

**VISCOSÍMETRO ROTATIVO
AUTOMATIZADO**

**ORLANDO VILLARREAL GÓMEZ
JAVIER ALFONSO JIMÉNEZ SANGUINO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2005**

**VISCOSÍMETRO ROTATIVO
AUTOMATIZADO**

**ORLANDO VILLARREAL GÓMEZ
JAVIER ALFONSO JIMÉNEZ SANGUINO**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
OMAR ARMANDO GÉLVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2005**

A Dios Todopoderoso

A mi bella madre

A mi padre

Al doctor Alfonso Prieto García

A Lizeth Churio

A Luz Marina, Wilson, Adela y demás hermanos

ORLANDO VILLARREAL GÓMEZ

A Dios bendito
A mis queridos padres
A mi amada esposa
A mis bellos hijos
A mis hermanos.

JAVIER ALFONSO JIMÉNEZ SANGUINO

AGRADECIMIENTOS

A Dios nuestro creador, por haberme brindado esta bella oportunidad, porque nunca me abandona y porque es la fuerza de mi vida.

A mi madre, por haberme dado la vida, su apoyo y motivación permanentes, y en los últimos tiempos, hasta la actualidad, me ha dado mucha moral desde el cielo.

A Omar Gélvez Arocha, Ingeniero Mecánico, director del proyecto y amigo, por su respaldo, confianza y colaboración oportuna.

Al Doctor Alfonso Prieto García, por su gran motivación y apoyo.

A Carlos Pico, Gilberto Parra, Alberto García, por su colaboración.

A Luz Marina y demás hermanos, que de una u otra manera me motivaron y apoyaron para culminar este gran proyecto.

ORLANDO VILLARREAL GÓMEZ

AGRADECIMIENTOS

A Dios todopoderoso que me ha brindado la oportunidad de vivir y realizar esta labor.

A mis padres que con años de lucha y sacrificio entregaron todo para ver realizado este triunfo.

A Jaime, Miguel y demás hermanos, que de una u otra forma fueron apoyo e incentivo para sacar adelante el proyecto.

A Omar Gélvez Arocha, Ingeniero Mecánico, director del proyecto y amigo, por su respaldo, confianza y colaboración oportuna.

JAVIER ALFONSO JIMÉNEZ SANGUINO

CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTOS DE VISCOSIDAD	3
1.1. DEFINICIÓN	3
1.2 UNIDADES	5
2. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO PREVIO DEL EQUIPO	6
3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL VISCOSÍMETRO ROTATIVO AUTOMATIZADO V.R.A	9
3.1 SISTEMA SENSOR	10
3.2 SISTEMA DE TRANSMISIÓN	12
3.3 SISTEMA DE MEDICIÓN DE TORQUE	15
3.4 SISTEMA MOTRIZ	17
4. CONFIGURACION ACTUAL DEL VISCOSIMETRO ROTATIVO AUTOMATIZADO	19
5. DESCRIPCIÓN MECÁNICA DEL EQUIPO	23
5.1 BASE DEL EQUIPO	23
5.2 VASO CONTENEDOR	25
5.3 AGUJA	26
5.4 TRANSDUCTOR DE TORQUE	28
5.4.1. Par de cilindros concéntricos	30
5.4.2 Resorte en espiral	32
5.4.3 Platina de ajuste del resorte en espiral.	33
5.4.4 Seguidor del potenciómetro	33
5.4.5 Potenciómetro	33
5.4.6 Topes del seguidor del potenciómetro	34
5.4.7 Eje del transductor	34

5.4.8 Estructura del transductor	34
5.4.9 Carcasa o tapa del transductor	35
6. DESCRIPCIÓN ELÉCTRICA DEL EQUIPO	36
6.1 EXPLICACIÓN DEL DIAGRAMA DE BLOQUES	36
6.1.1 Sensores de temperatura	37
6.1.2 Encoder	37
6.1.3 PWM hacia el motor (regulador de velocidad).	37
6.1.4 Display (LCD)	37
6.1.5 Microcontrolador	37
6.2 ESQUEMA GENERAL DEL HARDWARE ELECTRÓNICO	37
6.2.1 Detección de la medición del potenciómetro	38
6.2.2 Detección de temperatura	42
6.2.3 Interfase a teclado	43
6.2.4. Salida PWM	44
6.2.5 Interface a display	45
6.2.6 Interface a la computadora	47
6.2.7 Posición del Encoder diferencial	49
6.2.8 Unidad Central del Control o MCU	51
7. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO	53
7.1 ECUACIÓN DEL TORQUE GENERADO	55
7.2 CALCULO DE LA COSNTANTE GEOMÉTRICA K DEL EQUIPO	56
8. MANUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO V.R.A.	57
9. PRRUEBAS Y TOMA DE DATOS	64
9.1 ACEITE DE BAJA VISCOSIDAD	64
9.2 ACEITE DE ALTA VISCOSIDAD	65
10. CONCLUSIONES	66
11. RECOMENDACIONES	68
BIBLIOGRAFÍA	71

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Deformación de un elemento de fluido newtoniano	3
Figura 2. Imagen del viscosímetro previo	6
Figura 3. Viscosímetro previo y su sistema de apoyo	7
Figura 4. Configuración de los cuatro sistemas de funcionamiento	9
Figura 5. Sistema sensor	10
Figura 6. Acople aguja giratoria – cilindro interno concéntrico	11
Figura 7. Formación del ángulo α entre los dos cilindros concéntricos	13
Figura 8. Acople del sistema de transmisión con la aguja giratoria	14
Figura 9. Sistema de medición de torque	16
Figura 10. Motor eléctrico	18
Figura 11. Presentación esquemática del viscosímetro rotativo automatizado	19
Figura 12. Fotografía del equipo	20
Figura 13. Esquema electrónico del V.R.A	21
Figura 14. Fotografía del transductor de torque	22
Figura 15. Base del equipo	23
Figura 16. Vista en corte de la base del equipo	24
Figura 17. Fotografía de la base de equipo	27
Figura 18. Vaso contenedor	26
Figura 19. Aguja giratoria	27
Figura 20. Esquema del transductor de torque	29
Figura 21. Formación de la señal análoga	30
Figura 22. Cilindros concéntricos	31
Figura 23. Resorte en espiral	32

Figura 24. Configuración del transductor	34
Figura 25. Carcasa del transductor	35
Figura 26. Circuito electrónico general	39
Figura 27. Esquema del hardware electrónico	40
Figura 28. Sensor de temperatura LM35	42
Figura 29. Teclado matricial	44
Figura 30. Modulación de ancho de pulso	45
Figura 31. Display LCD	46
Figura 32. Conexión física al display	47
Figura 33. Configuración de pines	48
Figura 34. Etapa de detección del Encoder	50
Figura 35. Conexión mecánica del Encoder	51
Figura 36. Configuración de pines del microcontrolador PIC16F873	52
Figura 37. Calibración del equipo	54
Figura 38. Sistema sensor para calcular el torque	55
Figura 39. Configuración del equipo V.R.A	57
Figura 40. Secuencia de instalación del vaso contenedor (fase 1)	58
Figura 41. Secuencia de instalación del vaso contenedor (fase 2)	59
Figura 42. Curva de T Vs Ω y su tabla de valores (Fase 1)	61
Figura 43. Curva de T Vs Ω y su tabla de valores (Fase 2)	63
Figura 44. Aceite de baja viscosidad	64
Figura 45. Aceite de alta viscosidad	65

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Unidades de viscosidad	5
Tabla 2. Valores de viscosidad	5
Tabla 3. Configuración previa del equipo	8

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. gráficas del diseño del V.R.A	72

GLOSARIO

AMPLIFICADOR: Instrumento cuya señal de salida equivale a la señal de entrada incrementada y que se alimenta de una fuente externa.

CALIBRACIÓN: Ajuste de un instrumento a valores deseados dentro de una tolerancia específica.

POTENCIÓMETRO: Divisor de tensión ajustable formado por un reóstato de tres terminales, uno de ellos móvil (resistencia variable).

PUENTE WHEATSTONE: Término empleado para designar la configuración eléctrica general de ciertos elementos transductores.

SEÑAL: Salida o información que emana de un instrumento.

SEÑAL DE SALIDA: Señal producida por un instrumento que es función de la variable medida.

SEÑAL DE SALIDA ANALÓGICA: Señal que es función continua de la variable medida.

SEÑAL DE SALIDA DIGITAL: Señal que representa la magnitud de la variable medida en forma de una serie de cantidades discretas codificadas en un sistema de notación.

TERMOCUPLAS: Par de conductores de materiales distintos unidos entre sí que generan una fuerza electromotriz cuando las dos uniones están a distintas temperaturas.

TERMORESISTENCIA: Resistencia cuyo valor varía con la temperatura, generalmente en forma lineal.

VISCOSIDAD: Resistencia a la deformación de un fluido bajo un esfuerzo de corte.

RESUMEN

TITULO: VISCOSÍMETRO ROTATIVO AUTOMATIZADO*

AUTORES: Orlando Villarreal Gómez
Javier A. Jiménez Sanguino**

PALABRAS CLAVES:

Viscosímetro rotativo automatizado, Mecánica de Fluidos, Viscosidad.

DESCRIPCIÓN

El objetivo de este proyecto es rediseñar y automatizar un viscosímetro rotativo perteneciente a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, de manera que pueda utilizarse en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

El rediseño, montaje y calibración del sistema ideado cumple con el objeto de mejorar los siguientes aspectos: Facilitar la maniobrabilidad del equipo (desde el punto de vista mecánico), lograr un sistema de adquisición de datos para la visualización y el control en el viscosímetro durante la realización de las pruebas que puedan brindar información de las siguientes variables: Torque, viscosidad, velocidad, temperatura del fluido en análisis, temperatura del líquido de enfriamiento y/o calentamiento, temperatura ambiente.

El resultado es un Viscosímetro Rotativo Automatizado de fácil manejo, calibrado con las señales provenientes del equipo, listas para un posterior acople con el sistema de adquisición de datos Field Point y un manual con los procedimientos de operación y mantenimiento del Viscosímetro Rotativo Automatizado, que permiten dotar de prácticas idóneas el Laboratorio de Mecánica de Fluidos, contribuir con la actualización de la Escuela de Ingeniería Mecánica y dar continuidad a las líneas de investigación relacionadas con el área de Mecánica de Fluidos mediante el desarrollo de proyectos que integran áreas de conocimiento de Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Diseño Industrial e Ingeniería Química.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Omar Gélvez

SUMMARY

TITLE: ROTARY AUTOMOTIVE VISCOMETER*

AUTHORS: Orlando Villarreal Gómez
Javier A. Jiménez Sanguino**

KEY WORDS:

Rotary Automotive Viscometer, Mechanics of Fluids, Viscosity.

DESCRIPTION:

The objective of this project is to redesign and make a Rotary Automotive Viscometer owned by School of Mechanical Engineering of the Industrial University of Santander, in a way that it could be used in the Mechanics of Fluids Laboratory.

The redesign, built and calibration of the system created, accomplishes the objective of improving the following items: to make an easy to use equipment (under the mechanical point of view) and under the functional point of view to achieve a system to get data in order to make possible the display of the information and the control of the viscometer during the tests; in order to give information about the following data: torque, viscosity, velocity, temperature of the analyzed fluid, temperature of the cool and/or liquid, environment temperature.

The result is a rotary automotive viscometer easy to use, calibrated with the signals from the equipment, ready to make future connections with a field point, data acquisition system and a manual with the operation and maintenance procedures of the rotary automotive viscometer, that lets: To endow suitable practices to the Laboratory of Mechanics of Fluids, to contribute with the actualization of the school of Mechanical Engineering and to give continuity to the investigation lines related to the mechanical of fluids area, by the development of works that integrate areas of knowledge in Mechanical Engineering, Electronic Engineering, Industrial Design and Chemistry.

* Degree Work

** Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Omar Gélvez

INTRODUCCIÓN

Dentro de la estrategia de apropiación de conocimientos y habilidades que maneje cualquier escuela de formación profesional, los laboratorios de prácticas en las disciplinas básicas profesionales juegan un papel primordial.

Una de las prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos, de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander que se tienen implementadas, posee dos opciones que se basan en: La rodadura de una bola en un plano inclinado y el efecto producido por un fluido en la rotación de un cilindro que se encuentra dentro de otro.

Específicamente el desempeño del equipo que utiliza la segunda opción es deficiente debido a las dificultades que reducen la posibilidad de obtener resultados apropiados, lo cual está relacionado principalmente con los siguientes factores: Maniobrabilidad y Funcionalidad.

Teniendo en cuenta que una práctica de laboratorio que permita fortalecer el proceso de apropiación de conocimientos y habilidades debe ser confiable, exacta y fácil de realizar. El cumplimiento de estas condiciones permite que el interés que muestre el estudiante se incremente, generando un ambiente adecuado para la apropiación del conocimiento.

Ha surgido la inquietud de realizar estudios y análisis tendientes a la realización de esfuerzos enfocados a dotar de prácticas idóneas en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, y en concreto uno de los equipos más representativos de la misma: el viscosímetro rotativo.

Este trabajo recopila el esfuerzo de los autores para realizar las modificaciones necesarias que, sólidamente sustentadas, permitan automatizar el viscosímetro y, por ende, ampliar su vida útil, capacidad de acción y mejorar el rol que desempeña en la labor educativa.

1. FUNDAMENTOS DE VISCOSIDAD

1.1 DEFINICIÓN

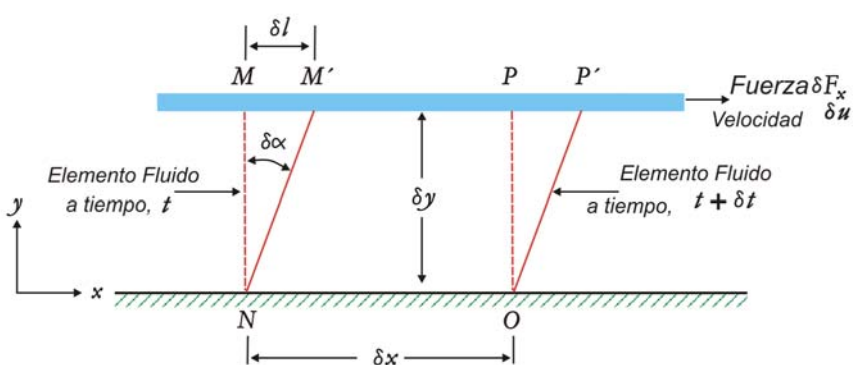
Un fluido se define como una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo cortante. La viscosidad es la resistencia a la deformación de un fluido bajo un esfuerzo cortante.

Los fluidos se pueden clasificar en forma general según la relación que existe entre el esfuerzo cortante aplicado y la rapidez de deformación resultante.

Los fluidos newtonianos son aquellos donde el esfuerzo cortante aplicado es directamente proporcional a la rapidez de deformación. Ejemplo: agua, glicerina. Los fluidos no newtonianos son aquellos fluidos donde el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación no son directamente proporcionales. Ejemplo: grasas, cremas y pintura.

Para nuestro interés, se trabajará con base en los fluidos newtonianos.

Figura 1. Deformación de un elemento de fluido newtoniano



Donde:

dl = distancia recorrida por la placa

dy = distancia entre placas

du = velocidad de la placa

d α = ángulo de deformación de la película

dt = intervalo de tiempo

Entonces: dl = du x dt, (S = v * t)

dl = dy * d α (para ángulos pequeños; tg α = d α)

igualando para dl tenemos: du * dt = dy * d α

despejando se obtiene $\frac{d\alpha}{dt} = \frac{du}{dy}$ (rapidez de deformación)

el esfuerzo cortante $\tau = \mu \frac{du}{dy}$

El esfuerzo cortante τ es proporcional a la rapidez de deformación para fluidos newtonianos. La constante de proporcionalidad es la viscosidad absoluta (μ)

entonces $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ (1)

Donde:

μ = Viscosidad absoluta

du = Velocidad de la placa

dy = Distancia entre placas o espesor de la película

τ = Esfuerzo cortante

1.2 UNIDADES

Tabla 1. Unidades de viscosidad

μ Viscosidad absoluta	ν Viscosidad cinemática
Centipoise	Centistokes
$\text{Dina} \cdot \text{sg} \cdot 10^{-2} / \text{cm}^2$	$\text{Cm}^2 \cdot 10^{-2} / \text{sg}$

Teniendo en cuenta que la viscosidad cinemática es la relación de la viscosidad absoluta sobre la densidad de fluido. $\nu = \mu/\rho$

Cabe anotar que para efectos industriales en los distintos procesos, la viscosidad es afectada por la temperatura.

Con el objeto de dar un aspecto más concreto y real al concepto de viscosidad presentamos una escala de valores de viscosidad para distintos fluidos a una temperatura igual a 25 °C.

Tabla 2. Valores de viscosidad

NOMBRE DEL FLUIDO	VISCOSIDAD CENTIPOISES
Miel	1500
SAE 50	800
Glicerina	500
SAE 30	300
Aceite de Oliva	100
SAE 10 (ligero)	70
SAE 5	32
Etilenglicol	20
Mercurio	1,5
Trementina	1,45
Agua	1
Ictano	0,54
Aire°	0,018

2. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO PREVIO DEL EQUIPO

El desempeño de este equipo era deficiente, debido a dificultades que reducían la posibilidad de obtener resultados confiables relacionados con su maniobrabilidad y funcionalidad, a causa de que su configuración, volumen y peso eran inapropiados.

En las figuras 2 y 3 se ofrece una presentación del estado previo del equipo y su sistema de apoyo.

