

15

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO



FACULTAD DE INGENIERIA

“DISEÑO DE UN SISTEMA
TOMOGRAFICO DE
CAPACITANCIA”

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

AREA MECANICA

P R E S E N T A :

BÜERHEND OROZCO RODRIGO



DIRECTOR:

DR. SAUL SANTILLAN GUTIERREZ

MEXICO, D. F.

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

– **A la Universidad Nacional Autónoma de México:**

Por la formación académica recibida.

– **Al Instituto Mexicano Del Petróleo:**

Por las facilidades proporcionadas para la realización de este trabajo.

Índice.

I. Introducción	1
II. Antecedentes	2
2.1 Introducción	5
2.2 Tomografía de capacitancia	8
2.3 Medición de capacitancias	11
III. Alcance y objetivos	13
IV. Diseño conceptual	14
4.1 Introducción	14
4.2 Descripción	14
4.3 Alternativas	14
4.3.1 Sistema compensador de presión	15
4.3.2 Sistema capacitivo.....	18
4.3.3 Sistema de cierre	20
4.4 Evaluación y selección	22
V. Diseño de configuración	26
5.1 introducción	26
5.2 Sistema compensador de presión	26
5.3 Sistema capacitivo.....	28
5.4 Sistema de cierre	29
VI. Ingeniería de detalle	31
6.1 Introducción	31
6.2 Selección de materiales	31
6.2.1 Estructura	31
6.2.2 Tubo dieléctrico	40
6.2.3 Sensores	43
6.2.4 Aro-sellos y empaques	44
6.2.5 Aceite compensador	46
6.3 Resultados.....	47
6.4 Costo.....	48
Plano de ensamble	49

Conclusiones	50
Anexo 1	51
1 Volumen compensador de presión.	51
2 Cálculo de cuerdas.	54
3 Esfuerzo sobre conector	56
4 Resorte compensador de presión	58
5 Volumen estimado de acero.....	62
6 Espesor de paredes	64
Anexo 2	68
Anexo 3	71
Anexo 4	76
Bibliografía	77

Introducción.

Tomografía de capacitancia.

Tres son las fuentes que representan principalmente los ingresos económicos de México; manufactura, servicios y exportaciones petroleras.

En el ámbito de las exportaciones petroleras, estas representan el 33 % del producto interno bruto lo que significa que la economía mexicana depende en gran medida de este recurso natural. Ante esto, la búsqueda de nuevos yacimientos petroleros, el diseño de sistemas artificiales de producción de crudo (como el sistema gravitacional desarrollado en el IMP) en pozos depresionados (localizados principalmente en el noreste del país), así como herramientas y/o dispositivos que optimicen la producción de crudo a través de la cualificación de los fluidos obtenidos en los pozos han sido, son y serán preocupación constante de la industria petrolera mexicana.

El método tradicional de medición es la separación de la mezcla multifásica en sus componentes monofásicos agua, crudo y gas (placa de orificio (fig.1.2) para el gas y la turbina para el aceite).

Lo simple de este método de medición contrasta con las desventajas de operación de los equipos como son.

- Los separadores trifásicos requeridos son sumamente voluminosos .
- Costo de instalación elevado
- Grandes recursos humanos, tanto en operación como en mantenimiento. son requeridos para su adecuado funcionamiento.

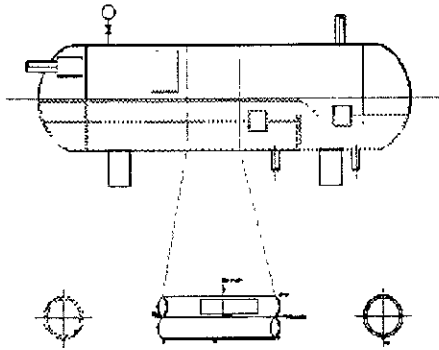


Figura 1.1. Separador multifásico de tipo horizontal



Figura 1.2. Medidor monofásico de orificio (se conecta despues del separador multifásico (fig 1 1))

Para vencer este problema, se han hecho grandes esfuerzos en el diseño de dispositivos de medición multifásica (Fig. 1.3) capaces de aproximarse a lo que puede considerarse un sistema de medición multifásico ideal o sea:

1. No invasor (para evitar caídas de presión y erosión del sensor).
2. Respuesta inmediata
3. Medición en línea que eviten problemas en la representatividad de la línea.
4. Alta confiabilidad que minimice el costo del mantenimiento
5. Independencia del régimen de flujo

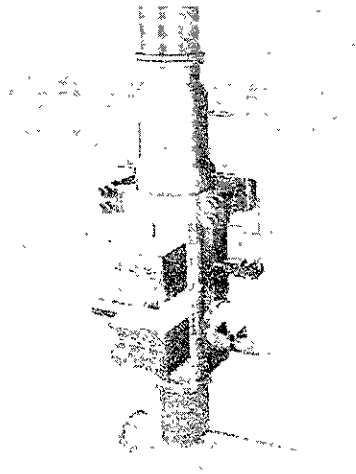


Figura 1.3. Medidor multifásico de flujo vertical.

Lo que se ha logrado con estos diseños dista mucho del caso ideal obteniéndose limitaciones más o menos severas. Todos son sensibles al cambio de régimen de flujo, la mayoría requiere que el flujo sea homogéneo para alcanzar una exactitud aceptable lo cual, en muchos casos, no es posible lograr en tuberías horizontales o inclinadas.

Para superar este problema se emplean dispositivos mezcladores que, como efecto negativo, interfieren en el libre flujo de los fluidos ocasionando caídas de presión que se ven reflejadas en el costo de equipo y energía de bombeo. Algunos cuentan con partes móviles internas que, además de provocar caídas de presión, reducen la confiabilidad y encarecen el mantenimiento, especialmente si el medidor se usa en lugares de difícil acceso como el fondo marino (Fig. 1.4).

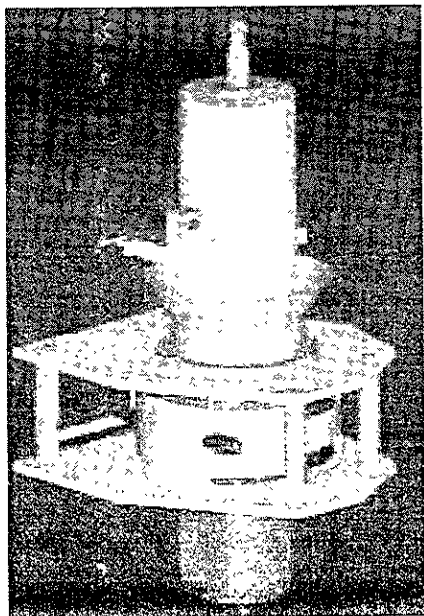


Figura 1.4. Medidor multifásico para uso marino.

En el caso de los medidores multifásicos diseñados para flujo vertical, presentan el inconveniente de una homogenización de flujo bajo como consecuencia, del exceso de burbujas concentradas en el centro de la tubería formando un patrón de flujo anular.

Estos inconvenientes pueden ser superados gracias a los métodos tomográficos desarrollados a principios de los 80s en Inglaterra, Bélgica y los Estados Unidos, ofreciendo medidores multifásicos independientes del régimen de flujo, alta confiabilidad y con un comportamiento aproximado al del tipo ideal.

Antecedentes.

Tomografía y sistemas tomográficos.

2.1 Introducción.

La palabra tomografía, se deriva de las raíz griega “tomos” que significa rebanada y “graphos” que significa imagen. El diccionario Oxford define tomografía como:

- Radiografía en la cual una imagen de un plano predeterminado de un cuerpo u otro objeto es obtenida por la rotación de un sensor.

Por su parte, la Enciclopedia Británica describe tomografía como:

- Compleja técnica comúnmente llamada tomografía computacional o tomografía axial computarizada la cual, fue desarrollada por Godfrey Hounsfield de Inglaterra y Allen Cormack de los Estados Unidos durante la década de los setentas. Desde entonces, esta tecnología ha sido ampliamente usada como herramienta de diagnóstico. En este procedimiento, una angosta barra de rayos x barre a lo largo de una área del cuerpo y es registrada no en un filme o cinta sino con un detector de radiación. Datos obtenidos de varios barridos son integrados por una computadora, la cual usa tablas de absorción de radiación para acceder a la densidad del tejido en miles de puntos. Los valores de densidad aparecen en una televisión como puntos de distinto brillo para producir un detallada imagen de la estructura interna bajo escrutinio

Como puede verse en esta descripción, la tomografía es a menudo percibida como una herramienta médica. Debe ser enfatizado sin embargo, que el concepto de tomografía no esta restringido al campo de la medicina pues en la última década ha sido desarrollada y aplicada como parte de muchos procesos en la industria. Este nuevo campo de aplicación es comúnmente conocido como tomografía de procesos industriales o simplemente tomografía de procesos.

Resulta necesario mencionar que la obtención de imágenes computarizadas de calidad representan solo un primer paso en la ingeniería de proceso. El fin de esta tecnología es cuantitativo o sea, la interpretación de una imagen o más probable, cientos de imágenes correspondientes a diferentes condiciones espaciales y temporales. En muchas circunstancias, un diagnóstico visual basado en la observación de imágenes, será insuficiente excepto quizás, en diagnósticos de mal funciones en proceso. Esto representa la mayor y fundamental diferencia entre la tomografía médica y la tomografía de proceso.

Actualmente existen diferentes técnicas tomográficas disponibles para estudiar complejos fenómenos de proceso (industriales, extractivos etc), por ejemplo ópticos, rayos x, rayos gama, emision de positrones, resonancia magnética, ultrasónicos y eléctricos

La selección de una técnica en particular depende de muchos factores aunque, en un proceso industrial, (ver tabla 2.1) estarán determinados principalmente por los siguientes factores:

- La naturaleza de los componentes contenidos en la línea de conducción, contenedor, reactor o material a ser examinado (principalmente si existe como un sólido, líquido, gas o mezcla multifásica y en que proporciones)
- La información buscada del proceso y su propósito (investigación de laboratorio, optimización de equipo, medidas de proceso o de control)
- Ambiente en donde se realiza el proceso (condiciones ambientales de operación, seguridad, facilidad de mantenimiento, etc)
- El tamaño del equipo de proceso y la escala del fenómeno a ser investigado.

Tabla 2.1 Técnicas tomográficas utilizadas en procesos industriales

Proceso industrial.	Método
Caracterización microestructural de componentes, partículas, pastas, espumas filtros (1- 10 000 μm)	Resonancia magnética. Micro tomografía de rayos x Tomografía óptica. Tomografía neutrónica.
Flujo multifásico (0.01-0.5 m)	Tomografía óptica. Tomografía resistiva. Tomografía capacitiva. Tomografía acústica.
Mezcla de polvos y transporte (0.01-0.5 m)	Tomografía de emisión positrónica. Tomografía capacitiva. Tomografía electrodinámica Transmisión de fotón - gama
Flujo y goteo en estudios de camas de reactores (0.01-0.5 m)	Tomografía de rayos gama Tomografía de rayos x Tomografía de emisión positrónica. Tomografía de capacitancia.
Mapeo térmico de reactores, objetos y atmósferas (0.01 m - 5 Km)	Emisión infrarroja. Tomografía de resistencia. Tomografía de microondas Tomografía de impedancia
Monitoreo de contaminación atmosférica (50 m-10 Km).	Absorción de láser.
Depósitos minerales y exploración de reservorios petrolíferos (50 m-50 km)	Velocidad acústica. Tomografía de difracción acústica

Los componentes básicos para cualquier sistemas tomográficos son: (Fig. 2.1)

- Sensor.
- Hardware. Manejo de información analógica y su conversión a digital.
- Software. Reconstrucción de señal, generación señales de control para el hardware, visualización.

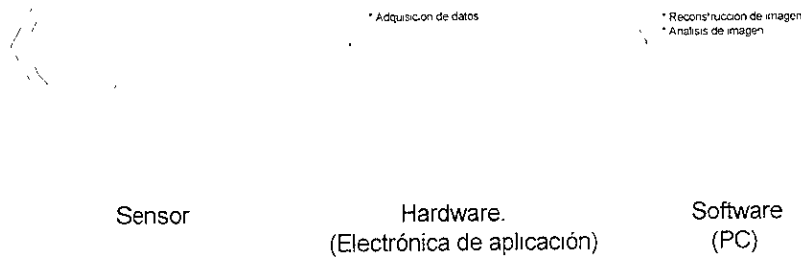


Figura 2.1 Componentes básicos de un sistema tomográfico

Los sistemas tomográficos tienen como principal característica su carácter no invasor o sea, no es necesario romper las paredes del contenedor o tubo para la adquisición de datos así mismo, no intrusos o sea, no debe interferir en la naturaleza del proceso examinado. No siempre es posible satisfacer estas características simultáneamente aunque, en la mayoría de los casos es obtenido.

Cada uno de estos sistemas (dependiendo del tipo de sensor utilizado) presenta ventajas y desventajas de acuerdo a la aplicación y características del proceso por ejemplo, la tomografía de rayos x tiende a ser lenta (tiempo de adquisición de las señales) y de reconstrucción de imágenes de mayor calidad, por su parte, la tomografía eléctrica es rápida y de visualización de datos de menor calidad. Para un proceso en el cual los cambios de interés se realicen en tiempos muy pequeños sería inservible el uso de un sistema tomográfico de rayos x que, si bien proveerá imágenes de calidad, estas no serán de gran uso al no mostrar el fenómeno en tiempo real (tabla 2.2).

Tabla 2.2 Características de algunos sensores tomográficos

Principio	Resolución (%)*	Sensor	Comentarios
Radiación electromagnética	1	Óptico	Rápido Acceso óptico requerido
Radiación Eelectromagnética	1	Rayos x Rayos gama	Lento (2 imágenes/s) Contención de radiación
	1	Emisión positrónica	Detección de partícula
	1	Resonancia magnética	Rápido
Acustica	3	Ultrasonido	Velocidad del sonido Complejo en uso
Medición de propiedades Eléctricas	10	Capacitivo Conductivo Inductivo	Rápido (50 imágenes/s) Bajo costo Aplicable para contenedores pequeños y grandes

* Porcentaje de el diámetro de la sección transversal.

2.2 Tomografía de capacitancia.

Como ha sido mencionado anteriormente, el campo de aplicación de las técnicas tomográficas ha evolucionado de una herramienta médica a una herramienta industrial capaz de caracterizar, estudiar y mejorar los procesos industriales. La creación de nueva tecnología, acompañada del "boom" informático, con sus cada vez mayores velocidades y capacidad de procesamiento de datos, ha hecho posible que fenómenos con altas frecuencias puedan ser estudiados en tiempo real. Como puede verse de la tabla 2.2, los sistemas tomográficos eléctricos, proporcionan una alta frecuencia de medición necesaria para el estudio en tiempo real de los fenómenos

El desarrollo de los sistemas tomográficos de capacitancia tienen sus inicios a mediados de los años 80's dentro del UMIST para la visualización de fluidos multifásicos dentro de los pozos de petróleo. Al mismo tiempo, un grupo en el Centro Tecnológico de Energía Morgantown en los Estados Unidos, estaban desarrollando un sistema similar para la medición de gas en fondos inestables. Los transductores capacitivos utilizados en ambos casos, eran aplicables en condiciones no electroconductoras

De acuerdo a lo ya mencionado, la tomografía de capacitancia puede ser definida como una técnica aplicada en la obtención de información, acerca de la distribución del contenido en tuberías o contenedores obtenida, a partir de las variaciones de las propiedades eléctricas dentro del contenedor.

A partir de esta información, se puede obtener:

- Imágenes de la sección transversal del contenedor.
- Fracciones volumétricas del fluido.
- Velocidad de los componentes del flujo multifásico dentro de la tubería.

Al igual que los demás sistemas tomográficos, el de capacitancia eléctrica consta de un sensor, sistema de adquisición de datos y un sistema computacional para la reconstrucción de datos.

Un sensor tomográfico de capacitancia esta formado por los siguientes elementos:

- Pantalla externa. Es usada para proteger al sensor de interferencias provocadas por campos electromagnéticos externos. Como puede verse de la figura 2.2, el potencial de la pantalla externa esta determinada por su conexión a tierra.
- Pantalla radial. Su principal función es eliminar las capacitancias entre las superficies adyacentes de los electrodos y, forzar a los campos electromagnéticos hacia la región central.
- Tubo o soporte dieléctrico. Como su nombre lo dice, su función es servir como soporte dieléctrico a los electrodos.
- Electrodos.

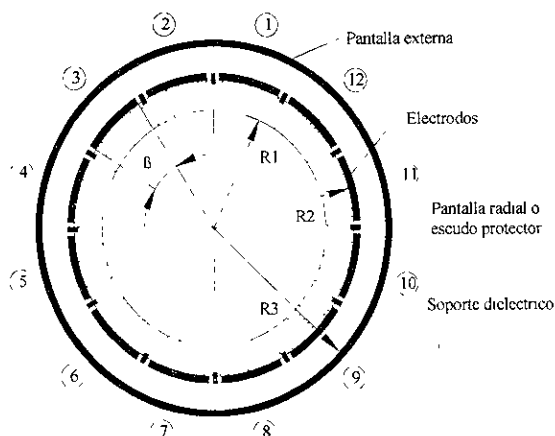


Figura 2.2 Componentes de un sensor tomográfico de capacitancia

Dado que estos sensores son conectados a tuberías industriales, se requieren los siguientes elementos estructurales de diseño:

- Bridas. Elementos necesarios para el montaje y fijación del sensor en la tubería.
- Dispositivo regulador de presión. Regula la presión entre la superficie exterior e interior del tubo dieléctrico

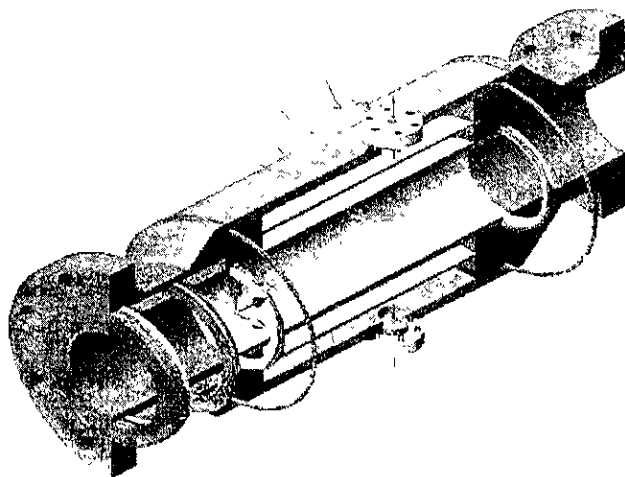


Figura 2.3 Prototipo de sensor tomográfico de capacitancia desarrollado en el IMP

2.3 Medición de capacitancias.

Para explicar el funcionamiento de un sistema tomográfico de capacitancia, es necesario e entender en primer lugar, como funciona el sistema de adquisición de datos .

El principio de funcionamiento es el siguiente:

Un electrodo de capacitancia desconocida C_x es conectado con un par de apagadores CMOS (S_1 y S_2) Fig. 2.4 denominados electrodos origen. Otro electrodo (electrodo detector) es conectado con los apagadores S_3 y S_4 . En un ciclo de trabajo, los apagadores S_1 y S_3 son en primer lugar cerrados (S_2 y S_4 son abiertos) para cargar C_x a un voltaje constante V_c .

La corriente fluye dentro de la entrada de CD1 donde este es convertido en una salida de voltaje negativo. En la segunda mitad del ciclo, los apagadores S_2 y S_4 se cierran (S_1 y S_3 se abren) para descargar C_x a un potencial cero. La corriente de descarga fluye saliendo de CD2 produciendo, una salida positiva de voltaje. Este ciclo de descarga y carga se repite a una frecuencia f . Los pulsos de corriente de carga y descarga son promediados dentro de dos detectores de corriente los cuales producen dos voltaje d.c. V_1 y V_2 .

Los capacitores C_{in} (0.1 microF) aseguran que los potenciales virtuales conectados a tierra en las entradas de CD1 y CD2 permanezcan estables durante la operación (a alta velocidad) de carga y descarga. Dado que durante la operación el electrodo origen es conectado a una baja impedancia (V_c y tierra) y los electrodos detectores siempre a un potencial de tierra, capacitancias parásitas no presentan efecto alguno en las mediciones.

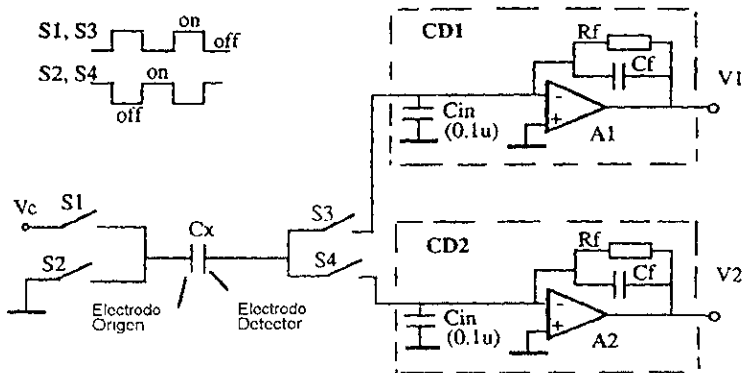


Figura 2.4 Circuito para medición de capacitancias

Un ciclo de captura de datos comienza con el electrodo 1 el cual, es seleccionado como electrodo origen, mientras que todos los demás como detectores. Las capacitancias entre los electrodos pares 1-2, 1-3, ..., 1-12 son medidos simultáneamente. Los 11 canales son habilitados uno por uno mediante un multiplexor para una futura amplificación y conversión analógica a digital. En el próximo paso, el electrodo 2 es seleccionado como origen (el electrodo 1 es conectado a tierra) y los electrodos 3-12 como los detectores. Capacitancias entre 2-3, 2-4, ..., 2-12 son medidos simultáneamente. Este proceso continúa hasta que el electrodo 11 es el origen y el 12 el detector Fig.2.5.

De esta forma, 66 lecturas independientes son obtenidas en cada ciclo o sea, para un sistema de 12 electrodos se tiene:

$$E = \frac{n(n-1)}{2} \tag{1}$$

Donde.

E= número de combinaciones

n= número de electrodos.

