temperatura máxima de prueba

Fluido: Aceite ligero, densidad 0.8892 gr/cc ( 22.79 °API)

Experimento No. 15



Prueba combinada T ambiente máx= 150.2 °C

Experimento No. 15

Prueba a 150 °C

Se utiliza una contenedor de acero inoxidable tipo 316

Se utiliza una camisa exterior de acero 17-4 Ph

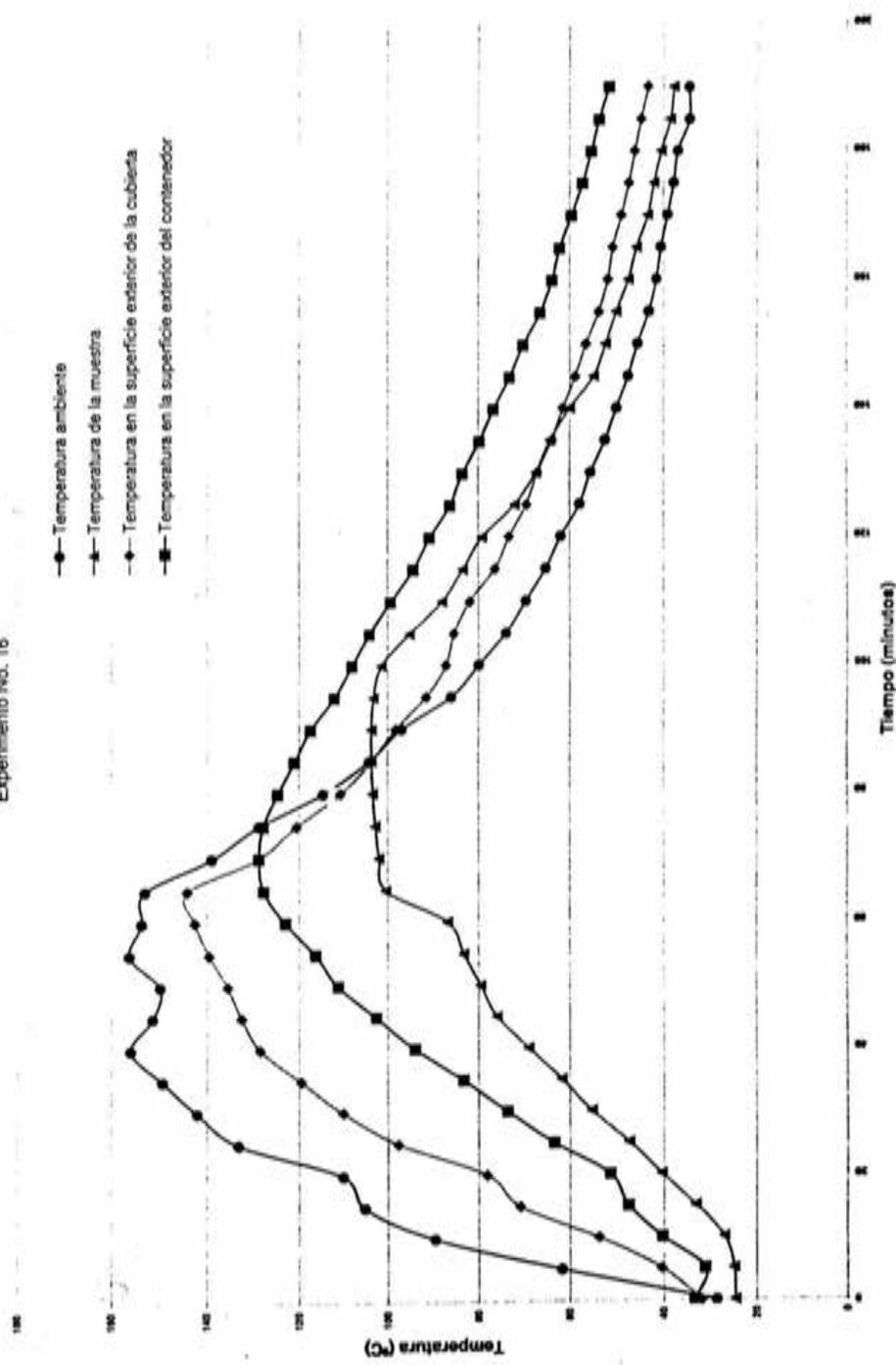
Se utiliza aire como aislante

Se utiliza una muestra de crudo de densidad 0.8892 gr/cc ( 22.79 ° API)

Hora	Tiempo (Minutos)	Temperatura del medio amb.	Temperatura de la muestra	ST-3	ST-4	ST-5	ST-6	
11:30	0	29.45	38.2	33.7	31.8	30.57	26.8	
	5	42.8	37.2	67.7	58.9	58.9	30.8	
	10	62.2	54.6	82.2	78.4	78.1	46.4	
	15	78	69	101.1	83	83.4	58.4	Potencia
	20	94.6	84.6	118.9	107.1	108.2	70.1	110.6 Watts
	25	109.3	96.6	135.3	120.8	122.5	81.7	
12:00	30	122.4	106.7	148.8	133.6	134.7	90.9	R= 120 Ohm
	35	134.8	118.2	161.2	146	146.4	99.9	I=0.960 A
	40	146.5	127.8	173.1	167.9	167.8	107.9	
	43	150	129.6	173.8	153.3	167.03	110.38	
	45	150.2	129.6	171.95	154.7	155.3	111.08	
	50	149.1	129.2	169.9	154.1	154.4	111.2	
	55	146.3	126.7	164.8	149.8	149.9	109.8	Potencia
12:30	60	144	124.5	162.2	148.2	148.1	107.7	55.3 Watts
	65	135.1	117.3	148.6	135	134.3	103.1	
	70	125.4	110.9	137.6	125.9	124.7	97.4	R=60 Ohm
	75	116.2	102.2	127.3	116.8	115.6	90.5	I=0.960 A
	80	106.5	94.5	117.3	107.9	106.3	84.5	
12:55	85	100.7	89.9	111.2	102.3	100.7	80.5	

Dif de Temperaturas Tmuest-Text	Dif de Temperaturas Tmuest-Tamb
7.63	8.75
-21.7	-5.6
-23.5	-7.6
-24.4	-8
-23.6	-10
-25.9	-12.7
-26	-13.7
-28.2	-16.6
-30	-18.7
-27.43	-20.4
-25.7	-20.6
-25.2	-19.9
-23.2	-19.6
-23.6	-19.5
-17	-17.8
-13.8	-14.5
-13.3	-14
-11.8	-12
-10.8	-10.8

Comportamiento de temperatura de una cámara de muestreo  
Aceite de densidad 0.8725 gr/cc, R= 120, Vecio  
Experimento No. 16



**Experimento No. 16**

Temperatura de trabajo 100 °C

Se utiliza una camisa interior de aleación de titanio

Se utiliza una camisa exterior de aleación de titanio

Se utiliza vacío a 1x10<sup>-4</sup> torr

Se utiliza una muestra de crudo de 0.8725 gr/cc

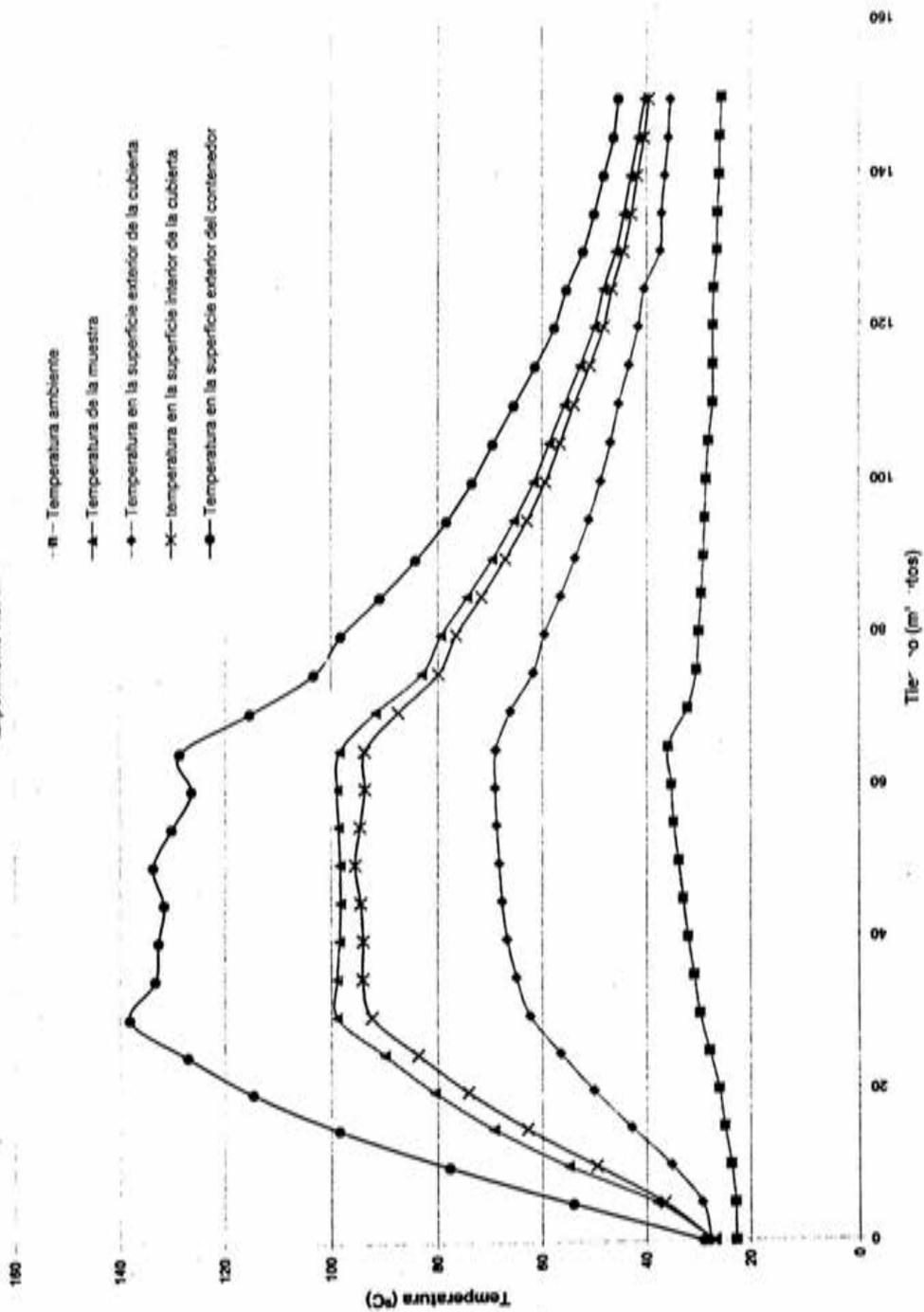
Resistencia del calentador de 120 ohm

s0 s1 s3 s2

Tiempo	Temp. amb. °C	Temp. de la muestra	Temp. de la sup. ext. de la cubierta	Temp. de la sup. Cent. ext. del contenedor	Voltaje del sensor de presión mV	Presión en el sensor Psi	Presión manom. Psi	Dif. De temperaturas Tm-Text	Dif. De temperaturas Tm-Tamb
0	28.64	24.55	31.88	33.35	123	0	100	-7.33	-4.09
5	61.73	24.78	40.46	31.16	123	0	150	-15.68	-36.95
10	89.62	26.94	53.9	40.3	152	80.33	200	-26.96	-62.68
15	106.32	33.22	70.92	47.59	354	639.87	700	-37.7	-72.1
20	110.18	40.43	78.09	51.42	496	1033.21	1100	-37.66	-69.75
25	133.21	47.42	97.65	63.47	964	2329.57	2300	-50.23	-85.79
30	142.04	55.35	110.18	73.58	1388	3504.05	3400	-54.83	-86.69
35	149.33	61.75	119.5	83.34	1812	4678.53	4450	-57.75	-87.58
40	155.98	68.99	128.4	93.93	2265	5933.34	5500	-59.41	-86.99
45	151.44	75.9	132.56	102.67	2610	6888.99	6550	-56.66	-75.54
50	149.91	79.5	135.56	111.26	3054	8118.87	7500	-56.06	-70.41
55	156.31	83.31	139.51	116.36	3246	8650.71	8000	-56.2	-73
60	153.8	86.82	142.55	122.98	3540	9465.09	8700	-55.73	-66.98
65	153.1	100.39	144.16	127.7	3740	10019.09	9200	-43.77	-52.71
70	139	101.94	128.88	128.73	3880	10406.89	9600	-26.94	-37.06
75	128.8	102.79	120.59	127.8	3890	10434.59	9620	-17.8	-26.01
80	114.75	103.37	110.77	124.62	3810	10212.99	9500	-7.4	-11.38
85	104.24	103.71	103.68	121.03	3680	9852.89	9175	0.03	-0.53
90	96.94	103.68	98.26	117.53	3550	9492.79	8820	5.42	6.74
95	86.08	103.25	91.6	112.23	3320	8855.69	8300	11.65	17.17
100	79.94	101.42	87.17	108.24	3170	8440.19	7900	14.25	21.48
105	73.94	95.2	85.41	104.21	2940	7803.09	7400	9.79	21.26
110	69.57	88.09	81.98	99.41	2760	7304.49	6900	6.11	18.52
115	65.22	83.48	76.35	94.4	2555	6736.64	6400	7.13	18.26
120	61.92	79.19	73.29	90.85	2408	6329.45	6000	5.9	17.27
125	57.9	72.02	69.43	86.35	2222	5814.23	5550	2.59	14.12
130	55.58	67.4	67.05	83.64	2109	5501.22	5250	0.35	11.82
135	52.43	64.21	63.9	79.8	1947	5052.48	4850	0.31	11.78
140	50.04	60	61.49	76.7	1818	4695.15	4500	-1.49	9.96
145	47.55	54.95	58.81	73.22	1671	4287.96	4150	-3.86	7.4
150	45.49	52.36	56.56	70.21	1545	3938.94	3810	-4.2	6.87
155	43.13	50.09	53.81	66.47	1383	3490.2	3400	-3.72	6.96
160	41.46	47.41	51.82	63.8	1273	3185.5	3100	-4.41	5.95
165	40.51	45.67	50.84	62.21	1206	2999.91	3000	-5.17	5.16
170	39.06	43.29	48.95	59.66	1098	2700.75	2975	-5.66	4.23
175	37.77	41.97	47.38	57.3	992	2407.13	2400	-5.41	4.2
180	36.85	40.41	46.11	55.49	922	2213.23	2200	-5.7	3.56
185	34.33	38.5	44.76	53.81	853	2022.1	2000	-6.26	4.17
190	34.41	37.72	43.36	51.69	762	1770.03	1800	-5.64	3.31