Figura 2. Imagen del viscosímetro previo

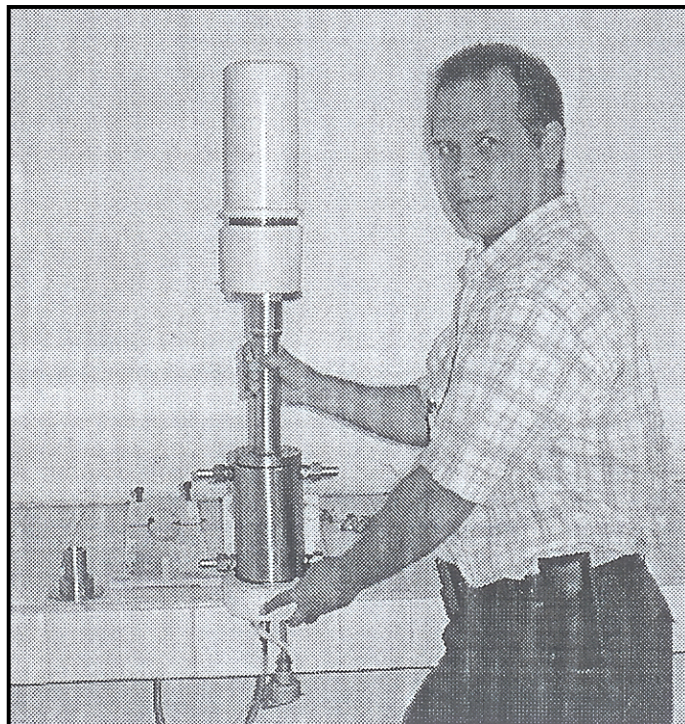


Figura 3. Viscosímetro previo y su sistema de apoyo

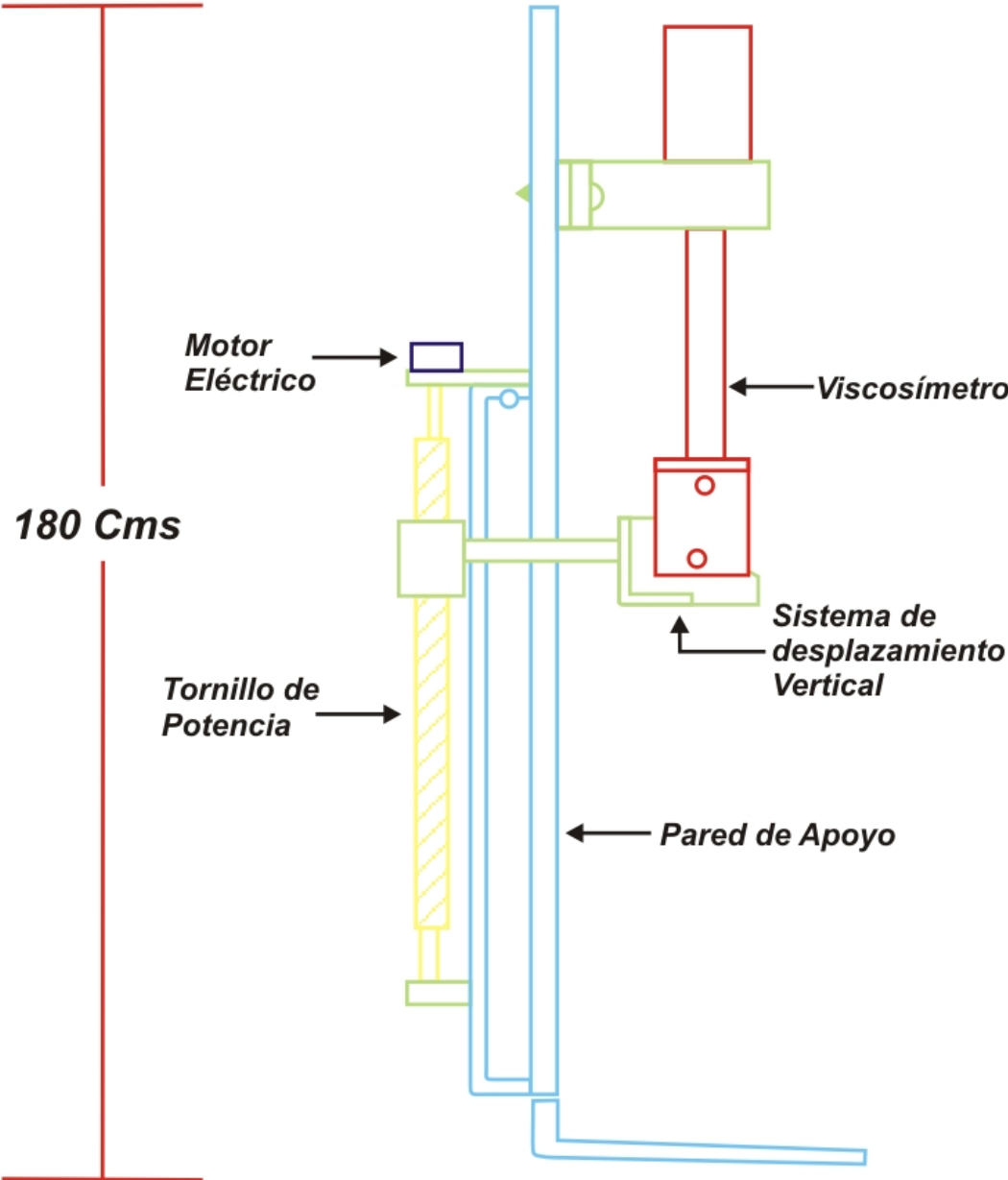


Tabla 3. Configuración previa del equipo

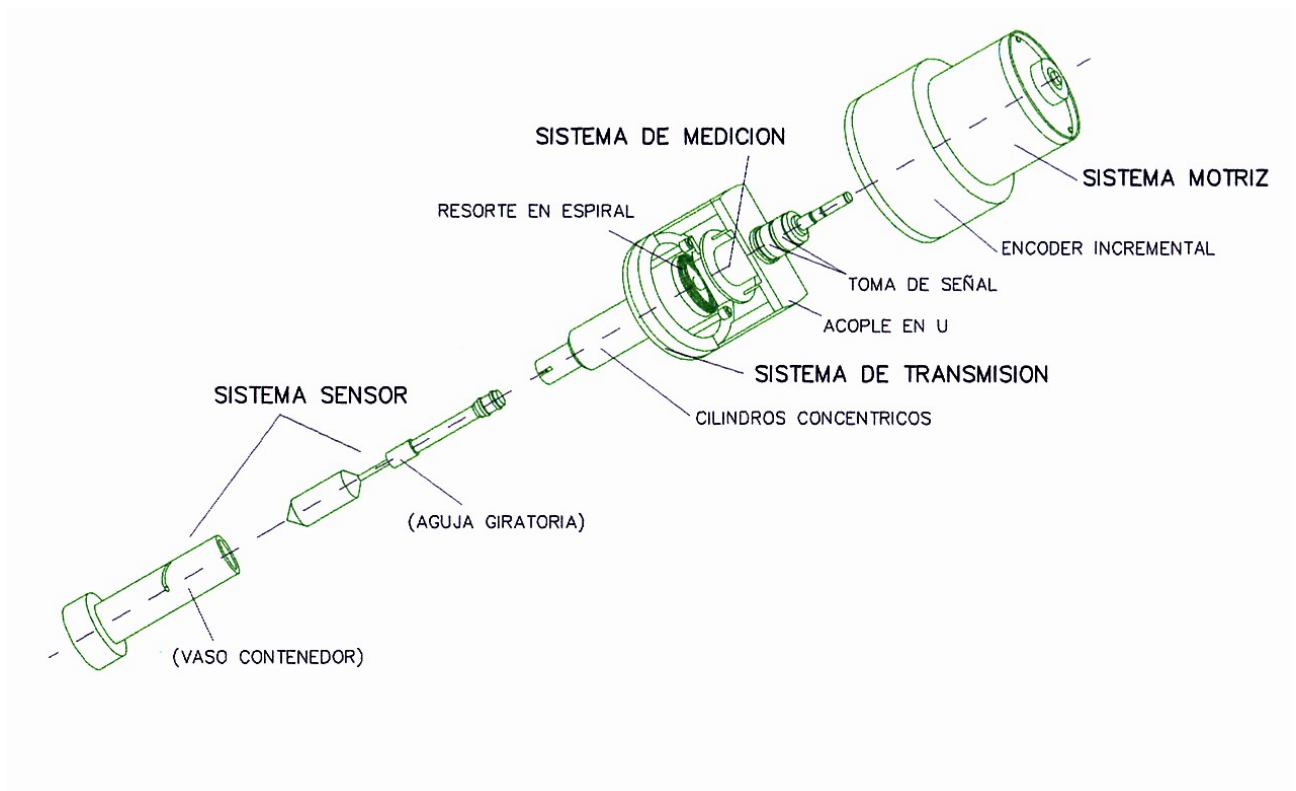
ASPECTOS	PRESENTACIÓN
<ul style="list-style-type: none">• Sistema de manejo• Sistema de apoyo• Sistema de desplazamiento vertical.	<ul style="list-style-type: none">• Incomodo• Pared• Tornillo de potencia accionado por motor eléctrico.

3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL VISCOSÍMETRO ROTATIVO AUTOMATIZADO V.R.A

Este equipo consta de cuatro sistemas para su funcionamiento en la toma de datos de laboratorio. Estos cuatro sistemas son:

- Sistema sensor
- Sistema de transmisión
- Sistema de medición de torque
- Sistema Motriz

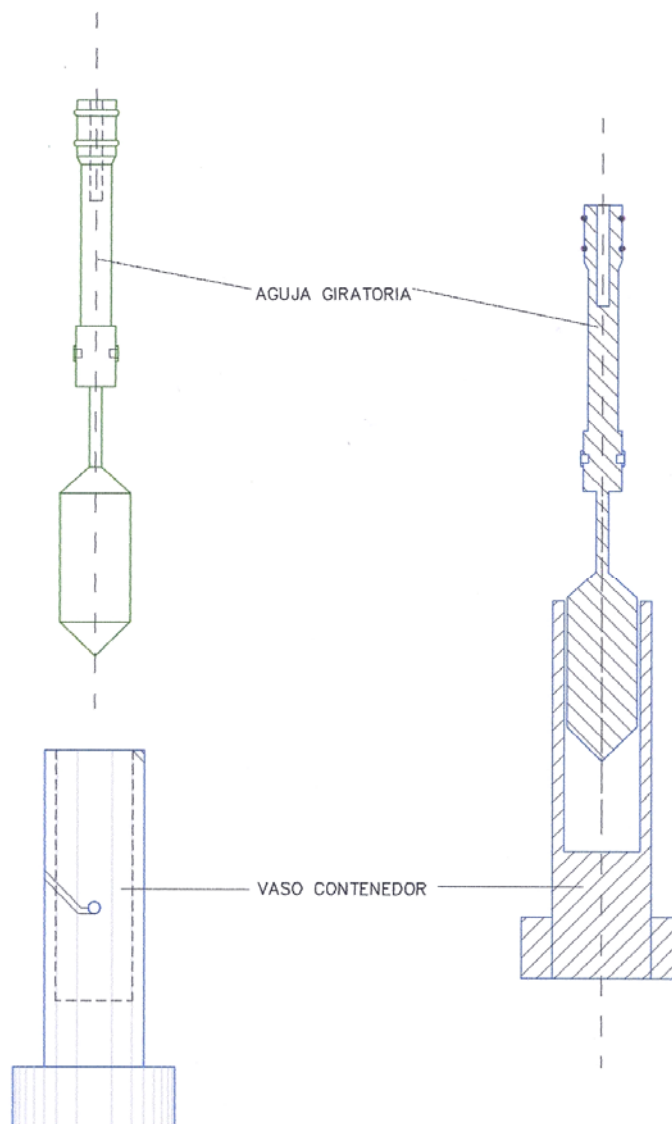
Figura 4. Configuración de los cuatro sistemas de funcionamiento



3.1 SISTEMA SENSOR

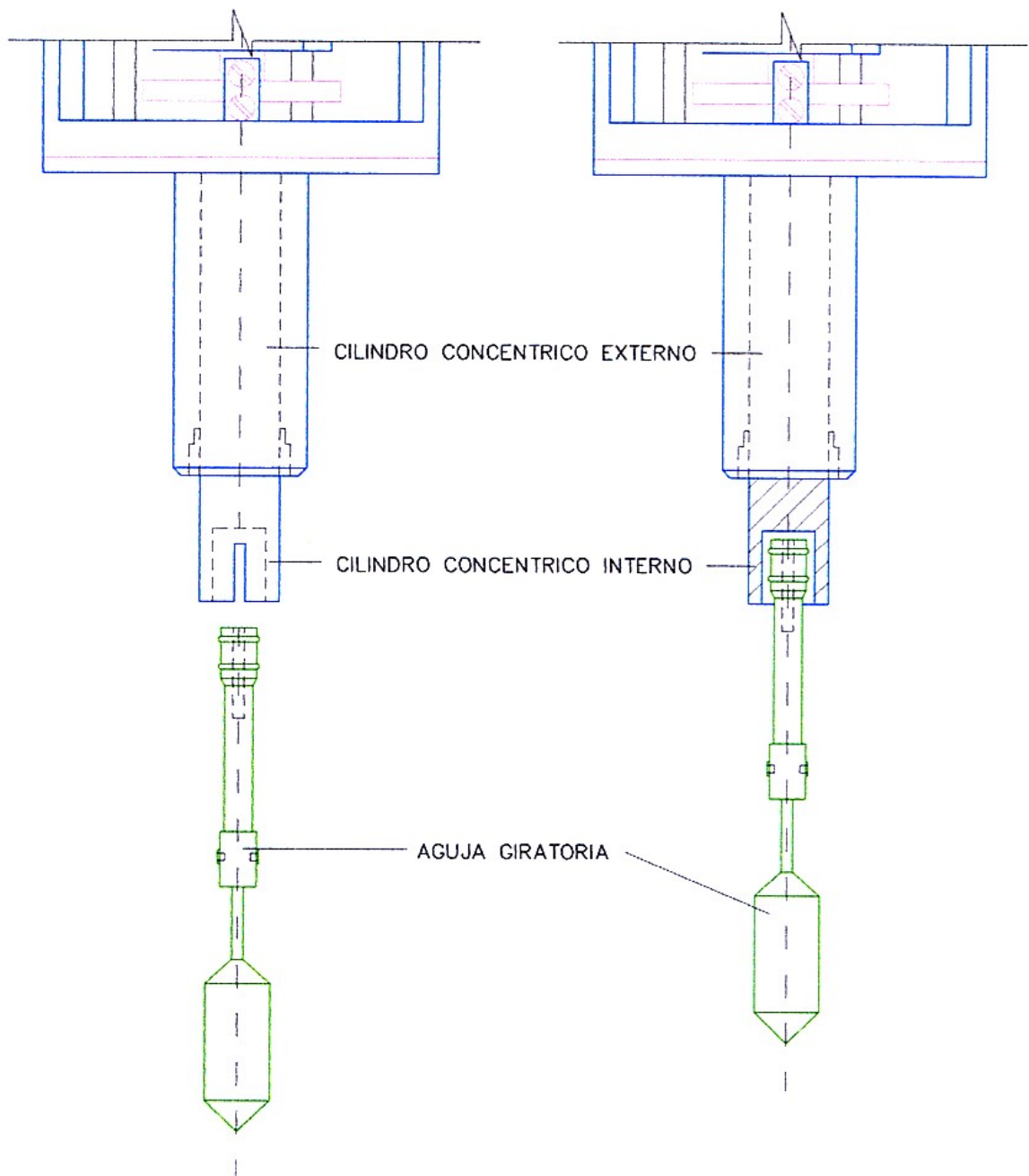
Este sistema consta de una aguja giratoria y un vaso contenedor fijo. Inicialmente se vierte una pequeña cantidad de aceite en el vaso contenedor fijo y luego se introduce la aguja giratoria en el vaso contenedor, quedando sumergida en el aceite, haciendo contacto directo con este. Ver figura 5.

Figura 5. Sistema sensor



Por el extremo superior la aguja se encuentra acoplada a uno de los dos cilindros concéntricos rotativos, mas exactamente al cilindro concéntrico interno que forma parte del sistema de transmisión. Ver figura 6.

Figura 6. Acople aguja giratoria – cilindro concéntrico interno



El sistema de transmisión que se encuentra acoplado con la aguja, le entrega a ésta, un movimiento angular para que gire dentro del aceite y reciba una resistencia viscosa a su movimiento, generada por el aceite, devolviéndole a manera de reacción o respuesta, al sistema de transmisión, un torque en sentido contrario al giro, proporcional a la viscosidad del aceite, que va a ser recibido o absorbido por el acople elástico o resorte en espiral, haciendo que éste se deforme un ángulo alfa. (α)

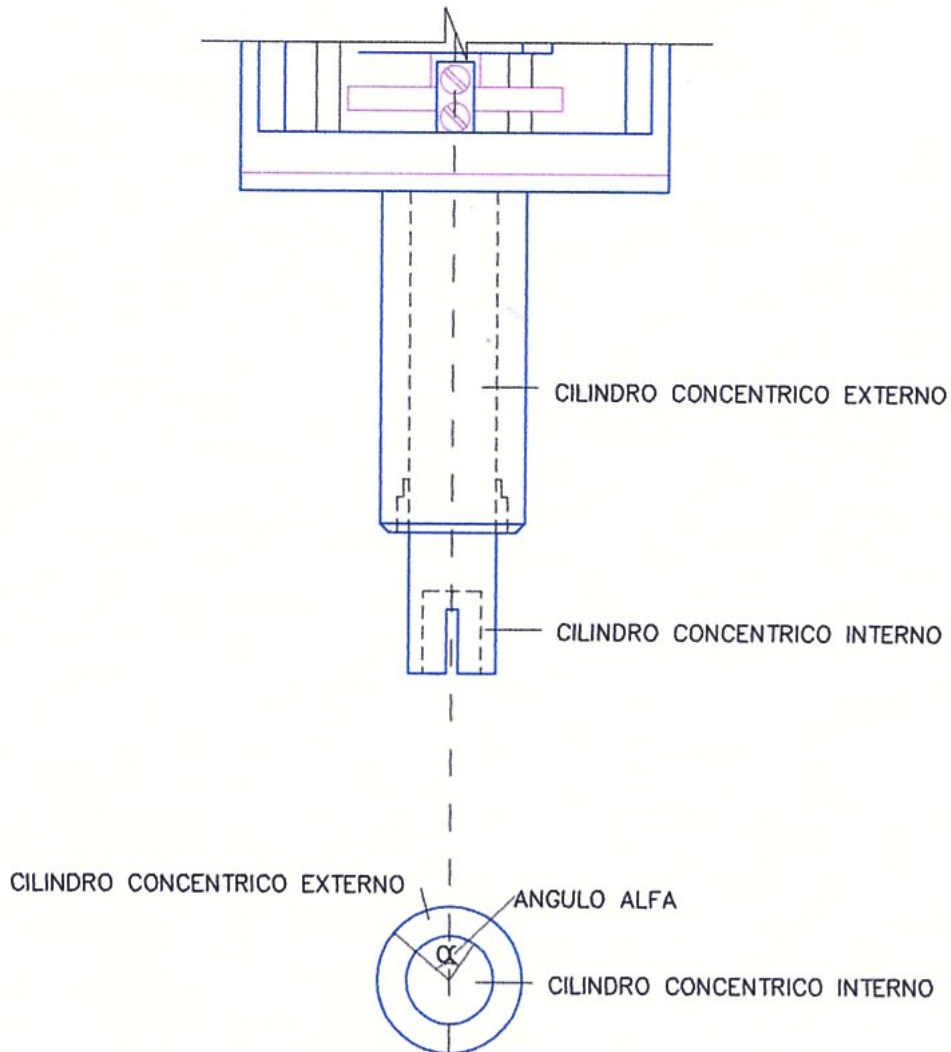
Aquí es cuando la señal mecánica de torque es recibida por el sistema de transmisión.

En el siguiente numeral se explica detalladamente lo que sucede.