En la práctica, el número de electrodos usados es de 8 a 16

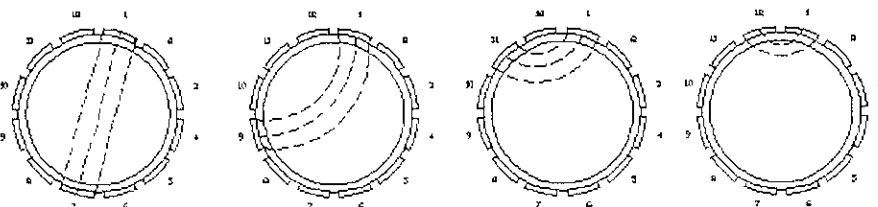


Figura 2.5 Medicion de capacitancias

Alcance y objetivos.

El objetivo de este trabajo es el de iniciar a México en el campo de la tomografía de capacitancia creando un prototipo a nivel laboratorio que permita medir flujo multifásico (agua, gas y crudo). De obtener resultados favorables, el modelo iniciará una segunda etapa de medición de campo en distintos pozos petroleros alrededor del país.

El alcance de este trabajo contempla únicamente el diseño del sistema, sin considerar la fabricación del mismo, así como la realización de pruebas. Al ser este proyecto uno del tipo multidisciplinario (electrónica, computación, matemáticas aplicadas), el esfuerzo por parte del autor, contempla únicamente la parte mecánica y estructural.

Diseño conceptual.

Selección de materiales y ensamble.

4.1 Introducción.

En el presente capítulo, se mostrarán los distintos sistemas que conforman el diseño, su función, opciones consideradas así como, la mejor opción según los requerimientos.

4.2 Descripción.

Los sistemas que conforman el presente prototipo son básicamente :

- Sistema compensador de presión.
- Sistema capacitivo.
- Sistema de cierre.

La figura 4.1 muestra en diagrama de bloques del sistema

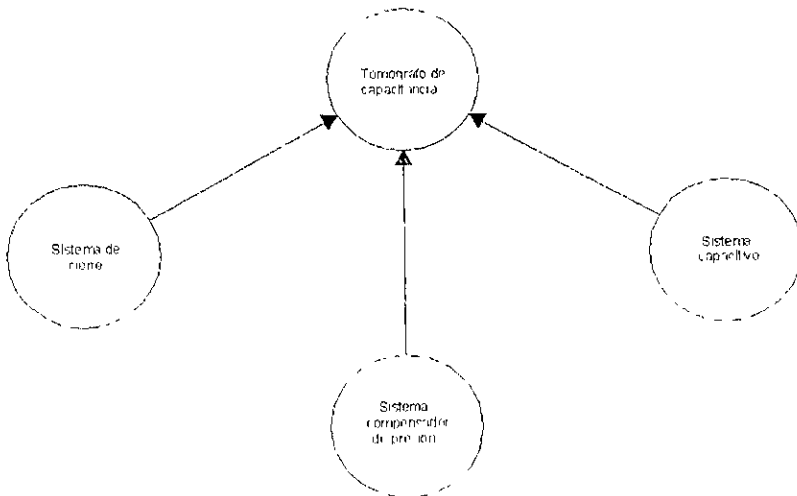


Figura 4.1 Diagrama de bloques del sistema tomográfico de capacitancia

Sistema compensador de presión

Como su nombre lo dice la principal función de este sistema es compensar las diferencias de presión que se generan entre la pared interna y externa del tubo dieléctrico, así como la expansión térmica del fluido neumático.

Sistema capacitivo.

Desde el punto de vista electrónico representa la parte de mayor importancia referente a la estructura . Su función es formar el arreglo capacitivo que servirá como sensor del fluido a estudiar.

Sistema de cierre.

Este sistema conforma al arreglo o elementos necesarios para el cerrado de el diseño.

4.3 Alternativas .

4.3.1 Sistema compensador de presión.

a) Sistema externo de tipo vertical.

De diseño conservador, este dispositivo consta de un único pistón colocado en la parte superior del sensor tomográfico. La simplicidad de esta opción podría mostrar limitantes al requerirse conductores externos que transfieran la presión hidráulica a la cámara interna y externa del tubo dieléctrico.

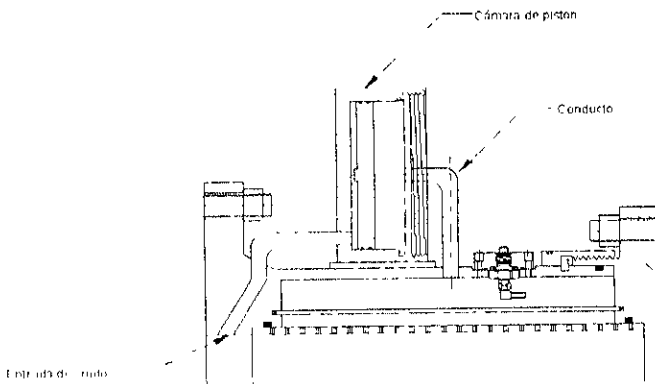


Figura 4.1 Sistema externo de tipo vertical

b) Sistema externo de tipo horizontal.

Con varios pistones en el exterior del prototipo esta opción (integrada a la brida de entrada) elimina la necesidad de conductos exteriores. En este caso la transmisión de la presión es lograda mediante orificios de comunicación.

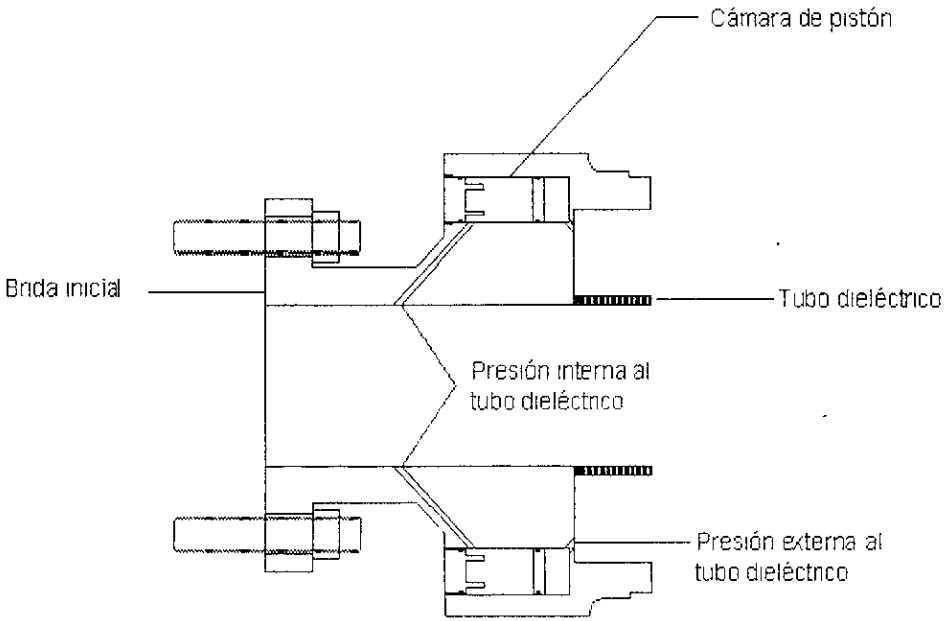


Figura 4.2 Sistema externo de tipo horizontal

c) Sistema interno central múltiple

Como su nombre lo dice, el sistema de regulación se encuentra integrado a la brida de entrada en su parte central (lo que reduce el número de geometrías externas). El número de pistones estará dado por las necesidades de compensación requeridas (fig 4.3).

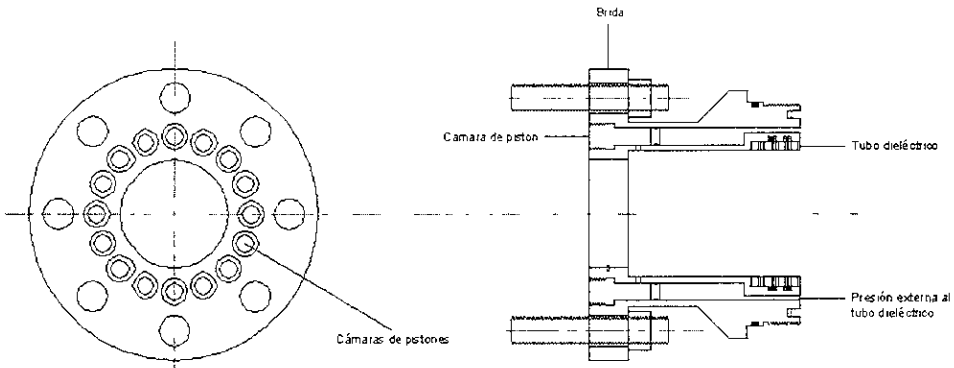


Figura 4.3. Estructura metálica del sistema tomográfico de capacitancia

d) Sistema interno central único.

Semejante al anterior, reemplaza el concepto de multipistones de compensación por un único pistón anular (fig. 4.4).

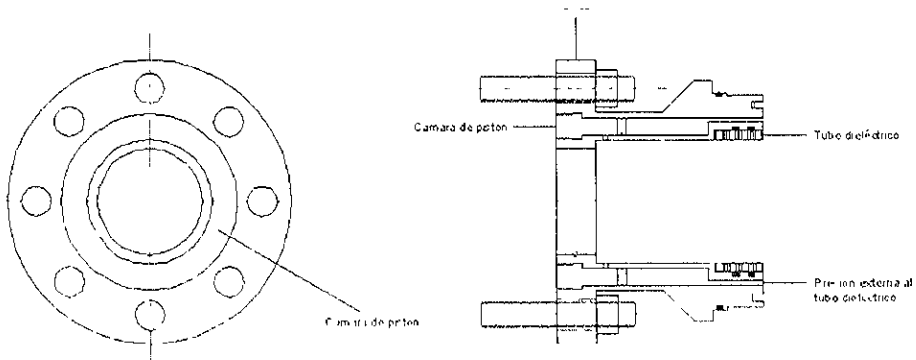


Figura 4.4. Estructura metálica del sistema tomográfico de capacitancia

4.3.2 Sistema capacitivo.

a) Sistema capacitivo impreso

Más que una impresión, este sistema hace uso de la tecnología de pinturas y/o epóxicas conductoras de electricidad las cuales, pueden ser aplicadas por distintos medios entre los cuales destaca la serigrafía (fig 4.5).

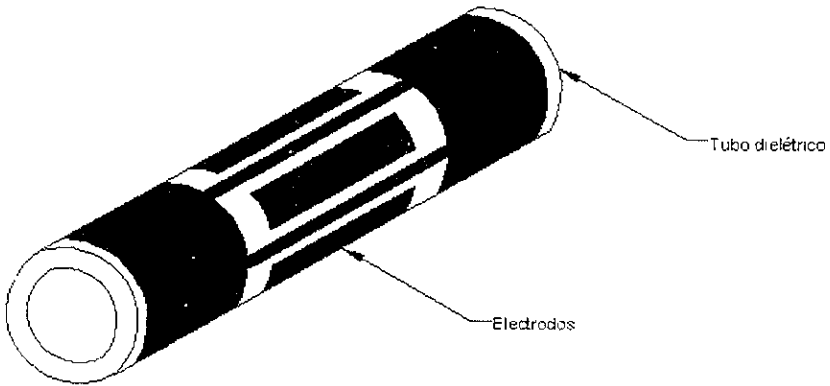


Figura 4.5. Arreglo capacitivo de electrodos mediante técnicas de serigrafía

b) Sistema capacitivo adherido.

En este sistema láminas metálicas forman el conjunto de electrodos, y demás componentes, alrededor del tubo dieléctrico. La fijación se logra con pegamento especial (fig 4.6).

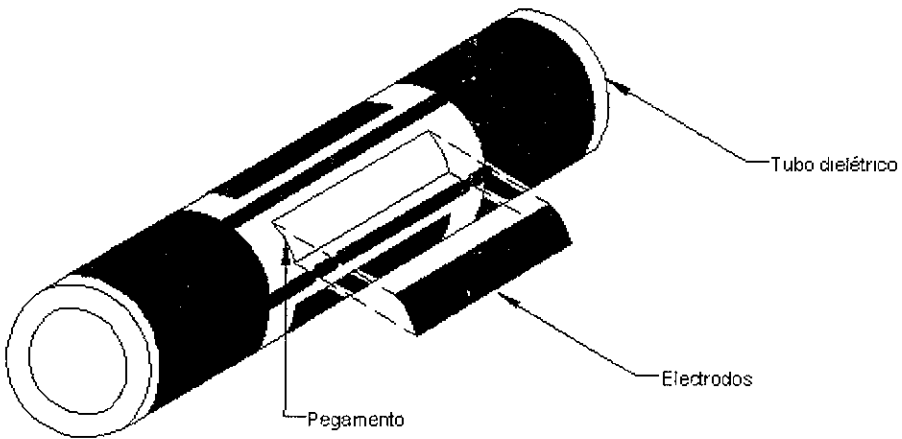


Figura 4.6. Arreglo capacitivo de electrodos mediante láminas metálicas.

4.3.3 Sistema de cierre.

a) Sistema de cierre externo

En este prototipo su cierre se logra mediante una rueda roscada que es restringida en su movimiento frontal con un disco tope. Como puede verse en la figura 4.7 las dos cuerdas son externas al contenedor a presión.

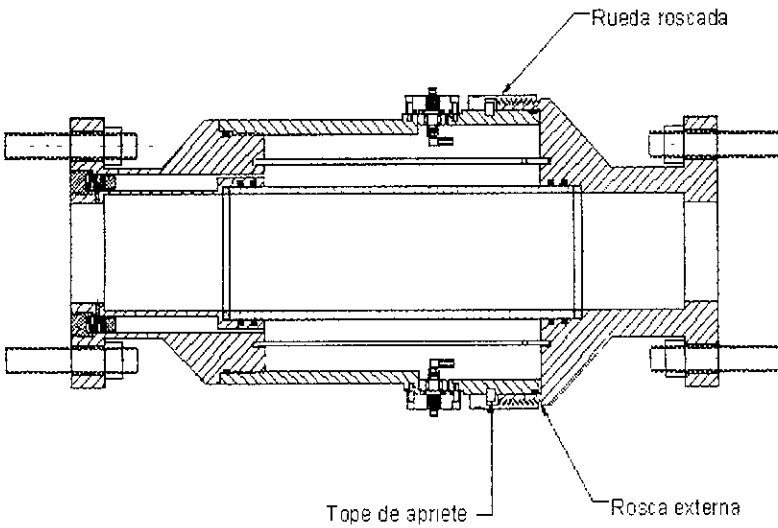


Figura 4.7 Sistema de cierre externo

b) Sistema de cierre interno.

De diseño simple, elimina el uso de cualquier elemento interno y/o externo para el cierre de el contenedor. Como puede verse de la fig 4.8 dos uniones roscadas son todo lo que se requiere para lograr el cierre.

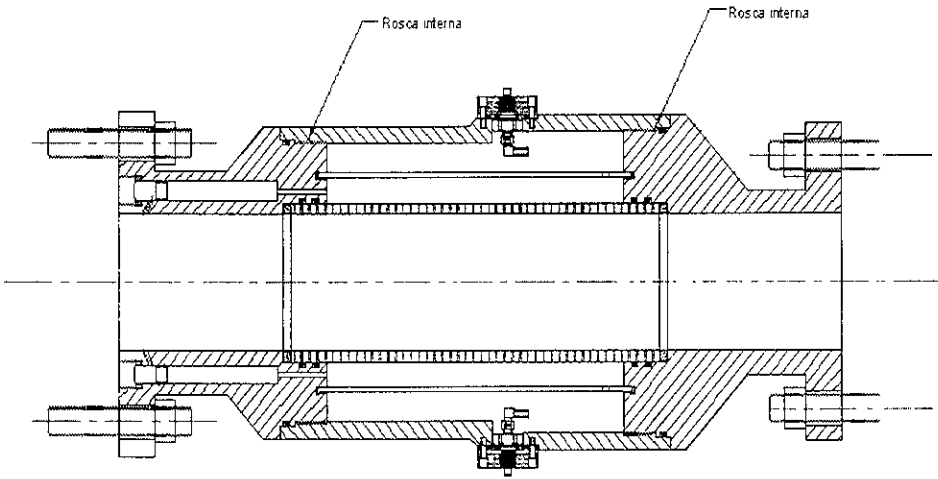


Figura 4.8. Sistema de cierre interno

4.4 Evaluación y selección .

Habiendo presentado las distintas opciones de solución para los sistemas que conforman el prototipo, se procederá con la selección de la mejor opción de acuerdo con los requerimientos y necesidades del sistema

El puntaje que se dio de acuerdo a los adjetivos alcanzados en cada uno de los sistemas puede ser visto en la tabla 4.1

Tabla 4.1. Criterios empleados en la selección de sistemas

Puntaje	Descripción
100	Completa satisfacción; Objetivo satisfecho en su totalidad.
90	Amplia satisfacción; Objetivos satisfechos en puntos de mayor importancia.
70	Considerable satisfacción; Objetivos satisfechos en la mayoría de sus aspectos.
50	Moderada satisfacción; Objetivos satisfechos en la mitad de sus aspectos.
30	Menor satisfacción; Objetivos satisfechos en la menos de la mitad de sus aspectos.
10	Mínima satisfacción; Objetivos satisfechos en un grado pequeño.
0	Insatisfactorio; Objetivos no satisfechos.

Sistema	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Externo Vertical	70	50	100	50	100	100	100	100
Externo Horizontal	70	70	90	50	90	90	90	90
Interno central Multiple	50	50	10	90	70	70	70	70
Interno central Único	100	100	100	90	100	90	100	100
Importancia	5	5	3	3	3	5	3	5
Externo Vertical	350	250	300	150	300	500	300	500
Externo Horizontal	350	350	270	150	270	450	270	450
Interno central Multiple	250	250	30	270	210	350	210	350
Interno central Único	500	500	300	270	300	450	300	500
								TOTAL
Externo Vertical	0.70	0.50	1.00	0.55	1.00	1.00	1.00	1.00
Externo Horizontal	0.70	0.70	0.90	0.55	0.90	0.90	0.90	0.90
Interno central Multiple	0.50	0.50	0.10	1.00	0.70	0.70	0.70	0.70
Interno central Único	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.90	1.00	1.00
								6.75
								6.45
								4.90
								7.90

Sistema compensador de presión:

Muy importante=5; Importante=3; Poco importante=1

I. Puntos de fuga

II. Confidabilidad

III. Operaciones requeridas en armado

IV. Eficiencia volumen ocupado vs desplazado.

V. Número de maquinados

VI. Maquinados de exactitud

VII. Número de piezas

VIII. Elementos a dar mantenimiento

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Sistema capacitivo impreso.	100	100	100	90	100	100	90	100
Sistema capacitivo adherido	100	90	100	70	100	90	70	70
Importancia	5	5	5	3	3	5	3	3
Sistema capacitivo impreso.	500	500	500	270	300	500	270	300
Sistema capacitivo adherido	500	450	500	210	300	450	210	210
Sistema capacitivo impreso.	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Sistema capacitivo adherido	1.00	0.90	0.90	0.78	1.00	0.90	0.78	0.70
Total								
								8.00
								6.96

Muy Importante=5; Importante=3; Poco importante=1

IV Operaciones de impresion o pegado
 V. Elementos externos de fijación
 VI Paralelismo entre electrodos.

I Resistencia térmica
 II Igualdad geométrica
 III Soidabilidad

VII. Puntos de unión
 VIII Tiempo de fabricación

Sistema	I	II	III	IV	V
Sistema de cierre externo	100	100	100	100	100
Sistema de cierre interno	90	70	70	90	100
Importancia	3	3	3	3	3
Sistema de cierre externo	300	300	300	300	300
Sistema de cierre interno	270	210	210	270	300
Sistema de cierre externo	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Sistema de cierre interno	0.90	0.70	0.70	0.90	1.00
Total					
					5.00
					4.20

Sistema de cierre

Muy Importante=5; Importante=3; Poco importante=1

I Número de elementos
 II Ensamblajes difíciles.
 III Número de maquinados

IV Dimensiones

V Maquinados de exactitud.

Diseño de configuración.

5.1 Introducción.

En el presente capítulo se presentará el diseño de configuración utilizando la mejor opción evaluada para cada uno de los diferentes sistemas.

5.1 Sistema compensador de presión.

El sistema compensador de presión (fig. 5.1) consta de un pistón anular central el cual, coincide en movimiento con el flujo que circula a través del sistema. Dos *o-rings* (uno en su diámetro mayor y el otro en el menor), crean el sellado que compensa por un lado, la diferencial de presión entre la pared externa e interna del tubo dieléctrico así como la expansión volumétrica del fluido hidráulico consecuencia de cambios de temperatura. Para asegurar el movimiento del pistón en aquellos casos en donde exista una contracción del fluido hidráulico (presiones en ambos extremos del tubo dieléctrico iguales), un resorte ejercerá la fuerza necesaria para el movimiento del mismo.

El sello o tapa del sistema conserva la misma geometría que el pistón, así como los respectivos *o-rings* que garantizan su sellado. Este elemento está roscado en su diámetro exterior y cuenta internamente con la base anular del resorte antes mencionado.

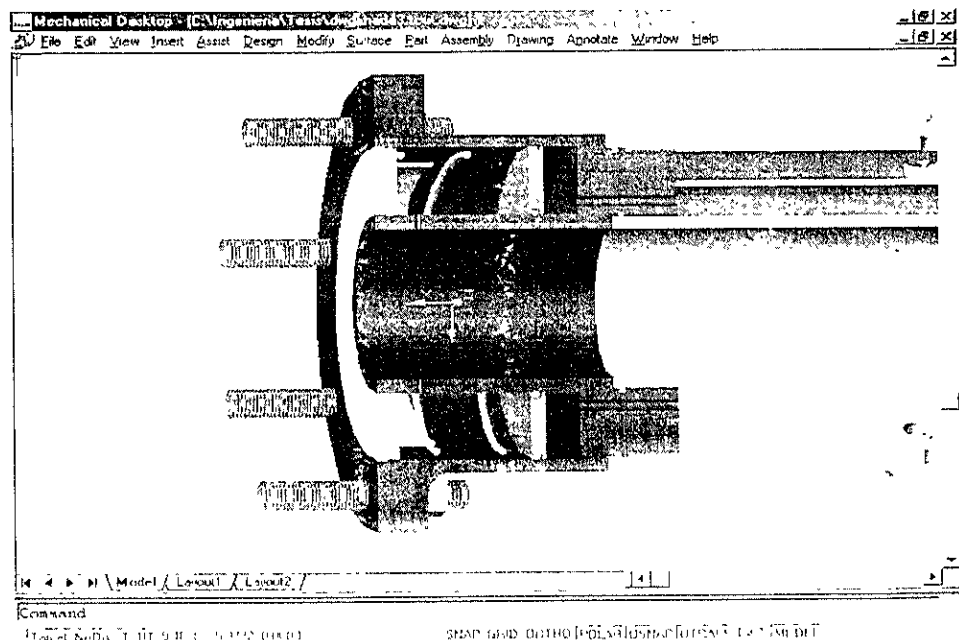


Figura 5.1. Corte lateral del sistema compensador de presión

En la fig. 5.2 se puede ver de una forma mas clara los elementos que conforman el sistema compensador de presión. Destacan de izquierda a derecha la tapa roscada del sistema con su base o soporte anular para el resorte, el pistón con sus *o-rings* de sellado, así como los conductos que comunican la pared interna y externa del tubo dieléctrico.