# Comportamiento de temperatura de una cámara de muestreo Aceite de densidad 0.925 gr/cc, Aire, R= 60 y 120 Ohm

Experimento No. 17



**Experimento No.17**

Temperatura de trabajo 150 °C

Se utiliza una camisa interior de aleación de titanio

Se utiliza una camisa exterior de acero 17-4Ph

Se utiliza aire como aislante

Se utiliza una muestra de crudo de 0,925 gr/cc

Resistencia del calentador de 60 y 120 ohm

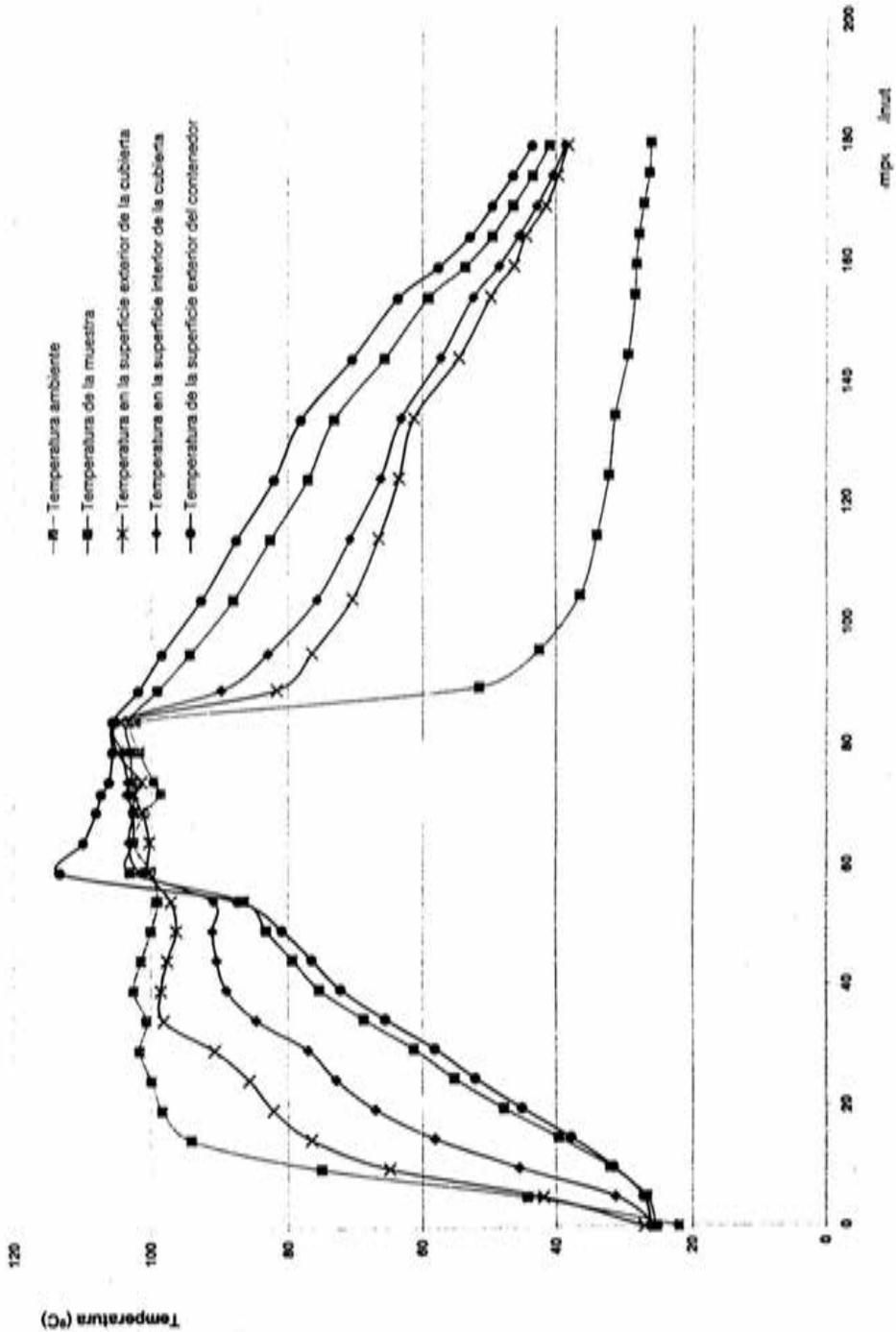
s4 s3 s2°

tiempo	Temp. amb. °C	Temp. de la muestra	Temp. de la sup. ext. de la cubierta	Temp. de la sup. int. de la cubierta	Temp. de la sup. Cent. ext. del contenedor	Voltaje del sensor de presión mV	Presión en el sensor Psi	Presión manom. Psi	Dif. De temperaturas Tm-Text	Dif. De temperaturas Tm-Tamb
0	22.64	26.58	27.39	26.86	28.75	139	0	100	-0.81	3.94
5	22.74	37.91	29.01	36.49	53.96	669	1468.1	1600	8.9	15.17
10	23.54	54.87	35.16	49.57	77.7	1624	4113.45	3850	19.71	31.33
15	24.77	69.13	42.9	62.73	98.4	2367	6171.56	5950	26.23	44.36
20	25.81	80.54	50.11	74.11	114.56	2942	7764.31	7500	30.43	54.73
25	27.63	89.87	56.41	83.64	127.16	3370	8949.87	8600	33.46	62.24
30	29.45	98.77	62.28	92.32	138.11	3760	10030.17	9600	36.49	69.32
35	30.61	98.79	64.91	93.98	133.3	3710	9891.67	9650	33.88	68.18
40	31.76	98.3	66.64	93.97	132.7	3680	9808.57	9650	31.66	66.54
45	32.77	98.12	67.67	94.4	131.62	3660	9753.17	9650	30.45	65.35
50	33.69	98.23	68.18	95.41	133.71	3670	9780.87	9650	30.05	64.54
55	34.76	98.51	68.67	94.57	130.26	3630	9670.07	9650	29.84	63.75
60	35.21	98.8	68.92	93.68	126.42	3600	9586.97	9600	29.88	63.59
65	35.82	98.31	68.86	93.67	128.69	3570	9503.87	9400	29.45	62.49
70	31.95	91.65	66.02	87.5	115.33	3250	8617.47	8550	25.63	59.7
75	30.19	83.06	61.72	79.91	103.31	2850	7509.47	7500	21.34	52.87
80	29.76	79.42	59.62	76.49	98.14	2670	7010.87	6900	19.8	49.66
85	29.22	74.31	56.5	71.55	90.91	2420	6318.37	6200	17.81	45.09
90	28.79	69.49	53.67	66.96	84.23	2189	5678.5	5550	15.82	40.7
95	28.51	65.25	51.06	62.85	78.35	1976	5088.49	5000	14.19	36.74
100	28.27	61.58	48.84	59.36	73.34	1799	4598.2	4550	12.74	33.31
105	27.85	58.64	46.97	56.55	69.32	1654	4196.55	4200	11.67	30.79
110	27.06	55.72	45.41	53.86	65.33	1304	3227.05	3700	10.31	28.66
115	26.96	52.72	43.41	50.86	61.33	1364	3393.25	3450	9.31	25.76
120	27.02	50.01	41.67	48.27	57.64	1231	3024.84	3100	8.34	22.99
125	26.85	48.3	40.51	46.66	55.36	1146	2789.39	2850	7.79	21.45
130	26.26	45.95	37.35	44.46	52.18	1030	2468.07	2550	8.6	19.69
135	26.17	44.38	37.05	42.99	50.08	952	2252.01	2350	7.33	18.21
140	25.82	43.05	36.32	41.74	48.28	886	2069.19	2150	6.73	17.23
145	25.68	41.63	35.58	40.42	46.39	798	1825.43	1950	6.05	15.95
150	25.32	40.31	35.18	39.46	45.46	777	1767.26	1900	5.13	14.99