3.2 SISTEMA DE TRANSMISIÓN

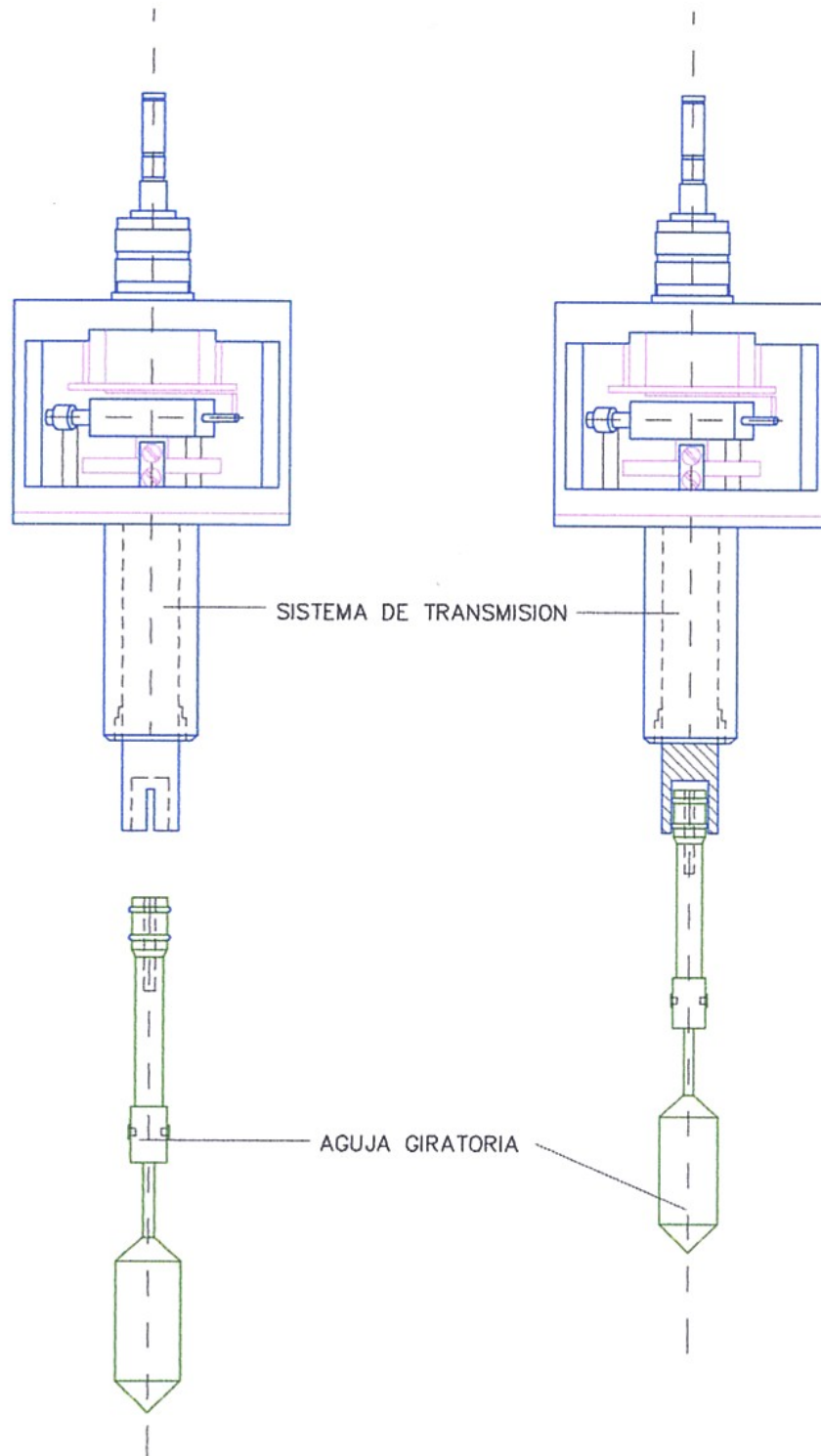
Este sistema de transmisión está conformado principalmente por un par de cilindros concéntricos rotativos, interconectados a través de un acople elástico o resorte en espiral, que les permite un movimiento de giro relativo en sentido contrario formándose entre ellos dos, un ángulo alfa (α) de desfase, como se observa en la figura 7.

Figura 7. Formación del ángulo α entre los dos cilindros concéntricos.



El cilindro concéntrico externo en su extremo libre se encuentra unido rígidamente a un eje que también forma parte de este sistema a través de un acople en forma de U o de campana para darle espacio al resorte en espiral; y por otra parte, el cilindro concéntrico interno en su extremo libre, se encuentra acoplado a la aguja giratoria para recibir el torque generado por la resistencia al movimiento, que presenta la viscosidad del aceite. Ver figura 8

Figura 8. Acople del sistema de transmisión, con la aguja giratoria.



Cuando el motor, que se encuentra conectado al eje del sistema de transmisión, se enciende o inicia su movimiento, la aguja comienza a girar y al mismo tiempo recibe una resistencia a su movimiento de rotación generada por la viscosidad del aceite.

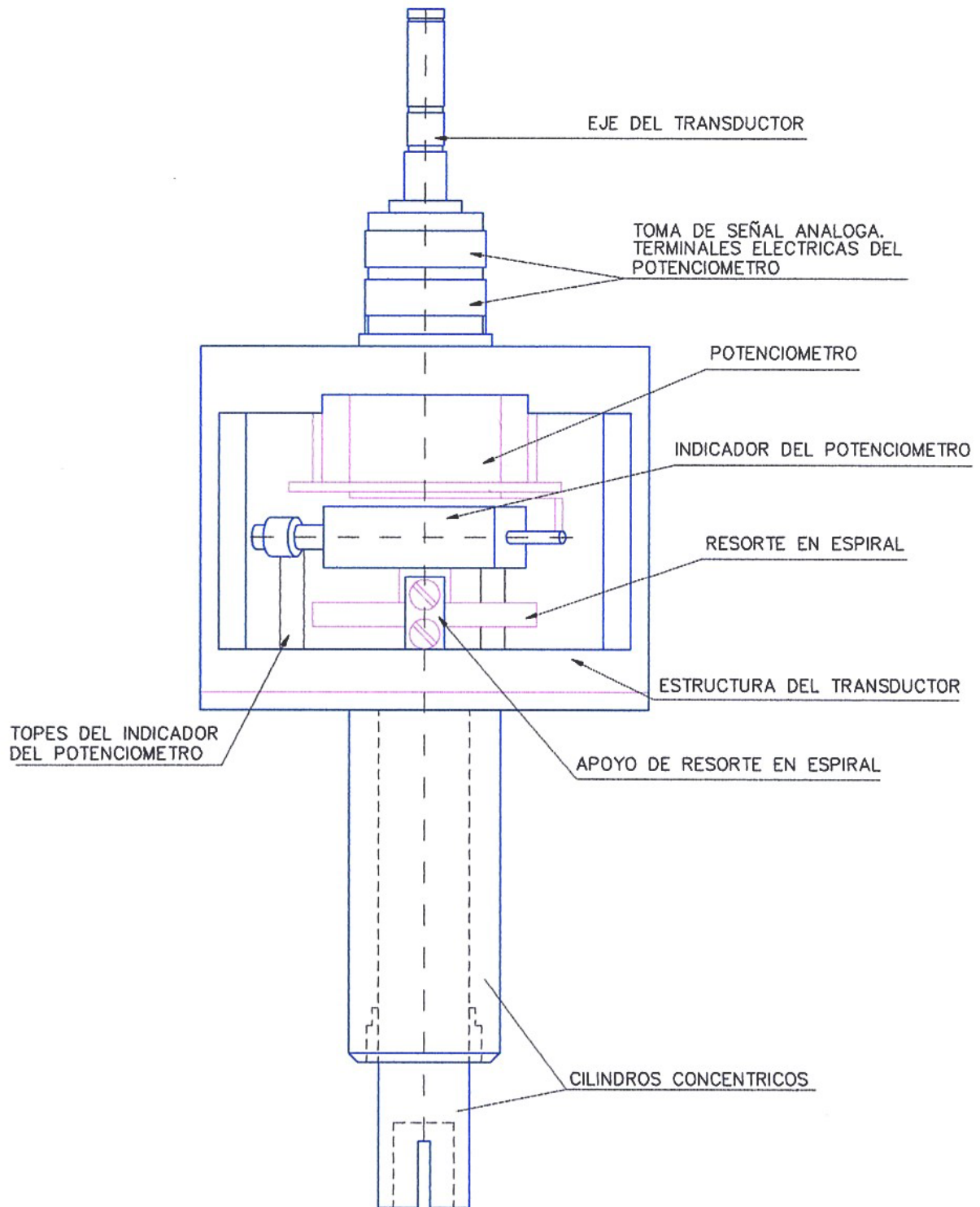
Esta resistencia viscosa se convierte en un torque en sentido contrario al movimiento, transmitido al cilindro concéntrico interno haciendo que este se regrese un ángulo α permitido por el acople elástico o resorte en espiral que interconecta a los dos cilindros concéntricos.

3.3 SISTEMA DE MEDICIÓN DE TORQUE

Este sistema se encuentra conformado por un potenciómetro, un seguidor o indicador del potenciómetro, dos terminales eléctricas en forma de pistas circulares y dos platinas tipo escobilla para la toma de la señal análoga.

El seguidor del potenciómetro se encuentra conectado fijamente al extremo superior del cilindro concéntrico interno, ligeramente por encima del resorte en espiral, por dentro del acople en forma de U o de campana, para recibir el ángulo α de rotación y transmitirlo al potenciómetro, que es un tipo de resistencia variable, para definir la señal análoga proporcional al torque generado por la viscosidad del aceite. Ver figura 9.

Figura 9. Sistema de medición de torque.



Esta señal análoga es enviada a las dos terminales eléctricas en forma de pistas circulares, montadas en el eje del sistema de transmisión, tipo abrazaderas, separadas una pequeña distancia que su vez se encuentran en contacto con dos platinas tipo escobilla, para transmitirla y convertirla en señal digital y ser enviada al display a través del microcontrolador para que finalmente sea leída como un valor numérico de torque en dinas – centímetros (dn – cn).

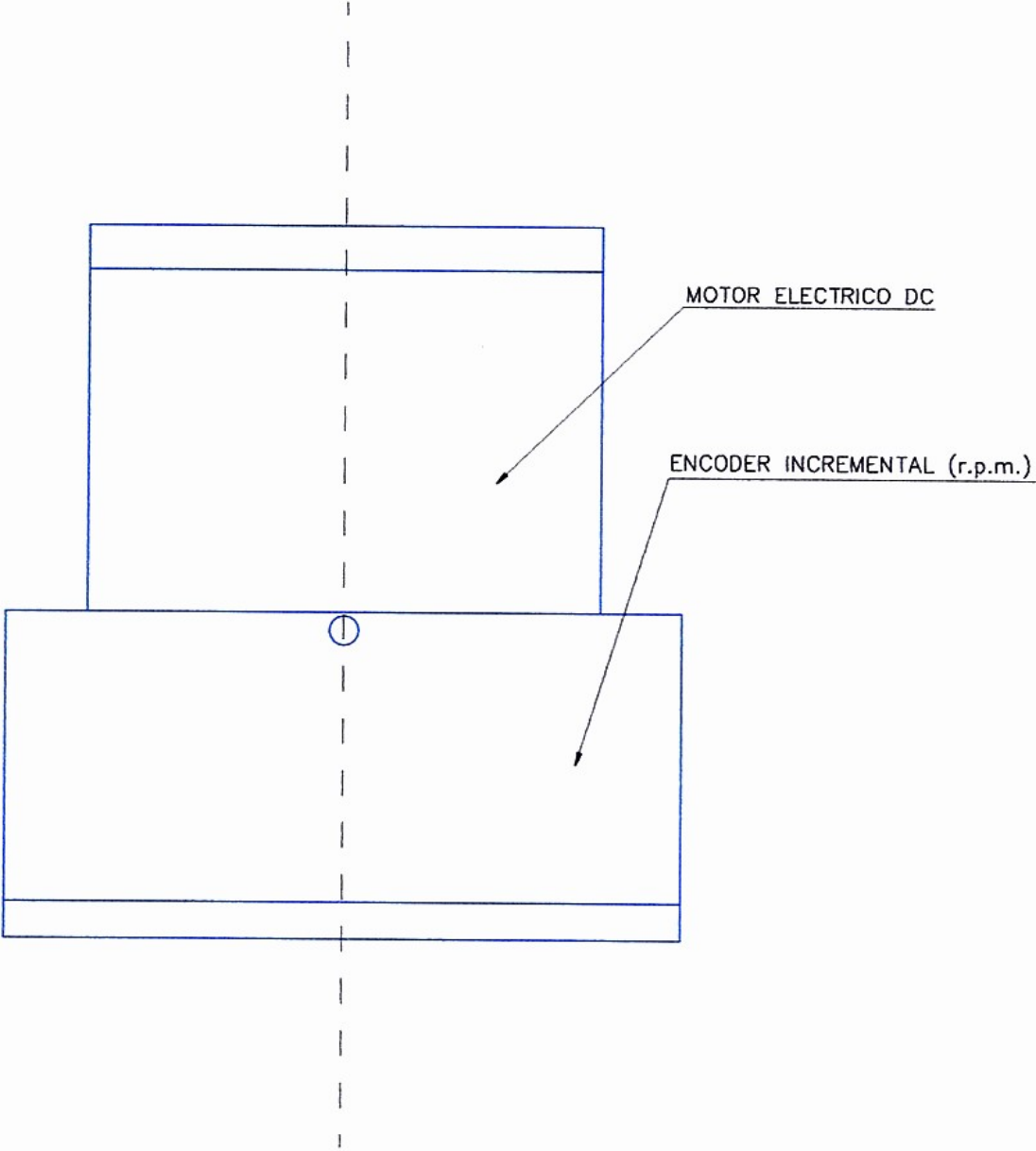
3.5 SISTEMA MOTRIZ

Este sistema cuenta con un motor eléctrico de 3 amperios alimentado con 20 voltios de corriente continua para una potencia equivalente de 1/12 de HP y un variador electrónico de velocidad por ancho de pulso tipo P.W.M.

Este motor está conectado al eje del sistema de transmisión a través de un acople rígido directo, haciéndolo girar las diferentes velocidades angulares requeridas en las pruebas de laboratorio.

También cuenta con un Encoder incremental para medir las diferentes velocidades angulares (ω) presentadas en las pruebas de laboratorio y ser mostradas numéricamente en el display en r. p. m Ver figura 10.

Figura 10. Motor eléctrico



4. CONFIGURACION ACTUAL DEL VISCOSIMETRO ROTATIVO AUTOMATIZADO

Para mejorar el funcionamiento y operación del equipo se innovaron los siguientes aspectos.

- Se hizo un rediseño desde el punto de vista mecánico para mejorar su maniobrabilidad, configuración y obtener una disminución apreciable de su volumen y peso. Ver figuras 11 y 12.

Figura 11. Presentación esquemática del Viscosímetro rotativo Automatizado V. R. A

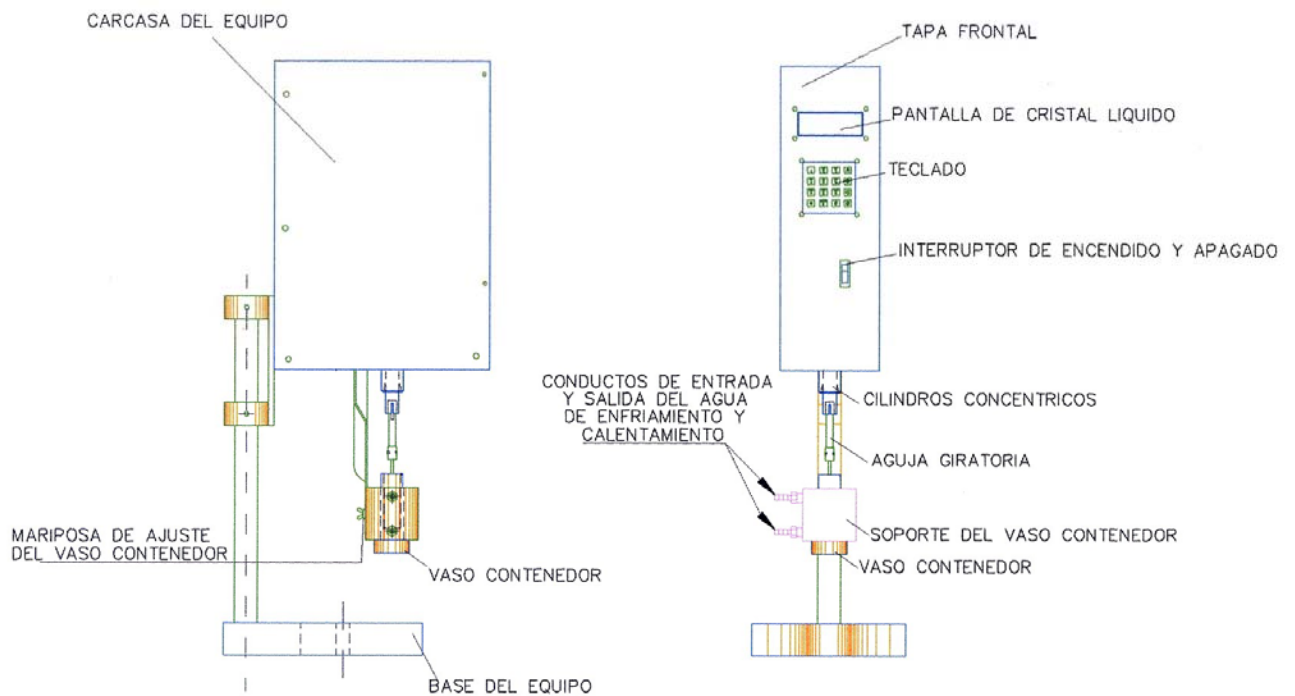
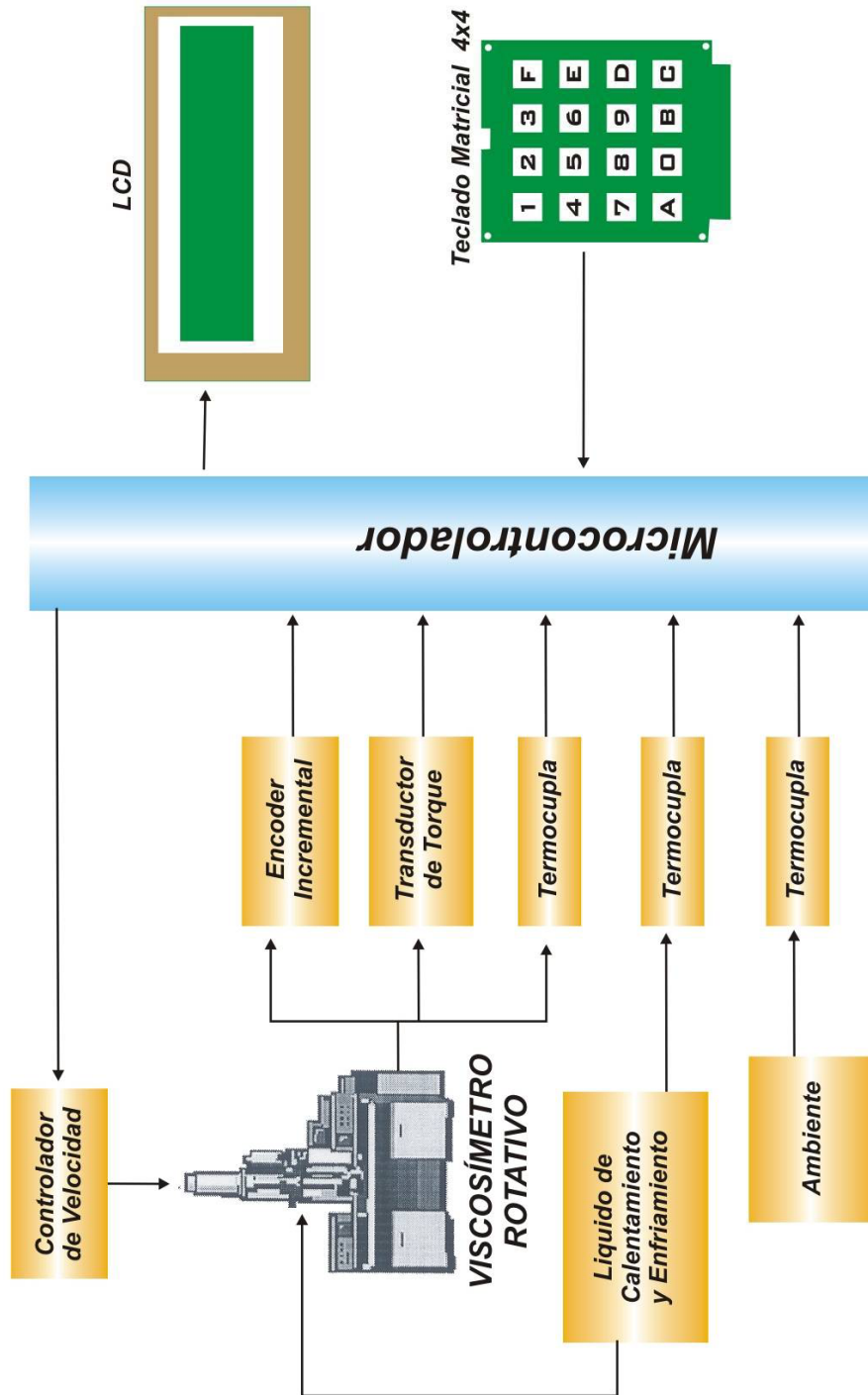