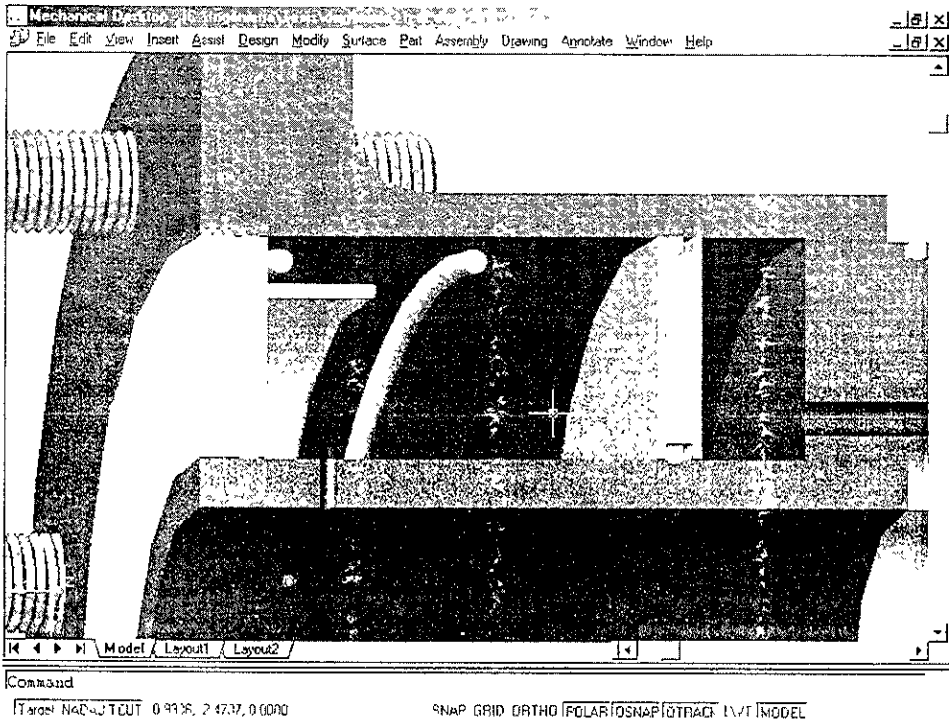


Figura 5.2 Cámara de pistón

5.2 Sistema capacitivo.

El sistema capacitivo esta montado sobre un material dieléctrico que cuenta con las características de soportar más de 100 °C, el fluido de trabajo que en este caso es crudo, agua y gas.

Los electrodos son impresos sobre el tubo mediante procesos serigráficos los cuales, permiten en una sola operación obtener la geometría vista en la fig. 5.3.

El material a utilizar debe permitir el soldado y/o el pegado de cables que transmiten la información para su proceso e interpretación.

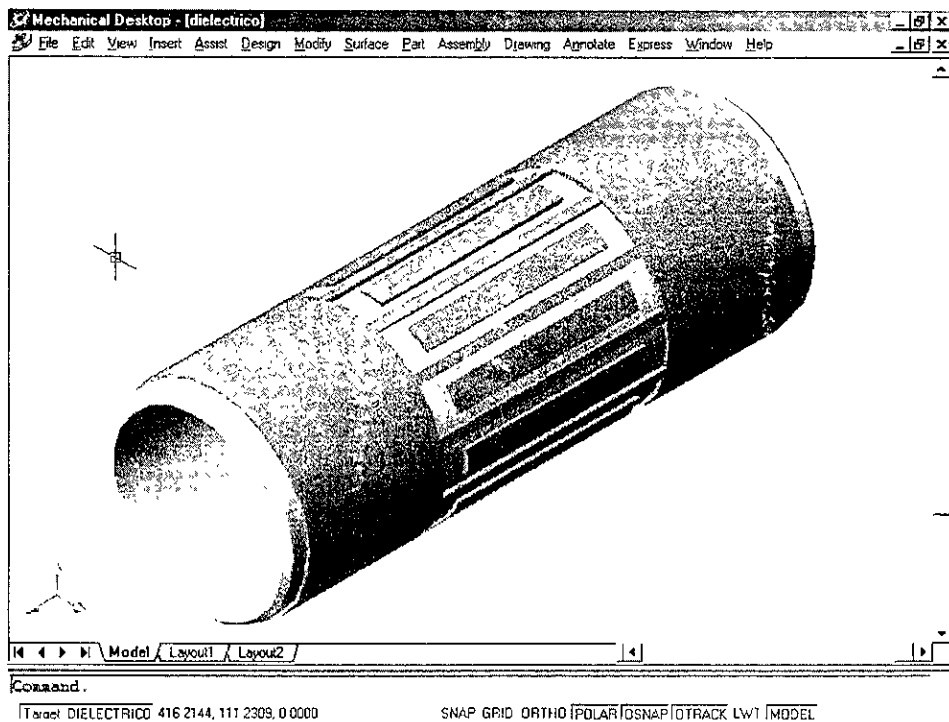


Figura 5.3. Electrodo capacitivos impresos mediante procesos de serigrafía

5.3 Sistema de cierre.

De diseño simple cumple con el dicho de que la mejor solución es la más simple. De esta forma, el sistema de cierre consta únicamente de dos cuerdas que pueden ser apretadas al girar solo una de la bridas (ver fig. 5.4).

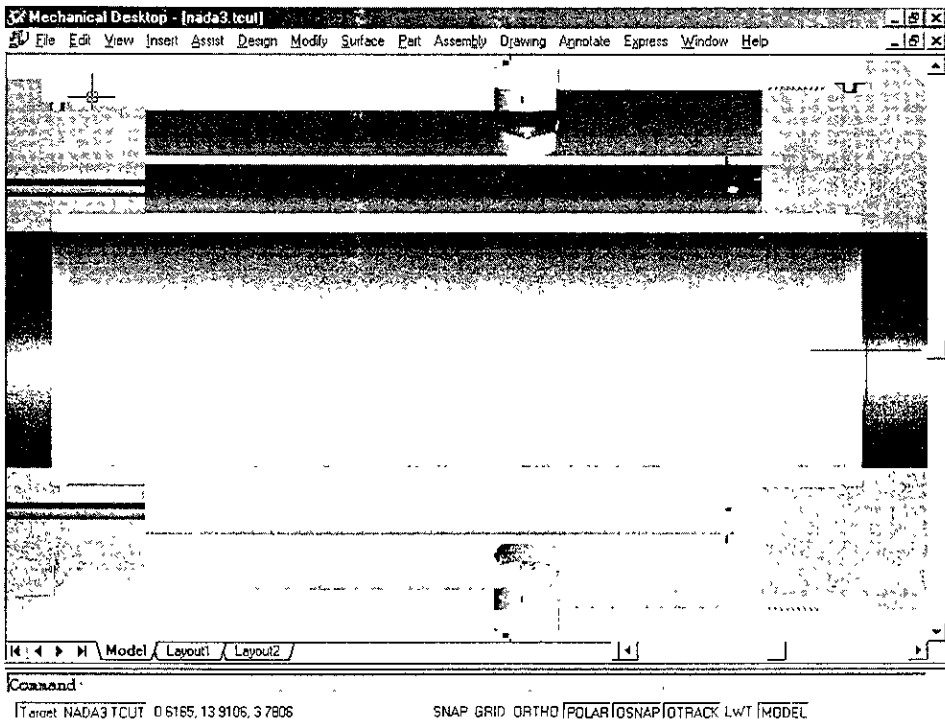


Figura 5.4. Sistema de cierre para sensor de capacitancia

En la fig. 5.5 se puede ver con mayor detalle la configuración del sistema de cierre. El sistema esta formado básicamente por una unión roscada y un *o-ring* para sellado .

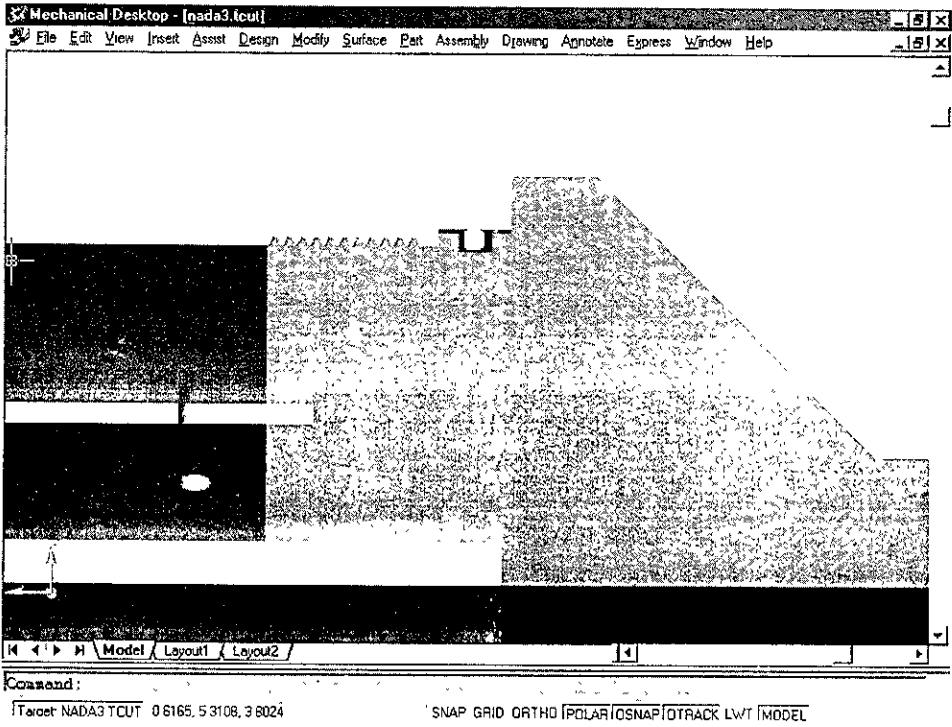


Figura 5.5. Ampliacion del sistema de cierre.

Ingeniería de detalle.

Selección de materiales y ensamble.

6.1. Introducción.

En el presente capítulo se mostrarán los criterios en la selección de materiales para cada uno de los elementos que conforman al prototipo, los posibles candidatos, así como el mejor material. Cuando el número de materiales candidatos ofreció varias posibilidades, se utilizó el método de ponderaciones múltiples para obtener la mejor selección. Cuando el caso así lo requirió, se hizo uso de modelos matemáticos, tablas y pruebas de laboratorio que predijeran o modelaran el comportamiento analizado, así como software que facilitara y visualizara los resultados. En este caso el software ocupado fue Maple V, Autocad, Mechanical desktop y Visual Basic.

6.2 Selección de materiales.

6.2.1 Estructura.

Para la presente estructura (ver Fig. 4.1) las condiciones de trabajo son aquellas que encuentran a la salida de los pozos de producción de crudo o sea:

1. Presión máxima de trabajo → 15 atm
2. Temperatura máxima de trabajo → 110 °C
3. Tipo de atmósfera, marina.
4. Contacto con agentes corrosivos como ácido sulfhídrico (H₂S) y monóxido de carbono (CO)
5. Tipo de fluido, no aereado o sea, carente de oxígeno.

Lo que se espera del material a seleccionar es:

- Resista las condiciones de trabajo (mecánicas, corrosivas y de manejo).
- Maquinabilidad

- Confiabilidad (factor de seguridad min. de 70 % en su funcionamiento y mantenimiento de sus partes de 1 a 2 veces al año).
- Disponibilidad (materiales y/o componentes adquiridos en el mercado nacional).
- Bajo costo.
- Vida útil mínima de un año

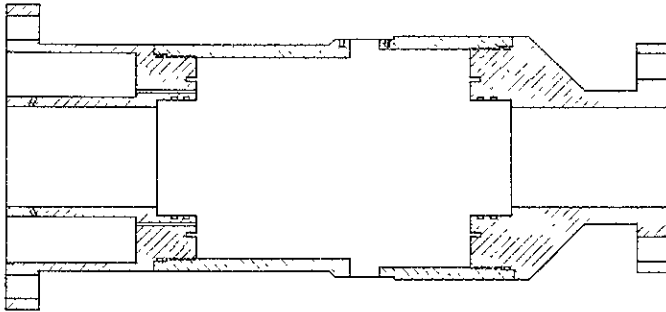


Figura 6.1 Estructura metálica del sistema tomográfico de capacitancia

Dentro de las distintas familias de aleaciones existentes (hierro, titanio, cobre, aluminio, níquel, magnesio etc) existen varias que, desde un punto de vista mecánico, cumplen con los requerimientos y necesidades del dispositivo sin embargo, su alto costo o escasa disponibilidad, hacen de su aplicación exclusiva en diseños donde sus características especiales son requeridas. Este es el caso de las aleaciones de titanio y níquel en donde su costo elevado y baja disponibilidad limitan su aplicación en la ingeniería (ver tabla 6.1)

Tabla 6.1 Costo de distintas aleaciones metálicas

Metal	\$/Kg. *	Disponibilidad
Acero al carbón 1020	0.85	Nacional
Acero 4140	2.20	Nacional
Acero inoxidable 316	4.50	Nacional
Monel 400	34.00	Importación
Titanio	58.00	Importación

* Precios en dólares americanos más impuesto

Ante lo expuesto tenemos que el costo, como primer criterio, simplifica la selección de materiales a aleaciones ferrosas, de cobre y aluminio.

Para el caso del aluminio, se tiene que mecánicamente no es solución para la presente aplicación ya que:

- La baja resistencia al impacto de este material, hace muy probable la falla del dispositivo como consecuencia de algún accidente.
- Al ser un material con características anódicas, se presentaría un proceso corrosivo del tipo galvánico al ser conectado a la línea producción hecha de acero*.
- Existen otras opciones con mejores propiedades e igual o mejor costo

Las aleaciones de cobre por su lado, presentan mejores propiedades mecánicas que el aluminio aunque presentan los siguientes inconvenientes:

- La resistencia al impacto de las aleaciones de cobre ,aunque mejores que las del aluminio, son inferiores a las aleaciones de hierro. Como puede verse de la tabla 6.2, la energía de impacto de la aleación de cobre C71500 (70% Cu-30% Ni) es mucho menor que la del acero 1020.
- Las aleaciones de cobre no son recomendadas en ambientes donde este presente ácido sulfhídrico húmedo (Ref 6.1).
- En el caso de utilizar aleaciones con gran contenido de zinc, esta sufrirá del proceso de deszincado como consecuencia del ácido sulfhídrico presente.
- Densidad mayor a la del acero

Tabla 6.2 Resistencia al impacto de algunas aleaciones de cobre y hierro

Aleación	Resistencia al impacto Izod [J]
C61300	54-66
C71500	81
C95300	23
C26000	14
AISI 1020	125
AISI 1040	50

*En este caso conviene mencionar que al ser el área catódica varias veces mayor (tubería de acero) que la anódica (sensor de aluminio), la corrosión galvánica del aluminio sería acelerada. De tener un caso contrario los efectos serían mucho menores.

En este momento se sabe que las aleaciones ferrosas constituyen la mejor opción de diseño dado su costo, disponibilidad y propiedades mecánicas, esto llevaría a pensar que el problema de selección del material esta solucionado pero, al encontrarse con un número enorme de aceros a elegir, seleccionar al mejor de entre tantos se convierte en un dolor de cabeza para el diseñador.

Para facilitar esta tarea es necesario considerar las características deseadas del material por ejemplo, para que usar un acero aleado al carbono como el 4140 que esta diseñado principalmente para obtener grandes durezas a través de tratamientos térmicos, si no se requiere esta característica para la aplicación o un acero con esfuerzo de cedencia de más de 500 Mpa si con 200 Mpa es suficiente. Con la información proporcionada al principio de este capítulo y sabiendo que no es recomendado el uso de aleaciones ferrosas con durezas y esfuerzos de cedencia mayores a 22 HRC y 550 Mpa (para evitar la falla del material por fragilización en ambientes donde existe ácido sulfhídrico, (ref.6.2)) se puede simplificar la selección de aceros a aceros al carbono.

Para explicar el porque de no considerar a los aceros inoxidables como opción de solución, es necesario analizar su comportamiento mecánicos de acuerdo a la teoría de recipientes a presión.

Para un recipiente a presión con los extremos abiertos se tiene que el esfuerzo radial y tangencial esta dado por:

(6.1)

$$\sigma_{rr} = - \frac{\alpha E}{r^2(1-\nu)} \int_a^r \Delta T r dr + \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) C'_1 + \frac{C'_2}{r^2}$$

(6.2)

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\alpha E}{r^2(1-\nu)} \int_a^r \Delta T r dr - \frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu} + \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) C'_1 - \frac{C'_2}{r^2}$$

De donde:

(6.3)

$$C'_1 = \frac{1}{b^2 - a^2} \left(p(a^2 - p, b^2) + \frac{\alpha E}{1-\nu} \int_a^b \Delta T r dr \right)$$

$$(6.4)$$

$$C_2 = -p_1 a^2$$

$$(6.5)$$

$$\Delta T = \frac{T_a - T_b}{\ln \frac{b}{a}} \ln \frac{b}{r}$$

$$(6.6)$$

$$\sigma_{zz} = E(\varepsilon_{zz} - \alpha \Delta T) + \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta})$$

$$(6.7)$$

$$\varepsilon_{zz} = \left[\frac{1}{E(b^2 - a^2)} \right] \left[(p_1 a^2 - p_2 b^2) - 2\nu(p_1(a-c)^2 - p_2(b-c)^2) \right] + \frac{2\alpha}{b^2 - a^2} \int_a^b \Delta T r dr$$

Donde:

α = Coeficiente de expansión térmica.

E = Módulo de Young.

ν = Coeficiente de Poisson.

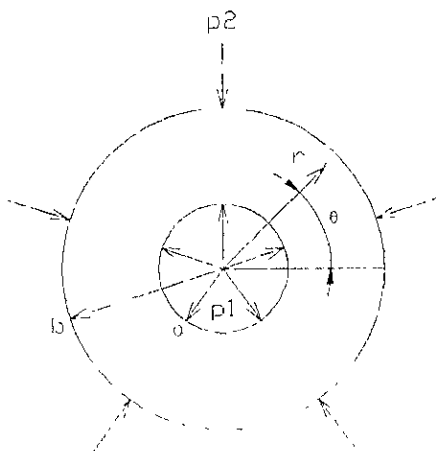


Figura 6.2 Esfuerzos presentes en cilindro de espesor (b-a)

De la ecuación (6.1) y (6.2) se tiene:

(6.8)

$$\int \Delta T r dr = \frac{T_a - T_b}{\ln(b/a)} \left[\frac{r^2}{2} (\ln(b) - \ln(r) + 0.5) - \frac{a^2}{2} (\ln(b) - \ln(a) + 0.5) \right]$$

(6.9)

$$\int_a^b \Delta T r dr = \frac{T_a - T_b}{\ln(b/a)} \left[\frac{b^2}{4} - \frac{a^2}{2} (\ln(b) - \ln(a) + 0.5) \right]$$

Para conocer los esfuerzos a lo largo de todo el espesor del material, se programaron las ecuaciones anteriores mediante Maple V como puede verse en el anexo 2 de este libro. Los resultados que se obtienen son los esfuerzos máximos para falla de materiales no frágiles según los criterios de Von Mises.

En la grafica 6.1 se muestran los esfuerzos a los cuales esta expuesto un acero inoxidable del tipo 316 y un acero al carbono 1020 (el factor de seguridad utilizado es de 70% o sea, una presión de diseño es de 2584 Mpa y 187 °C). El máximo esfuerzo presente en el acero 316 es de 375 Mpas lo que significa que este material no ofrece un factor de seguridad en su diseño del 70% por el otro lado, el acero 1020 con un esfuerzo máximo de 285 Mpa satisface este factor de seguridad. En la tabla 6.3 se muestran las características mecánicas que explican este comportamiento.

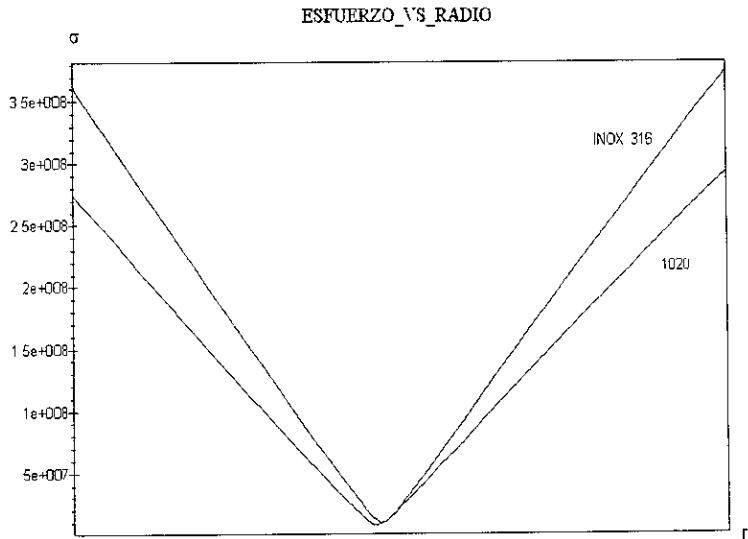
Tabla 6.3 Propiedades mecánicas de aceros 1020 y 316 .