# Comportamiento de temperatura en la cámara de muestreo

Fluido: Aceite de densidad 0.8892 gr/cc, R= 60 ohm, Papel cerámico

Experimento No. 18



**Experimento No.18**

Temperatura de trabajo 100 °C

Se utiliza una camisa interior de titanio

Se utiliza una camisa exterior de acero inox. Tipo 17-4Ph

Se utiliza como aislante térmico: papel cerámico

Se utiliza una muestra de crudo de 0.8892 gr/cc

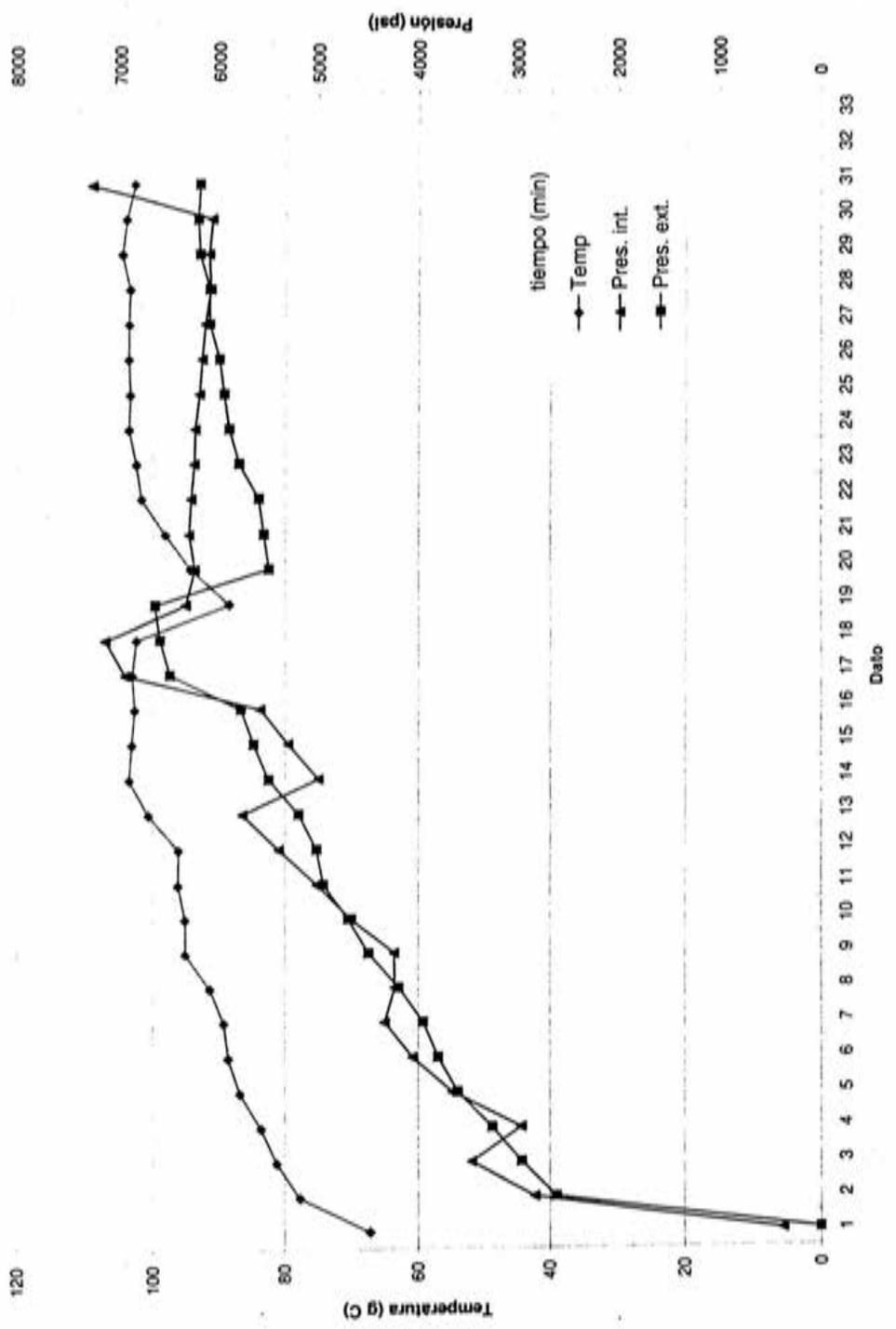
Resistencia del calentador de 60 ohm

s4                      s3                      s2°

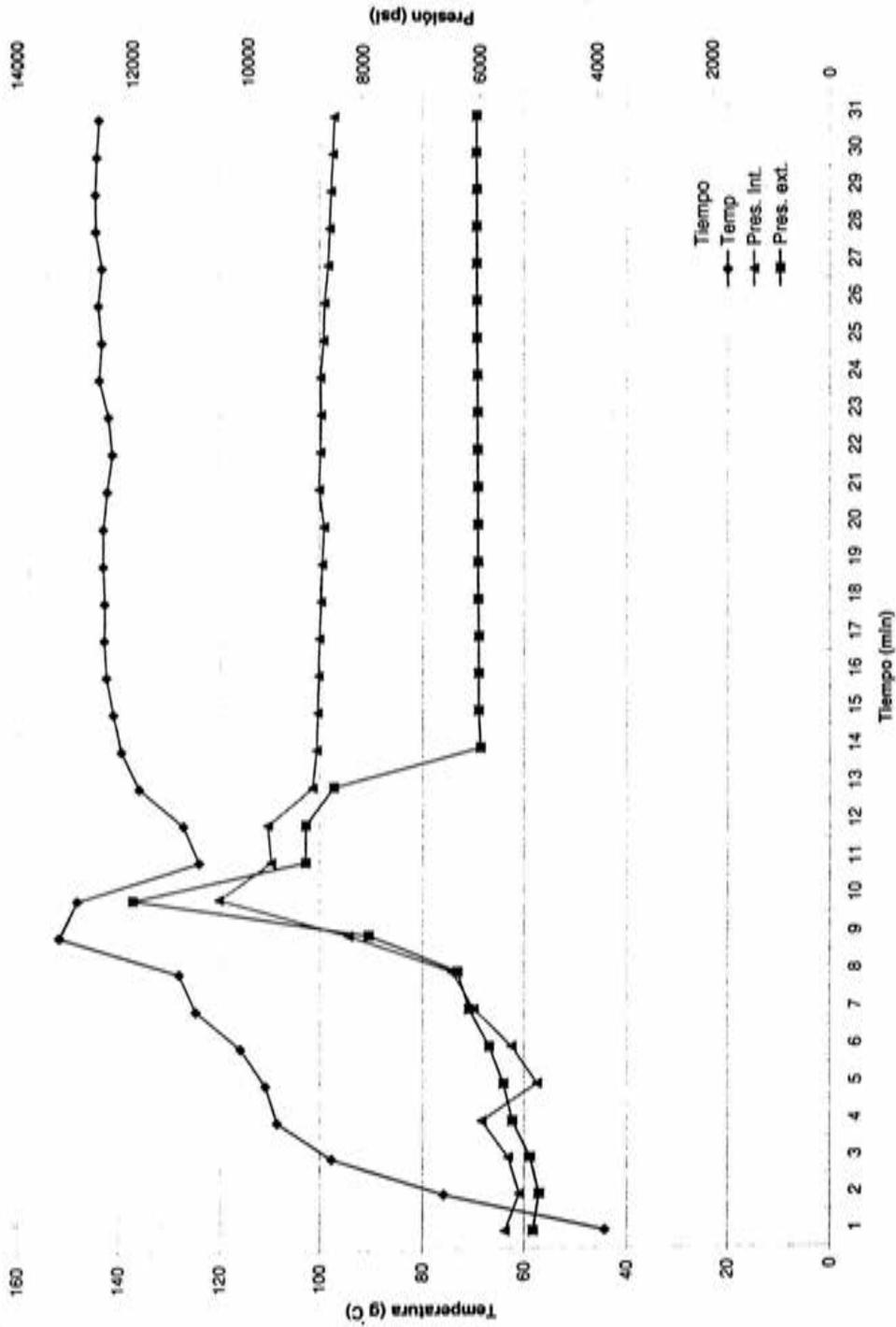
Tiempo	Temp. amb. °C	Temp. de la muestra	Temp. de la sup. ext. de la cubierta	Temp. de la sup. int. de la cubierta	Temp. de la sup. Cent. ext. del contenedor	Voltaje del sensor de presión mV	Presión en el sensor Psi	Presión manom. Psi	Dif. De temperaturas Tm-Text	Dif. De temperaturas Tm-Tamb
0	22.1	25.59	27.28	25.37	26.22	88	13.85	50	-1.69	3.49
5	44.31	26.98	41.95	31.47	27.4	84	2.77	50	-14.97	-17.33
10	75.06	32.21	64.86	45.46	31.76	83	0	70	-32.65	-42.85
15	93.99	39.64	76.54	58.19	37.86	0	-229.91	50	-36.9	-54.35
20	98.28	47.823	82.13	66.98	45.09	169	238.22	300	-34.307	-50.457
25	99.88	55.26	85.66	72.88	52.14	428	955.65	950	-30.4	-44.62
30	101.68	61.3	90.71	77.08	58.18	657	1589.98	1500	-29.41	-40.38
35	100.73	68.69	98.12	84.69	65.52	952	2407.13	2300	-29.43	-32.04
40	102.63	75.37	98.56	88.98	72.21	1217	3141.18	3000	-23.19	-27.26
45	101.52	79.38	97.62	90.4	76.53	1390	3620.39	3450	-18.24	-22.14
50	100.02	83.28	96.26	91.03	80.9	1570	4118.99	3900	-12.98	-16.74
55	99.05	86.46	97.05	90.89	87.38	1753	4625.9	4400	-10.59	-12.59
60	100.06	103.23	100.37	101.56	113.52	2674	7177.07	6700	2.86	3.17
65	102.74	102.77	100.31	103.37	110.05	2658	7132.75	6750	2.46	0.03
70	100.95	102.65	101.39	102.83	108.14	2576	6905.61	6450	1.26	1.7
73	98.58	102.76	102.66	103.66	107.4	2539	6803.12	6450	0.1	4.18
75	99.63	102.92	101.49	103.52	106.25	2516	6739.41	6400	1.43	3.29
80	101.7	103.15	105	104.33	105.76	2502	6700.63	6300	-1.85	1.45
85	102.33	103.6	104.58	104.98	105.74	2503	6703.4	6300	-0.98	1.27
90	51.59	99.03	81.65	89.72	101.98	2417	6465.18	6050	17.38	47.44
96	42.56	94.26	76.45	82.94	98.42	2299	6138.32	5850	17.81	51.7
105	36.53	87.96	70.33	75.66	92.61	2093	5567.7	5300	17.63	51.43
115	34.04	82.59	66.41	70.69	87.53	1894	5016.47	4800	16.18	48.55
125	32.31	77	63.36	66.1	82.01	1681	4426.46	4300	13.64	44.69
135	31.44	73.04	61.19	63.06	78.04	1529	4005.42	3900	11.85	41.6
145	29.58	65.55	54.59	57.29	70.37	1240	3204.89	3100	10.96	35.97
155	28.58	59.1	49.85	52.49	63.57	975	2470.84	2450	9.25	30.52
160	28.34	53.66	46.26	48.52	57.68	752	1853.13	1900	7.4	25.32
165	27.95	49.58	44.52	45.56	52.96	55	-77.56	1300	5.06	21.63
170	27.23	46.38	41.52	42.88	49.6	441	991.66	1000	4.86	19.15
175	26.4	43.51	39.7	40.51	46.45	321	659.26	700	3.81	17.11
180	26.19	40.96	38.2	38.55	43.62	212	357.33	450	2.76	14.77