Figura 12. Fotografía del equipo



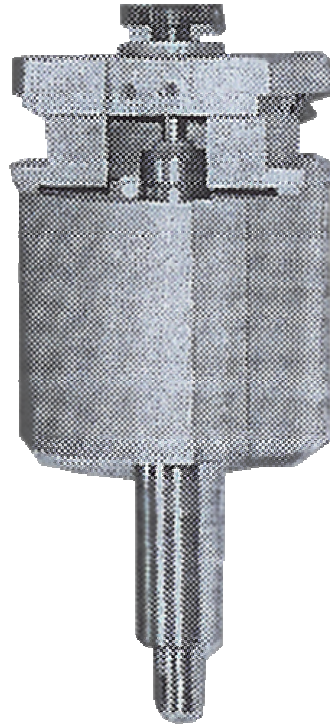
- Se incorporó un sistema electrónico para el control, visualización y adquisición de datos, para que durante la realización de las pruebas brinde información de los siguientes parámetros:
 - ✓ Torque (T): En Dinás – Centímetros (Dn – cm).
 - ✓ Velocidad angular (ω): en revoluciones por minuto r. p. m
 - ✓ Temperaturas: del fluido en análisis y del liquido de enfriamiento y calentamiento en °C (Grados centígrados). Ver figura 13.

Figura 13. Esquema electrónico del V.R.A.



- Se diseñó e instaló un software para que el viscosímetro sea manejado desde el computador.
- Se calibró el equipo con un fluido de viscosidad ya conocida con un valor $\mu = 98.3 \text{ Cp}$.
- Dentro del diseño mecánico se tomó como única pieza para el proyecto el transductor de torque, rediseñando el resorte en espiral, que sirve para transmitir el torque generado por la viscosidad del aceite, ver figura 14.

Figura 14. Fotografía del transductor de torque



5. DESCRIPCIÓN MECÁNICA DEL EQUIPO

Como el Viscosímetro Rotativo Automatizado dispone de un sistema mecánico no muy complejo se puede obtener una buena comprensión y entendimiento de sus partes y sus funciones respectivas de una manera sencilla.

5.1 BASE DEL EQUIPO

Esta base permite colocar el viscosímetro verticalmente brindándole libertad y comodidad para su funcionamiento, con la ventaja que se puede ubicar en cualquier banco de trabajo, que tenga una buena nivelación. Ver figuras 15 y 16.

Figura 15. Base del equipo

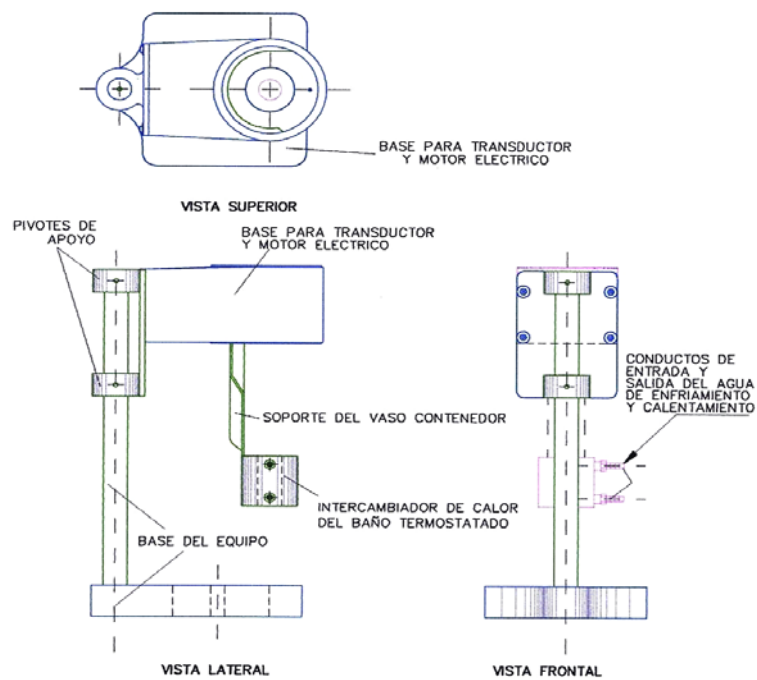
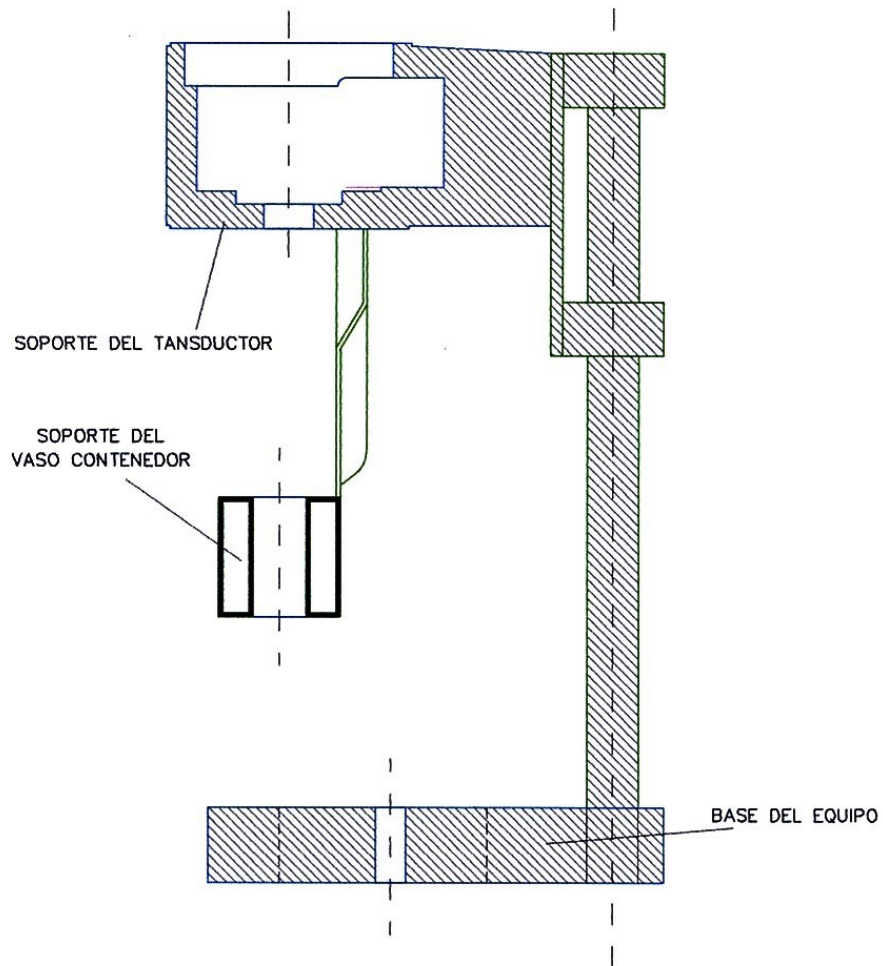


Figura 16. Vista en corte de la base del equipo



Esta base se encuentra conformada por el pie de base, soporte para los cuatro sistemas que configuran el equipo que son: sistema sensor, sistema de transmisión, sistema de medición de torque y el sistema motriz, como se puede ver en la figura 17.

Figura 17. Fotografía de la base de equipo



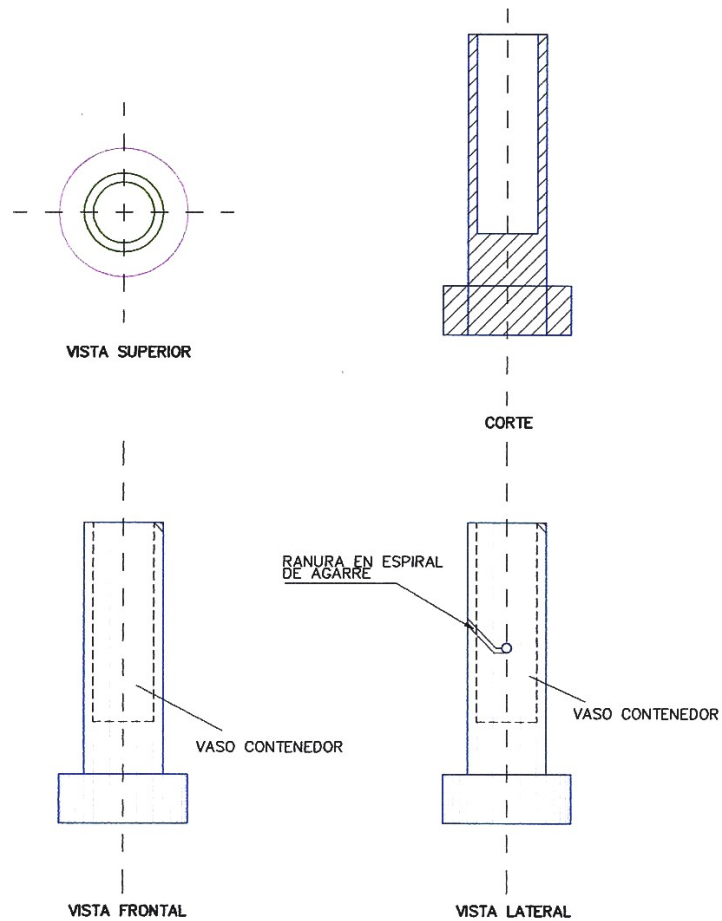
Este conjunto está ensamblado a través de bujes fijos con prisioneros de ajuste y tornillos de tal manera que permita ser desarmado. El pie de la base fue construido en hierro cold rolled con un recubrimiento en cromo (cromado) para evitar la oxidación.

5.2 VASO CONTENEDOR

Este vaso es de forma cilíndrica, fabricado en acero inoxidable con proceso de manufactura de torno cilindrado interna y externamente, mientras que en la parte inferior se le colocó una base cilíndrica de agarre hecha en teflón para proteger al usuario de las altas temperaturas por calentamiento.

Su función es contener el aceite de interés, al cual se le va a medir la viscosidad y también es ocupado por la aguja, a la que se refiere seguidamente. (Ver figura 18)

Figura 18. Vaso contenedor



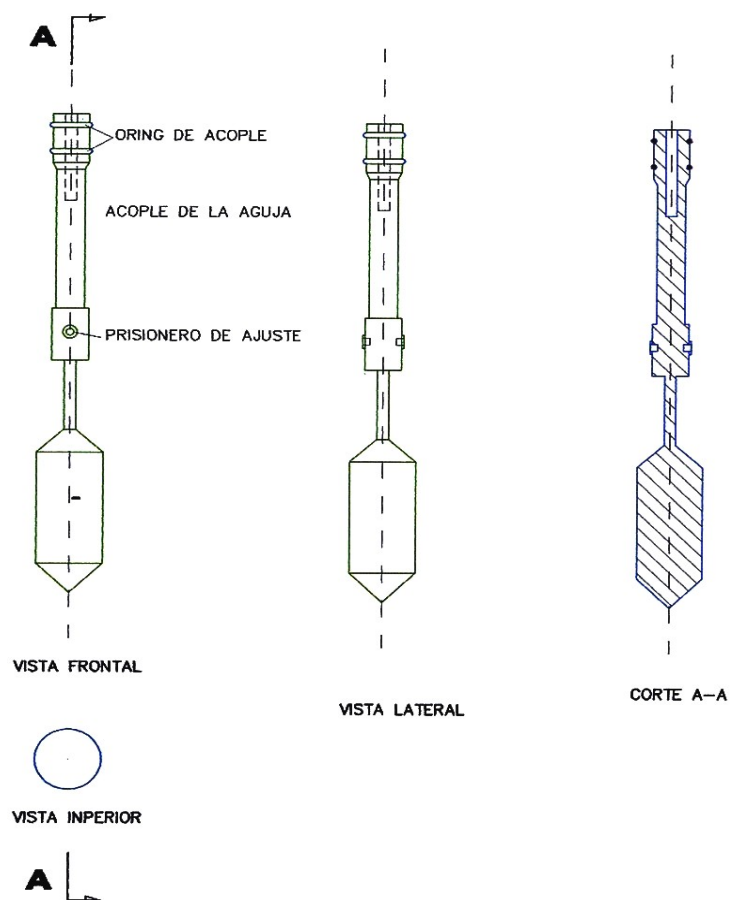
En la superficie exterior se realizó una ranura en espiral para que sirva de agarre con la mariposa de ajuste que lleva el soporte para este vaso.

5.3 AGUJA

La aguja es el elemento que se encuentra en contacto directo con el aceite en interés durante el proceso de medición de la viscosidad y está sujeta a

uno de los cilindros concéntricos, más exactamente al cilindro interno, a través de un acople rígido, anclado a la aguja por prisioneros de ajuste y empotrado al cilindro interno por presión mediante dos empaques de caucho circulares, en forma de toroide llamado o'ring. (Ver fig. 19)

Figura 19. Aguja giratoria



Este elemento de forma cilíndrica macizo fue fabricado en acero inoxidable, con proceso de manufactura de torno. Su volumen y peso fueron preseleccionados de tal manera que se ajuste a los requerimientos.

La función de la aguja en rotación es la de recibir la fricción del aceite por efecto de la viscosidad, convertirla en torque y transmitirla al transductor.

En cuanto al acople, también es en acero inoxidable, de forma cilíndrica y con proceso de manufactura de torno. En un extremo lleva una cavidad cilíndrica con prisioneros de ajuste para acoplar la aguja y en el otro extremo un par de O'ring para ajustarlo al eje cilíndrico interno del transductor.

5.4 TRANSDUCTOR DE TORQUE

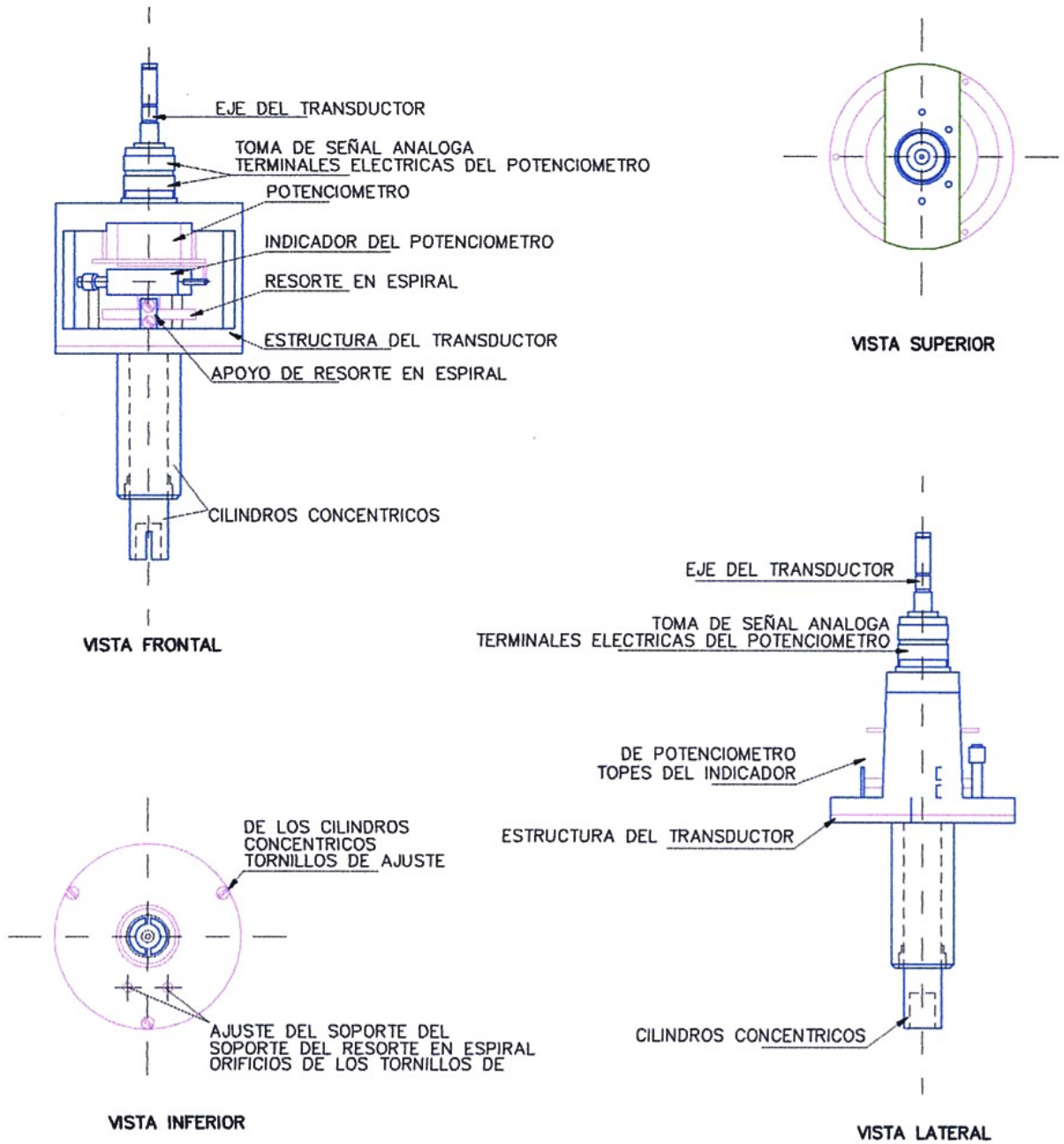
Este elemento fue tomado del viscosímetro previo y es un poco más complejo que los demás; sin él no se puede realizar prueba alguna de laboratorio.