Acero	Y.S [Mpa]	Coefficiente de expansión térmica	$\sigma \rightarrow T_{in} = 20$ [Mpa]	$\sigma \rightarrow T_{in} = 50$ [Mpa]	$\sigma \rightarrow T_{in} = 110$ [Mpa]	$\sigma \rightarrow T_{in} = 187$ [Mpa]	$\Gamma.S^*$ %
316	310.00	15.90	19.44	81.80	206.60	366.80	47.00
1020	295.00	12.10	19.55	68.65	167.00	295.00	76.00

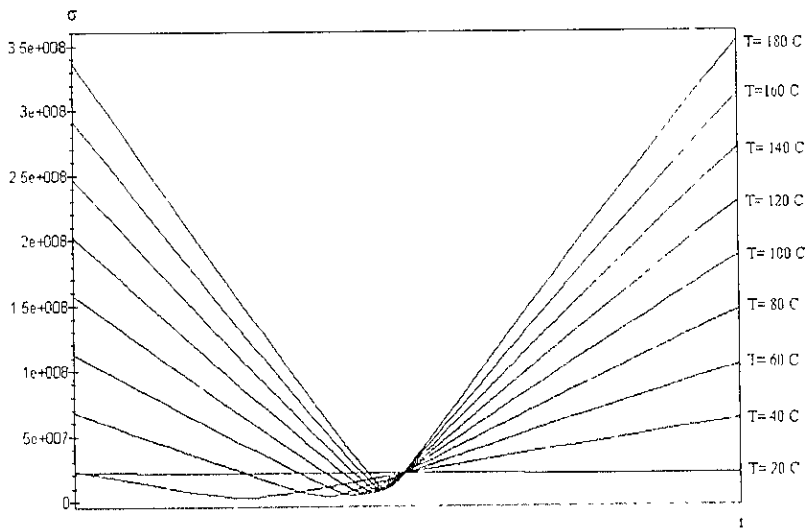
* Factor de seguridad del material antes de la falla

Para una diferencial de temperatura igual a cero se tiene que los esfuerzos producidos por la diferencia de presiones representan apenas 19 Mpa (cantidad insignificante a la presente en condiciones donde una diferencial de temperaturas existe) Esto indica que los esfuerzos presentes en este diseño son en su mayoría térmicos y, por lo tanto, dependientes de las propiedades térmicas del material.

De esta forma los esfuerzos presentes en el acero inoxidable 316 son mayores al los del acero al carbono 1020 al tener una constante de expansión térmica mayor que la del acero al carbono de 15.90 y 11.70 $\mu m / m \text{ } ^\circ C$ respectivamente.



Gráfica 6.1. Gráfica esfuerzo contra distancia radial de dos aleaciones de hierro



Gráfica 6.2. Criterio de Von Mises para acero inox 316 expuesto a diferentes temperaturas internas (la temperatura externa es la ambiental)

En este momento se sabe que el acero inoxidable 316 no ofrece las ventajas mecánicas con las que cuentan los aceros al carbono sin embargo, su carácter de inoxidable podría ser una característica de importancia que compense sus propiedades mecánicas inferiores.

Es cierto que, bajo ciertas condiciones corrosivas como atmosféricas, el acero inoxidable muestra mayor resistencia que los aceros de bajo carbono sin embargo, para ciertas condiciones, el acero inoxidable es mucho más propenso a picarse que los aceros al carbono. Para el caso de este prototipo, el acero inoxidable es poco aprovechado en ambientes corrosivos no aerados (el oxígeno no está presente en crudos obtenidos a más de 100 m de profundidad, (ref 6.3)) donde la película protectora de óxido de cromo no puede ser formada, originando un aumento en las imperfecciones superficiales del acero iniciadores de picaduras (la presencia de CO₂ (ver tabla 6.7) ataca al acero de una forma localizada o sea por picaduras ref 6.1).

Este problema es solucionado con un recubrimiento superficial que convierta su superficie en una no conductora aunque ¿por qué pagar el costo de un acero inoxidable con propiedades mecánicas inferiores a otros aceros, si se tiene que proteger con un recubrimiento anticorrosivo adicional?. Los aceros al carbono recubiertos ofrecen mejor precio, propiedades mecánicas, y buena resistencia a la corrosión.

Seleccionando al mejor acero se tiene:

Material	Esfuerzo de cedencia	Resistencia al impacto	Soldadura	
Acero 1020	3.0	5	5	
Acero 1030	4.0	4	4	
Acero 1040	5.0	3	3	
Importancia	2.0	3.0	2.0	
Acero 1020	6.0	15.0	10.0	
Acero 1030	8.0	12.0	8.0	
Acero 1040	10.0	9.0	6.0	
Acero 1020	0.6	1.0	1.0	2.6
Acero 1030	0.8	0.8	0.8	2.4
Acero 1040	1.0	0.6	0.6	2.2

Muy importante 3, Importante 2, Poco importante 1

De acuerdo a los cálculos de la sección 6.3.5, el esfuerzo de cedencia mínimo requerido es de 276.4 Mpa lo que significa, que un acero 1020 rolado en caliente (Y.S -210 Mpa) no satisface las necesidades del diseño. 1 o anterior debe ser tomado en cuenta para garantizar la confiabilidad del diseño

En la siguiente tabla se pueden ver algunas propiedades del acero 1020 de acuerdo a su proceso de conformado.

Proceso de conformado	Y.S [Mpa]	DUREZA [HDB]
Rolado	330.00	78.00
Rolado en frío	350.00	68.00
Rolado en caliente	210.00	75.00
Normalizado	345.00	73.00
Recocido	295.00	70.00

Fuente Matweb.

Para mejorar la baja resistencia de este acero a la corrosión y desgaste en una misma operación, se aplicará un proceso de nitrurizado que, por un lado, creará una superficie no conductora y dura que reducirá la corrosión y aumentará la resistencia al desgaste por abrasión.

6.2.2 Tubo dieléctrico.

La principal función de este elemento es como ya se dijo, servir de soporte mecánico a los electrodos capacitivos, así como de conducto por el cual circula el flujo a estudiar.

La tabla 6.4 muestra algunos cerámicos y vidrios de aplicación en la ingeniería.

Tabla 6.4 Características de algunos cerámicos de uso en la ingeniería

Material	Ventajas	Desventajas	Candidato
Oxido de Berilio	<ul style="list-style-type: none"> Alta conductividad térmica. Excelentes propiedades dieléctricas. Resistente a la corrosión Disponible en distintas geometrías 	<ul style="list-style-type: none"> Uno de los más caros Tóxico si se inhala 	NO
Carburo de boro	<ul style="list-style-type: none"> Gran dureza. Resistencia a altas temperaturas 	<ul style="list-style-type: none"> Electroconductor Poca resistencia a choques térmicos 	NO
Nitruro de boro	<ul style="list-style-type: none"> Conductividad térmica alta Excelentes características dieléctricas. No tóxico. Puede ser utilizado en contacto con muchos metales como el hierro, níquel, aluminio, estaño, cobre, germanio e indio 	<ul style="list-style-type: none"> En presencia de agua el óxido de boro tiende a hidrolizarse degradando sus propiedades térmicas y dieléctricas 	NO
Macor	<ul style="list-style-type: none"> Maquinable con herramientas ordinarias de corte. Adecuado para serigrafía de electrodos. Estabilidad térmica Resistencia química. Trabajo continua a 800 °C 	<ul style="list-style-type: none"> Costo elevado 	SI
Carburo de silicio	<ul style="list-style-type: none"> Uno de los cerámicos más resistentes a la corrosión 	<ul style="list-style-type: none"> Semiconductor 	NO
Nitruro de silicio	<ul style="list-style-type: none"> Soporta grandes esfuerzos y elevadas temperaturas Inerte con ácidos minerales, aluminio, plomo, estaño, zinc, plata y oro Resistente al desgaste. 	<ul style="list-style-type: none"> Reacciona con soluciones causticas calientes, sales, magnesio, cobre y acero inoxidable 	NO
Dióxido de zirconio	<ul style="list-style-type: none"> Inerte a ácidos y bases así como, a metales refractarios. Resistente al desgaste Se pueden obtener distintas geometrías 	<ul style="list-style-type: none"> Constante dielectrica muy grande 	NO
Alumina	<ul style="list-style-type: none"> Buena resistencia al desgaste Resistencia a la corrosion. Puede obtenerse en distintas geometrías. Resistencia química Estabilidad térmicas. 	<ul style="list-style-type: none"> No disponible en el mercado nacional 	SI
Borosilicato (Duran)	<ul style="list-style-type: none"> Resistencia química Resistencia térmica Resistencia a choques térmicos Estabilidad mecánica Disponible en el mercado nacional Bajo costo 	<ul style="list-style-type: none"> Propiedades mecánicas inferiores a las de los cerámicos 	SI

De los materiales candidatos se tiene la siguiente tabla.

Material	Resistencia térmica	Valor dieléctrico	Resistencia Química	Resistencia mecánica	Resistencia a abrasivos	Permita metalizado	Disponibilidad	Costo	
Macor	3.00	4.00	4.00	3.00	4.00	5.00	1.00	1.00	
Alumina	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	1.00	1.00	
Borosilicato	2.00	3.00	4.00	2.00	3.00	5.00	5.00	5.00	
Importancia	1	1	1	1	2	2	3.00	3.00	
Macor	3.00	4.00	4.00	3.00	8.00	10.00	3.00	3.00	
Alumina	5.00	5.00	5.00	5.00	10.00	10.00	3.00	3.00	
Borosilicato	2.00	3.00	4.00	2.00	6.00	10.00	15.00	15.00	
									Total
Macor	0.60	0.80	0.80	0.60	0.80	1.00	0.20	0.20	5.00
Alumina	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.20	0.20	6.40
Borosilicato	0.40	0.60	0.80	0.40	0.60	1.00	1.00	1.00	5.80

Muy importante = 3, Importante = 2, Poco importante = 1

Los cerámicos de alumina son la mejor opción dado sus excelentes propiedades mecánicas y resistencia química (en comparación con los vidrios de borosilicato). Dado que el vidrio de borosilicato es un producto disponible en el mercado nacional, bajo costo y que cumple con los requerimientos de trabajo, se califica como material seleccionado. En la tabla 6.5 se puede ver como las propiedades de los cerámicos de alumina no son aprovechables en su totalidad en comparación con las de los borosilicatos.

Tabla 6.5 Propiedades de Sintox contra Duran

Material	Modulo de Young [Gpa]	Temperatura máxima de trabajo [C]	Densidad g/cc	Resistencia a choque térmico [C]
Alumina Sintox MR.	330.00	1250.00	3.67	170
Borosilicato Duran MR.	62.8	500.00*	2.23	120 **

* Uso en cortos lapsos de tiempo

** Valor recomendado por el fabricante.

Para asegurar la resistencia mecánica al desgaste por abrasión del tubo dieléctrico, se realizó la prueba respectiva que asegurara la funcionalidad del dispositivo.

La metodología empleada es la siguiente

Tomando un tubo dieléctrico de borosilicato (Duran) con las mismas dimensiones del diseño final, se maquinaron las tapas que, por un lado, contendrían el fluido y abrasivo y por el otro servirían de soporte para ser montado en un torno fig 6.3.

- La cantidad de fluido en el interior del tubo es de 1 litro.
- La cantidad de abrasivo es 1 % en volumen que representa el máximo porcentaje encontrado a la salida de los yacimientos de crudo.
- La velocidad angular del tubo es de 250 rpm.
- Tiempo que duró la prueba 100 hrs.
- Peso del tubo 1219 gr.

Resultados de la prueba:

Después del tiempo antes mencionado, se observó que la superficie interna del tubo no presentaba señales visibles que pudieran indicar desgaste por abrasión

Al comparar el peso inicial del tubo con el final se constató que no hubo un desgaste como consecuencia de la prueba o sea peso final igual a peso inicial.

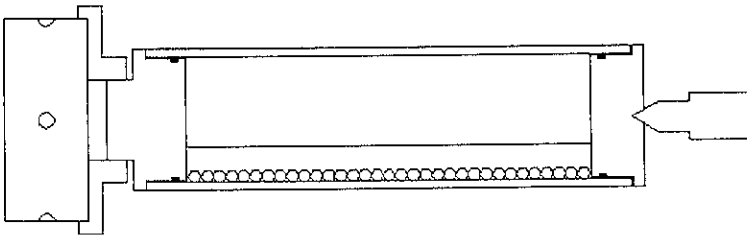


Figura 6.3. Prueba de abrasión realizada a tubo DURAN. Las dimensiones del abrasivo están exageradas

6.2.3 Sensores.

La figura 6.4 muestra la configuración de los electrodos sobre el tubo dieléctrico por el cual, fluye el fluido a estudiar.

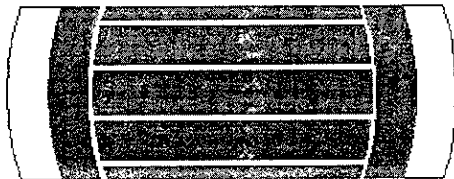


Figura 6.4. Disposición de electrodos sobre tubo dieléctrico

Para obtener la configuración de electrodos mostrada en la figura 6.4, es necesario contar con un método flexible y simple que facilite su fabricación y evite el uso de elementos o componentes innecesarios que compliquen el diseño.

El uso de epóxicas conductoras a base de plata permiten crear superficies electroconductoras sobre distintos materiales como papel, plásticos, caucho, madera y cerámicos. Dependiendo del tipo de epóxica, pueden ser aplicados mediante métodos tales como spray, brocha, inmersión y serigrafía. Eléctricamente son altamente conductoras y permiten ser soldados.

En el mercado existen distintos tipos de epóxicas dependiendo de la temperatura necesaria para el curado (horneado del material conductor que inicia con la eliminación del solvente y finaliza con una reacción química que crea las características conductoras y mecánicas del material) o secado (el secado, que puede realizarse a temperatura ambiente o acelerarse aumentando su temperatura, difiere del curado en que sus propiedades eléctricas y mecánicas son obtenidas en cuanto el solvente se evapora del material o sea, sin reacción química posterior, esto es una garantía sobre la obtención de las propiedades eléctricas del material).

De acuerdo con las características del tubo dieléctrico, la epóxica conductiva a utilizar debe ser de baja temperatura de curado o secado, a temperatura ambiente. Dupont ofrece estos productos bajo el número 5504N y 4929N.

De acuerdo con los diseñadores electrónicos que participan en este desarrollo, la garantía que ofrece la epóxica 4929N en cuanto a sus propiedades eléctricas (incluyendo su menor resistividad) es criterio suficiente para seleccionarlo como material de diseño.

6.2.4 Aro-sellos y empaques.

La tabla 6.6 muestra las características de servicio aplicables a elastómeros de uso en la industria petrolera en medios fluidos específicos.

Tabla 6.6 Características de elastómeros de uso en la industria petrolera

Compuesto	Nitrilo	Fluorocarbono	Aflas	Chemraz	EPDM	Kalrez
Temperatura de servicio. [C]	0-135	0-204	38-204	4-204	40-288	38-204
Medios						
H ₂ S	NR	A	A	A	NR	A
CO ₂	A	B	B	A	NR	B
CH ₄	B	A	A	A	NR	B
Hidrocarburos	A	A	A	A	NK	A
Xileno	NR	A	B	A	NR	A
Alcoholes	A	C	B	A	B	A
Bromuro de zinc	NR	A	A	A	NP	A
Inhibidores	B	NR	A	A	NP	B
Agua salada	A	A	A	A	A	A

Fuente Instituto Mexicano del Petróleo, Exploración y producción

A = Satisfactorio; B = Poco o nulo efecto; C = Deformación; NR = No recomendado; NP = No probado

Hidrocarburos, ácido sulfhídrico (H₂S), dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄) son los medios que están presentes (ver tabla 4.7) a la salida del árbol de válvulas lugar, en donde el sensor tomográfico será instalado. La temperatura en este punto varía entre 25 y 110 °C por lo que elastómeros tales como el Aflas, EPDM y Kalrez (al trabajar a temperaturas mínimas de 38 y 40 °C) no son adecuados para este desarrollo. La tabla 6.6 muestra que los elastómeros de nitrilo no son recomendados para su aplicación en medios con ácido sulfhídrico lo que implica, el uso de elastómeros a base de fluorocarbonos y/o chemraz para lo cual, se hará uso del método de ponderaciones múltiples.

Material	Resistencia a H ₂ S	Resistencia a CO ₂	Resistencia a crudo	Resistencia temperatura	Disponibilidad	Costo	
Fluorocarbono	3.00	2.00	3.00	3.00	3.00	3.00	
Chemraz	3.00	3.00	3.00	3.00	1.00	2.00	
Importancia	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.00	
Fluorocarbono	9.00	6.00	9.00	9.00	9.00	6.00	
Chemraz	9.00	9.00	9.00	9.00	3.00	4.00	
							Total
Fluorocarbono	1.00	0.66	1.00	1.00	1.00	1.00	5.66
Chemraz	1.00	1.00	1.00	1.00	0.33	0.66	4.99

Muy importante 3; Importante 2; Poco importante 1

La tabla anterior muestra claramente que el fluorocarbono (viton) es la mejor opción para empaques y aro-sellos (*O-Rings*) en contacto con el crudo (ver plano 1). Para aquellos aro-sellos con o sin contacto con fluidos hidráulicos, los elastómeros de Nitrilo ofrecen resistencia a aceites minerales, fluidos hidráulicos y gasolinas Ref. (Parker de México) así como un mejor precio que los hechos de fluorocarbono.

Tabla 6.7. Composición de muestra de crudo pozo Jujo 45.

Componente	% Mol
Nitrógeno.	0.099
Bióxido de carbono.	0.172
Ácido sulfhídrico.	0.113
Metano	1.998
Etano	2.550
Propano	4.930
Isobutano.	1.496
Butano normal	4.863
Isopentano	2.641
Pentano normal	3.113
Hexanos	7.357
Heptanos y más pesados	70.668
Total	100.00.

Fuente: Exploración y producción, Instituto Mexicano del Petróleo.

6.2.5 Aceite compensador.

A partir la información ofrecida por los fabricantes, experiencia y pruebas realizadas, se formó la siguiente tabla.

Fluido	Estabilidad térmica	Protección antioxidante	Protección anticorrosiva	Expansión térmica	Disponibilidad	Costo	
Nuto-H	4.00	5.00	4.00	5.00	4.00	3.00	
ATF	3.00	5.00	4.00	3.00	5.00	5.00	
Kutwell	1.00	5.00	4.00	3.00	4.00	3.00	
Univolt	3.00	4.00	4.00	5.00	4.00	3.00	
Vicor	5.00	5.00	5.00	4.00	4.00	3.00	
Importancia	3.00	2.00	3.00	3.00	3.00	2.00	
Nuto-H	12.00	10.00	12.00	15.00	12.00	6.00	
ATF	9.00	10.00	12.00	9.00	15.00	10.00	
Kutwell	3.00	10.00	12.00	9.00	12.00	6.00	
Univolt	9.00	8.00	12.00	15.00	12.00	6.00	
Vicor	15.00	10.00	15.00	12.00	12.00	6.00	
							Total
Nuto-H	0.80	1.00	0.80	1.00	0.80	0.60	5.00
ATF	0.60	1.00	0.80	0.60	1.00	1.00	5.00
Kutwell	0.20	1.00	0.80	0.60	0.80	0.60	4.00
Univolt	0.60	0.80	0.80	1.00	0.80	0.60	4.60
Vicor	1.00	1.00	1.00	0.80	0.80	0.60	5.20

Muy importante = 3; Importante = 2; Poco importante = 1

Nuto-H Aceite hidráulico.

ATF Aceite para transmisión.

Kutwell Aceite para corte.

Univolt Aceite para transformador.

Vicor Aceite de sílicón.

6.3 Resultados.

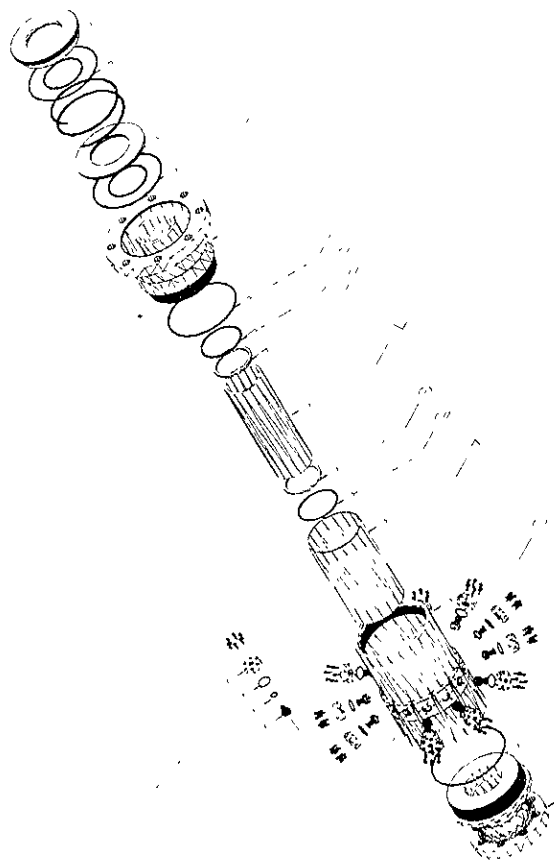
Largo	57.15	[cm]
Diámetro de cuerpo	19	[cm]
Peso	66.8	[kg]
Material del diseño	AISI 1020	
Espesor de pared	11	[mm]
Factor de seguridad en espesor de pared	70	[%]
Volumen de aceite neumático	5.58	[l]
Expansión térmica de aceite neumático a 110 °C	7.5	[%]
Volumen de acero sin maquinar	213	[kg]
Longitud de cámara del pistón	11.4	[cm]
Resorte de sistema de compensación.		
Material	AISI A229	
Número de gage	5	
Constante	618	[N/m]
Longitud libre	4.23	[cm]
Número de hilos	2	
Roscas	Ver anexo 3	

6.4 Costo.

CONCEPTO	UNIDADES	COSTO UNITARIO (US)*	COSTO TOTAL (US)*
Acero 1020	213 Kg.	\$ 0.85	\$ 181.05
Acero 1040	3 Kg.	\$ 2.20	\$ 6.60
Tubo de aluminio	1 Kg.	\$ 2.00	\$ 2.00
Tubo dieléctrico	1 pza	\$ 58.00	\$ 58.00
Resorte de compensación	1 pza	\$ 5.00	\$ 5.000
O-ring 2-265 Parker®	2 pzas	\$ 0.550	\$ 1.100
O-ring 2-243 Parker®	2 pzas	\$ 0.575	\$ 1.150
O-ring 2-263 Parker®	1 pza	\$ 0.575	\$ 0.575
O-ring 2-242 Parker®	1 pza	\$ 0.550	\$ 0.550
O-ring 2-170 Parker®	1 pza	\$ 0.475	\$ 0.475
O-ring 2-155 Parker®	1 pza	\$ 0.475	\$ 0.475
O-ring 2-121 Parker®	12 pzas	\$ 0.475	\$ 5.700
Conector bifásico	12 pzas	\$ 150.00	\$ 1800.00
Empaque de Viton®	-	\$ 20.00	\$ 20.00
Tornillo allen No. 8	72 Pzas	\$ 0.50	\$ 36.00
Pasta electroconductora 80% Ag	250 gr	\$ 115.00	\$ 115.00
Aceite de silicón	6.0 l	\$ 8.00	\$ 48.00
Maquinado	-	\$ 1200.00	\$ 1200.00
Serigrafía	-	\$ 25.00	\$ 25.00
Nitrurizado	67 Kg	\$ 4.50	\$ 301.50
		Total	\$ 4815.50

* Precio en dolares americanos más impuesto

1	...	...	...	...	...
2	...	...	...	...	...
3	...	...	...	...	...
4	...	...	...	...	...
5	...	...	...	...	...
6	...	...	...	...	...
7	...	...	...	...	...
8	...	...	...	...	...
9	...	...	...	...	...
10	...	...	...	...	...
11	...	...	...	...	...
12	...	...	...	...	...
13	...	...	...	...	...
14	...	...	...	...	...
15	...	...	...	...	...
16	...	...	...	...	...
17	...	...	...	...	...
18	...	...	...	...	...
19	...	...	...	...	...
20	...	...	...	...	...
21	...	...	...	...	...
22	...	...	...	...	...
23	...	...	...	...	...
24	...	...	...	...	...
25	...	...	...	...	...
26	...	...	...	...	...
27	...	...	...	...	...
28	...	...	...	...	...
29	...	...	...	...	...
30	...	...	...	...	...
31	...	...	...	...	...
32	...	...	...	...	...
33	...	...	...	...	...
34	...	...	...	...	...
35	...	...	...	...	...
36	...	...	...	...	...
37	...	...	...	...	...
38	...	...	...	...	...
39	...	...	...	...	...
40	...	...	...	...	...
41	...	...	...	...	...
42	...	...	...	...	...
43	...	...	...	...	...
44	...	...	...	...	...
45	...	...	...	...	...
46	...	...	...	...	...
47	...	...	...	...	...
48	...	...	...	...	...
49	...	...	...	...	...
50	...	...	...	...	...