*Gráficas de experimentos de la  
optimización de la válvula de admisión*

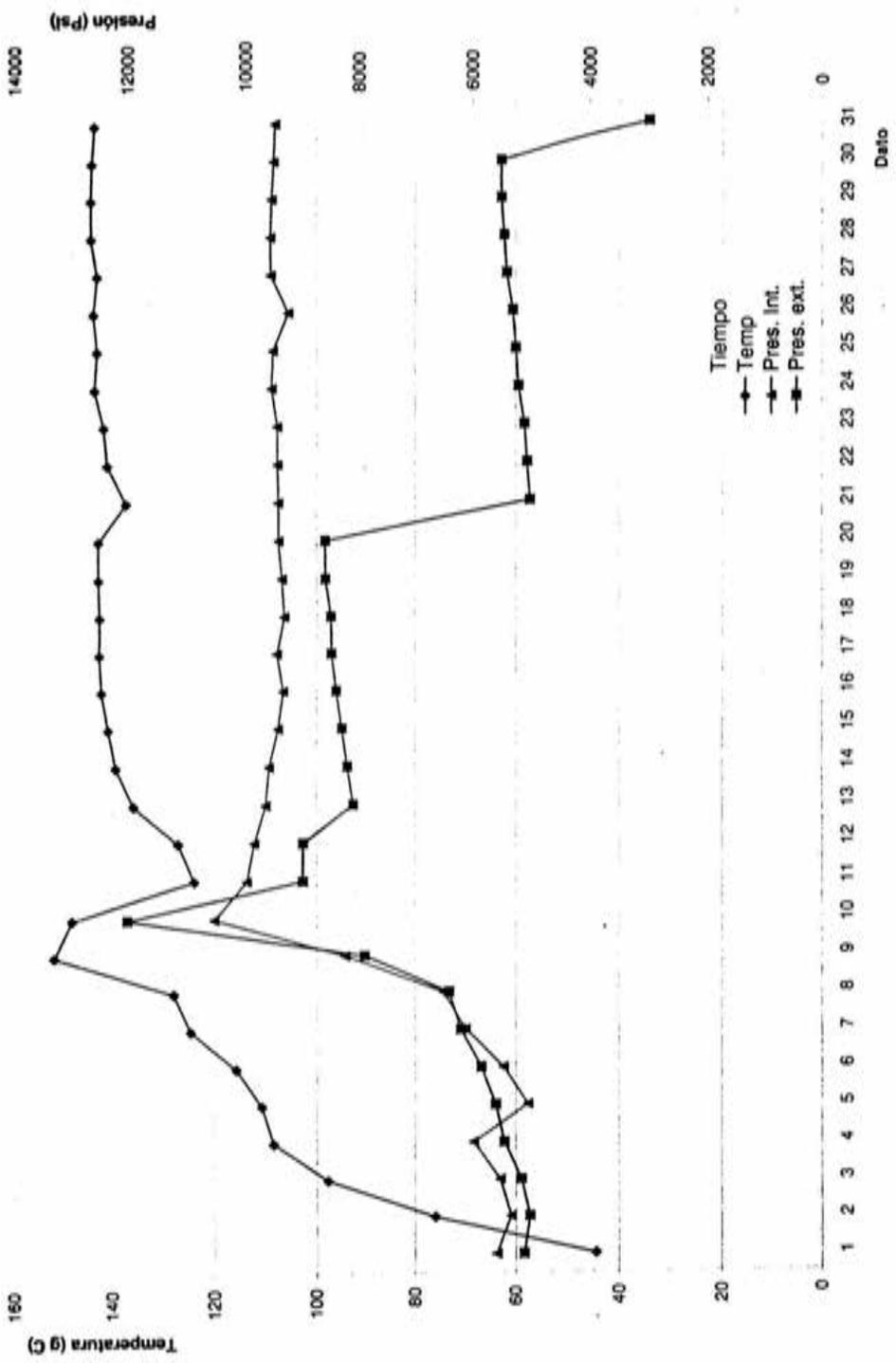
Experimento de la válvula  
1-2



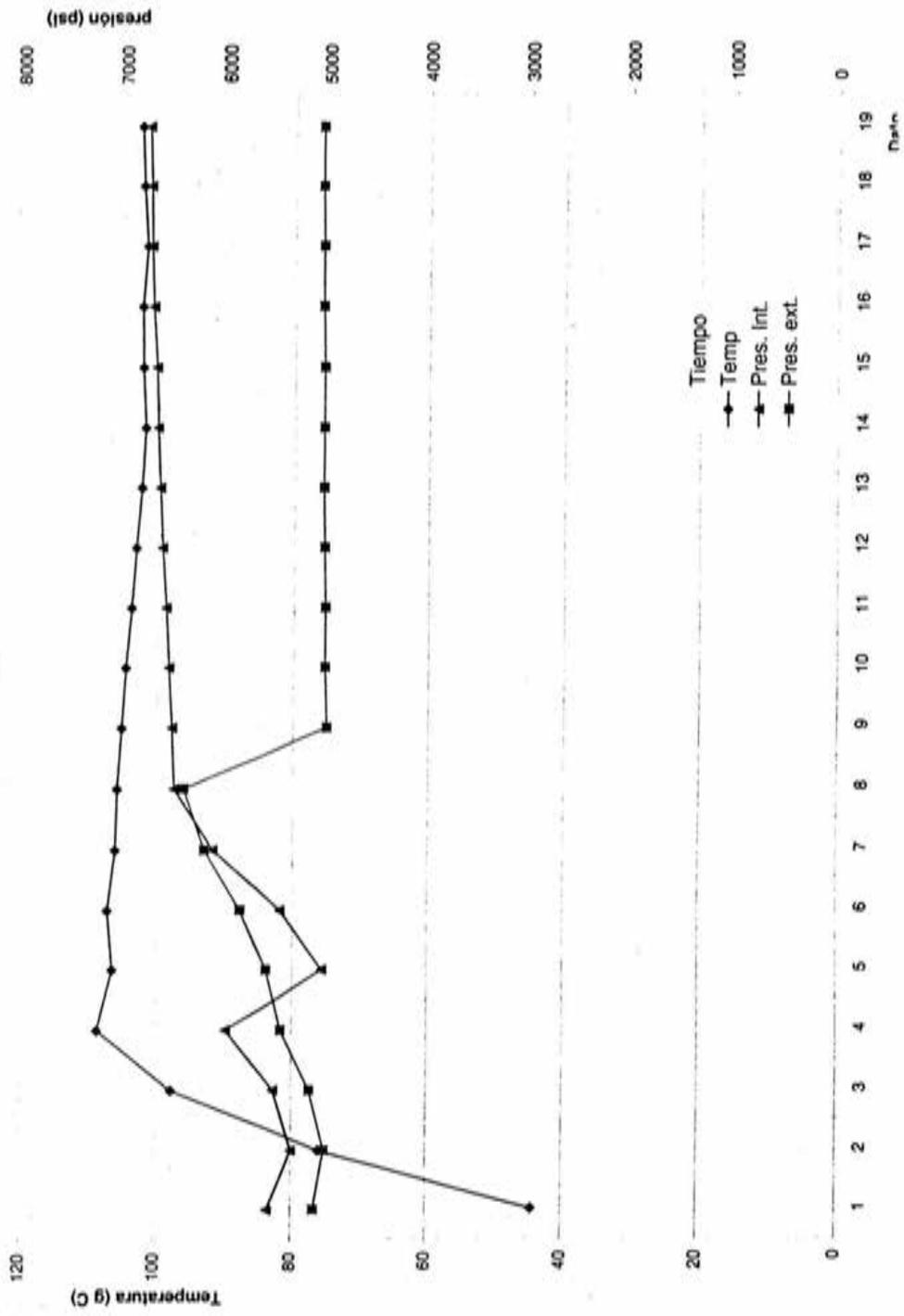
Experimento de la válvula  
1-3



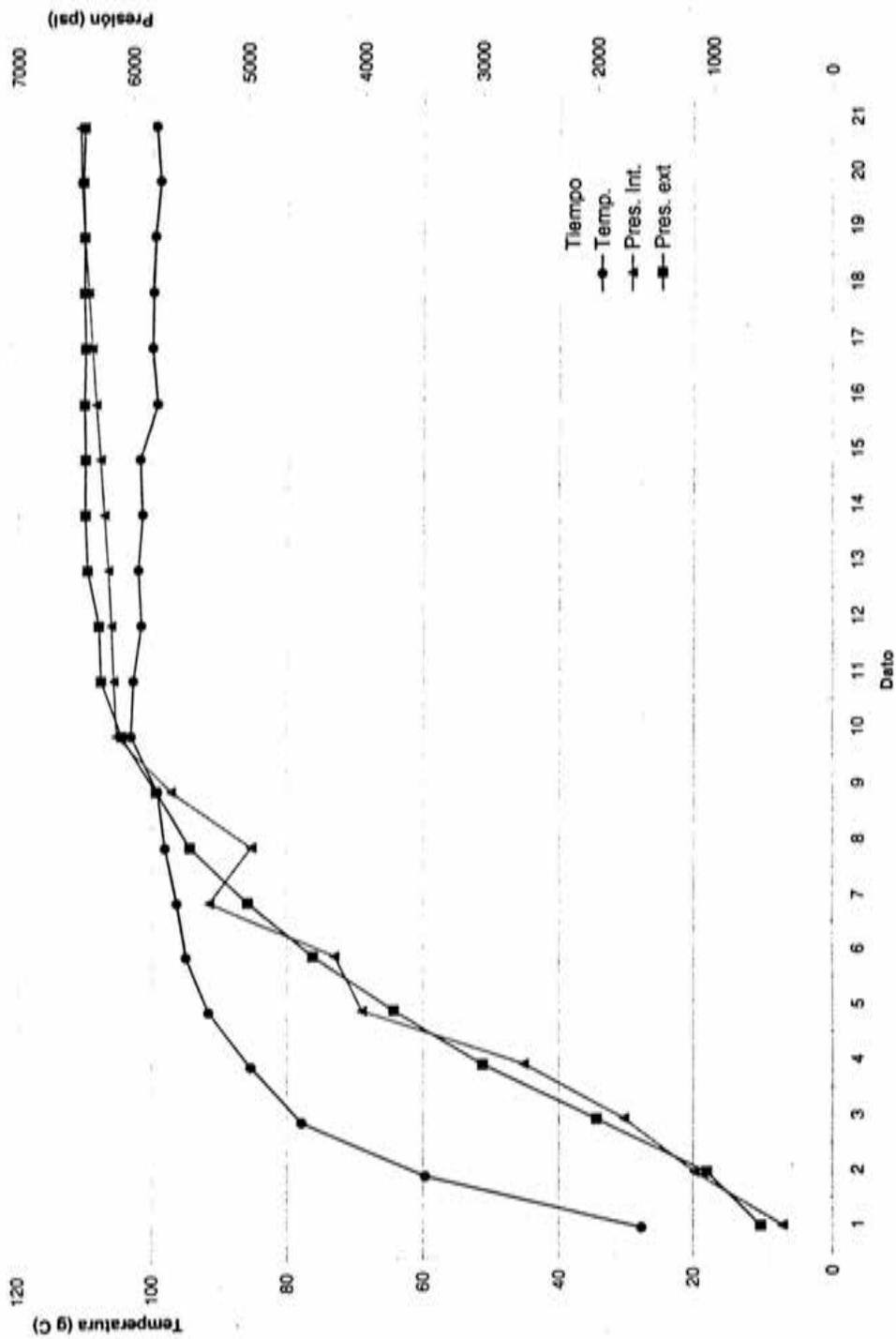
Experimento de la válvula  
1-4



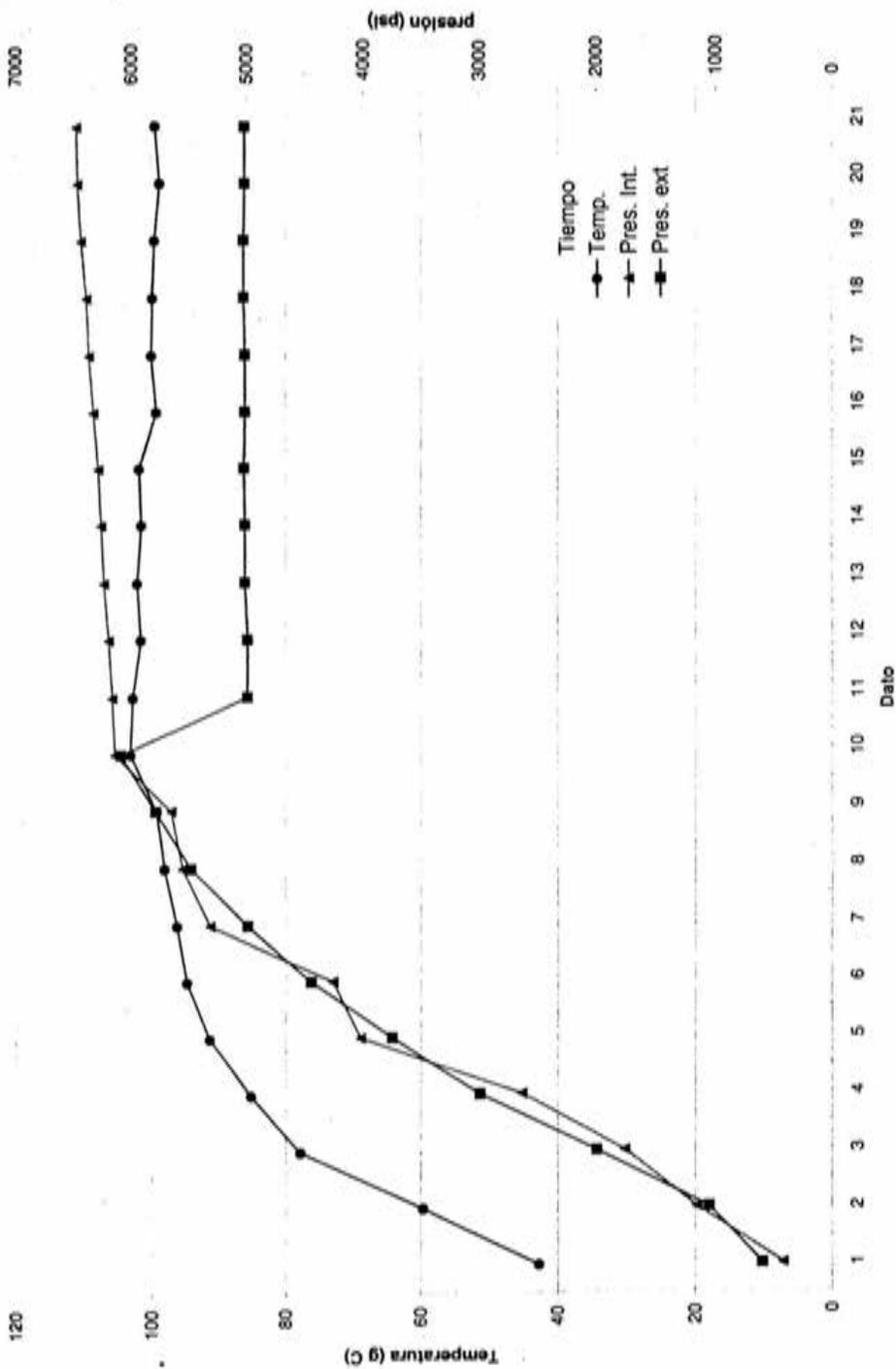
Experimento de la válvula  
2-1



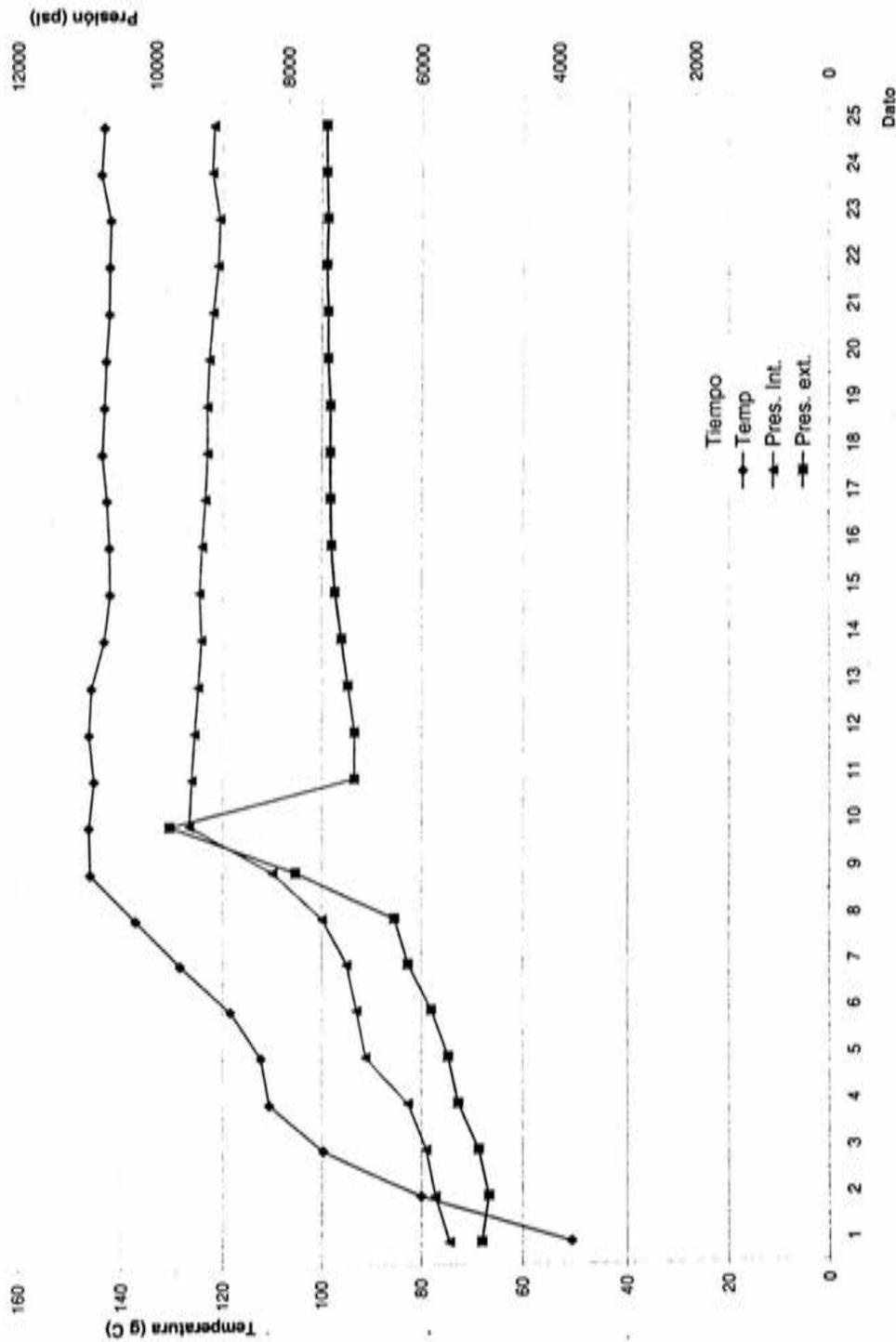
Experimento de la válvula  
2-2



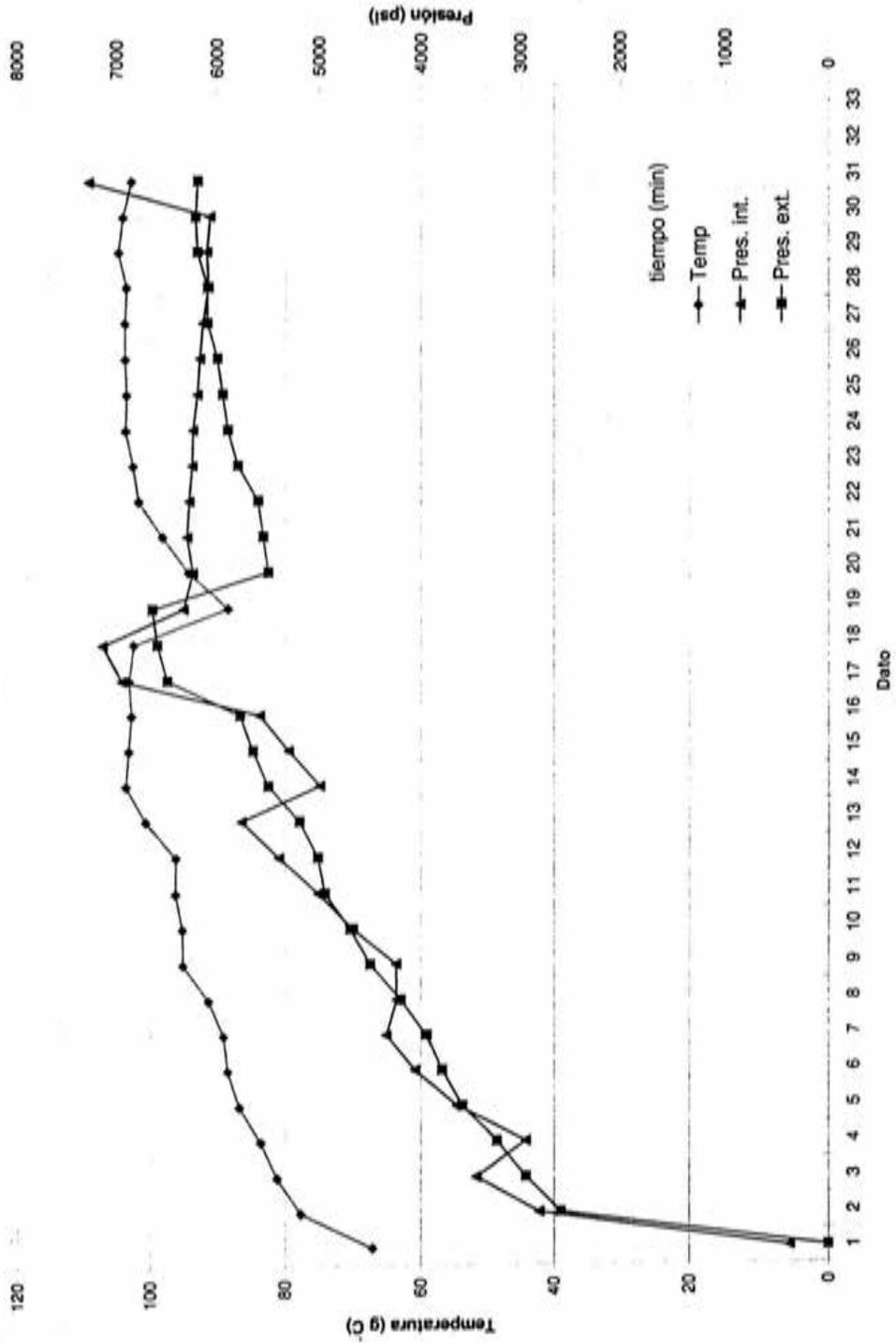
Experimento de la válvula  
2-3



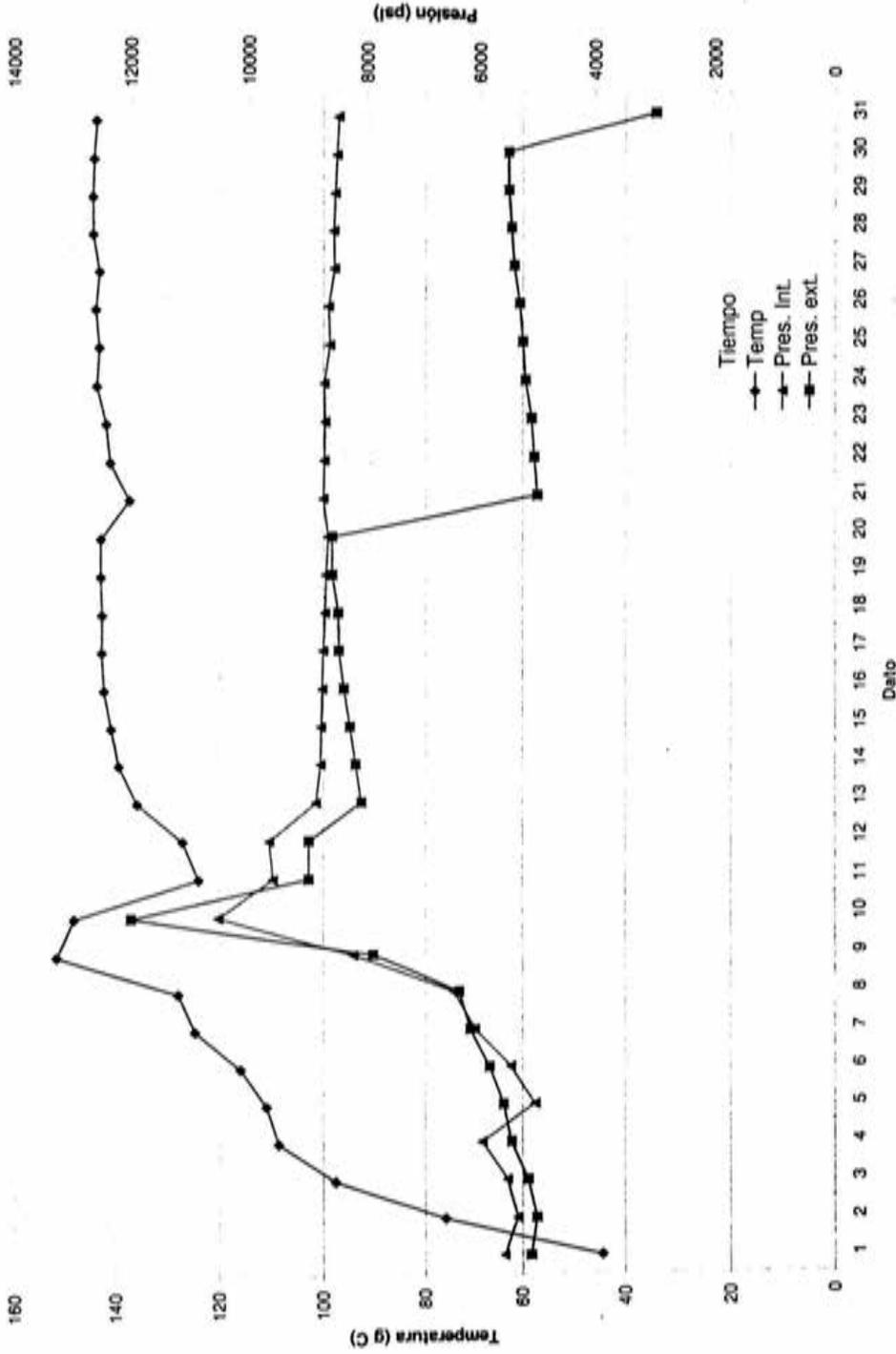
Experimento de la válvula  
2-4



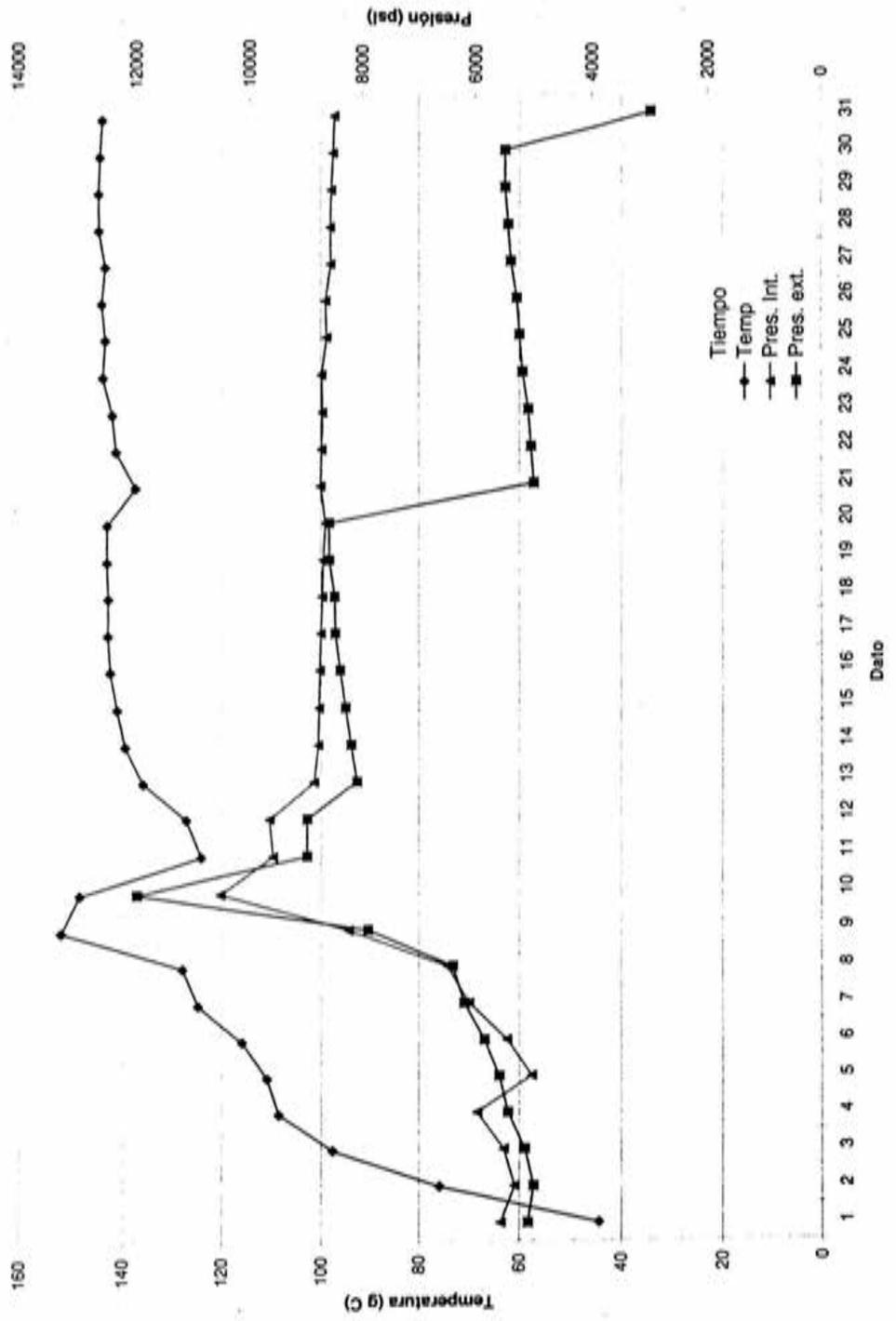
Experimento de la válvula  
3-1



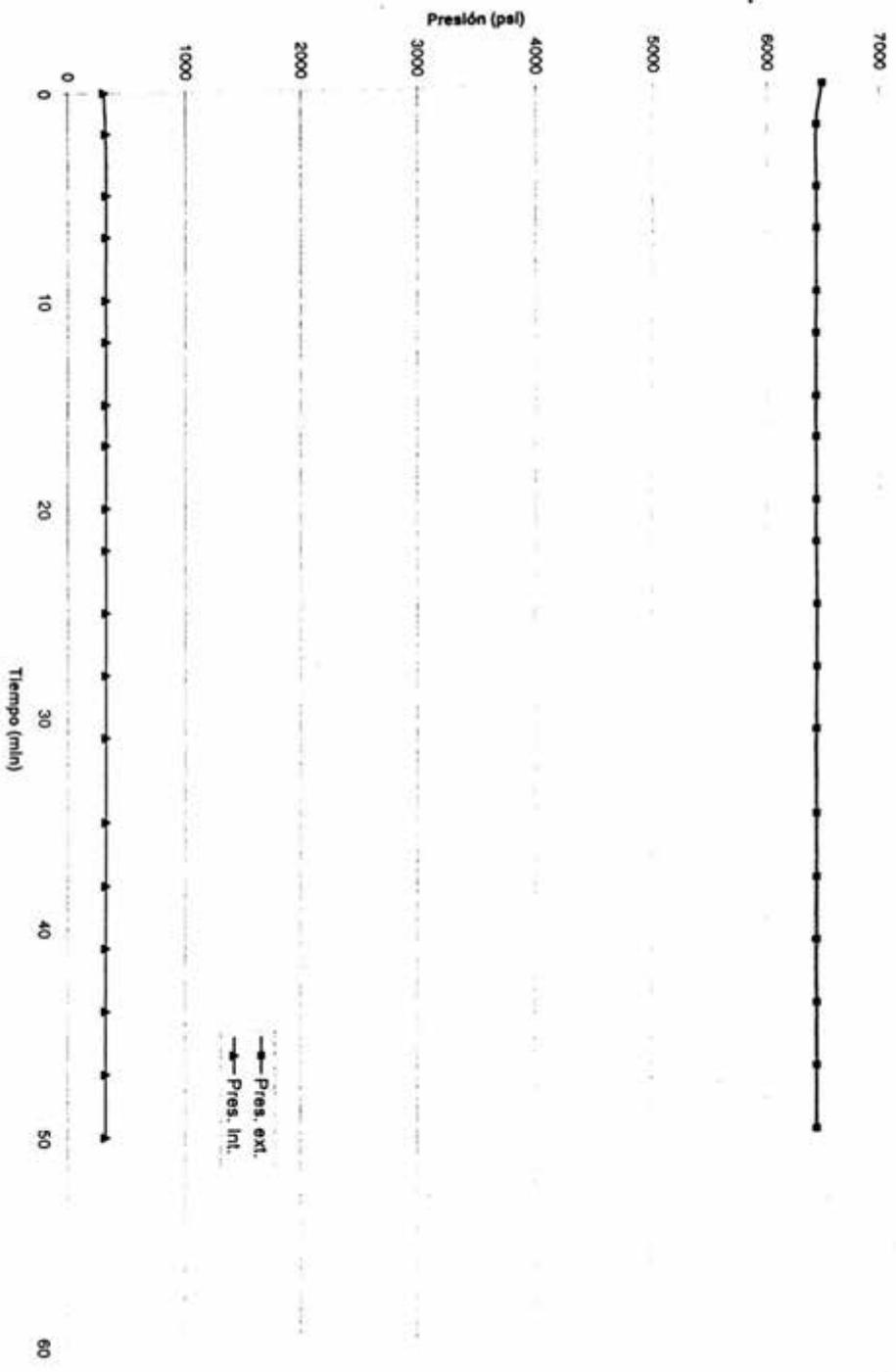
Experimento de la válvula  
3-3



Experimento de la válvula  
3-4

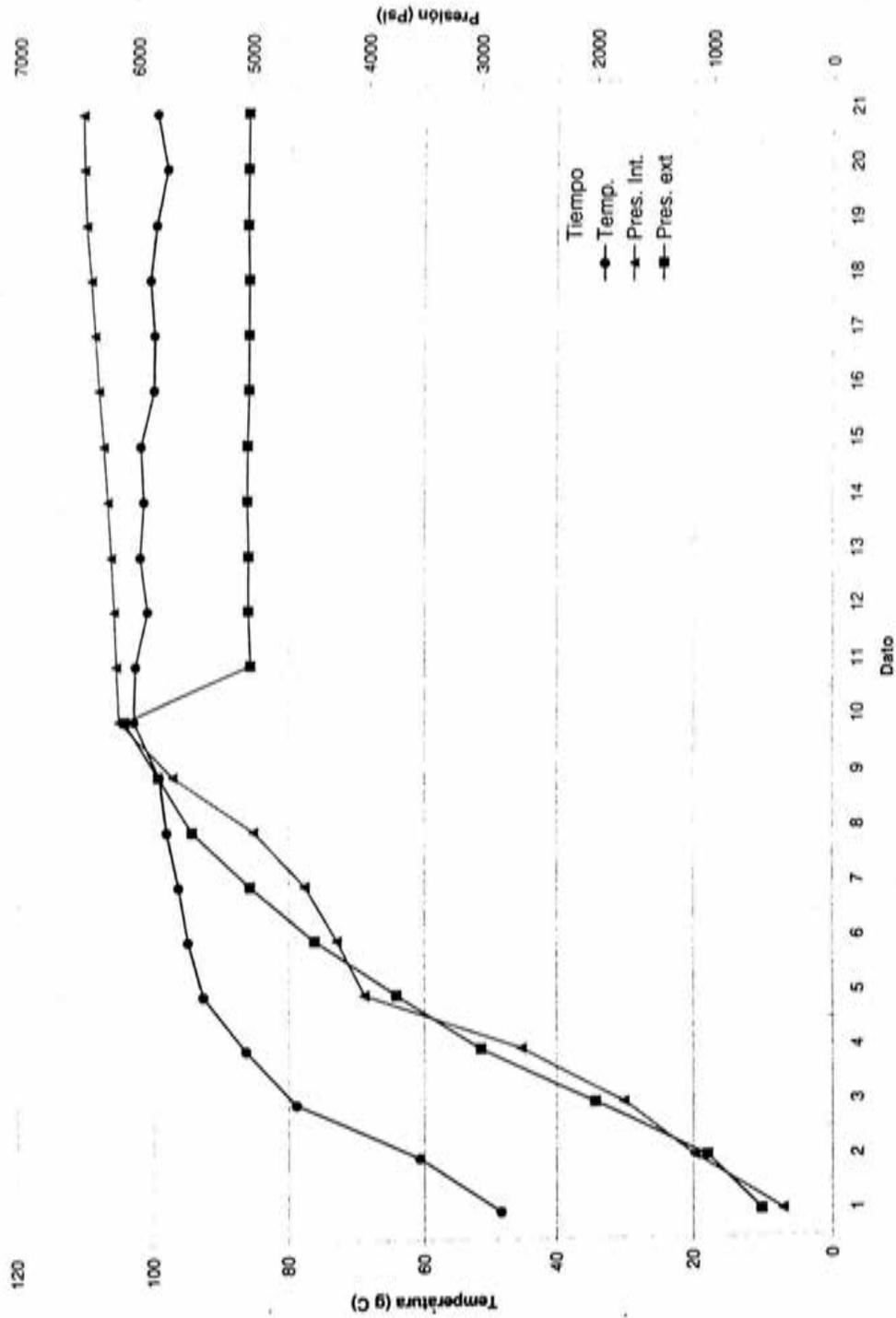


### Experimento de la válvula 4-1

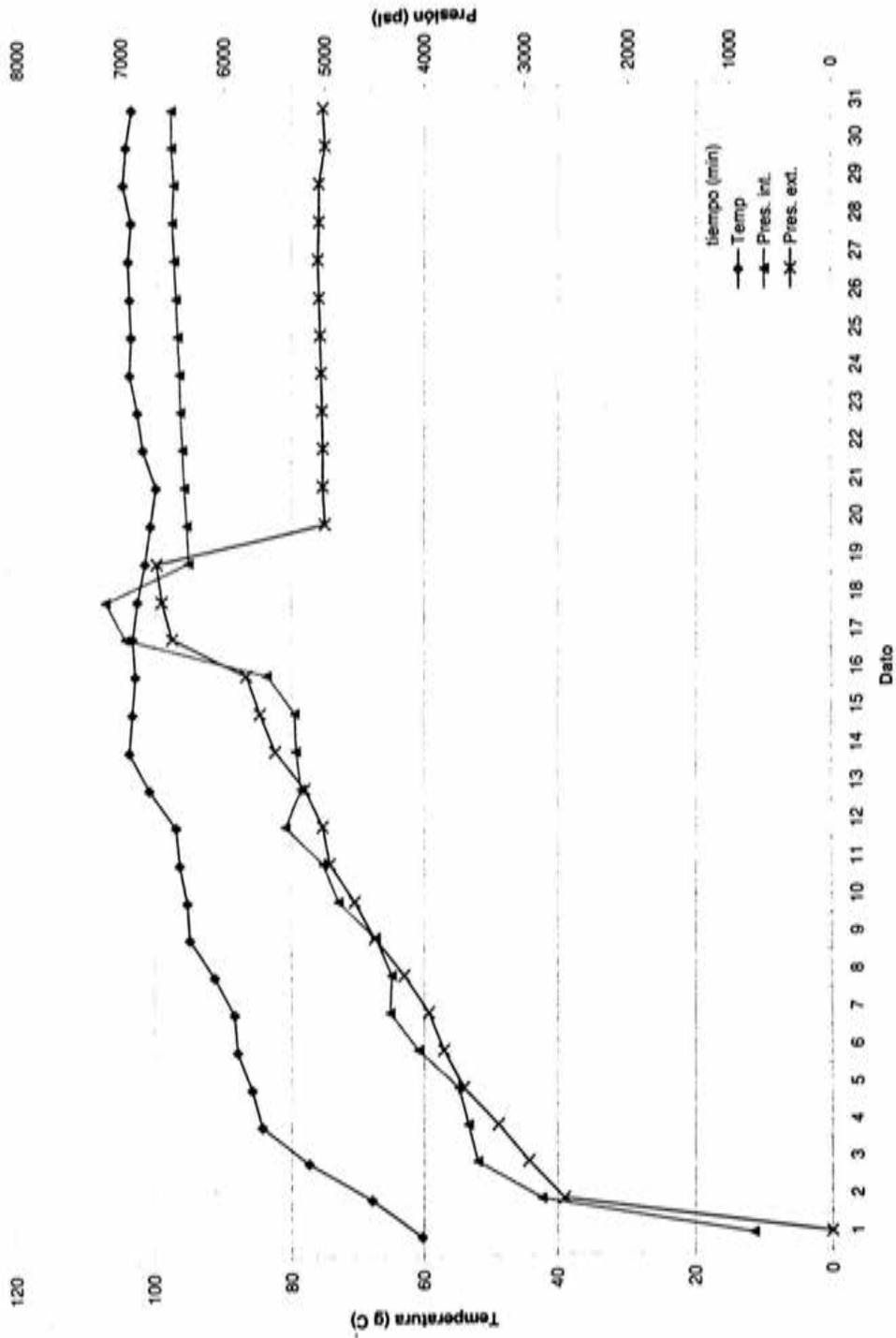


# Experimento de la válvula

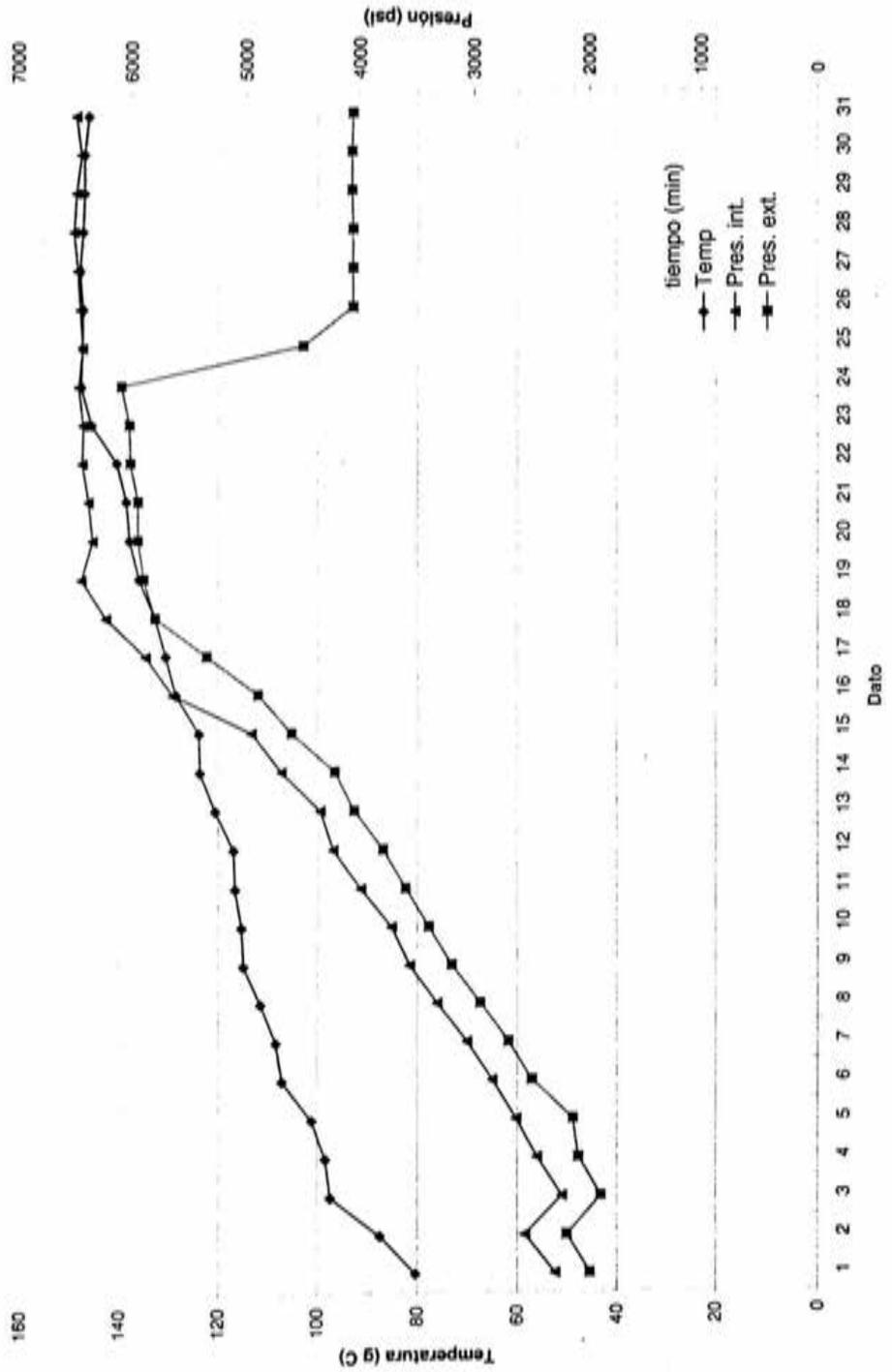
4-2



Experimento de la válvula  
4-3



Experimento de la válvula  
4-4



# *Apéndice D*

Dibujos de detalle

*Los planos y dibujos de detalle son propiedad del Instituto Mexicano del Petróleo, para cualquier consulta favor de ponerse en contacto con el autor Marco A. Hernández R. mahernan@imp.mx*