Está compuesto de nueve (9) elementos, que son:

- a. Par de cilindros concéntricos.
- b. Resorte en espiral.
- c. Platina de ajuste del resorte en espiral a la estructura.
- d. Seguidor del potenciómetro.
- e. Potenciómetro.
- f. Topes del seguidor del potenciómetro.
- g. Terminales eléctricas del potenciómetro. Toma de señal análoga.
- h. Estructura del transductor.
- i. Eje del transductor.

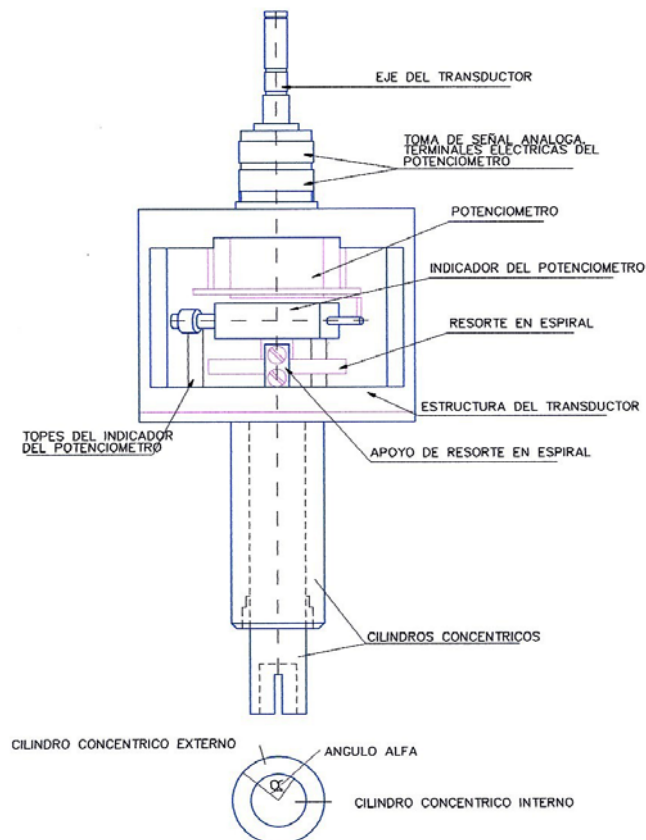
(Ver figura 20)

Figura 20. Transductor de torque



Es importante resaltar que el extremo interno del resorte en espiral está acoplado al cilindro concéntrico interno junto con el seguidor del potenciómetro, mientras que el extremo externo está acoplado al cilindro concéntrico externo, permitiendo así un pequeño movimiento relativo entre los dos cilindros concéntricos, formando entre ellos un ángulo α para definir la señal análoga a través del potenciómetro (resistencia variable). Ver figura 21.

Figura 21. Formación de la señal análoga



A continuación se describe cada una de sus partes:

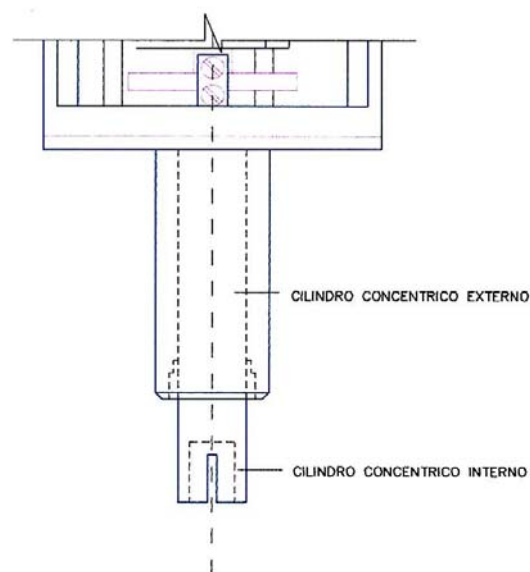
5.4.1. Par de cilindros concéntricos. Como su nombre lo indica son dos cilindros, uno dentro de otro, fabricados en acero inoxidable con proceso de

manufactura de torno, montados con libertad de giro a través de dos rodamientos de tal manera que ofrecen un movimiento relativo de rotación de uno respecto al otro.

Los rodamientos se encuentran ubicados de la siguiente manera: uno en el extremo superior que ofrece resistencia a cargas axiales y radiales, permitiendo que el cilindro concéntrico interno se apoye sobre el cilindro concéntrico externo y no exista desplazamiento axial alguno entre los dos. El segundo rodamiento recibe cargas radiales y va ubicado en una parte intermedia de tal forma que los dos cilindros concéntricos presenten linealidad y ajuste.

El cilindro concéntrico externo está montado directamente a la estructura del transductor de manera rígida y el cilindro concéntrico interno como tiene libertad de rotación dentro del externo, se une a la estructura a través del resorte en espiral transmitiendo así el torque generado por la aguja al potenciómetro. (Ver fig. 22)

Figura 22. Cilindros concéntricos



5.4.2 Resorte en espiral. Este resorte, como su nombre lo indica, tiene forma en espiral y es fabricado en cobre calibre 0.4.

El resorte fue cambiado y rediseñado mediante prueba y error y con ayuda de una tabla que posee el fabricante para los diferentes requerimientos que se presentan en su labor. El objeto de este rediseño fue buscar un resorte con mayor sensibilidad, tal que permitiera realizar la prueba de laboratorio deseada con la nueva inercia del equipo, mucho menor que la del anterior, obtenida del rediseño mecánico del equipo. (Ver fig. 23)

Figura 23. Resorte en espiral



El resorte tiene como función principal resistir fuerzas de torsión y transmitir al potenciómetro el torque proveniente de la aguja y el cilindro concéntrico interno, además de accionar el seguidor del potenciómetro haciéndolo regresar a su posición inicial, estado de reposo, para poder dar inicio a otra medición.

El extremo externo está conectado a la platina de ajuste, que está sujeta a la estructura y también permite calibrar la tensión del resorte en espiral y graduar la posición cero (0) del seguidor del potenciómetro.

5.4.3 Platina de ajuste del resorte en espiral. Esta platina tiene forma de ele (L), fabricada en bronce, y está sujeta por tornillos de ajuste de un lado a la estructura del transductor y del otro lado dispone de dos tornillos de apriete, soportando una platina que brinda agarre y graduación al resorte en espiral. (Ver fig. 24)

5.4.4 Seguidor del potenciómetro. Es una pieza en forma de prisma rectangular, fabricada en bronce y conectada horizontalmente al cilindro concéntrico interno formando una T. Por un extremo horizontal hace contacto con los topes desde el punto inicial, llamado “cero”, hasta el punto extremo final llamado “span”, permitiendo así al cilindro concéntrico interno girar un ángulo de rotación comprendido entre 0° y 300° , de tal manera que brinde un ángulo suficiente para que dé la información del torque deseado, transmitido a través de la aguja y el cilindro concéntrico interior. Y por el otro extremo está conectado a una palanquilla unida al potenciómetro lineal que hace variar la posición de lectura, haciendo que el torque sea convertido en una señal análoga eléctrica de voltaje. (Ver fig. 24)

5.4.5 Potenciómetro. Es un dispositivo de resistencia variable que permite convertir un efecto mecánico de torsión en una señal eléctrica análoga. El valor de la resistencia de este dispositivo es de 200 ohmios. Lleva un elemento adicional montado sobre el eje del transductor que consiste en dos terminales en forma de pistas circulares, llamadas “terminales eléctricas” para tomar la señal eléctrica análoga a través de dos platinas tipo escobilla que finalmente conducen la señal al microcontrolador, y ser presentada luego en el display en valores de torque con unidades de Dina-cm previamente calibrada.

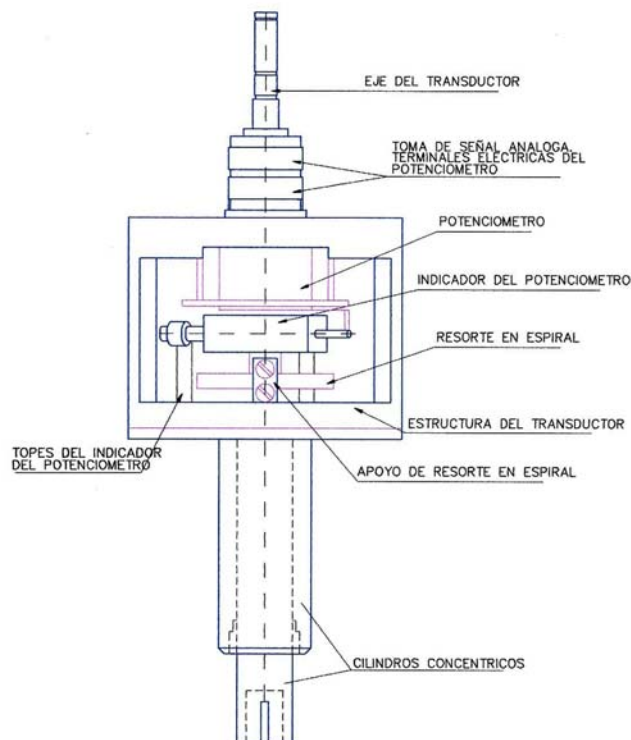
Este potenciómetro va montado rígidamente a la estructura del transductor de tal manera que le permite girar conjuntamente con éste. (Ver fig. 24)

5.4.6 Topes del seguidor del potenciómetro. Son dos pines sobresalientes alargados de forma de cilíndrica, anclados a la estructura del transductor y cubiertos en caucho en su extremo superior para amortiguar la llegada del seguidor del potenciómetro y así suavizar su contacto y evitar desajustes del resorte en espiral y otros elementos. (Ver fig. 24)

5.4.7 Eje del transductor. Es el encargado de recibir la potencia de salida del motor y transmitirla al transductor que actúa como un solo elemento. Está acoplado al eje del motor, posterior al Encoder por medio de una chaveta medialuna y un tornillo prisionero. (Ver fig. 24)

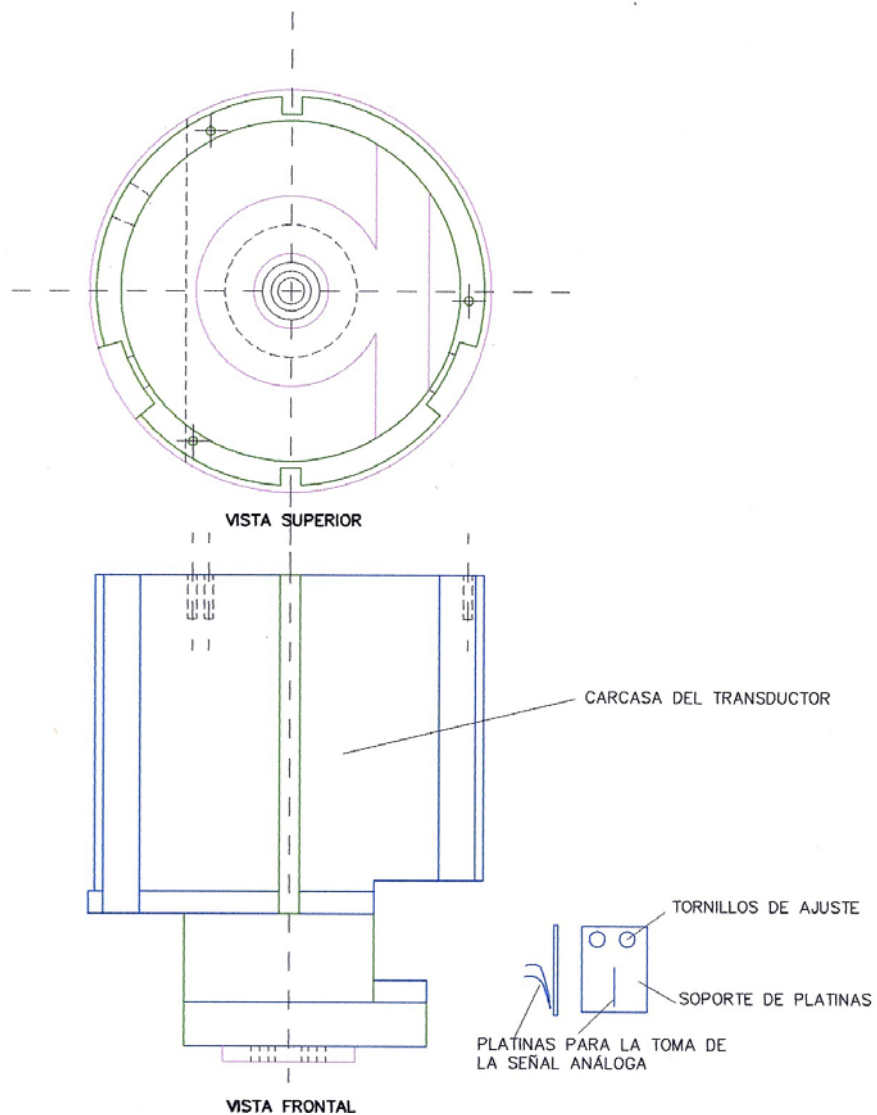
5.4.8 Estructura del transductor. Es la parte que sostiene y contiene todos los elementos del transductor para que presente un solo cuerpo en movimiento. (Ver fig. 24)

Figura 24. Configuración del transductor



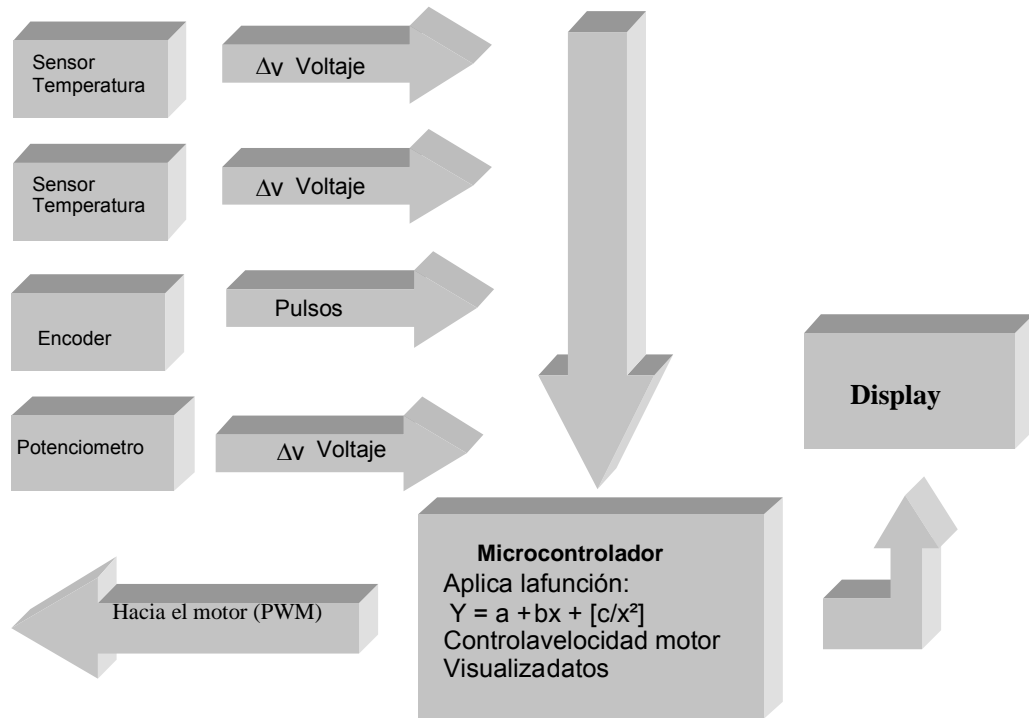
5.4.9 Carcasa o tapa del transductor. Es la encargada de cubrir el transductor para protegerlo de elementos extraños. Está fabricada en aluminio. (Ver figura 25)

Figura 25. Carcasa del transductor



6. DESCRIPCIÓN ELECTRÓNICA DEL EQUIPO

Figura 26. Diagrama de bloques del control electrónico



6.1 EXPLICACIÓN DEL DIAGRAMA DE BLOQUES

6.1.1 Sensores de temperatura. Determinan la temperatura del líquido de enfriamiento y calentamiento al igual que la temperatura del aceite. Tienen una salida de voltaje proporcional a la temperatura, la cual es de $10\text{mV}/^\circ\text{C}$. Este voltaje de salida es digitalizado por medio de un canal de conversión A/D de 10 bits.

6.1.2 Encoder. Es de tipo diferencial, lo que significa que la frecuencia de los pulsos determina la velocidad del motor. El eje del motor cuenta con un

disco ranurado con 18 huecos formando una circunferencia, distanciados 20° uno del otro. Este dispositivo tiene la función de generar un tren de impulsos de frecuencia variable, cuyo periodo le dice al microcontrolador la velocidad del motor en un instante.

6.1.3 PWM hacia el motor (regulador de velocidad). La modulación por ancho de pulso (PWM) determina el ciclo útil de la frecuencia aplicada al motor para su movimiento. Al variar el ciclo útil de la señal, el motor varía la velocidad proporcionalmente. La resolución del ancho de pulso es de 10 bits, lo que significa que pueden existir 1024 valores diferentes.

6.1.4 Display (LCD). La pantalla o display es un dispositivo de cristal líquido que visualiza caracteres por medio de matrices de puntos. Se utiliza para visualizar el torque experimental, la temperatura de los sensores, la velocidad de motor y la velocidad seleccionada para el motor por medio del teclado.

6.1.5 Microcontrolador. El microcontrolador PIC16F873 es un dispositivo programado para diferentes tareas, como son: Generar la modulación por ancho de pulso al motor, recibir los datos desde el teclado para la selección de la velocidad, digitalizar el voltaje de los sensores de temperatura, visualizar datos, aplicar la función de la curva $y = a + bx + c/x^2$, donde $y =$ torque experimental, $x =$ medición del potenciómetro en mv. En términos generales, el microcontrolador convierte toda señal eléctrica análoga en un valor digital que se visualiza en el display (LCD).

6.2 ESQUEMA GENERAL DEL HARDWARE ELECTRÓNICO

El hardware agrupa todos los componentes electrónicos que regulan el funcionamiento eléctrico del equipo para obtener al final un valor de torque experimental en $dn - cm$ de acuerdo al aceite sometido al análisis. Un valor

de la velocidad angular en rpm y el manejo y control del equipo por medio del computador a través del software diseñado exclusivamente para el equipo y desde su propio teclado.

6.2.1 Detección de la medición del potenciómetro. El equipo cuenta con un resorte helicoidal conectado a un potenciómetro que se deforma proporcionalmente a la viscosidad del aceite. Este potenciómetro tiene una resistencia en sus terminales de 33 a 179 ohmios y para la detección electrónica de la medición del potenciómetro se utiliza una fuente de corriente.