Conclusiones.

Con la elaboración de este primer diseño, México inicia su carrera en lo que a sistemas tomográficos de capacitancia se refiere.

Si bien es cierto que las potencias precursoras de esta tecnología llevan consigo varios años de investigación y experiencia, es objetivo del IMP acortar esa brecha que, en el año 2001 es de más de 10 años.

Los resultados obtenidos en este trabajo son alentadores al presentar un primer diseño estructural que permite, a los distintos campos multidisciplinarios que participan en este proyecto, probar y perfeccionar los distintos elementos electrónicos y computacionales necesarios para los procesos de adquisición de señales y su interpretación.

Los logros de este diseño van más allá de un limitado a las condiciones favorables que se encuentran en laboratorio pues está pensado para operar en condiciones de campo que son indiscutiblemente más agresivas e inestables que las encontradas en laboratorio (manejo, corrosión, temperatura, etc.). Esto beneficia en no requerir un rediseño que se adapte a las condiciones de campo además, de ser modelado y probado (por segunda o más veces) por los especialistas en electrónica que participan en el proyecto lo que significa, un ahorro de tiempo y dinero.

A diferencia de algunos sensores desarrollados en los Estados Unidos, Inglaterra y Bélgica, este diseño está pensando para un fácil transporte y maniobrabilidad al localizar al sistema compensador de presión en el interior del sistema lo que significa, que no existen componentes externos que puedan ser dañados, o que dificulten su transporte o maniobrabilidad.

El uso de un único pistón central reduce en número de elementos significativamente logrando así un mantenimiento mínimo, así como una mayor seguridad en su funcionamiento.

Salvo del objetivo de este trabajo la creación física del diseño que hubiera ayudado a la realización de pruebas y mejoras. Trabajos posteriores establecerán el éxito obtenido en el presente diseño, así como las modificaciones necesarias.

Anexo 1

Cálculos.

1 Volumen compensador de presión.

De la Fig. 7.5 se tiene que el volumen de aceite máximo contenido en el sistema esta dado por :

(7.1)

$$V_{tm} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_B$$

Donde:

(7.2)

$$V_1 = \pi \left(\frac{D_1^2 - d^2}{4} \right) L_1$$

(7.3)

$$V_2 = \pi \left(\frac{D_2^2 - d^2}{4} \right) L_2$$

(7.4)

$$V_3 = \pi \left(\frac{D_3^2 - d^2}{4} \right) L_3$$

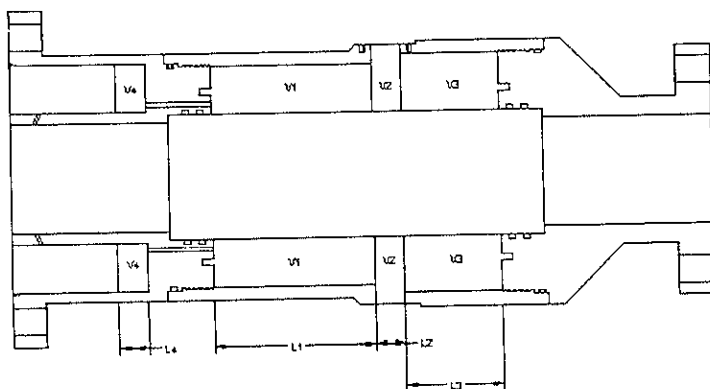


Figura 7.5. Cámara de aceite.

$$V_4 = \pi \left(\frac{D^2 - dp^2}{4} \right) L_4 \quad (7.5)$$

El volumen de los barrenos esta dado por:

$$V_B = 8\pi \left(\frac{D_B^2}{4} \right) L_B \quad (7.6)$$

Sustituyendo las ecuaciones (7.2), (7.3), (7.4), (7.5), (7.6) en (7.1) se tiene:

$$V_{im} = \frac{\pi}{4} \left[(D_1^2 - d^2)L_1 + (D_2^2 + d^2)L_2 + (D_3^2 - d^2)L_3 + (D_4^2 - d^2)L_4 + 8(D_B^2)L_B \right] \quad (7.8)$$

Sustituyendo valores se tiene:

$$V_{im} = \frac{\pi}{4} \left[(7.30^2 - 4.125^2)(5.34) + (8.515^2 - 4.125^2)(1.0) + (7.90^2 - 4.125^2)(3.24) + (7.42^2 - 4.3^2)(1) + 8(0.25^2)(2) \right]$$

$$V_{im} = 340.78 \quad \text{in}^3$$

El volumen que hay que compensar a una temperatura de 110 °C, es de 7.5% o sea:

$$V_c = 340.78 * 0.075 = 25.56 \quad \text{in}^3$$

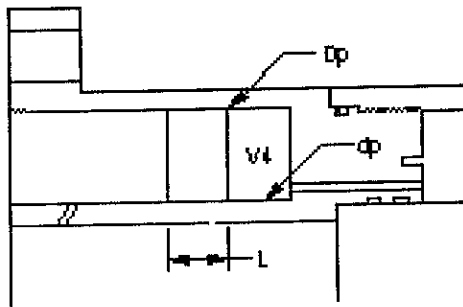


Figura 7.6. Cámara de pistón

Para conocer la longitud de la cámara del pistón se tiene:

(7.9)

$$L = \frac{4V_c}{\pi(D_p^2 - d_p^2)}$$

Sustituyendo valores se tiene:

$$L = \frac{4 * 25.56}{\pi(7.42^2 - 4.3^2)} = 0.89 \text{ in}$$

2 Cálculos de cuerdas.

El cálculo de cuerdas se obtuvo mediante el programa mostrado a continuación (fig 7.7). Para detalles acerca de la programación así como las ecuaciones aplicadas ver anexo 3.

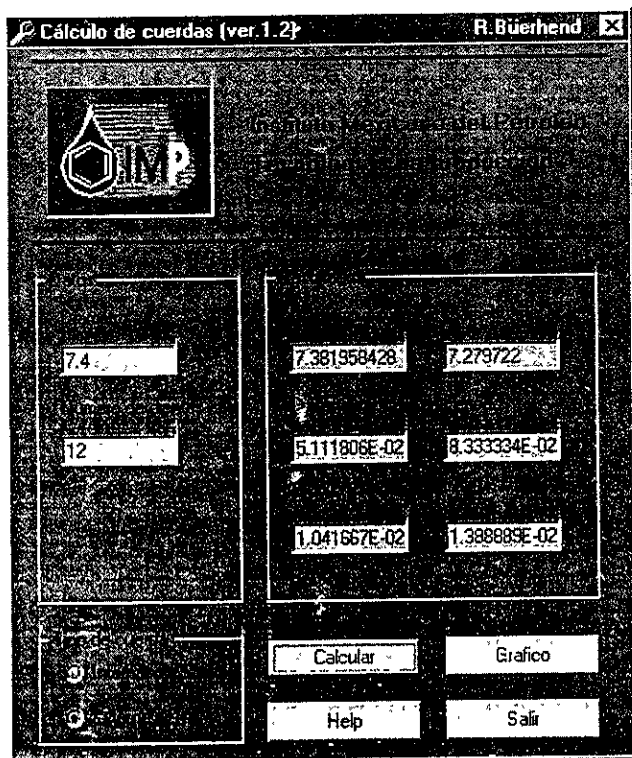


Figura 7.7. Pantalla principal para cálculo de cuerdas

En esta pantalla se pueden ver los valores de diseño para una rosca externa de 7.4" de diámetro, su representación gráfica es mostrada a continuación fig 7.8.

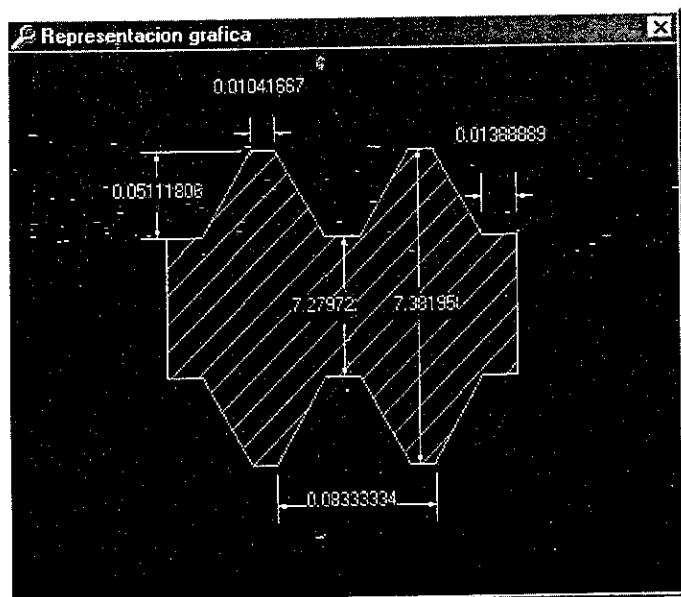


Figura 7.8. Representación gráfica de resultados.

Con este programa se obtuvieron los siguientes resultados:

Tipo de cuerda	Diámetro real [in]	Diámetro mayor [in]	Diámetro menor [in]	Profundidad [in]
Interna	7.40	7.394	7.292	0.0451
Interna	8.00	7.994	7.892	0.0451
Externa	7.40	7.382	7.280	0.0511
Externa	8.00	7.982	7.880	0.0511

3 Esfuerzo sobre el conector electrónico.

La fuerza resultante sobre el conector bifásico esta dada por:

(7.10)

$$F = P_{int} A_{int} - P_{atm} A_{ext}$$

donde:

(7.11)

$$A_{int} = 1.5 H^2 \left(\frac{1}{\tan(\theta)} \right)$$

(7.12)

$$A_{atm} = \pi \left(\frac{D^2}{4} \right)$$

Para un hexaedro $\theta=60$ y $H=0.975$ (distancia entre caras planas)

Sustituyendo los valores en 7.11 y 7.18 se tiene:

$$A_{int} = 1.5 * 0.975^2 \left(\frac{1}{\tan(60)} \right) = 0.8232 \text{ in}^2$$

$$A_{atm} = \pi \left(\frac{0.5^2}{4} \right) = 0.1963 \text{ in}^2$$

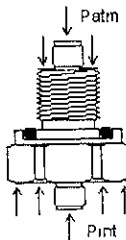


Figura 7.9 Conector bifásico

Sustituyendo valores en 7.10 con un factor de seguridad de 1.7 se tiene:

$$F = 1.7 * 220.45 * 0.8232 - 14.7 * 0.1963 = 305.6 \text{ lbf}$$

Para tornillos cabeza tipo allen No. 8 (que tienen la función de fijar el conector bifásico con la estructura del sensor) se tiene que la fuerza máxima de tensión que soportan cada uno de ellos es de 2270 lbf.

4 Resorte compensador de presión.

En la figura 7.10 se pueden observar las diferentes posiciones del pistón a lo largo de la cámara de compensación.

La posición máxima de compresión para este diseño esta dada por C sin embargo, dada la presencia de ineficiencias en el llenado, extracción de aire y contaminación del fluido neumático antes y durante la operación, esta puede desplazarse hacia la posición D.

Sabiendo que esta distancia no tiene que estar muy alejada de C por razones de seguridad, la longitud libre del resorte para este diseño estará dada cuando el pistón este en D.

Por su parte B es la posición teórica máxima esperada por la expansión térmica del fluido neumático. El volumen a ser desplazado por efecto del aumento de temperatura del aceite esta dado por el segmento BC.

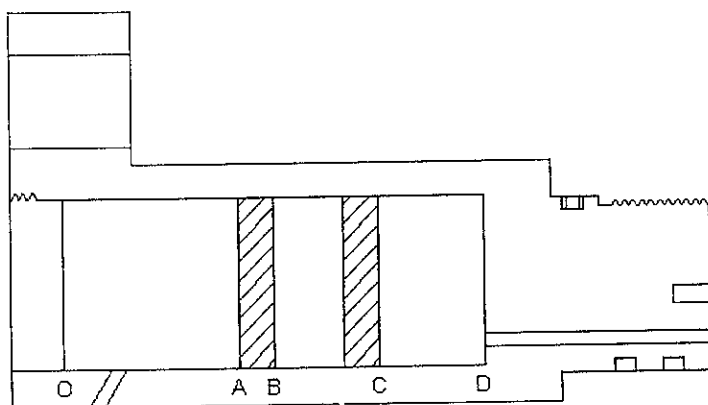


Figura 7.10 Cámara de pistón

Iniciando el cálculo del resorte se consideran los siguientes datos:

$D_w=0.207$	in (gage No. 5)
$D_m=7.0$	in
$d_t=3.665$	in
$d=1.665$	in
$N_c=2$	

Donde:

D_w = diámetro o calibre del alambre.

D_m = diámetro del resorte. (Entre centros de alambre)

d = deflexión para una fuerza dada.

d_t = distancia libre

N_c = número de hilos o anillo activos

Material ASTM A229

La fuerza que ejerce el resorte sobre el pistón en el punto B (ver Fig.7.10) esta dada por:

(7.13)

$$F = \frac{dGD_w}{8N_c C^3}$$

Donde:

G=Módulo de elasticidad

C= Constante del resorte igual a D_m/D_w

Sustituyendo valores se tiene:

$$F = \frac{(1.665)(11.5 \times 10^6)(0.207)}{8(2) \left(\frac{7}{0.207} \right)^3} = 6.4 \quad \text{lb}_f$$

El periodo del resorte esta dado por:

(7.14)

$$P = \frac{D_1 - 2D_w}{2} = \frac{3.665 - 2(0.207)}{2} = 1.6255 \quad m$$

El ángulo del resorte esta dado por:

(7.15)

$$\lambda = \text{ang tan} \left(\frac{P}{\pi D_m} \right) = \text{ang tan} \left(\frac{1.6255}{7\pi} \right) = 4.22^\circ$$

La longitud del resorte comprimido es:

(7.16)

$$SH = D_w(N_c + 2) = 0.207(4) = 0.828 \quad m$$

El esfuerzo al cual va a estar sometido el resorte es:

$$S_s = \frac{8KFD_m}{\pi D_w^3} \quad (7.17)$$

donde:

$$K = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} \quad (7.18)$$

Sustituyendo valores:

$$S_s = \frac{8(1.041)(6.4 \times 10^3)(7)}{\pi(0.207)^3} = 13.41 \quad \text{ksi}$$

Por otro lado el esfuerzo de diseño para este material esta dado por:

$$S_{sd} = \frac{47.304}{D_w^3} = \frac{47.304}{(0.207)^3} = 63.80 \quad \text{ksi} \quad (7.19)$$

La fuerza que ejerce el resorte cuando se encuentra totalmente comprimido es:

$$F_{sh} = Kr(d_1 - SH) \quad (7.20)$$

Donde Kr es la constante del resorte.

Sustituyendo valores en 7.20

$$F_{sh} = 3.53(3.665 - 0.828) \quad \text{lbf}$$

Dado que el esfuerzo es proporcional a F este es obtenido a partir de S_s

$$S_{sh} = \frac{10\ 01(13.4)}{6.4} = 20.96 \quad \text{ksi}$$

Es esfuerzo permisible para este estado es:

$$S_{shp} = \frac{Q}{D_w^{0.19}} = \frac{87.5}{0.207^{0.19}} = 118 \quad \text{ksi}$$

Dado que:

$$S_s < S_{sd} \quad \text{y} \quad S_{sh} < S_{shd}$$

El diseño es viable.

5 Volumen estimado de acero (sin maquinar).

De los planos de fabricación, se pueden definir las diferentes geometrías básicas a partir de las cuales, se van a maquinar los distintos elementos estructurales de nuestro diseño por ejemplo, la brida inicial, es maquinada a partir de un cilindro de 9.250 por 6.875" de ancho.

Brida inicial: (7.21)

$$V_1 = \frac{\pi D^2 L}{4} = \frac{\pi * 11.25^2 * 7}{4} = 695.8 \quad in^3$$

Brida final uno: (7.22)

$$* V_2 = L^2 H = 8.750^2 * 1.375 = 105.273 \quad in^3$$

Brida final dos. (7.23)

$$* V_3 = L^2 H = 5.250^2 * 2.125 = 124.460 \quad in^3$$

Brida final tres. (7.24)

$$V_4 = \frac{\pi D^2 L}{4} = \frac{\pi * 9.25^2 * 4.250}{4} = 285.6 \quad in^3$$

Estructura tubular: (7.25)

$$V_5 = \frac{\pi (D^2 - d^2) L}{4} = \frac{\pi (9^2 - 7^2) * 12.75}{4} = 320.44 \quad in^3$$

Pistón de compensación:

(7.26)

$$* V_6 = L^2 H = 7.750^2 * 0.500 = 30.0 \text{ in}^3$$

Tapa de compensación:

(7.27)

$$* V_7 = L^2 H = 7.750^2 * 1.500 = 90.0 \text{ in}^3$$

Sumando $V_1...V_7$ se tiene:

$$V_t = 1651.6 \text{ in}^3 = 0.0271 \text{ m}^3$$

Sabiendo que la densidad del acero es de 7850 kilogramos por metro cúbico se tiene que la masa es:

$$m = V_t * \rho = 0.0271 * 7870 = 213.0 \text{ kg}$$

* En este caso, los discos son cortados a partir de una placa cuadrada con un largo de 1/4" adicional al diámetro del disco a cortar, esto quiere decir que el comprador paga mas de lo que realmente recibe

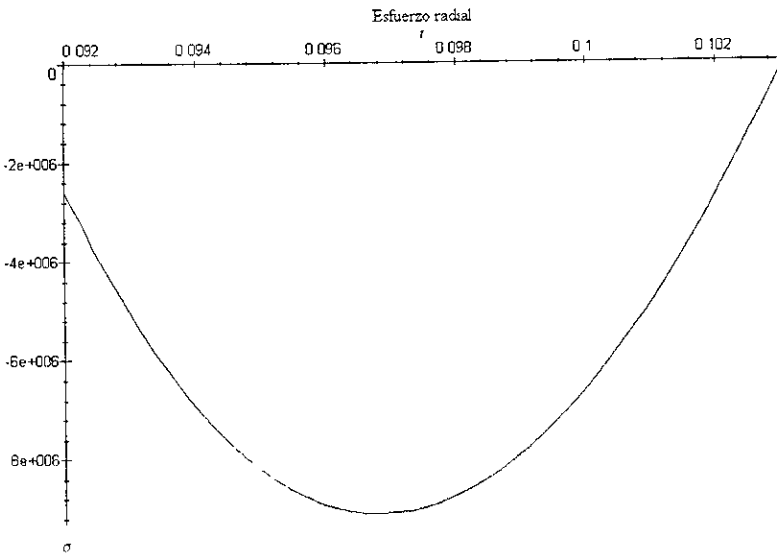
** Todas las dimensiones estan sobradas al tener que ajustarse en algunos casos, a medidas estandar además de, requerirlas en los procesos de maquinado

6 Espesor de paredes.

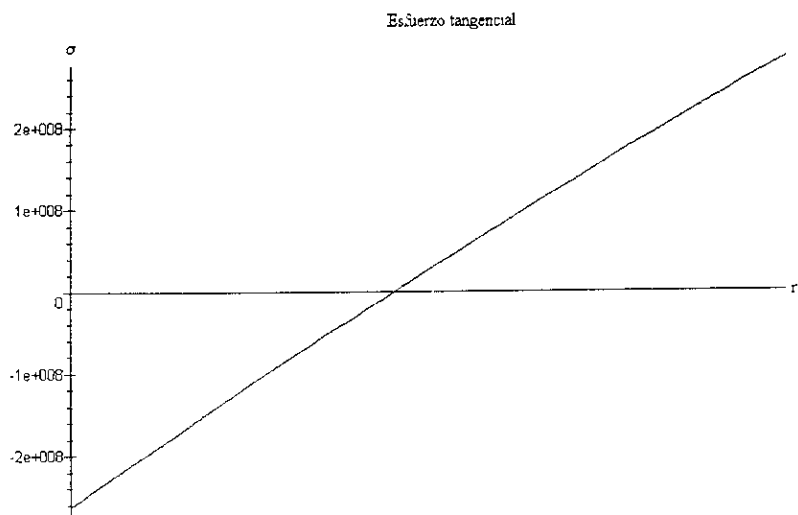
Apartir de las ecuaciones 4.1 a 4.7 se pueden obtener las gráficas que muestran los esfuerzos y deformaciones a los cuales está expuesto el sistema.