## ***Apéndice E***

*Deducción de ecuaciones para calcular el  
espesor de pared de elementos  
sometidos a presión*

**Deducción de ecuaciones para cálculo de espesor de pared de elementos sometidos a presión.**

El cálculo de los recipientes a presión esta regida por las diferentes teorías de resistencia de materiales, sin embargo es necesario determinar si el recipiente es considerado de pared gruesa o delgada, para ello existen diversos criterios, por ejemplo: Shigley establece que un cilindro es de pared delgada si la relación entre el espesor  $e$  y el diámetro interior  $d_i$  del cilindro es menor de  $1/20$ .

$$e < \frac{1}{20} d_i \tag{E.1}$$

Pisarenko refiere que un cilindro se considera de pared gruesa si el espesor de su pared es mayor que una décima de su radio medio.

$$e > \frac{rm}{10} \tag{E.2}$$

Durr y Wachter indican que los cilindros de paredes delgadas son aquellos cuyo diámetro exterior es mayor o igual a 10 veces el espesor de la pared.

$$d_b \geq 10e \tag{E.3}$$

Por último Gere y Timoshenko proporcionan como regla general la relación del radio  $r$  al espesor  $e$  mayor a 10 para que se considere el cilindro de pared gruesa.

$$\frac{r}{e} > 10 \tag{E.4}$$