En la figura 26 se observan los amplificadores operacionales IC3A, IC3B, cuya función es generar una fuente de corriente de precisión de 1mA al fijar un voltaje exacto de 2.5V en la resistencia de precisión R6 (2.500 ohmios).

Por medio de la Ley de Ohm:

$$I = V / R \text{ entonces } I = 2.5V / 2.500 \text{ ohmios} = 1mA \quad (6.1)$$

Esta corriente de precisión se lleva al potenciómetro por medio del conector llamado potenciómetro, generando un voltaje que es proporcional a la medición del mismo. Teniendo en cuenta la resistencia del potenciómetro el voltaje que entrega es:

Para el mínimo valor de 33 ohmios:

$$V = I \times R = 1mA \times 33 \text{ ohmios} = 33mV \quad (6.2)$$

Para el máximo valor de 179 ohmios:

$$V = I \times R = 1mA \times 179 \text{ ohmios} = 179mV \quad (6.3)$$

El amplificador operacional IC4B amplifica el voltaje de salida del potenciómetro por un factor de:

$$\text{Amplificación} = \{(R10 + R11 / R11)\} = \{(32.2\text{kOhm} + 1.4\text{kOhm} / 1.4\text{kOhm}\} = 24$$

(6.5)

Los voltajes obtenidos con las ecuaciones (6.2) y (6.3) no entran directamente al conversor A/D del microcontrolador, pues antes son amplificados por un factor de 24 según la ecuación (6.5). Los valores límite de voltaje de salida del potenciómetro que entran al conversor A/D (microcontrolador) son:

$$\text{VentA/D} = \text{Vsal-potenc} * \text{Amplificación} \quad (6.6)$$

$$\text{VentA/D} = 33\text{mV} * 24 = 792\text{mV} \quad (6.7)$$

$$\text{VentA/D} = 179\text{mV} * 24 = 4.29\text{V} \quad (6.8)$$

Las ecuaciones (6.7) y (6.8) muestran los valores superior e inferior del voltaje de entrada al conversor análogo digital del microcontrolador. La digitalización de ese voltaje produce un valor hexadecimal, el cual utiliza el microcontrolador para obtener el torque experimental. Para conocer dichos valores se utiliza la ecuación (6.9):

$$\text{Valor-hex} = \text{Voltaje-analizado} / \text{Valor-muestra} \quad (6.9)$$

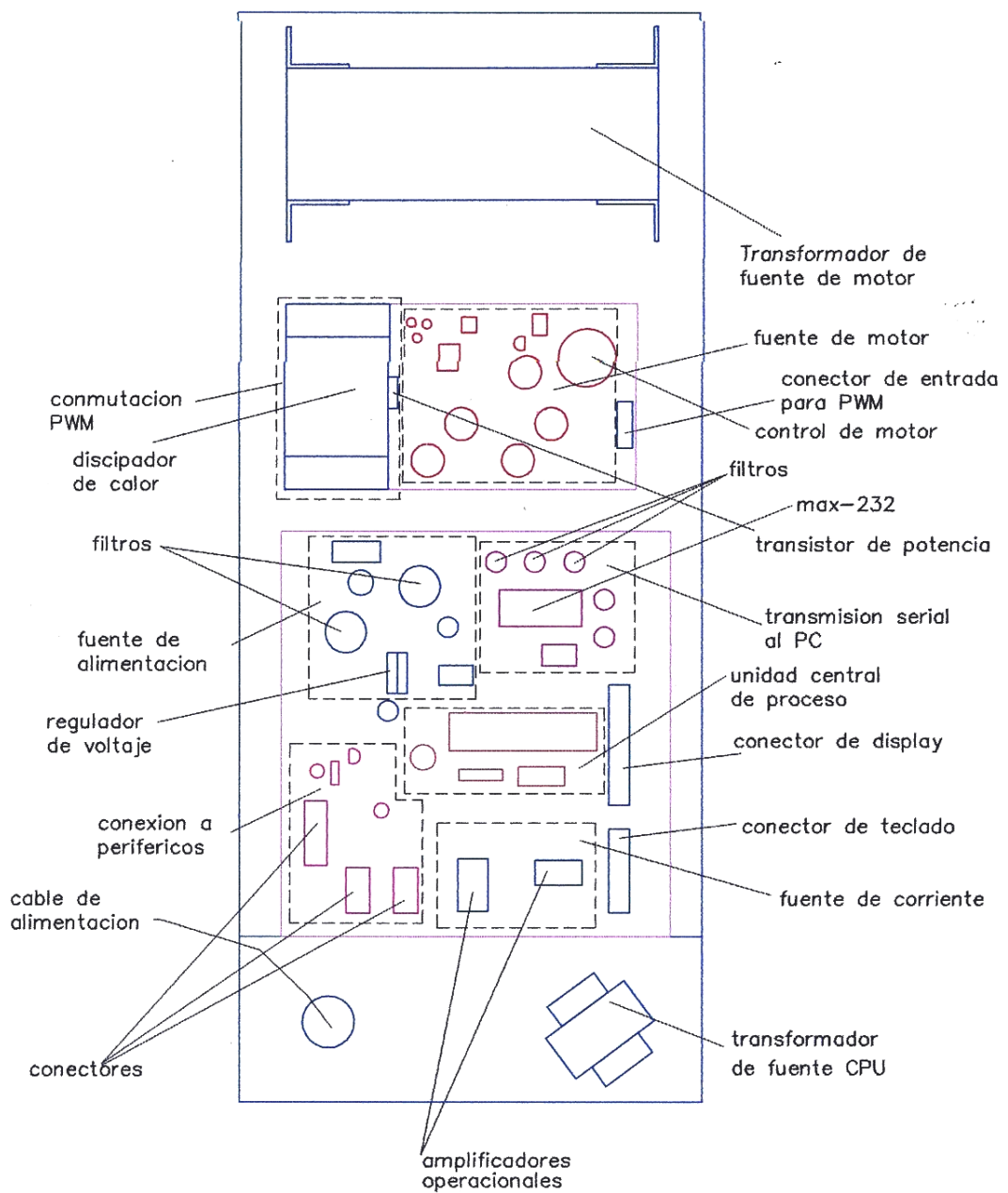
$$\text{entonces Valor-hex1} = 792\text{mV} / 4.88\text{mV} = 162\text{d} = \text{A2h} \quad (6.10)$$

$$\text{entonces Valor-hex2} = 4290 \text{ mV} / 4.88\text{mV} = 879\text{d} = \text{036Fh} \quad (6.11)$$

Los valores en hexadecimal de las ecuaciones (6.10) y (6.11) los utiliza el microcontrolador para obtener el torque experimental, que se analiza en un capítulo posterior.

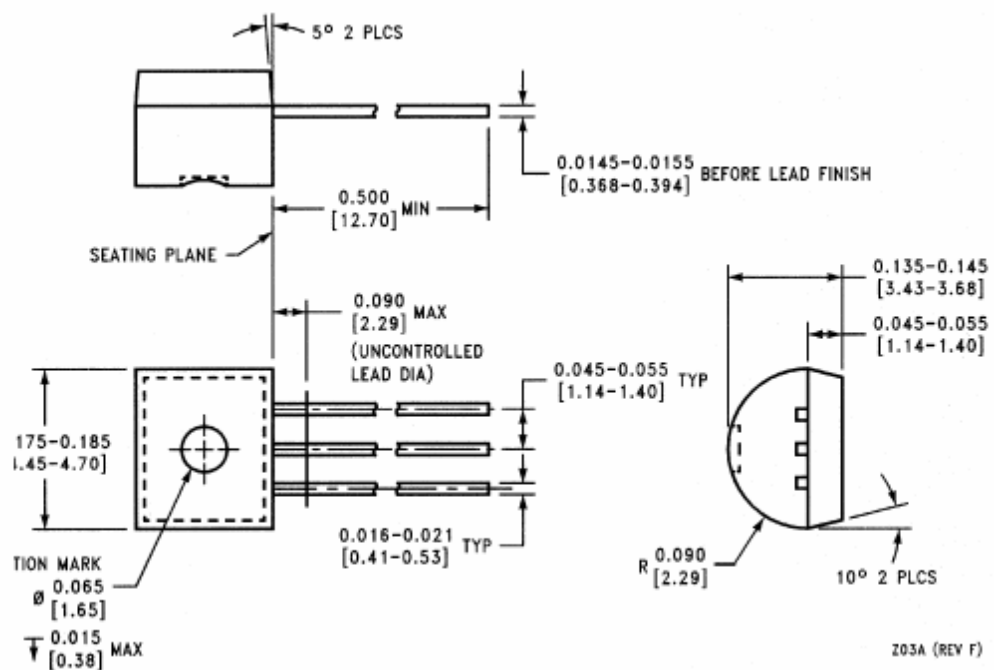
En la figura 27 se puede observar la configuración física del sistema electrónico presentado a manera de vista frontal.

Figura 27. Esquema del hardware electrónico



6.2.2 Detección de temperatura. En la figura 28 se observan dos componentes llamados LM35 S1 y LM35 S2, que son sensores de temperatura de silicio, cuya salida es lineal y responde a un factor de 10mV/°C. Este tipo de sensor debe ser energizado con 5V y la salida de voltaje puede alimentarse inmediatamente al canal de conversión análogo digital del PIC16F873.

Figura 28. Sensor de temperatura LM35



Fuente: www.national.com

El encapsulado del sensor (TO92) es el de un transistor de pequeña señal. Sus características son:

- Disipación de potencia menor a 50mW.
- Salida lineal 10mV/°C.
- Rango de medición entre –5°C a 150°C.
- Alimentación de 5Vdc.
- Precisión de ±0.2°C

La salida del sensor de temperatura es digitalizada por medio del microcontrolador de la siguiente manera:

$$\text{Valor A/D(dec)} = V_{\text{sal-sensor}} / 4.88\text{mV} \quad (6.12)$$

Luego que la señal es digitalizada el microcontrolador recurre a una tabla donde compara el valor de la conversión con la posición de una tabla y en caso de coincidir, el valor específico de la tabla es el valor de temperatura a visualizar.

6.2.3 Interfase a teclado. En la figura 26 existe un conector para teclado con ese mismo nombre. Su función es la de conectar un teclado matricial de 3 x 4 con el fin de poder entregar al microcontrolador los valores de velocidad deseados por el usuario y el tiempo de duración de rotación de 1 a 30 segundo.

El teclado matricial cuenta con los números de 1 a 9 incluyendo el 0 y con dos teclas adicionales que son * y #. Las letras no se utilizan, ver figura 29.

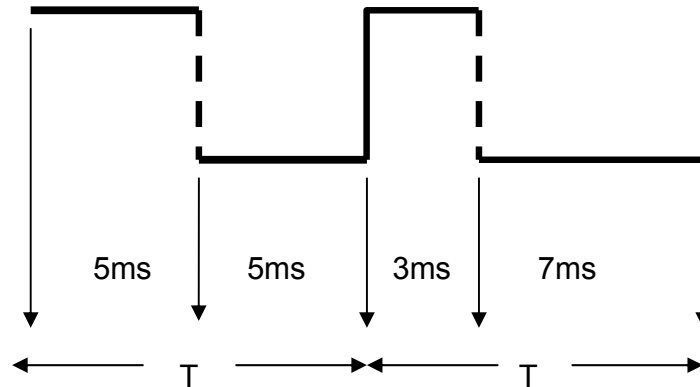
Figura 29. Teclado matricial



6.2.4. Salida PWM. En el esquema general del circuito electrónico (ver figura 26) se observa un conector llamado PWM, cuyo fin es llevar hacia el motor un tren de pulsos donde el ciclo útil corresponde a una selección determinada por teclado. Por el pin RC2 del microcontrolador sale un tren de pulsos cuya frecuencia es de 218Hz y cuyo periodo es de 4.58ms. El ciclo útil del tren de pulsos se puede regular para 1024 valores diferentes o, lo que es lo mismo, llevar el ciclo útil desde el 1% hasta el 100% con una resolución de 0.097%.

En la figura 30 se observa el efecto de la modulación de ancho de pulso, donde la variación del ciclo útil produce un efecto de aumento o pérdida de energía en el motor para la misma frecuencia generada. El microcontrolador PIC16F873 tiene un registro de 10bits para poder modular el ciclo útil y cuenta con un registro de 8 bits para obtener una frecuencia específica.

Figura 30. Modulación de ancho de pulso



Cuando por medio del teclado se selecciona una velocidad de 01 a 30, el microcontrolador selecciona a su vez 30 rangos diferentes de velocidad. Si la resolución total es de 1024 pasos, la ecuación que determina el valor de cada velocidad entre 1 y 30 es:

$$\text{Valor-paso} = \text{Total pasos} / 30 = 1024/30 = 34.1 \quad (6.13)$$

Cuando el teclado hace una selección numérica para la velocidad, el microcontrolador multiplica el valor seleccionado por el valor de cada paso. Ejemplo: Si se selecciona por teclado el valor 05, el valor seleccionado para el PWM será $5 \times 34 = 170$. Este valor será cargado en el registro de 10 bits del módulo PWM y se genera el respectivo ciclo útil para la misma frecuencia (218Hz).

6.2.5 Interface a display. La etapa de visualización comprende la conexión física al display LCD de dos líneas por 16 caracteres. El display utilizado es una pantalla estándar de cristal líquido y matriz de puntos.

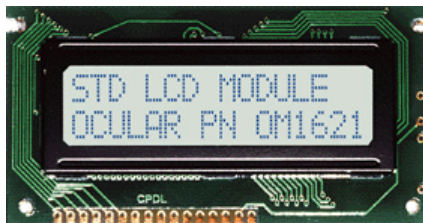
Características

- Carácter = Matriz de 5 x 8 puntos

- 16 caracteres x 2 líneas
- Área efectiva 61mm x 27mm
- Peso 50 gr
- Vcc = 5V
- Sin luz de fondo
- Tiempo de escritura de instrucción / dato de 50µs
- Conexión a 4 y 8 hilos
- 60° de ángulo de visión

En el proyecto, la conexión es a 4 hilos con el microcontrolador PIC16F873 como se ve en la figura 31. Debido a que un dato es de 8 bits, primero se envía el nivel bajo y luego el alto del dato. Por ejemplo: Para enviar el valor 10011100 se envía primero el valor 1100 y luego 1001.

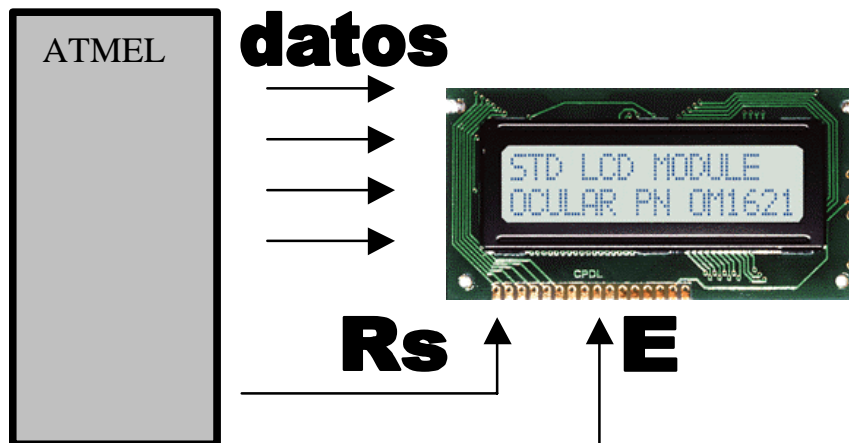
Figura 31. Display LCD



Fuente: www.ocularinc.com

En la figura 32 también se observan dos pines de control Rs y E. La función de RS es indicarle al display si la información enviada es un dato o una instrucción. Un dato puede ser un carácter y una instrucción puede ser la orden de borrar la pantalla. La función de E es latchar (habilitar) el valor hexadecimal que se envía al display.

Figura 32. Conexión física al display



6.2.6 Interface a la computadora. El circuito de control cuenta con una interface USART (Transmisor – Receptor Universal – Asíncrono - Síncrono) con niveles de voltaje RS232. Esta interface consiste en un circuito integrado MAX232, adecuadamente conectado al microcontrolador PIC16F873 por medio de dos líneas de control: Tx y Rx. Estos pines son manejados por el hardware interno del microcontrolador. En la figura 26 se aprecia el componente marcado como IC5 (MAX232) cuya función es transmitir los valores de torque experimental, velocidad angular y temperatura a la computadora.

Descripción MAX232:

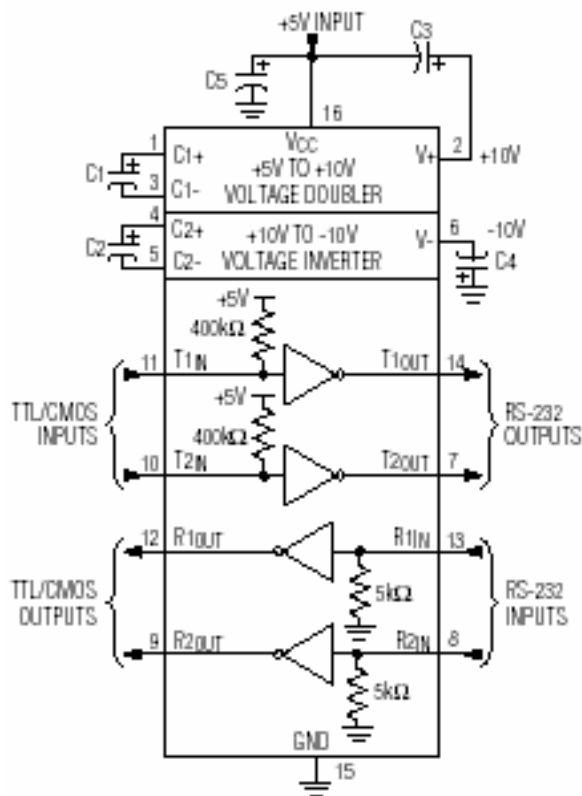
- Estándar EIA RS232
- Transmisión hasta 56k baudios/s
- Vcc = 5Vdc
- Protección térmica
- Protección contra cortocircuito
- Retardo de propagación 100ns

Aplicaciones:

- Sistema RS232 de baja potencia
- Comunicación half-duplex o full-duplex a la computadora

En la figura 33 se aprecia la configuración del MAX232 y seguidamente se definen sus pines. Los pines 10 y 11 son para transmisión por medio de niveles de voltaje TTL (+5V). Los pines 9 y 12 son para recepción por medio de niveles de voltaje TTL (+5V). Los pines 1, 3, 4, 5, 6 son utilizados por el circuito integrado para convertir los niveles de voltaje TTL (0V y 5V) en niveles de voltaje RS232 (-12V a +12V).

Figura 33. Configuración de pines.



6.2.7 Posición del encoder diferencial. En la figura 34 se aprecia la etapa electrónica utilizada para detectar la velocidad del motor. En el conector llamado *rampa1* se conectan los diodos infrarrojos, en los pines marcados 1 y 2 se conecta el infrarrojo receptor y en los pines marcados como 3 y 4 se conecta el infrarrojo transmisor.