Las condiciones de trabajo, los espesores de pared, así como la programación de ecuaciones pueden ser vistas en el anexo 2 este libro.

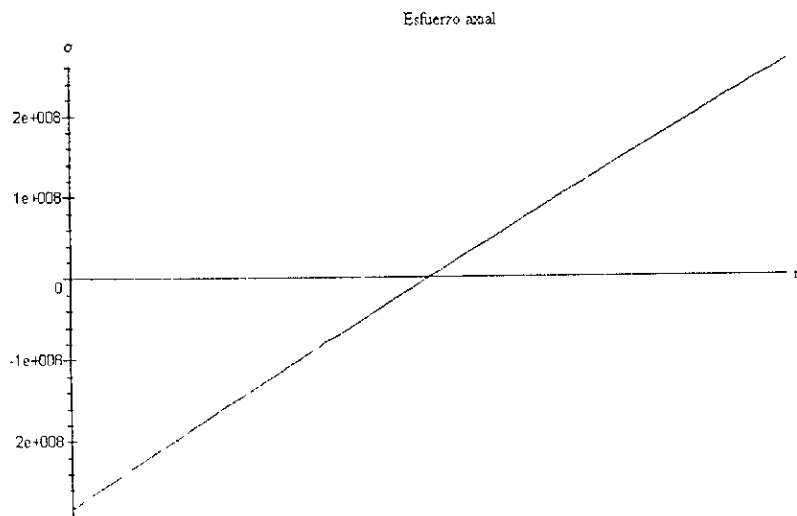
En este caso el espesor de pared es de 11 mm.



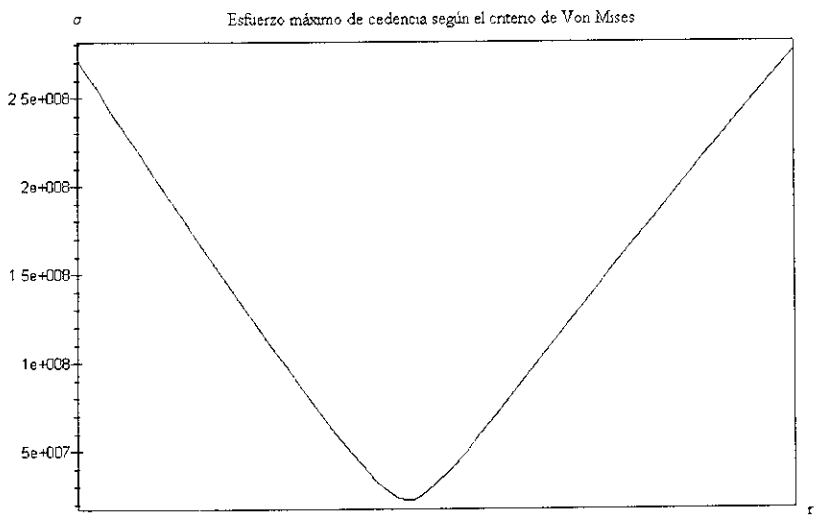
Gráfica 7.3. Gráfica esfuerzo radial contra distancia radial (AISI1020)



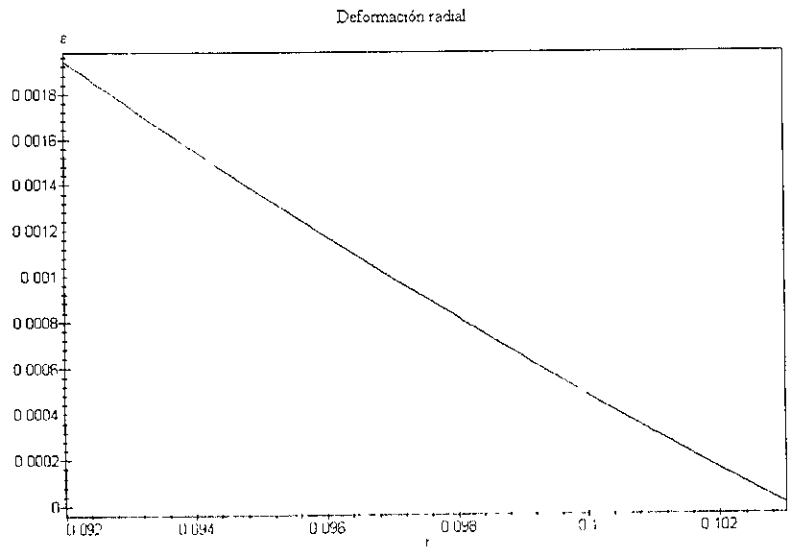
Gráfica 7.4. Gráfica esfuerzo tangencial contra distancia radial (AISI1020)



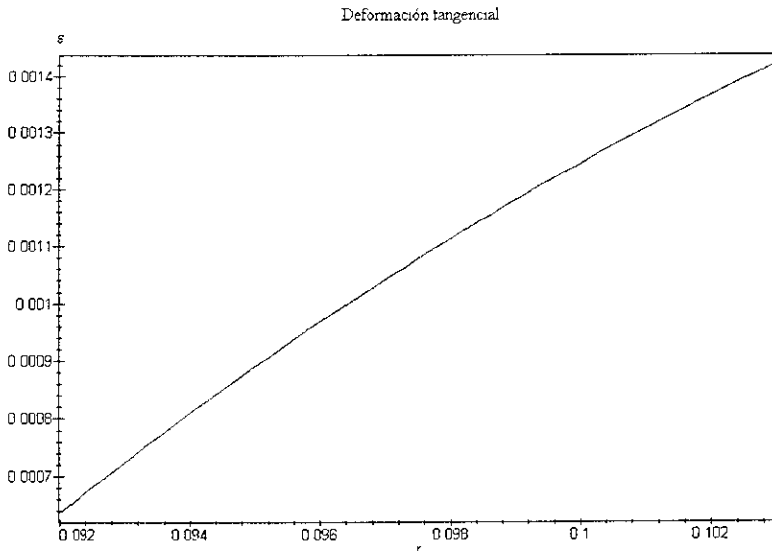
Gráfica 7.5. Gráfica esfuerzo axial contra distancia radial (AISI1020)



Gráfica 7.6. Gráfica esfuerzo de cedencia según el criterio de Von Mises (AISI1020)



Gráfica 7.7. Gráfica deformación radial contra distancia radial (AISI1020)



Gráfica 7.8. Gráfica deformación tangencial contra distancia radial (AISI1020)

Anexo 2.

Programación en Maple V

```

#                               Esfuerzos presentes en un recipiente a presión.
#
# *****
#
# --> El presente modelo esta desarrollado para un acero 1020 con las siguientes
propiedades:
#
# E=200 Gpa
# CT=11.7 E-6 m/m C
#
# --> Los cálculos consideran un factor de seguridad de 0.70
#
# --> Las condiciones de trabajo son (sin considerar algun factor de seguridad):
#
# Patm=101.325 kpa;
# Pinterna=1520 kpa;
# Tmax=110 C;
# Tamb=20 C
#
# --> Nomenclatura utilizada:
#
# el = Módulo de elasticidad
# v = Módulo de poisson.
# ct = Constante de expansión térmica.
# p2 = Presión externa.
# p1 = Presión interna.
# ta = Temperatura interna.
# tb = Temperatura externa.
# b = Radio externo del cilindro.
# a = Radio interno cilindro.
# c = Radio del tubo dieléctrico
# esr = Esfuerzo radial.
# est = Esfuerzo angular
# esz = Esfuerzo en z
# der = Deformación radial
# det = Deformación tangencial
# dez = Deformación en z
# esvm = Esfuerzo de cedencia según el criterio de Von Mises
#
# .....
```

- # Valores y condiciones de trabajo
- el:=200E9;
- v:=0.29;
- ct:=11.7E-6;
- p2:=101.325E3;
- p1:=2585E3;
- ta:=187;
- tb:=20;
- a:=0.092;
- b:=0.103;
- c:=0.045;

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Expresiones matemáticas

- $vt := (ta - tb) * \ln((b/r)) / \ln((b/a));$
- $Iba := ((ta - tb) / \ln(b/a)) * (0.25 * b^2 - 0.5 * a^2 * (\ln(b) - \ln(a) + 0.5));$
- $Ira := ((ta - tb) / \ln(b/a)) * (0.5 * r^2 * (\ln(b) - \ln(a) + 0.5) - 0.5 * a^2 * (\ln(b) - \ln(a) + 0.5));$
- $c1 := (1 / (b^2 - a^2)) * ((p1 * a^2 - p2 * b^2) + (Iba * ct * el) / (1 - v));$
- $c2 := -p1 * a^2;$

Esfuerzo radial

- $esr := (-1 * (ct * el) / (r^2 * (1 - v))) * Ira + (1 - a^2 / r^2) * c1 + c2 / r^2;$

Esfuerzo angular

- $est := ((ct * el) / (r^2 * (1 - v))) * Ira - (ct * el * vt) / (1 - v) + (1 + a^2 / r^2) * c1 - c2 / r^2;$

Deformación en z

- $dez := (1 / (el * (b^2 - a^2))) * (-2 * v * (p1 * a^2 - p2 * b^2) + (p1 * (a - c)^2 - p2 * (b - c)^2)) + 2 * ct * Iba / (b^2 - a^2);$

Deformación radial

- $der := (1 / el) * (esr - v * (est + esz)) + ct * vt;$

Deformación tangencial

- $det := (1 / el) * (est - v * (esr + esz)) + ct * vt;$

Esfuerzo en z

- $esz := el * (dez - ct * vt) * v * (est + esr);$

Criterio de Von Mises

- $esvm := (1/\sqrt{2}) * \sqrt{((est-esr)^2 + (esr-esz)^2 + (esz-est)^2)}$;

Instrucciones de graficación.

- $AA := \text{plot}(esr, r=a..b, \text{color}=\text{BLACK});$
- $BB := \text{plot}(est, r=a..b, \text{color}=\text{BLACK});$
- $CC := \text{plot}(esz, r=a..b, \text{color}=\text{BLACK});$
- $DD := \text{plot}(der, r=a..b, \text{color}=\text{BLACK});$
- $EE := \text{plot}(det, r=a..b, \text{color}=\text{BLACK});$
- $FF := \text{plot}(dez, r=a..b, \text{color}=\text{BLACK});$
- $GG := \text{plot}(esvm, r=a..b, \text{color}=\text{BLACK});$
- $\text{with}(plots);$
- $\text{display}([FF]);$
- >

Anexo 3.

Cálculo de cuerdas, programación en visual basic.

Frame 1

```
'Option Explicit
Dim f As Single
Dim dr As Single 'Diametro real
Dim dmn As Single 'Diametro menor
Dim p As Single 'Periodo
Dim c As Single 'Cresta
Dim v As Single 'Valle
Dim nh As Single 'Numero de hilos
Dim w As Single 'Profundidad
```

```
Sub Command1_Click()
If Text1.DataChanged = True Then dr = Text1
If Text2.DataChanged = True Then nh = Text2
```

```
'Operaciones matemáticas
```

```
'P = Periodo
'w = Profundidad
'dmy = Diámetro mayor
'dmn = Diámetro menor
'c = Cresta
'v = Valle
'nh = Número de hilos
```

```
p = 1 / nh
h = p * 0.866
Text7 = p
```

```
Select Case f
```

```
Case 0
```

```
w = 17 * h / 24
dmy = dr - h / 4
dmn = dr - 2 * (h / 8 + 17 * h / 24)
c = p / 8
v = p / 6
Text8 = c
Text9 = v
Text6pro = w
Text4 = dmy
Text5 = dmn
```

```
Case 1
```

```
w = 5 * h / 8
dmy = dr - h / 2
dmn = dr - 1.5 * h
```

```
c = p / 4
v = p / 24
Text8 = c
Text9 = v
text6pro = w
Text4 = dmy
Text5 = dmn
```

```
End Select
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Command2_Click()
End
End Sub
```

```
Private Sub Command3_Click()
If f = 0 Then Form2.Show 1
If f = 1 Then Form4.Show 1
End Sub
```

```
Private Sub Command4_Click()
Form3.Show 0
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Option1_Click()
If Option1 = True Then f = 1 Else f = 0
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Option2_Click()
If Option2 = True Then f = 0 Else f = 1
End Sub
```

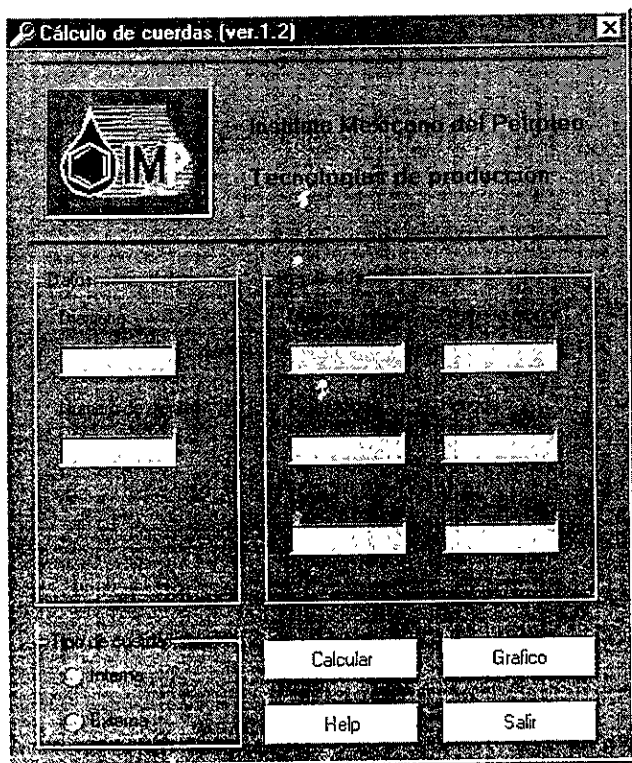


Figura 8.1. Pantalla principal o *frame* 1

Frame 2

Sub Form_Load()

```
Label1 = Val(Form1.text6pro.Text)      'W
Label2 = Val(Form1.Text8.Text)        'Cresta
Label3 = Val(Form1.Text9.Text)        'Valle
Label4 = Val(Form1.Text7.Text)        'Periodo
Label5 = Val(Form1.Text5.Text)        'Diámetro menor
Label6 = Val(Form1.Text4.Text)        'Diámetro mayor
```

```
x = Val(Form1.Text8.Text)
p = Val(Form1.Text7.Text)
```

```
If x = p / 8 Then indi = 0 Else indi = 1
```

Select Case indi

Case 0

```
Label2 = Val(Form1.Text8.Text)        'cresta
Label3 = Val(Form1.Text9.Text)        'valle
```

Case 1

```
Label3 = Val(Form1.Text8.Text)        'cresta
Label2 = Val(Form1.Text9.Text)        'valle
```

End Select
End Sub

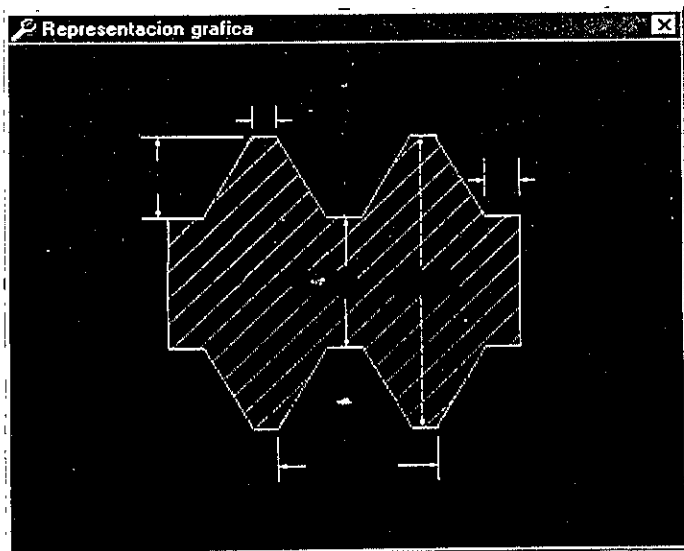


Figura 8.2 Frame 2

Frame 4

Private Sub Form_Load()

```

Label3 = Val(Form1.text6pro.Text) 'W
Label2 = Val(Form1.Text8.Text) 'Cresta
Label1 = Val(Form1.Text9.Text) 'Valle
Label6 = Val(Form1.Text7.Text) 'Periodo
Label4 = Val(Form1.Text5.Text) 'Diámetro menor
Label5 = Val(Form1.Text4.Text) 'Diámetro mayor
    
```

End Sub

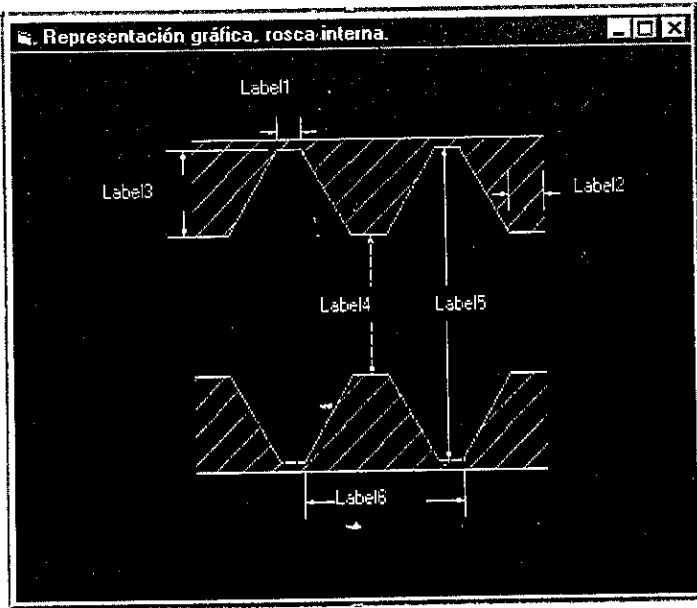
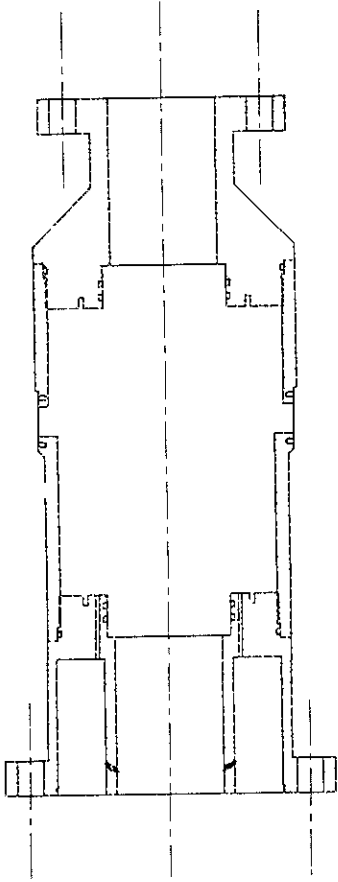
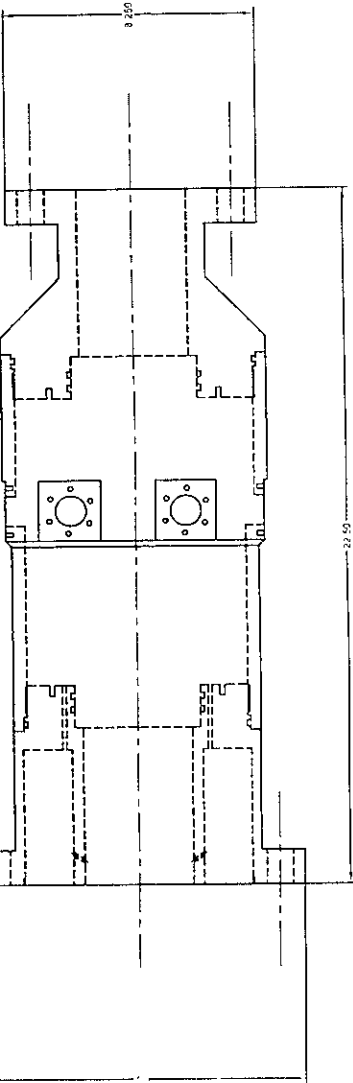


Figura 8.3. Frame 4



LAS TOLERANCIAS EN DIMENSIONES, ANGULOS Y
 ABASTOS NO ENRIOLADOS SEAN LAS SIGUIENTES:
 EN ACABADOS DE SU-
 PERFICIE: 0.05
 CILINDRICAS: 0.05
 Y ESCUINAS: 0.05
 DILATA: 0.05
 ANGULAR: $\pm 1/2$ GRADO

ESCALA: 1:1	ACOTACION: PULG.	MATERIAL: AISI 1020	CANT. DE PZAS: 1
DESCRIPCION: SENSOR TOMOGRAFICO			
MARCA: IMP			FECHA: Agosto de 2001
			No. DE DIBUJO: 1

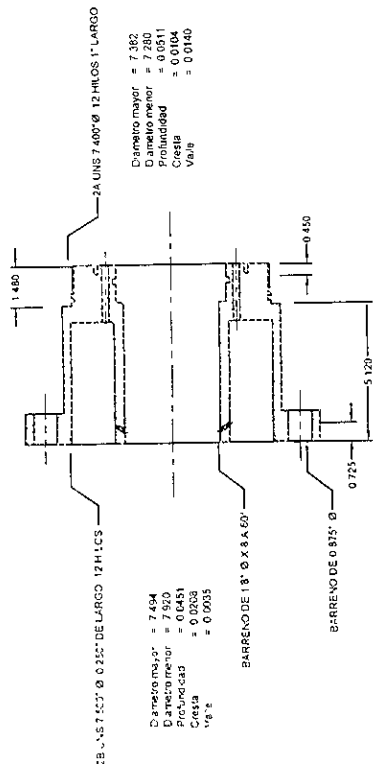
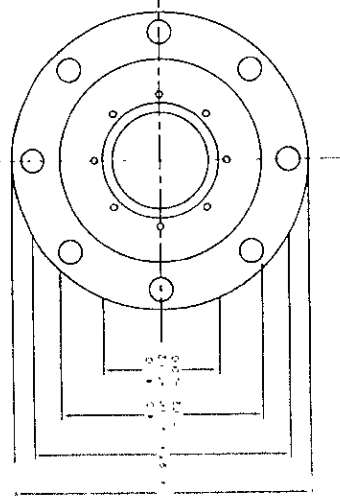
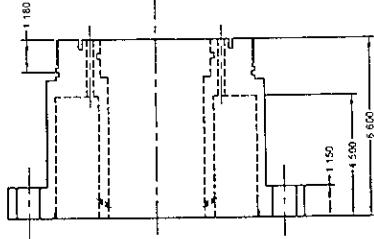
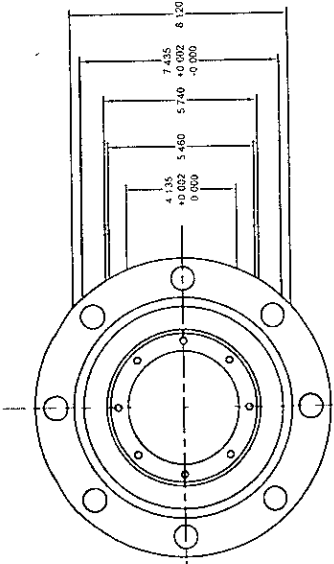
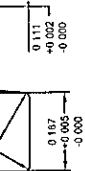


INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO
 GEOFÍSICA DE REPLICACION



UNIVERSIDAD NACIONAL
 AUTÓNOMA DE MÉXICO

DE $\sqrt{}$ A $\sqrt{}$



Diámetro mayor = 7.382
 Diámetro menor = 7.280
 Profundidad = 0.051
 Cresta = 0.046
 Vete = 0.0140

Diámetro mayor = 7.494
 Diámetro menor = 7.920
 Profundidad = 0.0451
 Cresta = 0.0208
 Vete = 0.0205

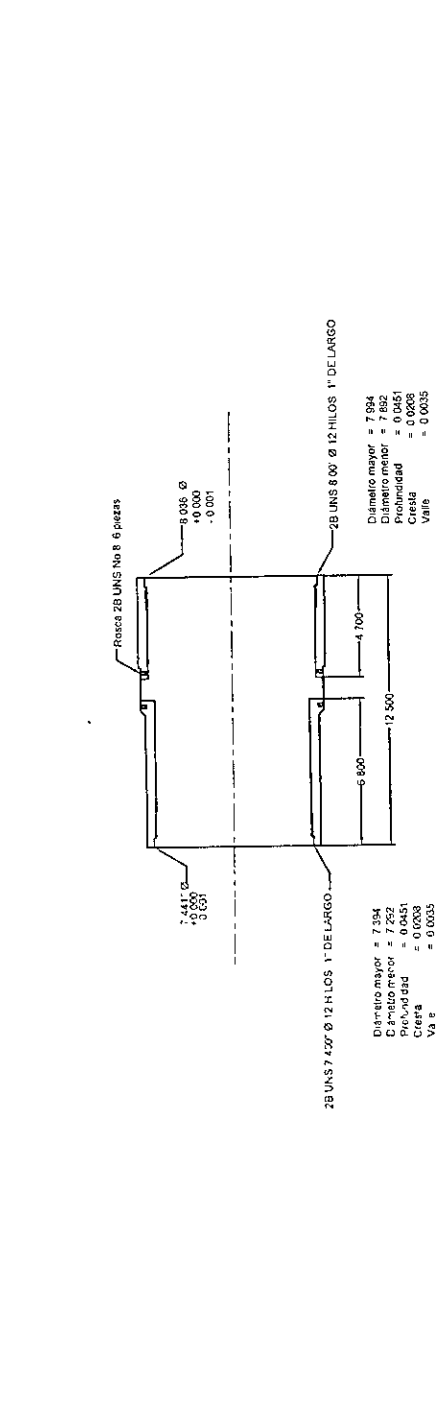
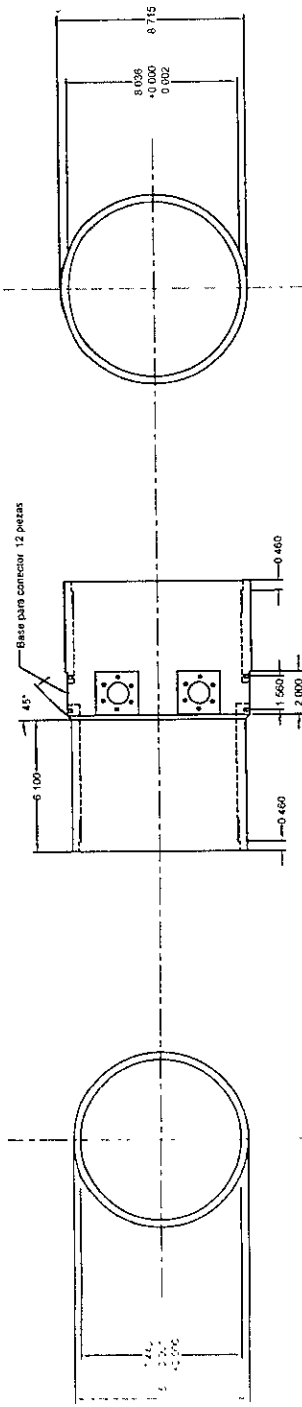
ESCALA: 1:1 ACOTACION: PULG. MATERIAL: AISI 1020 CANT. DE PZAS: 1
 DESCRIPCION: **BRIDA DE REGULACION**
 MARCA: **IMP**
 FECHA: Agosto de 2001
 No. DE DIBUJO: 2

LAS TOLERANCIAS EN DIMENSIONES, ANGULOS Y ACERDOS NO INDICADOS SEHAN LOS SIGUIENTES:

DIMENSION	TOL. PULO
EN ACERDOS DE 90°	+0.010
EN ACERDOS DE 45°	+0.005
CHUMBALES, BARRAS Y ESQUINAS REDONDEADAS	+0.003
DIAGONALES	±0.001
ANGULAR	±1/2 GRADO

DE \sqrt{A} A \sqrt{V}





2B UNS 7 437 Ø 12 HILOS 1" DE LARGO

Diámetro mayor = 7.994
 Diámetro menor = 7.262
 Profundidad = 0.6451
 Cresta = 0.0008
 Vete = 0.0035

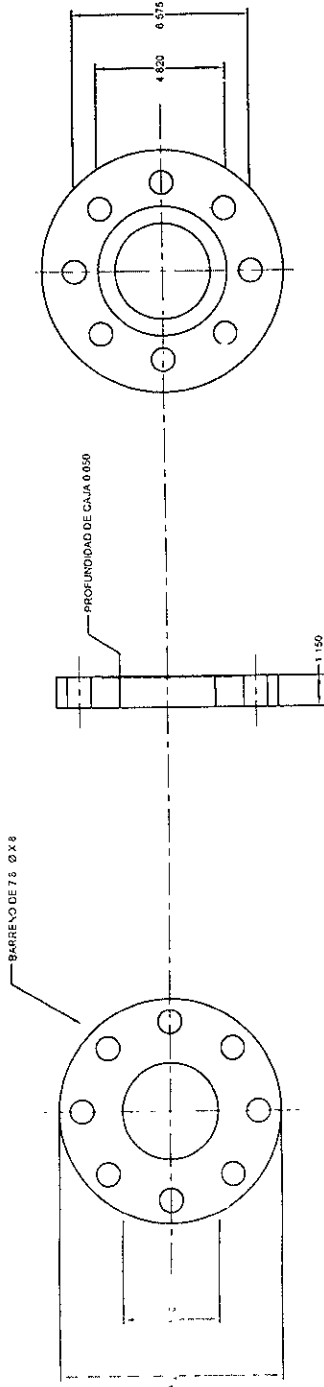
2B UNS 8 00 Ø 12 HILOS 1" DE LARGO

Diámetro mayor = 7.994
 Diámetro menor = 7.892
 Profundidad = 0.6251
 Cresta = 0.0035
 Vete = 0.0035

LAS TOLERANCIAS EN DIMENSIONES, ANGULOS Y ACERADOS NO ROTULADOS SEAN LOS SIGUIENTES: EN ACERADOS DE SU- PERFECTE REALIZES CILINDROS, RANURAS Y CANTONERAS REDON- DADAS DE \sqrt{A} A \sqrt{Y}	ESCALA: 1:1	ACOTACION: PULG.	MATERIAL: AISI 1020	CANT. DE PZAS: 1
	DESCRIPCION: TUBO DE UNION			
DIMENSION	TOL. PULG.			
0	± 0.010			
0.0	± 0.008			
0.000	± 0.005			
ANGULAR	± 1/2 GRADO			
MARCA: IMP	FECHA: Agosto de 2001			
	No. DE DIBUJO: 3			



INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO
 GEOFÍSICA DE EXPLORACIÓN



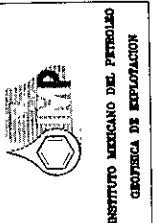
LAS TOLERANCIAS EN DIMENSIONES, ANGULOS Y ACABADOS NO INDICADOS SEGUN LOS SIGUIENTES:

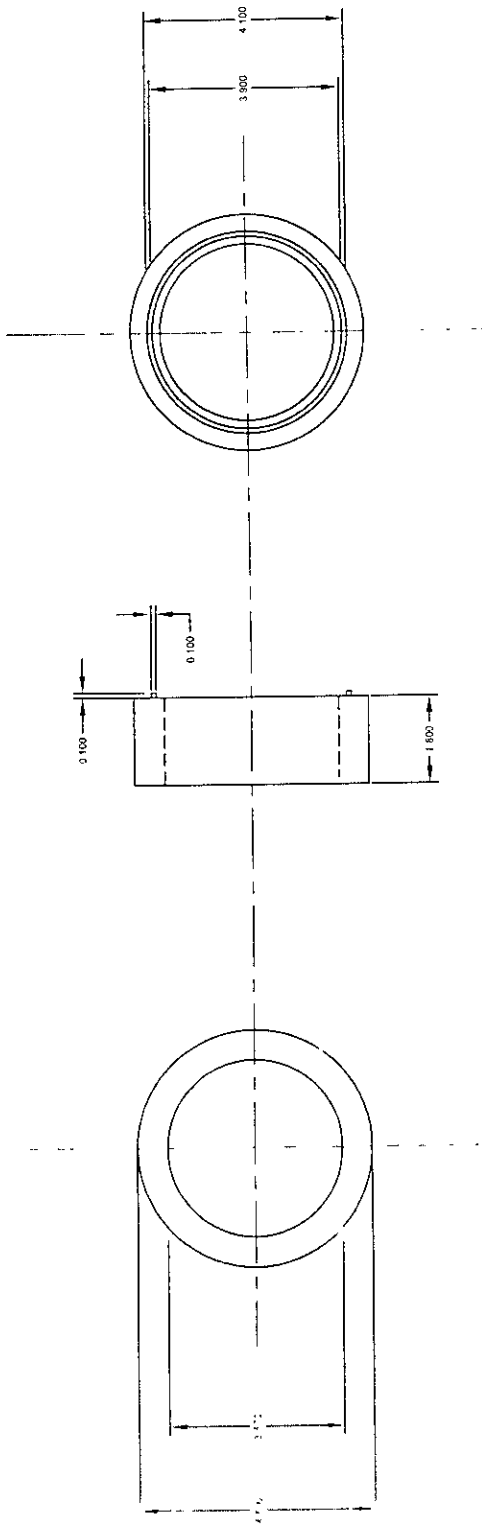
DIMENSION	TOL. PULG.
Ø	+0.010
Ø Ø	+0.008
Ø Ø	+0.002
Ø Ø	+0.001

EN ACABADOS DE SU-
 CUPULAS, BARRAS
 Y ESCUINAS MEDON-
 SIALES

ANGULAR	1/2 GRADO
ANGULAR	1/2 GRADO

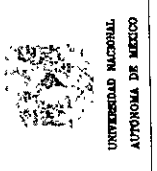
ESCALA: 1:1	ACOTACION: PULG.	MATERIAL: AISI 1020	CANT. DE PZAS: 1
DESCRIPCION: BRIDA FINAL 1			
MARCA: IMP			FECHA: Agosto de 2001
			No. DE DIBUJO: 4



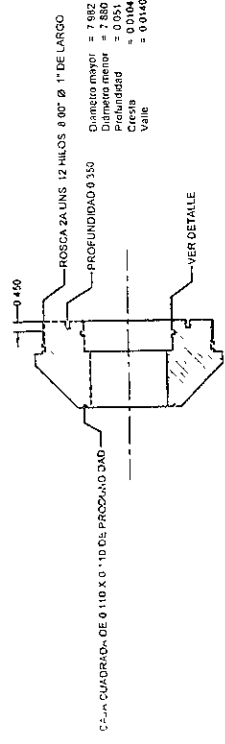
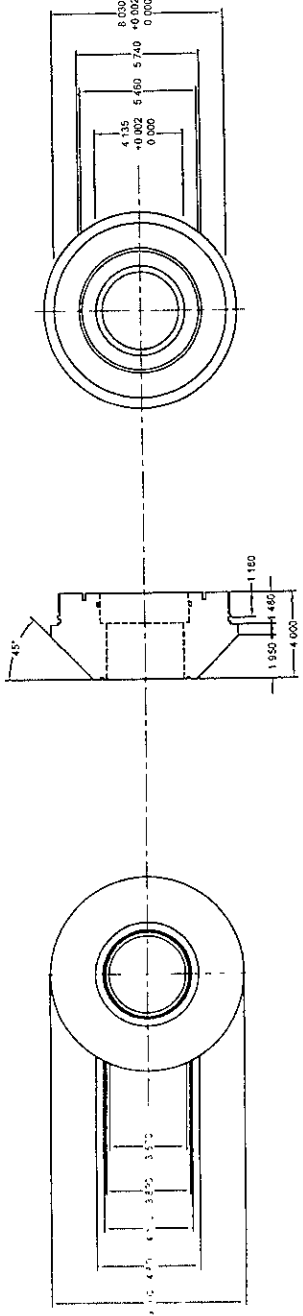
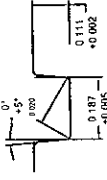


LAS TOLERANCIAS EN DIMENSIONES, ANGULOS Y ACABADOS NO INDICADOS SERAN LOS SIGUIENTES:
 EN ACABADOS DE SU-
 PERFICIE: 0.050
 CHALAZAS, BARRAS Y ESCUADRAS: 0.050
 DEBILES: 0.050
 ANGULAR: $\pm 1/2$ GRADO

ESCALA: 1:1	ACOTACION: PULG.	MATERIAL: AISI 1020	CANT. DE PZAS: 1
DESCRIPCION: BRIDA FINAL 2			
MARCA: IMP			FECHA: Agosto de 2001
			NO. DE DIBUJO: 5



DE \sqrt{A} A \sqrt{V}



C-2-11 CUADRO DE 0.110 X 0.110 DE PROXIMO DADO
 ROSCA 2A UNIS 12 HILOS 8 80" Ø 1" DE LARGO
 PROFUNDIDAD 0.350
 VER DETALLE
 Diámetro externo = 7.882
 Diámetro interno = 7.880
 Profundidad = 0.051
 Cresta = 0.0104
 Valle = 0.0140

LAS TOLERANCIAS EN DIMENSIONES, ANGULOS Y ACABADOS NO INDICADOS SERAN LOS SIGUIENTES:

ACABADO DE SUPERFICIE	TOL. PULG.
EN ACABADOS DE SU- PERFICIE EXTERNA, CANTONERAS, BARRILAS Y ESQUINAS REDON- DEADAS	+0.010 +0.005 +0.002 +0.001
ANGULAR	±1/2 GRADO

DE \sqrt{A} A \sqrt{V}

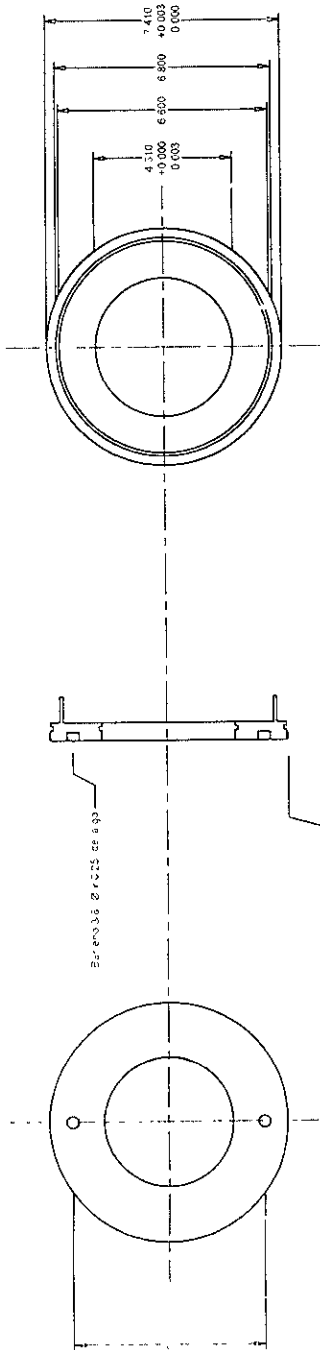
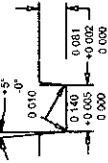
ESCALA: 1:1	ACOTACION: PULG.	MATERIAL: AISI 1020	CANT. DE PZAS: 1
DESCRIPCION: BRIDA FINAL 3			
MARCA: IMP		FECHA: AGOSTO DE 2001	
No. DE DIBUJO: 6			



INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO
 GEOFISICA DE EXPLORACION



UNIVERSIDAD NACIONAL
 AUTÓNOMA DE MÉXICO



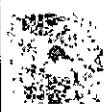
Superficie 2 veces de 45°

2. VAS 50° 2. 12H 40T 24. CF. 10.9.33

- Diametro mayor = 7.482
- Diametro menor = 7.380
- Profundidad = 0.0511
- Cresta = 0.0104
- Valle = 0.0035



INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO
GEOGRAFIA DE EXPLORACION



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCALA: 1:1 ACOTACION: PULG. MATERIAL: AISI 1020 CANT. DE PZAS: 1

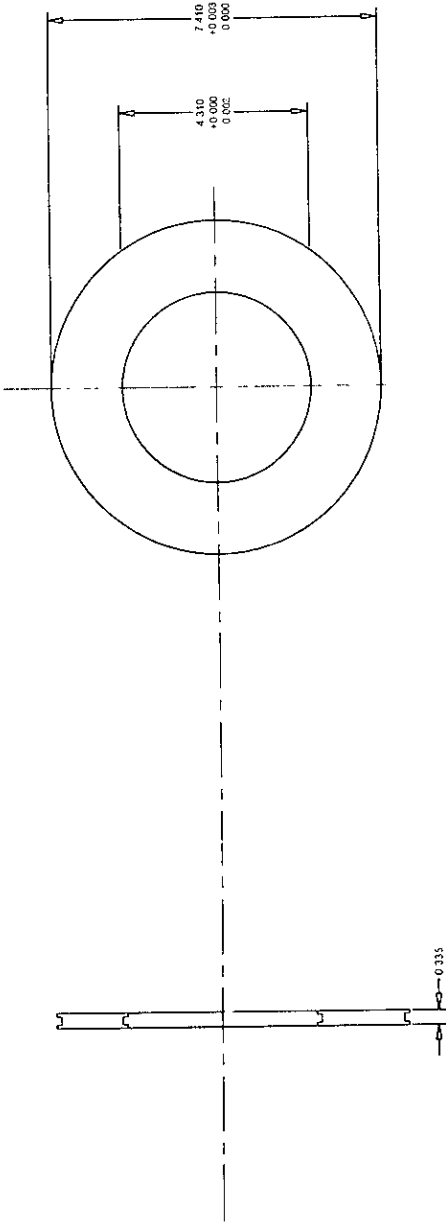
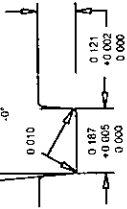
DESCRIPCION: TAPA ROSCADA

FECHA: Agosto de 2001

MARCA: IMP No. DE DIBUJO: 7

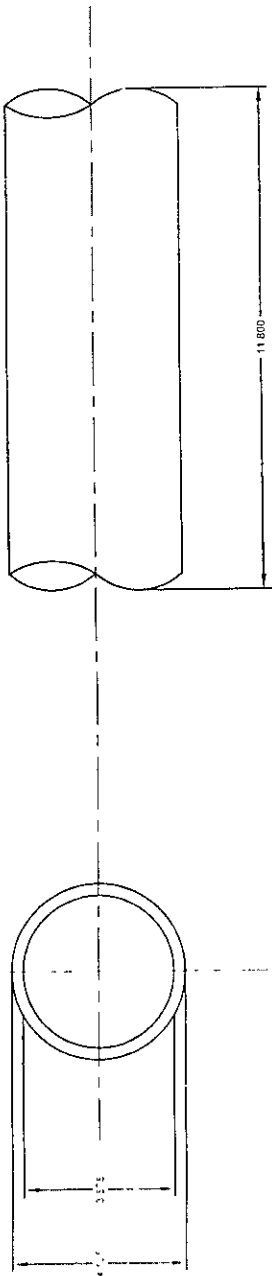
EN ACABADOS DE SU- PUESTOS DE ANGULOS Y ESQUINAS REDON- DEADAS.	ANGULAR	+1/2 GRADO
DESECCION	TOL. PULG.	
0	0.000	
0.0	0.003	
0.050	0.001	
0.050	0.001	

US V A V



LAS TOLERANCIAS EN DIMENSIONES, ANGULOS Y ACABADOS NO INDICADOS SEAN LOS SIGUIENTES. EN ACABADOS DE SU- PROTECCION, REFINIS- Y ESCALAS REDON- DADAS: 0.005 0.000 0.005 0.000 0.005 0.000 ANGULAR 1/2 GRADO	ESCALA: 1:1	ACOTACION: PULG.	MATERIAL: AISI 1020	CANT. DE PZAS: 1
	DESCRIPCION: PISTON DE REGULACION MARCA: IMP			
FECHA: Agosto de 2001 N. DE DIBUJO: 8				
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO		INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO CENOTECNICA DE REGULACION		

OK ✓ a ✓



LAS TOLERANCIAS EN DIMENSIONES, ANGULOS Y
 ACABADOS NO DEBEN SER MENORES A LAS SIGUIENTES:

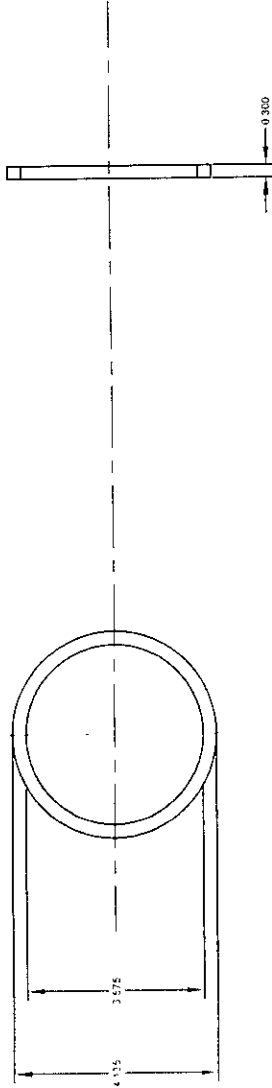
DIMENSION	TOL. PULG.
0	+0.010
0.0	+0.005
0.00	+0.002
0.000	+0.001
ANGULAR	11/2 GRADO