Según ASME, un recipiente tiene pared delgada si el cociente entre el espesor  $e$  de la pared y el diámetro interior  $d_i$ , del recipiente es igual o menor a 0.10.

$$\frac{e}{d_i} \leq 0.10 \tag{E.5}$$

Para un diámetro interior  $d_a$  de aproximadamente 31.75 cm (1.250") y un diámetro exterior  $d_b$  de 42.84 mm (1.687") propuesto, según estos criterios se tiene:

Autor	Espesor ( $e$ )	Criterio
Shigley	2.93 mm > 0.97 mm (0.1155" > 0.03845")	Pared gruesa
Pisarenko	2.93 mm < 2.24 mm (0.1155" > 0.08845")	Pared gruesa
Durr y Wachter	25.4 mm < 29.33mm ( $1" < 1.155"$ )	Pared gruesa
Gere y Timoshenko	109.95 mm > 35.4 mm ( $64.329" > 10"$ )	Pared gruesa
ASME	0.349 mm > 0.10	Pared Gruesa

**Tabla F.1. Criterios para determinar el tipo de cilindro.**

Según estos criterios el recipiente pertenece a los de pared gruesa, por lo tanto se deben de realizar consideraciones diferentes a las tomadas si este fuera de pared delgada.

Sin embargo es posible seguir un procedimiento análogo para determinar la fuerza total que transmite la sección longitudinal, dividiendo esta fuerza entre el área sobre la que actúa obteniendo el valor medio del esfuerzo circunferencial o tangencial, tanto en el caso de paredes delgadas como en el de paredes gruesas.