6.2.7.1 Funcionamiento electrónico. Cuando el circuito está energizado, el infrarrojo transmisor está conectado a una fuente de 5V y a GND por medio de la resistencia R15 (100 ohmios). Aplicando la ley de Ohm:

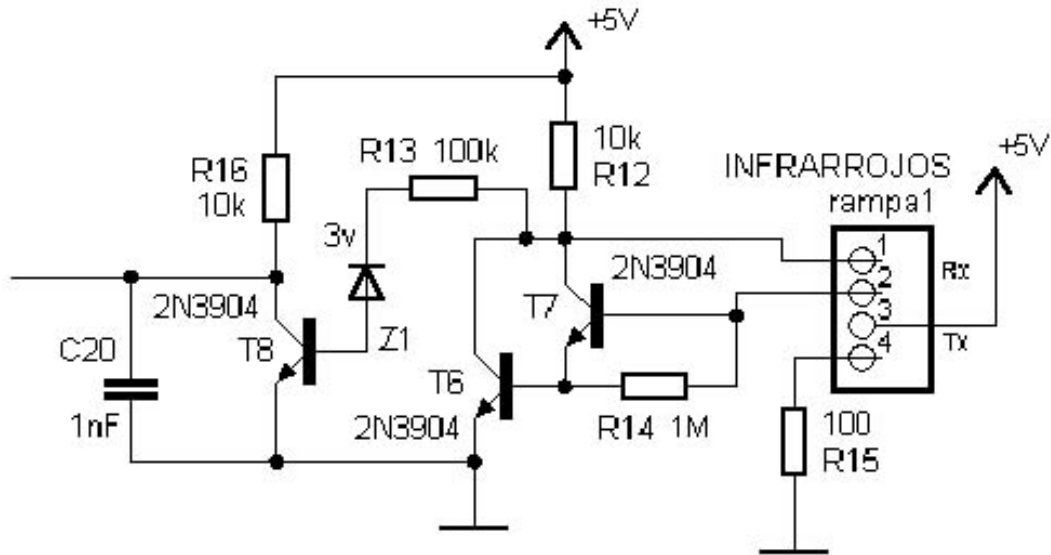
$$I = V / R = 5V / 100 \text{ ohms} = 50\text{mA} \quad (2.14)$$

La corriente que circula por el transmisor permite que emita luz infrarroja hacia el receptor.

Igualmente se observa que el receptor queda conectado a la base de dos transistores T6 y T7 conectados en configuración *Darlington*. Cuando el infrarrojo receptor es excitado por la luz del transmisor, circula una corriente de ánodo a cátodo que energiza la base de T7, el cual a su vez energiza la base de T6, produciendo una variación del voltaje del colector en T6 y T7 (de 4v a 1.5V).

La siguiente etapa conformada por R13, Z1 y T8 tiene como fin convertir las variaciones irregulares del colector T7 y T6 en pulsos de voltaje definidos de 5V a 0v. Estos pulsos definidos son convertidos por el microcontrolador en un punto de referencia para determinar la velocidad del motor.

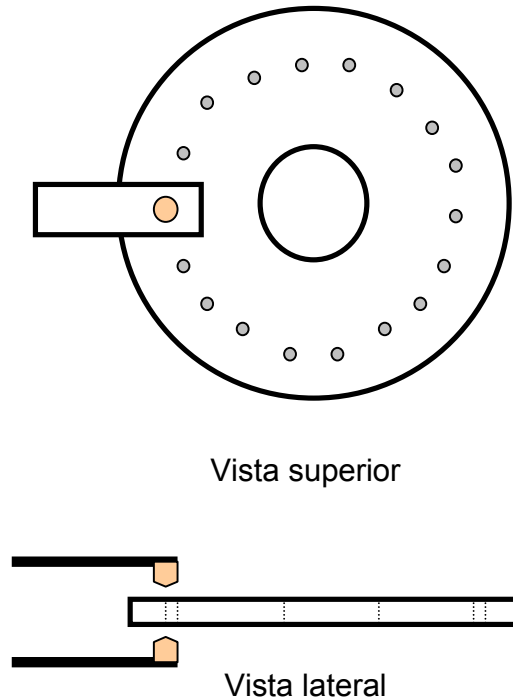
Figura 34. Conexión electrónico del Encoder



6.2.7.2 Funcionamiento mecánico. El Encoder en su parte mecánica consiste en un disco metálico ranurado unido al eje del motor. Este disco cuenta con un diodo infrarrojo transmisor y un diodo infrarrojo receptor enfrentados. El disco tiene 18 agujeros para obtener pasos de 20° durante la detección de la velocidad. Debido a que el motor en carrera libre puede girar a 1200rpm, se obtienen 360 pulsos en el encoder durante un segundo, con una duración de 2.7ms por pulso a la máxima velocidad.

En la figura 35 se aprecia la conexión física de los infrarrojos al encoder y se observa que el infrarrojo transmisor y el infrarrojo receptor están enfrentados (en color naranja) y pueden excitar un circuito electrónico, dependiendo de que en un momento determinado pasen frente a un agujero o no.

Figura 35. Conexión mecánica del encoder diferencial



6.2.8 Unidad Central del Control o MCU. La Unidad Central de Control o MCU es el microcontrolador encargado de realizar todas las tareas de detección y control en el circuito electrónico. Para este proyecto se ha escogido el microcontrolador PIC16F873 de Microchip por todos los recursos con que cuenta, bajo costo, confiabilidad y disponibilidad permanente en el mercado.

- **Microcontrolador PIC16F873**

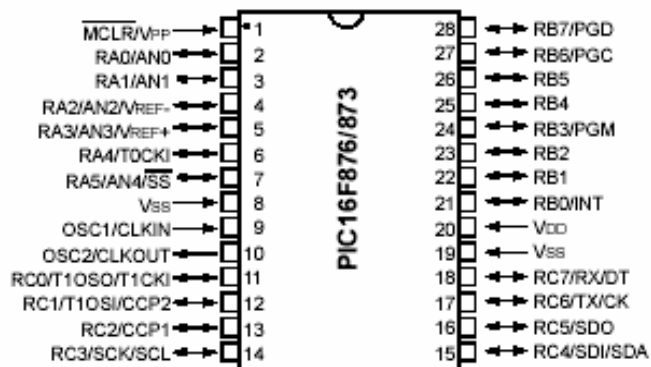
Este dispositivo fabricado por Microchip cuenta con una unidad aritmética y lógica, 22 puertos de entrada-salida, 2k de memoria reescribible de programa y 5 canales de conversión analógica digital, 2 canales para generación de PWM, transmisión al PC por medio de interface USART (RS232) y otros recursos adicionales.

Recursos:

- 35 instrucciones de operación
- Velocidades de reloj de hasta 20 Mhz
- Hasta 2kbytes de memoria de programa
- 14 fuentes de interrupción
- Modo sep de ahorro de energía
- Alimentación de 5Vdc
- 3 timers para temporización
- 2 módulos PWM
- 5 canales de conversión A/D de 10 bits
- Puertos SPI e I2C
- Puerto USART
- Bajo consumo de energía

En la figura 36 se observa el diagrama de pines del microcontrolador el cual viene en un encapsulado DIP de 28 pines y contorno delgado.

Figura 36. Configuración de pines del PIC16F873



Fuente: www.microchip.com

7. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

La calibración del viscosímetro consiste en tomar los valores presentados en milivoltios (mv) obtenidos del potenciómetro y convertirlos en valores de torque para presentarlos en Dinás – Centímetros (D. cm.)

Para realizar este proceso fue necesario utilizar un aceite patrón de viscosidad absoluta conocida con un valor de 98.3 cp, aplicar la ecuación de torque expresada así:

$$T = \mu k \omega$$

Donde:

μ = viscosidad absoluta en centipoises

k = Constante geométrica del sistema sensor (cm³)

ω = velocidad angular del sistema motriz (rpm)

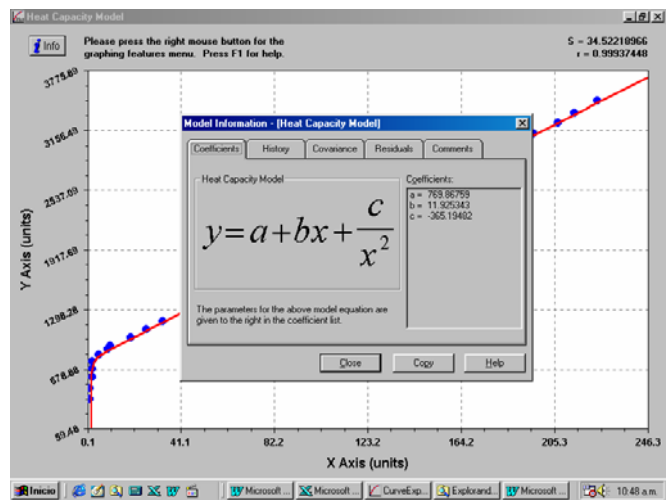
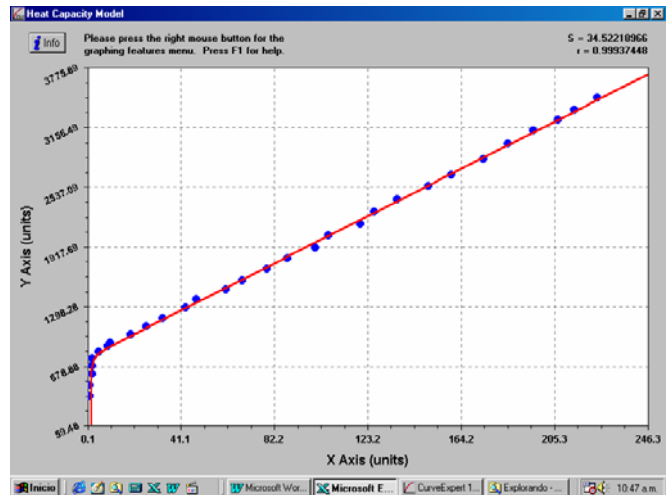
Nota: Más adelante se deduce la ecuación de torque y la obtención de la constante geométrica del sistema sensor.

Además se incorporó un software llamado curvexpert al microcontrolador del equipo, para establecer una relación directa entre los valores de medida del potenciómetro y los valores de Torque para ser presentados finalmente en el display

En la figura 37 – se puede observar la gráfica, los valores y la ecuación, entre la medida del potenciómetro en milivoltios (mV) y los valores de Torque obtenidos en dinas – centímetros (d – cm.)

Figura 37. Calibración del equipo

X	Y
milivoltios conversion A/D	torque formula dinas-cm
1	369.18
1	477.59
2	603.58
2	682.69
2	761.8
5	829.19
9	887.79
10	925.88
19	1004.99
26	1092.89
33	1180.79
43	1289.2
48	1377.1
61	1473.79
68	1570.48
79	1687.68
88	1796.09
100	1913.29
106	2039.28
120	2156.48
126	2285.4
136	2411.39
150	2549.1
160	2666.3
174	2830.38
185	2988.6
196	3123.38
207	3231.79
214	3340.2
224	3466.19



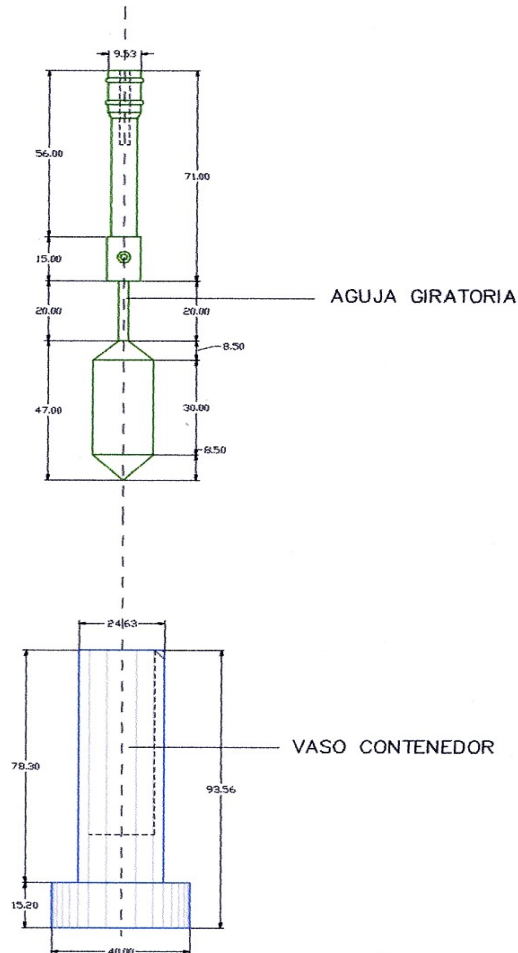
$$y = a + bx + c/x^2$$

Torque = a + b(mV) + c/(mV)² donde, a = 769,8675 b = 11,92534 c = -365,1948

Seguidamente se demuestra la obtención de la fórmula del torque generado a causa de la resistencia viscosa que presenta el aceite a la aguja giratoria, cuando ésta se encuentra en movimiento de rotación.

7.1 ECUACIÓN DEL TORQUE GENERADO

Figura 38. Sistema sensor para calcular el torque



Se tiene que $\tau = \mu \, du / dy = \mu \, U / Y$

Se sabe que $F = \tau \, A$

De la anterior ecuación se tiene: $F = (\mu U / Y) \, A$

Aplicando las ecuaciones de continuidad y Navier Stokes aplicado al principio de vorticidad se obtiene que:

$$M_{TOT} = \mu\omega \left[\frac{4\pi Rc^2 Rb^2 L}{Rc^2 - Rb^2} + \frac{2\pi Rb^3}{3\text{sen}\theta} \right]$$

Definimos K = constante geométrica

$$K = \left[\frac{4\pi Rc^2 Rb^2 L}{Rc^2 - Rb^2} + \frac{2\pi Rb^3}{3\text{sen}\theta} \right]$$

caso general

Donde:

K = constante geométrica

μ = viscosidad absoluta del aceite

ω = velocidad angular

7.2 CALCULO DE LA CONNSTANTE GEOMÉTRICA K DEL EQUIPO

En la figura 39, se puede observar el sistema sensor propio del equipo, donde se encuentran los diferentes parámetros que intervienen en el cálculo de la constante geométrica k, la cual se va a utilizar para hallar la viscosidad de los diferentes fluidos, dentro de las experiencias que se han de realizar en el laboratorio.

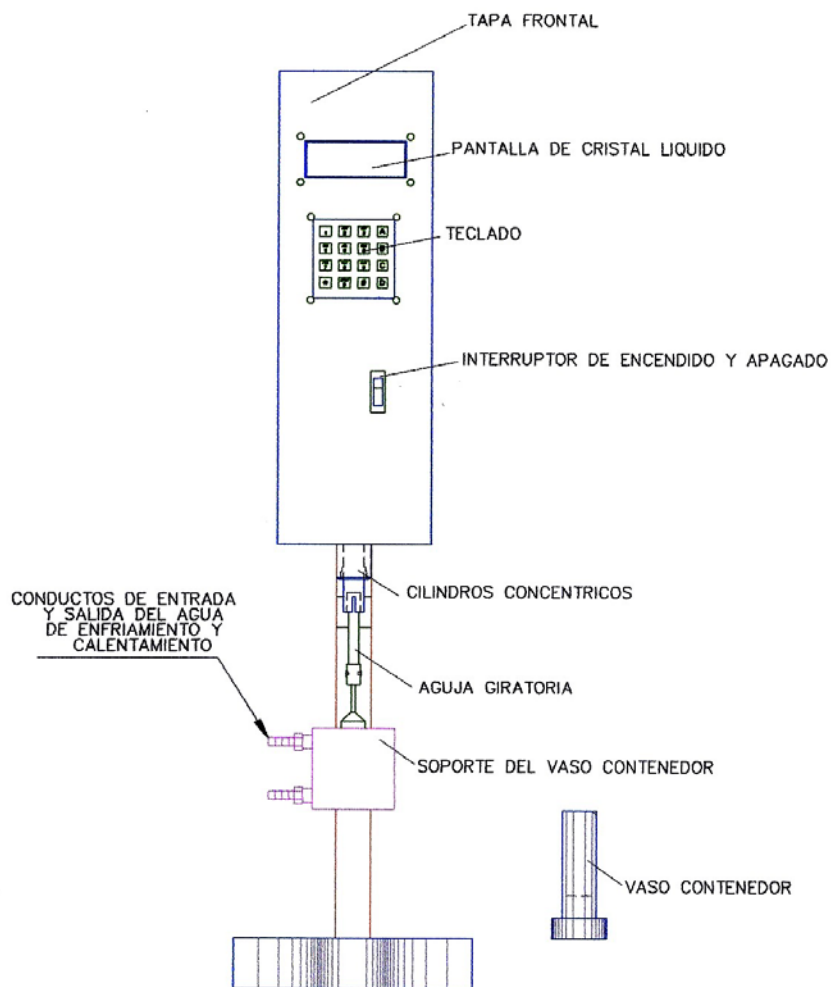
$$K = \left[\frac{4\pi Rc^2 Rb^2 L}{Rc^2 - Rb^2} + \frac{2\pi Rb^3}{3\text{sen}\theta} \right]$$

Para nuestro caso particular K = 178 cm³

8. MANUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO V.R.A.

En la figura 39 se observa la configuración externa del equipo determinando la ubicación e identificación de los diferentes botones de manejo, la pantalla de cristal líquido (display) (LCD), y las partes involucradas en la realización de la prueba de laboratorio para obtener el valor de viscosidad de un determinado aceite.

Figura 39. Configuración del equipo V.R.A



Hay que tener en cuenta que el equipo se puede operar de dos formas. La primera mediante un manejo directo con el teclado del equipo y la segunda a través del computador; en ambas opciones de manejo se enciende y se apaga el equipo directamente del botón de encendido y apagado.

PASOS A SEGUIR PARA OPERAR EL EQUIPO

Manejo directo con el teclado del equipo.

1. Se conecta el equipo a un toma corriente de 110 voltios.
2. Se enciende el equipo actuando el botón de encendido y apagado.
3. Se vierte una pequeña medida de aceite en el vaso contenedor.
4. Se instala el vaso contenedor en su respectivo soporte como muestra en la secuencia de las figuras 40 y 41 quedando la aguja giratoria sumergida en el aceite.