EN ACERCA DE SU-
 PERFICIE RESALTES
 CANTONALES, RANURAS
 Y ESCUINOS SE DON-
 DARA

DE \sqrt{A} A \sqrt{V}

ESCALA: 1:1	ACOTACION: PULG.	MATERIAL: DURAN	CANT. DE PZAS: 1
DESCRIPCION: TUBO DIELECTRICO			
MARCA: IMP		FECHA: Agosto de 2001	
No. DE DIBUJO: 9			





INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO
SECRETARÍA DE ENERGÍA



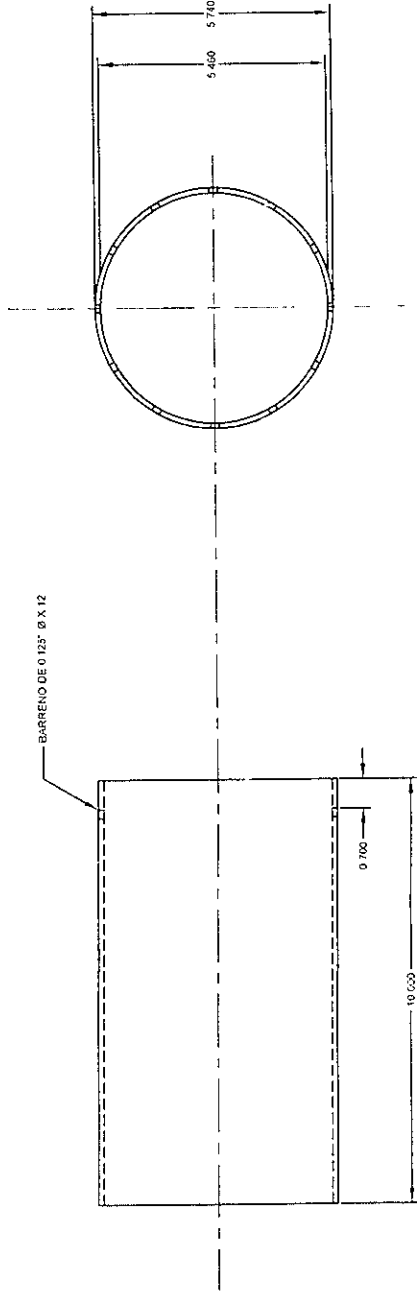
UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCALA: 1:1		ACOTACION: PULG.	MATERIAL: VITON 9	CANT. DE PZAS: 2
DESCRIPCION:		EMPAQUE DEL TUBO DIELECTRICO		
MARCA: IMP		FECHA: Agosto de 2001		
		No. DE DIBUJO: 10		

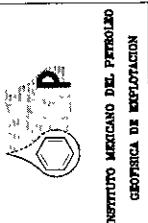
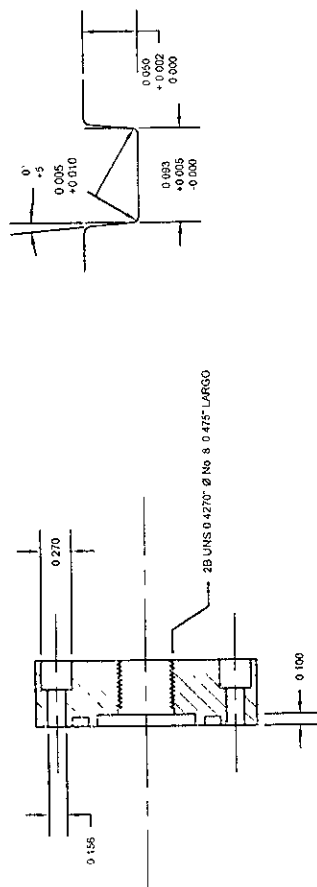
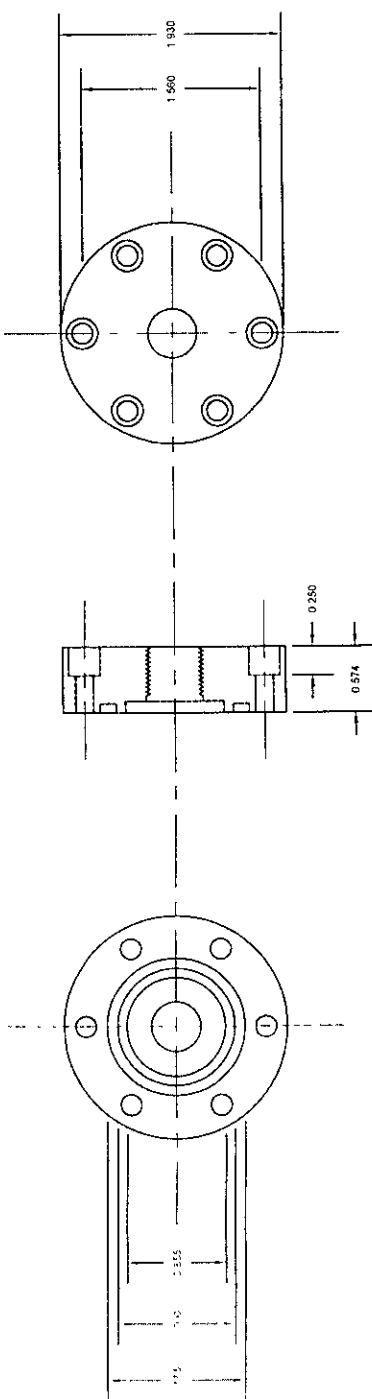
LAS TOLERANCIAS EN DIMENSIONES, ANGULOS Y ACERADOS NO INDICADOS SEGUN LAS SIGUIENTES:
 EN ACERADOS DE SU-
 PERFICIE, REBATES,
 CILINDROS, BANGUROS
 Y BANGUROS MEDIO-
 BANGUROS
 ANGULAR

DIMENSION	TOL. PULG.
0	+0.010
0	+0.000
0.00	+0.002
0.000	+0.001
ANGULAR	±1/2 GRADO

DE \sqrt{A} A \sqrt{V}



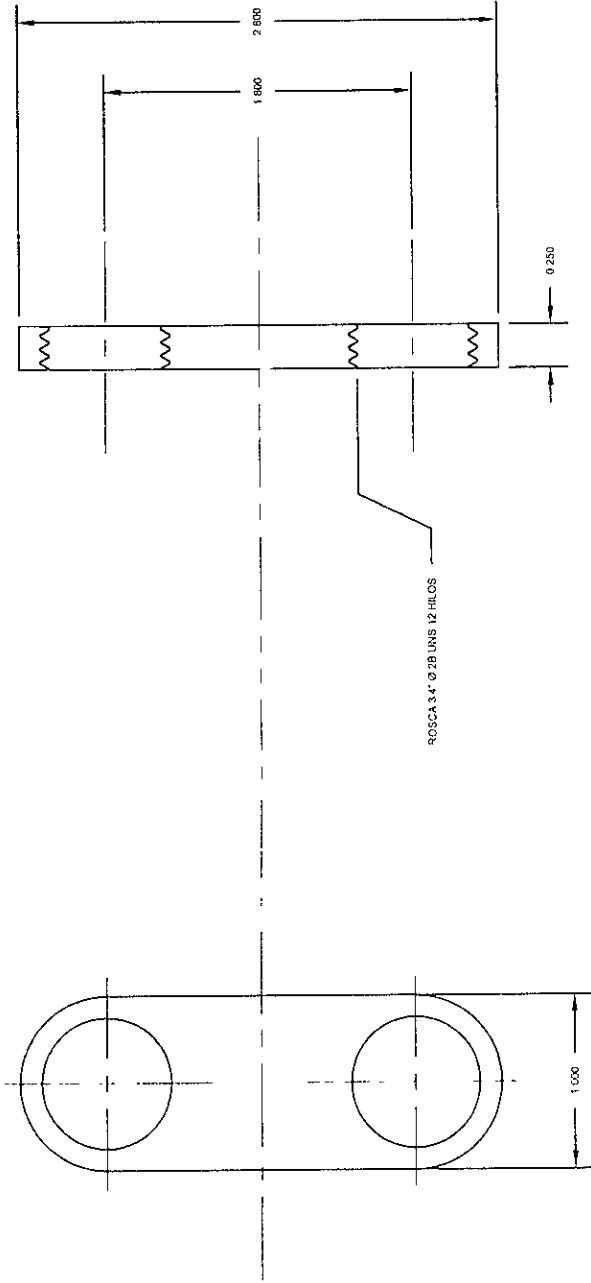
LAS TOLERANCIAS EN DIMENSIONES, ANGULOS Y ACABADOS NO INDICADOS SEERAN LOS SIGUIENTES: EN ACABADOS DE SU- CECTE: REBARBAS Y ESQUINAS REDON- DEADAS DE \sqrt{a} A \sqrt{b}	DIMENSION	TOL. PULG.	ESCALA: 1:1		ACOTACION: PULG.	MATERIAL: ALUMINIO	CANT. DE PZAS: 1
	0	±0.010	DESCRIPCION: TUBO DIELECTRICO				
	0.0	±0.005					
	0.00	±0.001					
ANGULAR	±1/2 GRADO						
MARCA: IMP		FECHA: Agosto de 2001		No. DE DIBUJO: II			
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO		INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO GEOFÍSICA DE EXPLORACION					



ESCALA: 1:1	ACOTACION: PULG.	MATERIAL: AISI 4140	CANT. DE PZAS: 12
DESCRIPCION: SOPORTE DEL CONECTOR			
FECHA: Agosto de 2001			
No. DE DIBUJO: 12			
MARCA: IMP			
ANGULAR: ±1/2 GRADO			

LAS TOLERANCIAS EN DIMENSIONES, ANGULOS Y
 LABRADOS NO INDICADOS SEGUN LOS SIGUIENTES:
 EN ACABADOS DE SU-
 PERFICIE: REALIDAD
 CUANTAS RANURAS
 Y ESCALONAS SEEDON-
 DADAS
 TOL. PULG.
 0
 0.0
 0.00
 0.000
 ANGULAR
 ±1/2 GRADO

1:2 A ✓
 1:1 A ✓
 1:1/2 A ✓



INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO
 GEOLÓGICA DE EXPLORACIÓN

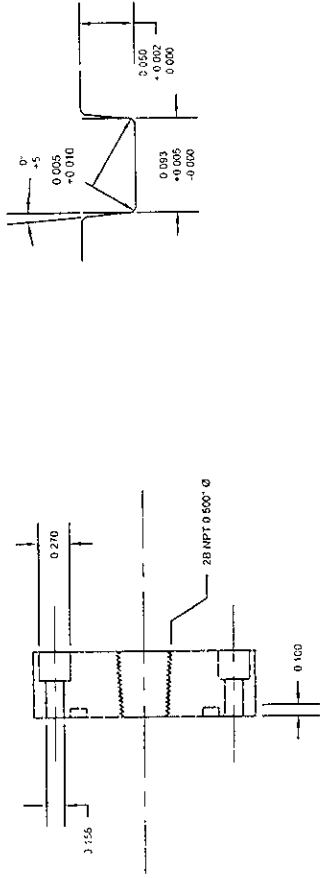
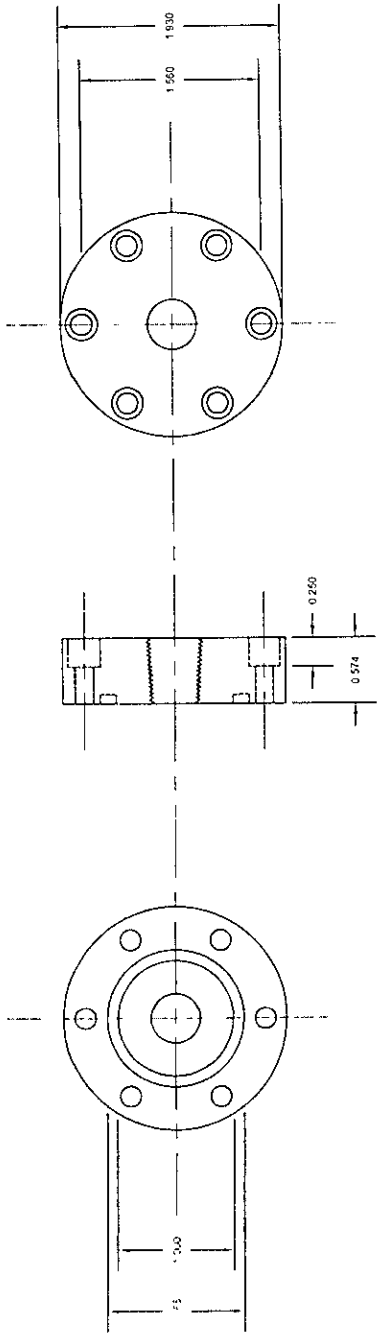


UNIVERSIDAD NACIONAL
 AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCALA: 1:1	ACOTACION: PULG.	MATERIAL: AISI 4140	CANT. DE PZAS: 2
DESCRIPCION: ACCESORIO A			
			FECHA: Agosto de 2001
			No. DE DIBUJO: 13
		MARCA: IMP	

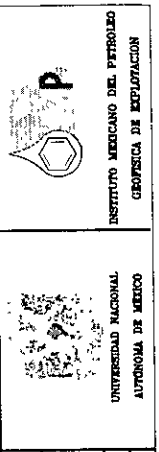
LAS TOLERANCIAS EN DIMENSIONES, ANGULOS Y ACABADOS NO INDICADOS SEGUN LAS SIGUIENTES.	
DIMENSION	TOL. PULG.
0 - 0.010	±0.010
0.010 - 0.050	±0.005
0.050 - 0.002	±0.002
0.002 - 0.001	±0.001
ANGULOS	±1/2 GRADO

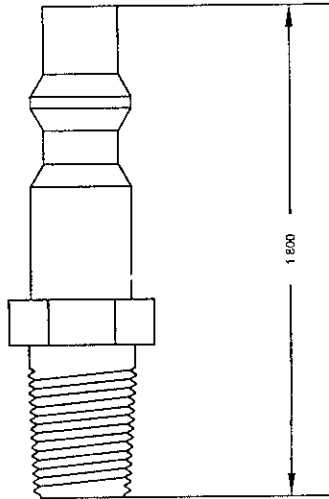
DE \sqrt{A} A \sqrt{V}



LAS TOLERANCIAS EN DIMENSIONES, ANGULOS Y
 ALZADOS NO INDICADOS SEGUN LOS SIGUIENTES.
 EN ACABADOS DE SU-
 PERFICIE, RESALTES,
 Y ESCALAS REDON-
 DADAS.
 DIMENSION TOL. PULG.
 0 ±0.010
 0.0 ±0.005
 0.00 ±0.002
 0.000 ±0.001
 ANGULAR ±1/2 GRADO

ESCALA: 1:1	ACOTACION: PULG.	MATERIAL: AISI 4140	CANT. DE PZAS: 12
DESCRIPCION: ACCESORIO B			
MARCA: IMP			FECHA: Agosto de 2001
			Nº. DE DIBUJO: 14





R-SCSA 0.5 Ø NPT



INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO
CENTRO DE INVESTIGACION
Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCALA: 1:1 ACOTACION: PULG. MATERIAL: ACERO CANT. DE PZAS: 1

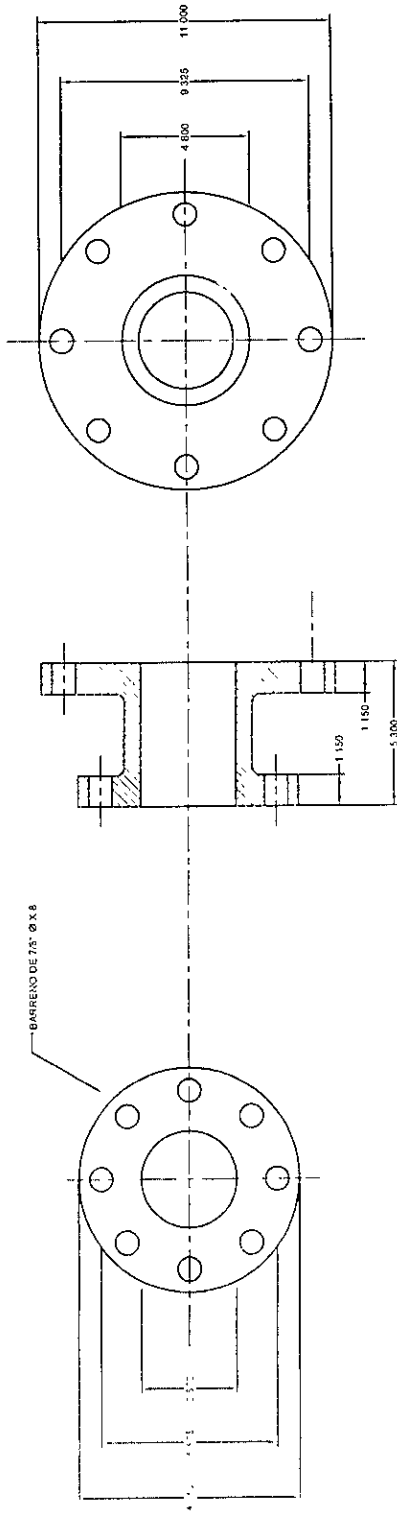
DESCRIPCION: **ACCESORIO C**

MARCA: **IMP** FECHA: Agosto de 2001
No. DE DIBUJO: 15

LAS TOLERANCIAS EN DIMENSIONES, ANGULOS Y ACERADOS NO INDICADOS SEGUN LAS SIGUIENTES:

DIMENSION	TOL. PULG.
EN ACERDOS DE SU- PERFICIE	±0.010
CHULANES, BARRIJAS Y ESQUINAS REDON- DEADAS	±0.005
	±0.002
	±0.001
ANGULAR	±1/2 GRADO

DE A V

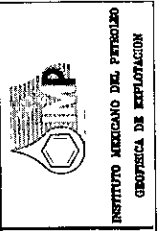


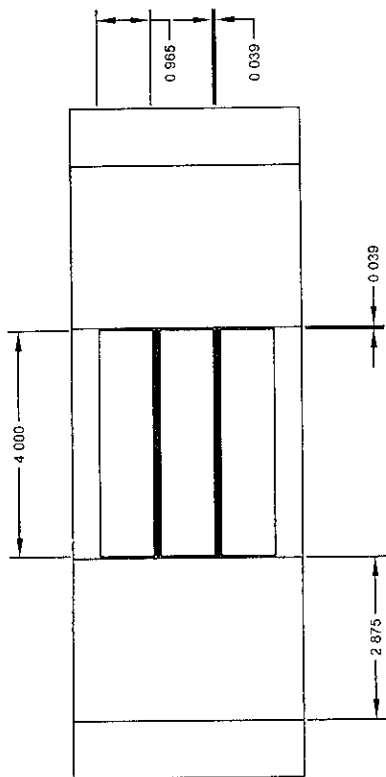
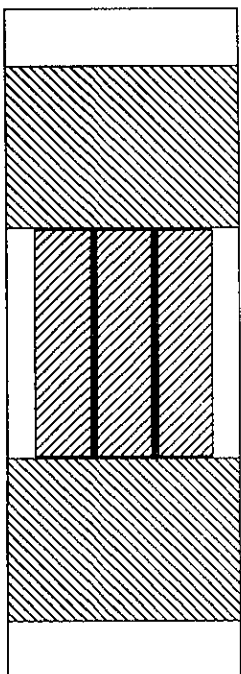
EN ACABADOS DE SU-
COPLES PERFORAS
Y ESQUINAS REDON-
DADAS

DIMENSION	TOL. PULG.
D.	±0.010
O.D.	±0.005
O.C.D.	±0.005
ANGULAR	±1/2 GRADO

LAS TOLERANCIAS EN DIMENSIONES, ANGULOS Y ACABADOS NO INDICADOS SERAN LOS SIGUIENTES:

ESCALA: 1:1	ACOTACION: PULG.	MATERIAL: AISI 1020	CANT. DE PZAS: 1
DESCRIPCION:		ACCESORIO D	
MARCA: IMP		FECHA: Agosto de 2001	Nº. DE DIBUJO: 16





Esta distancia es la misma de los espacios arriba y abajo de esta línea

Fil. Jueves de electrodos es de 12
353 e a 1030 abarca 303

LAS TOLERANCIAS EN DIMENSIONES, ANGLAS Y ACABADOS NO INDICADOS SEJAN LAS SIGUIENTES: EN ACABADOS DE SU- PERFICIALES Y ANGLAS Y EN ANGLAS REDON- DEADAS: DIMENSION D.T. 1/2 A 1/4 0.010 0.005 0.002 0.001 ANGULAR 1/2 GRADO	ESCALA: 1:1	ACOTACION: PULG.	MATERIAL: 4929N	CANT. DE PZAS: 1
	DESCRIPCION: SERICRAFIA			
MARCA: IMP				FECHA: Agosto de 2001
				No. DE DIBUJO: 17



INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO
GEOFISICA DE EXPLOTACION

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

Bibliografía.

- Engineering materials, properties and selection.
Kenneth Budinski.
Prentice-hall, 2nd edition, 1993, USA.
 - Desing of machine element.
Virgel M. Faires.
Macmillan, 4th edition, 1965, USA.
 - Ingeniería petrolera básica.
Francisco Garaicochea P.
CSIPSA, 1995, México (Ref. 6.3)
 - An introduccion to the basics of well completions, stimulations and workovers.
George E. King.
2nd edition, 1995, USA. (Ref. 6.2)
 - Mecánica de materiales.
Beer Fernandin.
McGraw-Hill, segunda edición, México.
 - Manual del ingeniero mecánico.
Baumeister theodore, Avallone A Eugene.
McGraw-Hill,Segunda edición, 1978, México.
 - Imaging Industrial Flows.
Plaskowski A.
IOP publishing, 1995.UK.
 - Process Tomography. Principles, techniques and application.
R. A. Willians and M. S. Beck.
Butter-Heinemann, 1995, Uk
 - Metals Handbook.
American society for metals. Vol. 1, 1989, USA.
 - Metals Handbook.
American society for metals. Vol. 2, 1989, USA. (Ref. 6.1)
 - Metals Handbook.
American society for metals. Vol. 13, 1989, USA.
-