La diferencia entre uno y otro caso estriba en que el cilindro de pared delgada, dicho valor medio es prácticamente igual al máximo esfuerzo tangencial, esto es, el esfuerzo tangencial se distribuye casi uniformemente en el espesor, mientras que en el caso de pared gruesa es mucho menor que el máximo valor de este esfuerzo tangencial, que no se distribuye uniformemente en el espesor, y su variación ni siquiera es lineal.

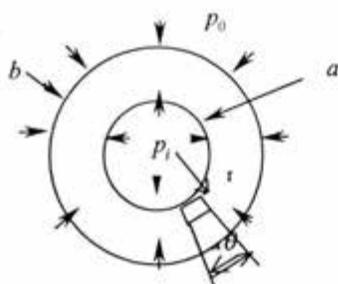


Figura E.1. Cilindro de análisis.

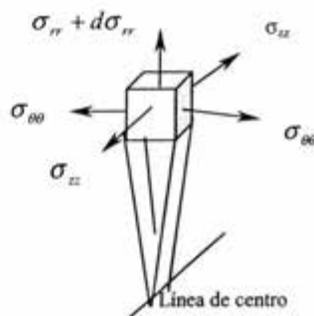


Figura E.2. Elemento aislado.

Es importante recordar la metodología para determinar los esfuerzos originados en el cilindro de pared gruesa, según la teoría de Gabriel Lamé, quien desarrolló este problema encontrando la solución en 1833, tenemos:

Considerando el cilindro de la figura E.1. se observa que tiene un radio interior  $a$  y un radio exterior  $b$ , estando sometido a presión interna y externa uniformemente distribuidas y de valor  $p_i$  y  $p_o$ , en este análisis no se consideran los esfuerzos producidos por un cambio de temperatura  $\Delta T_0$ , será considerado posteriormente completando el análisis, considerando el cilindro también como un cilindro cerrado, se aísla una porción del cilindro con un espesor diferencial  $dr$  y se considera la mitad de longitud unitaria de este elemento cilíndrico diferencial.

El esfuerzo tangencial en el elemento aislado en la figura E.2., es  $\sigma_r + d\sigma_r$  ya que  $\sigma_r$  varía a lo largo del radio. Los esfuerzos radiales se suponen de tensión de modo que un resultado negativo indica la existencia de compresión. Tal elemento puede estudiarse como un cilindro de pared delgada por lo tanto, para el equilibrio, la suma de las fuerzas aplicadas debe ser igual a cero:

$$(\sigma_r + d\sigma_r) 2(r + d\sigma_r) - \sigma_r (2r) - 2\sigma_r dr = 0 \quad (E.6)$$

El producto  $dr(d\sigma_r)$  puede despreciarse, como infinitésimo de segundo orden, respecto de las otras cantidades. En estas condiciones la ecuación anterior se escribe en la forma:

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - 2\sigma_r = 0 \quad (E.7)$$

Para obtener otra relación entre  $\sigma_r$  y  $\sigma_t$  hay que adoptar alguna hipótesis complementaria. Se supone que una sección recta, normal al eje del cilindro, permanece plana después de la deformación y, por tanto, la deformación unitaria longitudinal es constante en cualquier punto de la sección. Aplicando la ley de Hooke en el caso de un estado triaxial de esfuerzos resulta:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_t)) \quad (E.8)$$

Ahora bien, como  $\varepsilon_z$ ,  $E$ ,  $\sigma_z$  y  $\nu$  son constantes, la suma  $\sigma_r + \sigma_t$  ha de ser constante en toda la sección. Llamando  $2A$  a esta constante:

$$\sigma_r + \sigma_t = 2A \quad (E.9)$$

Ahora se puede enunciar una ecuación que sólo incluya  $\sigma_r$ ; esto es sumando las ecuaciones F.8 y F.9:

$$r = \frac{d\sigma_r}{dr} + 2\sigma_r = 2A \quad (E.10)$$

o bien, 
$$r = \frac{d\sigma_r}{dr} = 2(A - \sigma_r) \quad (E.11)$$

de donde al separar variables, se obtiene

$$\frac{d\sigma_r}{A - \sigma_r} = 2 \frac{dr}{r} \quad (E.12)$$

la integración da:

$$-\log_e (A - \sigma_r) = 2 \log_e r + C = \log_e r^2 + C \quad (E.13)$$

$$\log_r (A - \sigma_r) r^2 = C \quad (E.14)$$

o bien, 
$$\log_r (A - \sigma_r) r^2 = e^{-C} = B \quad (E.15)$$

de donde B es una constante más adecuada que  $e^{-C}$ . Resolviendo para  $\sigma_r$ , finalmente se obtiene :

$$\sigma_r = A - \frac{B}{r^2} \quad (E.16)$$

Sustituyendo este valor en la ecuación 3.6.4, resulta:

$$\sigma_t = A + \frac{B}{r^2} \quad (E.17)$$

Los valores de las constantes A y B se determinan mediante las condiciones de frontera que son :

$$\sigma_r = -p_i \text{ para } r = a$$

$$\sigma_r = -p_0 \text{ para } r = b$$

donde el signo menos indica que  $\sigma_r$  es un esfuerzo de compresión, con estos valores se obtiene el sistema:

$$-p_i = A - \frac{B}{a^2} \quad (E.18)$$

$$-p_0 = A - \frac{B}{b^2} \quad (E.19)$$

cuya solución es:

$$A = \frac{a^2 p_i - b^2 p_0}{b^2 - a^2} \quad (E.20)$$

$$B = \frac{a^2 b^2 (p_i - p_0)}{b^2 - a^2} \quad (E.21)$$

Sustituyendo estos valores en las expresiones E.16 y E.17 se obtienen las expresiones generales de  $\sigma_r$  y  $\sigma_t$ , en un punto cualquiera a la distancia  $r$  del centro:

$$\sigma_r = \frac{a^2 p_i - b^2 p_0}{b^2 - a^2} - \frac{a^2 b^2 (p_i - p_0)}{(b^2 - a^2) r^2} \quad (E.22)$$

$$\sigma_r = \frac{a^2 p_i - b^2 p_0}{b^2 - a^2} + \frac{a^2 b^2 (p_i - p_0)}{(b^2 - a^2) r^2} \quad (\text{E.23})$$

considerando que existe un cambio de temperatura  $\Delta T_0$  en función del radio  $r$ , la distribución de esfuerzos por temperatura en las paredes del recipiente están expresadas a por las ecuaciones:

$$\sigma_r = \frac{\alpha E T_0}{2(1-\nu) \ln(b/a)} \left[ -\ln \frac{b}{r} + \frac{a^2 (b^2 - r^2)}{r^2 (b^2 - a^2)} \ln \frac{b}{a} \right] \quad (\text{E.24})$$

$$\sigma_t = \frac{\alpha E T_0}{2(1-\nu) \ln(b/a)} \left[ 1 - \ln \frac{b}{r} - \frac{a^2 (b^2 + r^2)}{r^2 (b^2 - a^2)} \ln \frac{b}{a} \right] \quad (\text{E.25})$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica, E es el módulo de elasticidad y  $\nu$  es la relación de Poisson. En este esfuerzo cuando  $T_0 = T_a - T_b$  es positivo, la temperatura en radio interior  $T_a$  es mucho mayor que en el radio exterior  $T_b$ . Cuando el cilindro se encuentra sujeto a una presión interna  $p_i$  y una presión externa  $p_0$ , y un cambio de temperatura, la distribución de esfuerzos en la pared del recipiente están dados por las ecuaciones:

$$\sigma_r = \frac{a^2 p_i - b^2 p_0}{b^2 - a^2} + \frac{a^2 b^2 (p_i - p_0)}{(b^2 - a^2) r^2} + \frac{\alpha E T_0}{2(1-\nu) \ln(b/a)} \left[ -\ln \frac{b}{r} + \frac{a^2 (b^2 - r^2)}{r^2 (b^2 - a^2)} \ln \frac{b}{a} \right] \quad (\text{E.26})$$

$$\sigma_t = \frac{a^2 p_i - b^2 p_0}{b^2 - a^2} + \frac{a^2 b^2 (p_i - p_0)}{(b^2 - a^2) r^2} + \frac{\alpha E T_0}{2(1-\nu) \ln(b/a)} \left[ 1 - \ln \frac{b}{r} - \frac{a^2 (b^2 + r^2)}{r^2 (b^2 - a^2)} \ln \frac{b}{a} \right] \quad (\text{E.27})$$

# **Apéndice F**

Teoría para el cálculo de esfuerzos en uniones roscadas

## Teoría para el cálculo de esfuerzos en uniones roscadas.

Existen generalmente dos clasificaciones genéricas de roscas:

a.- *Rosca para tornillos de potencia*

b.- *Roscas para sujetadores*

Las roscas para tornillos de potencia se utilizan para transmitir movimiento en forma suave y uniforme, como actuadores lineales que transforman el movimiento rotatorio en movimiento lineal. Mientras que las roscas para tornillos de potencia se utilizan en dispositivos con movimiento; ordinariamente las roscas para sujetadores se usan en tornillos comunes para unir partes, es decir como dispositivos de unión.

Algunas aplicaciones típicas de tornillos de potencia se encuentran en gatos para automóviles, tornillos de avance en tornos, prensas tipo tornillo, grapas, vástagos para válvulas, camas de hospital, barras de mando para control en reactores nucleares, etc.

Por lo general los tornillos de potencia tienen eficiencia del orden de 30 a 75%, dependiendo del ángulo de la hélice y del coeficiente de fricción por el deslizamiento entre la tuerca y el tornillo. Las formas de roscas usadas en tornillos de potencia son: rosca Acme, rosca Acme corta o truncada, rosca Acme truncada de 60°, rosca cuadrada modificada y rosca trapezoidal. Las especificaciones de estas roscas están dadas por los estándares de la ANSI para tornillos de traslación.

Los tornillos de sujeción están caracterizados por tener la rosca en " V ", en comparación con la rosca para tornillos de potencia, ésta es más susceptible al deterioro, además la raíz aguda da como resultado grandes concentraciones de esfuerzo, sin embargo esto se ha reducido reemplazando las crestas y raíces agudas por superficies planas, roscas *Seller*, mostrada en la figura F.1. El diámetro mayor o exterior es medido en las crestas de las roscas externas y en las raíces para las roscas internas, éste diámetro es utilizado para designar una rosca. El paso de un tornillo se mide como la distancia entre puntos correspondientes de roscas adyacentes. Este es igual al recíproco del número de hilos/pulg.

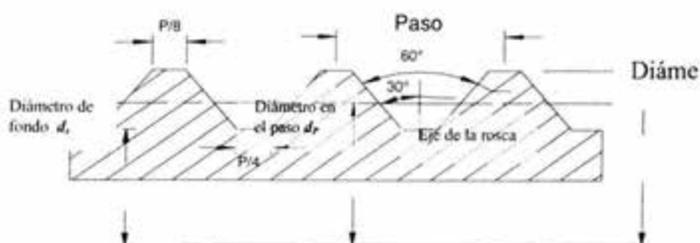


Figura F.1. Geometría de la rosca unificada e ISO, perfil básico de una cuerda externa.

El avance es la distancia que mueve axialmente un tornillo durante una revolución del mismo. Las siguientes roscas son las más comúnmente usadas y se les designa como roscas "estándar".

1. Gruesa, designada como UNC (*Unified National Coarse*). Se le usa para trabajos de ensamble generales, especialmente donde el ensamble y el desensamble son frecuentes y necesarios. No debe utilizarse en el caso de diseños con problemas de vibraciones. Se recomienda su empleo con metales que sean de acero. Una regla recomendada en el diseño es especificar siempre rosca gruesa a menos que un factor específico de diseño indique lo contrario.
- 2.- Fina, designada como UNF (*Unified National Fine*). Esta serie es muy usada en automóviles, aviones y en aplicaciones con problemas de vibración. También son recomendadas para diseños donde se tengan agujeros para roscar en materiales de acero.
- 3.-Extrafina, designada como UNEF (*Unified National Extra Fine*). Usada en aplicaciones instrumentales, particularmente en trabajos de aviación y también en los casos que involucren vibraciones y choques fuertes. Por lo general los tornillos de esta serie se hacen de acero de aleación de alto grado.

En la designación de roscas, la letra A se usa para indicar roscas externas y la B para roscas internas. Además las roscas se clasifican de acuerdo al ajuste. El ajuste 1 tiene la tolerancia más amplia y por tanto, los ajustes más holgados, se usa donde se necesita de un ensamble y desensamble rápido.

Los de ajuste 2 son los más ampliamente empleados y son recomendados para la mayor parte de las aplicaciones excepto cuando se indique lo contrario y por alguna razón específica. La clase 3 es el último ajuste estándar, es el más apretado, y se le utiliza en aplicaciones de precisión.

Una variación de estos ajustes puede obtenerse usando una diferente clase de ajuste para roscas externas e internas.

Al realizar un análisis del esfuerzo en un perno o en un tornillo, el primer paso consiste en calcular el diámetro necesario usando la fórmula directa de tensión o de compresión, donde  $F$  es la carga que está soportada y  $A$  es el área de la sección transversal basada en el diámetro de raíz, ec. F.1.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (F.1)$$

Si hay posibilidad de fallas por flexión o por efecto de columna, deberá verificarse el diámetro para esas condiciones.

Otro posible modo de falla sería si las roscas se cortasen, suponiendo que las roscas comparten por igual el esfuerzo, las siguientes ecuaciones pueden utilizarse para calcular el esfuerzo de corte en el tornillo y en las roscas de la tuerca, además del aplastamiento entre las roscas. Según V.M. Faires:

$$\sigma_{(tuerca)} = \frac{F}{\pi d \left( \frac{h}{2} \right)} \quad (F.2)$$

$$\sigma_{(tornillo)} = \frac{F}{\pi d_r \left( \frac{h}{2} \right)} \quad (F.3)$$

$$\sigma_b = \frac{F}{\left( \frac{\pi}{4} \right) (d^2 - d_r^2) \left( \frac{h}{p} \right)} \quad (F.4)$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo de corte,  $\sigma_b$  es el esfuerzo de aplastamiento,  $d$  es el diámetro exterior del tornillo,  $h$  es la altura de la tuerca,  $d_r$  es el diámetro de la raíz del tornillo y  $p$  el paso del tornillo.

Se ha encontrado que las roscas no comparten por igual la carga, una estimación conservadora sería que un solo hilo tomara toda la carga, como se indica en la figura F.2.

Sin embargo la cedencia de los hilos admite que la carga sea transferida a otros hilos de la rosca. Por lo tanto, es recomendable escoger un material suave para la tuerca, de manera que la cedencia del material pueda actuar.

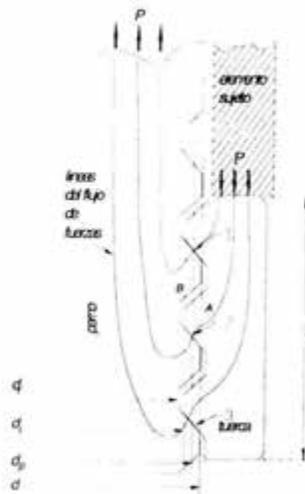


Figura F.2. Distribución de esfuerzos en una rosca.

Debido a que no está muy claro cuántos hilos están en acoplamiento y pueden compartir la carga, como criterio de diseño se puede establecer que todos los hilos comparten la carga por igual, por lo que es conveniente calcular con un coeficiente de seguridad alto; también podrá suponerse que toda la carga la soporta un solo hilo, posición muy conservadora. Para cualquier caso, una longitud razonable de hilos acoplados puede aproximarse por las siguientes reglas empíricas:

- 1.- Para acero, la longitud deberá ser por lo menos igual al diámetro exterior de la rosca.
- 2.- Para hierro vaciado, latón o bronce la longitud del acoplamiento de las roscas deberá ser por lo menos 1 ½ veces el diámetro exterior de la rosca.
- 3.- Para aluminio, zinc o plástico ésta deberá ser por lo menos 2 veces.

Robert C. Juvinall, establece que existe un esfuerzo cortante sobre los hilos de la cuerda en donde el área de corte está dada como  $\pi d(0.75t)$ , donde  $d$  es el diámetro de la superficie de fractura por cortante.

Si determinamos el espesor de la tuerca (o la profundidad de agarre de un tornillo en un agujero roscado) necesario para proporcionar equilibrio entre la resistencia a la tensión del perno y la resistencia al "barrido" o deformación de la cuerda si ambos elementos, perno y tuerca o agujero roscado, se hace del mismo material.

La fuerza a tensión requerida en el perno para que ceda toda la sección transversal con rosca es:

$$F = \pi d (0.75t) = \frac{\pi}{4} (0.9d)^2 S_s \quad (\text{F.5})$$

donde  $d$  es el diámetro de la cuerda. Según la figura 3.18, la carga a la tensión requerida en el perno para que la superficie de falla al "barrerse" la cuerda entera de la tuerca es:

$$F = \pi d (0.75t) (0.58S_s) \quad (\text{F.6})$$

Al igualar las dos expresiones anteriores se sabe que las resistencias a la tensión del perno y al "barrido" de la rosca están equilibradas cuando el espesor de la tuerca es aproximadamente:

$$t = 0.47d \quad (\text{F.7})$$

Ya que las tuercas por lo común son más suaves que los pernos con objeto de permitir cedencia ligera en los hilos superiores de la cuerda y, por lo tanto, distribuir la carga con más uniformidad entre los hilos de contacto, el espesor estándar de la tuerca debe ser aproximadamente  $7/8d$ .

# ***Apéndice G***

*Características técnicas de sensores*

## Características Técnicas de los sensores de presión y temperatura

La herramienta cuenta con cuatro sensores que se encuentran distribuidos en la herramienta de fondo, un par de ellos miden las condiciones de la muestra capturada (temperatura y presión), el otro par está acoplado a la parte número SM-43, denominada *Porta sensores de yacimiento*, que precisamente miden las condiciones de presión y temperatura del yacimiento.

### Sensores de Presión:

Los sensores utilizados en ésta herramienta para medir la presión emplean un "strain gauge" colocado sobre un diafragma de metal que proporciona muy buena estabilidad especialmente a altas temperaturas. El diafragma es maquinado en acero 17-4 Ph y soldado al cuerpo del transductor para reducir componentes, sobre éste se coloca una resistencia de platino del tipo RTD que proporciona datos para corregir los efectos de la temperatura. La figura G.1, muestra un sensor con rango de 0 a 1054.6 kg/cm<sup>2</sup> (15 000 psi).

Se emplean dos sensores, uno para medir el comportamiento en presión de la muestra y otro para registrar de igual forma el comportamiento del yacimiento.

### Características técnicas:

*Tipo: Diafragma de acero 17-4Ph, P/N 614473-0003 (OMEGADYNE-PX3435-0023)*

*Sensor de Presión IMO de 0 a 15 000psi (1054.6 kg/cm<sup>2</sup>)*

*Presenta una gran estabilidad a la temperatura de 150 °C.*

*Solo requiere de una alimentación positiva.*

<i>Voltaje de excitación</i>	<i>10Vdc-15 Vdc máxima</i>
<i>Rango de salida (RS)</i>	<i>30 mV nominal-25 mV mínimo</i>
<i>Resistencia del puente(sobre el diafragma)</i>	<i>2000 min-3000 ohm máx.</i>
<i>No linealidad</i>	<i>±0.15% RS</i>
<i>Histéresis</i>	<i>±0.06% RS</i>

<i>Material de la Carcaza</i>	<i>Acero Inoxidable 17-4 Ph</i>
<i>Tipo de rosca</i>	<i>9/16- 18 UNF-2*</i>
<i>Sensor de temperatura</i>	<i>tipo RTD de 1000 ohm</i>
<i>Rango de operación</i>	<i>-65°F (-53.8 °C) a +400°F (204.44 °C)</i>



Figura G.1. Sensor de presión para registros de pozos

Tiene una sensibilidad de 31.533 mV a plena escala con un intervalo de medición de 0 a 1054.6 kg/cm<sup>2</sup> (15,000 psi). Si se alimenta con un voltaje de 10 V.

En este caso se alimenta con un voltaje de 6.9 Volts. Presentando un voltaje diferencial de 0 V a 21.75777 mV a plena escala de 0 a 1054.6 kg/cm<sup>2</sup> (15000 psi)

#### Sensores de temperatura:

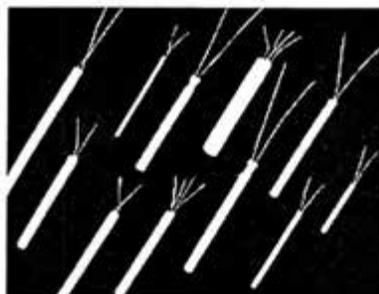
Para medir la temperatura se utilizan dos sensores tipo RTD (Detector Térmico de Resistencia). Uno para medir parámetros de la muestra y otro para el yacimiento.

El RTD convierte la variable física (temperatura) en una eléctrica (resistencia). Para la herramienta se seleccionó un RTD debido a que presenta buena linealidad y estabilidad, además de tener un coeficiente térmico positivo. El sensor cuenta con un alambre de platino encapsulado con cerámica y se comporta bajo la siguiente ecuación:

$$R = R_0 (1 + \alpha T)$$

de donde  $R_0$  es una resistencia de referencia, cuando  $T = 0$  °C, el valor de  $R_0$  es igual a 100  $\Omega$ ,  $\alpha$  que es un coeficiente adopta un valor de 0.00385. La alta sensibilidad y repetibilidad de la información que proporciona, lo hacen propio para utilizarse en el control de la temperatura. El RTD que se utiliza presenta una resistencia de 100  $\Omega$  a una temperatura de 0 °C y aumenta directamente proporcional presentando una resistencia de 161.05  $\Omega$  a una temperatura de 160°C.

La variación de voltaje debido a la variación de la resistencia por efecto de la temperatura puede ser obtenido mediante un puente de Wheatstone.



*Características importantes del sensor de temperatura tipo RTD:*

- Bajo consumo de corriente*
- Tamaño reducido*
- Gran Estabilidad a 150 °C*
- Fácil acondicionamiento*

Figura G.2. Sensores de temperatura tipo RTD

**Características técnicas del motor de la válvula:**

El motor que se emplea tiene especificaciones SS Rare Earth Gearmotor, E-1430, tiene las siguientes características técnicas.

Torque máximo del motor	0.019 hp (14.2 W)
Voltaje de alimentación	24 Vdc
Inercia	$7.1 \times 10^{-5}$ oz in sec <sup>2</sup>
Material de la flecha	Ac. Inox. 420 tratado (40-50 Rc)
Velocidad de salida del motor	25 100 ±1150 rpm (sin carga)
Numero de parte del motor	457A100-1
Inercia del reductor	$1.8 \times 10^{-6}$ oz in sec <sup>2</sup>
Baleros lubricados	
Cara para montaje	Acero Inox. 303 (ASTM A582)
Rango de temperatura del embobinado	180°C
Relación de velocidad del reductor	1 108:1 (22.65 rpm)
Torque de salida del reductor	150 oz in

El plano SMH-01 muestra la ubicación de cada uno de estos elementos.

# ***Apéndice H***

*Prueba de funcionamiento del detector de  
coples*

## Prueba de funcionamiento del detector de coples

En el capítulo 4, inciso 4.5.1, se describió el funcionamiento del detector de coples, sin embargo es importante mencionar que este dispositivo ha pasado por diversas etapas, en un inicio se tenía el concepto de instalar el detector en un módulo por separado, utilizando una versión con las que trabaja el equipo de Pemex, con algunas adaptaciones, por ejemplo eliminar un juego de diodos que se utilizan como puente eléctrico en las operaciones de disparos, que en nuestro sistema no se utiliza, dejando libre la bobina que estaría directamente conectada al cable de registros a través de la cabeza MH-22, sin embargo debido a que la herramienta se alimenta con un voltaje de hasta 100 V y 1 A de corriente, correríamos el riesgo de quemar la bobina y deshabitar el detector en una operación real. Una opción que se presentó, fue diseñar un dispositivo para poder desviar la corriente para proteger la bobina, pero implicaba diseñar un conector de dos pines en la conexión a Pemex y modificar la cabeza, lo que resultó más complicado.

El problema se resolvió integrando el detector al módulo de electrónica e incluir una pieza con un orificio al centro, para sacar el cable de comunicación y alimentación de la herramienta; de ésta forma la bobina se podría conectar directamente a la electrónica para amplificar la señal y mandar el pulso hacia superficie. La figura H.1. muestra las piezas conectadas al disipador de temperatura que es parte del módulo de electrónica, antes de hacer la bobina.

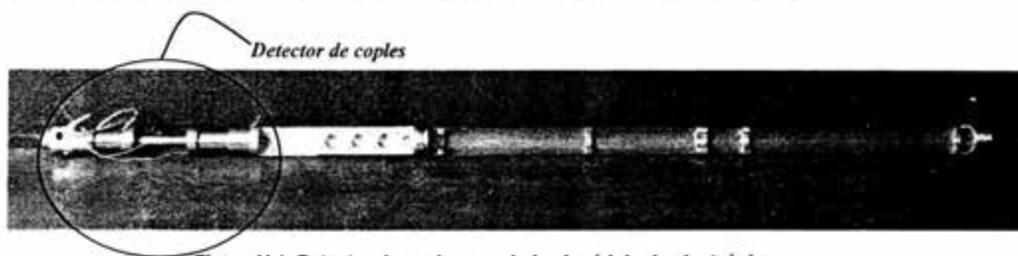


Figura H.1. Detector de coples acoplado al módulo de electrónica

Las piezas que integran el CCL, se pueden encontrar en el apéndice después de verificar el número de parte. En los dibujos está especificado que son de acero AISI 1006, es un material que se oxida fácilmente por lo que las piezas tienen un recubrimiento superficial conocido como "tropicalizado", con el que se retarda un poco el proceso de oxidación.

El detector de coples fue habilitado enrollando 3 600 vueltas de cable especial resistente a alta temperatura, calibre 38 AWG con recubrimiento de poliamida (politermalizado), con una

impedancia final de 3.6 K ohm, utilizando dos imanes de alnico 5 con una carga de 300 Gauss aproximadamente, la figura H.1. muestra el detector de coples terminado e instalado en el módulo mencionado.



Figura H.2. Instalación del CCL.

Una de las pruebas es que la bobina no se ponga en corto, esto se evitó enrollando cinta de teflón en el núcleo de la bobina, después de soldar el cable a éste con soldadura para alta temperatura tipo Sn96.3-Ag 3.7 marca Kester, enseguida se enrolló el cable utilizando una bobinadora especial, tratando de evitar la ruptura del cable. Al final la bobina es cubierta con cinta Kapton de 0.003 pulg de espesor; ésta cinta resiste temperaturas mayores a 400°C.

Después de instalar la bobina junto con las demás piezas y conectarlo a la tablilla electrónica, se procedió a realizar la prueba de funcionamiento, la cual consistió en medir la *fem* que se induce cuando se perturba el campo magnético por el paso de un cuerpo ferromagnético a una velocidad dada.

El detector se colocó en una camisa de titanio y se hizo pasar una pieza de metal sobre la superficie de la camisa, en el sitio donde se ubica la bobina, a diversas velocidades tratando de simular el movimiento de la herramienta cuando desciende en el pozo, la fuerza electromotriz inducida esperada se registró en un osciloscopio, resultando de alrededor de 8 mV. Este pulso, en operaciones reales, es registrado por el microcontrolador y enviado al módulo de comunicación de la electrónica para ser transmitido por el cable a superficie donde un programa de computo lo percibe, manteniendo la cuenta de los pulsos que llegan que servirán para estimar la profundidad. La carátula del programa fue presentada en el capítulo 5, especifica-

mente en el inciso 6.2. La siguiente figura muestra la magnitud del flujo magnético del CCL.



Figura H.3. Flujo magnético del detector de coples en la prueba de funcionamiento