Figura 40. Secuencia de instalación del vaso contenedor (fase 1)

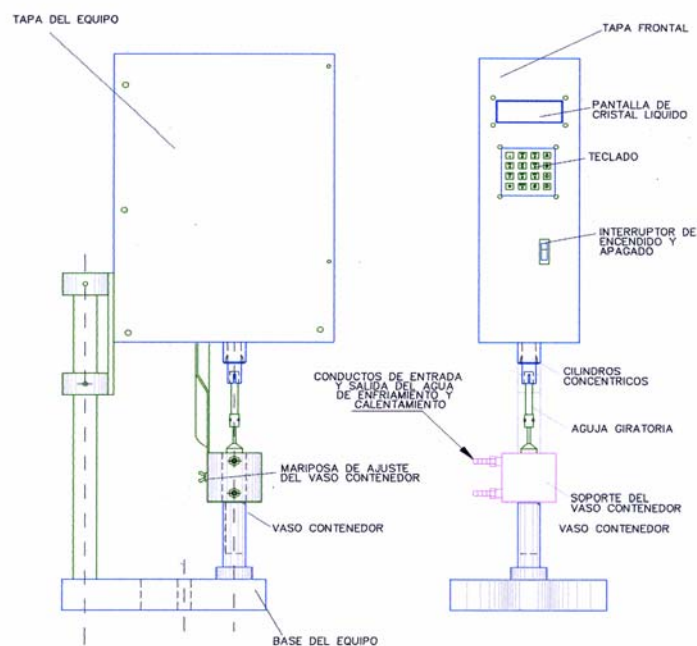
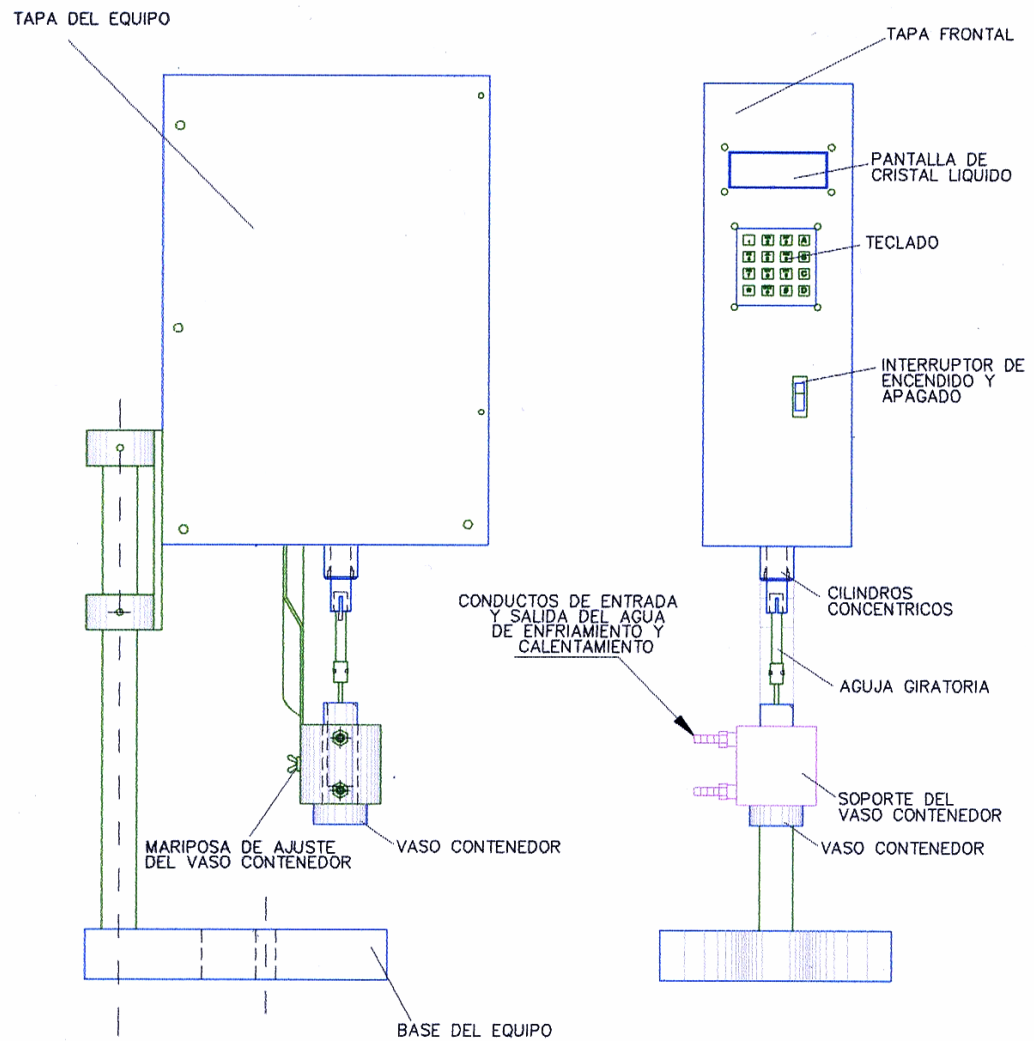


Figura 41. Secuencia de instalación del vaso contenedor (Fase 2)



5. En la pantalla aparece VEL (velocidad); el equipo cuenta con 30 velocidades, con el teclado se selecciona la velocidad con un valor desde 01 hasta 30 (a medida que aumenta el número de 01 a 30 aumenta la velocidad).

6. Luego aparece al frente DUR (duración, significa tiempo de duración de rotación de la aguja giratoria sumergida en el aceite) el tiempo oscila entre 1 segundo a 30 segundos, se selecciona el tiempo deseado con el teclado.
7. Se espera el tiempo seleccionado y aparece la velocidad angular (ω) en r.p.m. y el torque (T) en D-cm.
8. Se toman estos datos en una tabla quedando ω en el eje x y T en el eje Y.
9. Se grafican estos datos y se obtiene aproximadamente una curva de primer orden es decir una recta. La ecuación es: $T = \mu k \omega$.

Donde:

T = Torque (Dn – Cm)

μ = viscosidad absoluta en centipoises o $\frac{\text{Dinas} \cdot \text{sg}}{\text{cm}^2} \cdot 10^{-2}$

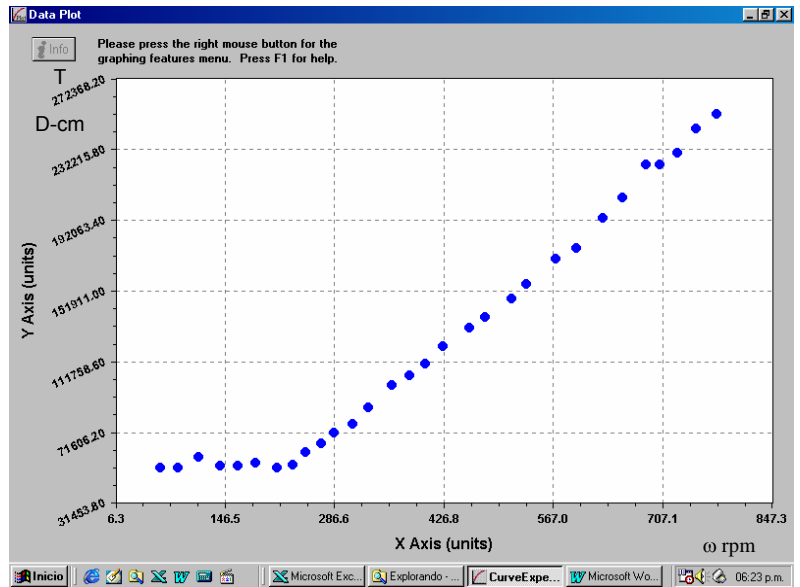
k = constante geométrica del equipo (agujas y vaso con tenedor)

$$k = \frac{2\pi r^3(L+S)}{R-r} \quad k = 318 \text{ cm}^3$$

ω = Velocidad angular (r.p.m)

Figura 42. Curva de T Vs ω y su tabla de valores (Fase 1)

veloc. Angular rpm	torque dinas-cm	viscosidad centipoises
63	51530	375.094288
86	51530	274.778374
113	57572	233.643515
140	52566	172.185966
163	52566	147.889787
186	54355	134.013149
213	51530	110.943381
233	53491	105.279946
250	60659	111.269489
270	65226	110.784203
286	71281	114.295362
310	76568	113.2678
330	85625	118.989188
360	98449	125.409277
383	103729	124.200194
403	110517	125.760686
426	120321	129.524729
460	130879	130.476709
480	136912	130.804033
513	147470	131.827851
533	155766	134.018982
570	170094	136.84691
596	176127	135.519108
630	193472	140.831054
656	204783	143.15645
686	223636	149.499058
703	223636	145.883861
726	230423	145.549281
750	243997	149.1915
776	252292	149.094841



10. Se obtienen 5 valores de viscosidad (μ) y se promedian obteniendo el

valor de viscosidad. La ecuación es: $\mu = \frac{T}{\omega k}$.

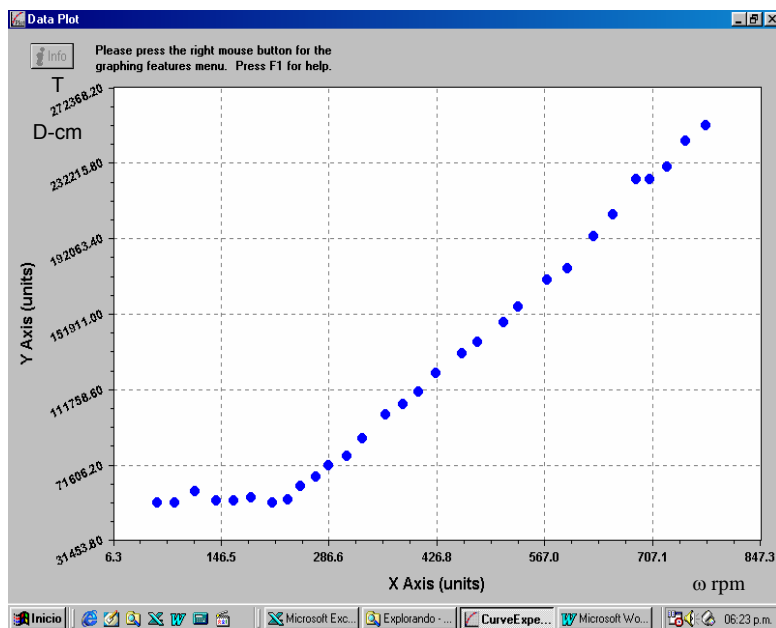
Manejo del equipo a través del computador:

1. Se conecta el equipo a un tomacorriente de 110 voltios.
2. Se enciende el equipo actuando el botón de encendido y apagado.
3. Se vierte una pequeña medida de aceite en el vaso contenedor.

4. Se instala el vaso contenedor en el respectivo soporte como se muestra en la secuencia de las figuras 32 y 33, quedando la aguja giratoria sumergida en el aceite.
5. Se instala el equipo al serial 232 del computador.
6. El software de manejo del equipo llamado terminal debe estar en el disco duro del computador.
7. El programa llamado terminal debe estar abierto.
8. Se hace clic en SETTINGS y luego en COMMUNICATIONS.
9. Aparece un cuadro y se realizan las siguientes selecciones:
 Baud rate = 2400
 Data bits = 8
 Stop bits = 1
 Parity = none
 Flow control = none
 Habilitar con OK.
 Conector = el puerto serial habilitado en el PC.
10. Aparece VEL (pide la velocidad).
11. Luego en la ventana en blanco se digita desde a01 hasta a30 para escoger las diferentes velocidades.
12. Aparece en el Display del equipo DUR (tiempo de duración desde 01 sg hasta 30 sg).
13. Se espera el tiempo seleccionado y aparece tanto en el display como en el computador la velocidad angular (ω) en r.p.m. y el torque T en D-cm.
14. Se toman los 30 valores de ω en (r.p.m.) y T (D-cm).
15. Se lleva en el computador el paquete de $\omega(x)$ y T(y) a la tabla de valores del programa CURV EXPERT.
16. El programa CURV EXPERT grafica la curva: $T = \mu k \omega$.
17. En el computador se calculan los valores de viscosidad $\mu = \frac{T}{\omega k}$. (ver figura 43)

Figura 43. Curva de T Vs ω y su tabla de valores (Fase 2)

veloc. Angular rpm	torque dinas-cm	viscosidad centipoises
63	51530	375.094288
86	51530	274.778374
113	57572	233.643515
140	52566	172.185966
163	52566	147.889787
186	54355	134.013149
213	51530	110.943381
233	53491	105.279946
250	60659	111.269489
270	65226	110.784203
286	71281	114.295362
310	76568	113.2678
330	85625	118.989188
360	98449	125.409277
383	103729	124.200194
403	110517	125.760686
426	120321	129.524729
460	130879	130.476709
480	136912	130.804033
513	147470	131.827851
533	155766	134.018982
570	170094	136.84691
596	176127	135.519108
630	193472	140.831054
656	204783	143.15645
686	223636	149.499058
703	223636	145.883861
726	230423	145.549281
750	243997	149.1915
776	252292	149.094841



Los programas o software curv Expert y Terminal se encuentran adjuntos en el CD.

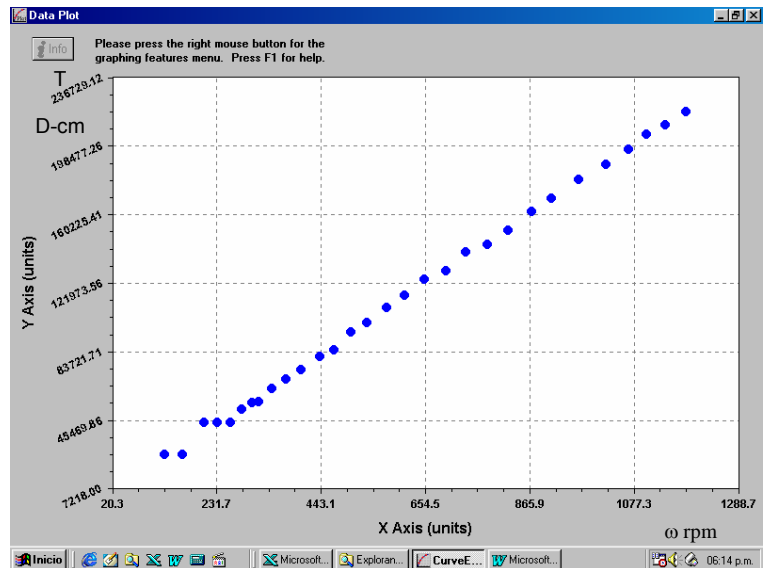
La configuración que describe el software Terminal se encuentra en el CD con el nombre de ini19.txt.

9. PRUEBAS Y TOMA DE DATOS

9.1 ACEITE DE BAJA VISCOSIDAD

Figura 44. Aceite de baja viscosidad

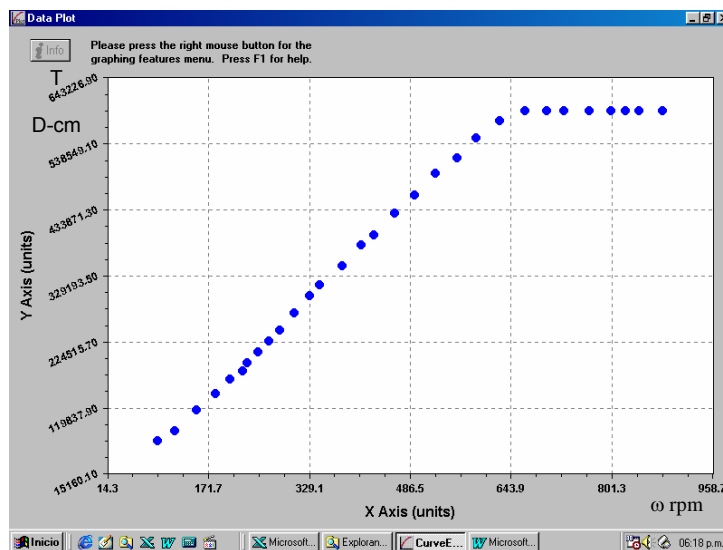
veloc. Angular rpm	torque dinas-cm	viscosidad centipoises
126	26343.93006	110.925438
163	26343.93006	85.746044
206	44418.08912	114.396775
233	44418.08912	101.140497
260	44418.08912	90.6374452
283	51530.0303	96.6039968
303	55185.09884	96.6274077
316	55993.3776	94.0092776
343	62947.3225	97.3653152
373	68255.89473	97.0850737
403	73547.61392	96.8243687
440	81097.42091	97.7857337
470	84870.4327	95.8031284
503	94677.66743	99.8621005
536	99957.64283	98.9401009
576	108254.1365	99.7110177
613	115041.8362	99.5672386
653	124091.8177	100.821022
696	128616.7261	98.0413636
736	139174.7045	100.32372
780	143699.5079	97.7421326
823	151240.8046	97.4967808
870	161798.5536	98.6680431
910	169339.7685	98.7276277
966	179897.4347	98.8027372
1020	188192.7223	97.886722
1066	196487.9956	97.7912393
1103	204783.2575	98.5008701
1140	210062.0556	97.7606076
1183	217603.1902	97.5891748



9.2 ACEITE DE ALTA VISCOSIDAD

Figura 45. Aceite de alta viscosidad

veloc. Angular rpm	torque dinas-cm	viscosidad centipoises
93	67499	332.839796
120	84116	321.453548
153	115796	347.074722
183	142191	356.321376
206	164815	366.902247
226	178389	361.976594
233	191209	376.333835
250	207800	381.17674
266	225144	388.150007
283	242489	392.940202
306	269637	404.090758
330	297539	413.476486
346	314884	417.345132
380	344294	415.495874
410	377475	422.206772
430	394065	420.262138
463	428000	423.919735
493	456656	424.779067
526	492099	429.029935
560	515477	422.12602
590	547149	425.279507
626	574297	420.710229
666	590888	406.866374
700	590888	387.104293
726	590888	373.241054
766	590888	353.750659
800	590888	338.716256
823	590888	329.25031
843	590888	321.438915
880	590888	307.923869



10. CONCLUSIONES

- Para el desarrollo adecuado del trabajo descrito se llevaron a cabo actividades relacionadas con el estudio y selección de las opciones de modificación del viscosímetro rotativo disponible en la Escuela de Ingeniería Mecánica, la búsqueda de proveedores, la cotización de los posibles elementos, la selección de la mejor oferta comercial, la instalación y verificación de los equipos adquiridos, el diseño de recursos complementarios, el ensamble y/o montaje de los diseños, la adecuación de los equipos y elementos, el diseño de los procedimientos de calibración y mantenimiento y la recopilación de la información relacionada. La ejecución de estas actividades permitió lograr plenamente los objetivos formulados en el plan propuesto.
- A través de un serio proceso de planeación, el cual incluyó el estudio y análisis técnico – financiero de los productos ofrecidos por algunos reconocidos proveedores y/o fabricantes de equipos relacionados con las posibles modificaciones al viscosímetro, se adquirieron los equipos relacionados con la opción elegida. Con esto se dio un satisfactorio cumplimiento a la necesidad de estudiar y sugerir opciones, que posteriormente permitieron el rediseño del viscosímetro rotativo.
- El desarrollo de las pruebas por parte de los autores permitió calibrar el Viscosímetro Rotativo Automatizado con base en el uso de fluidos de viscosidad ya conocida, brindando una relación directa entre la viscosidad del fluido y el torque generado por éste a partir de la rotación inicial de uno de los cilindros concéntricos, dando como resultado una señal eléctrica proporcional a la viscosidad del fluido.

- El estudio de los conceptos fundamentales asociados al tema central del proyecto permitió dejar listas las señales provenientes del equipo para un posterior acople con el sistema de adquisición de datos Field Point propuesto para el laboratorio.

- El objetivo de presentar a través de un manual de procedimientos de operación y mantenimiento del viscosímetro se ve plasmado en los fragmentos del mismo que hacen parte de los anexos.

- El diseño de los elementos descritos y que hacen parte del trabajo de automatización del viscosímetro rotativo constituye la propuesta de mejora en el aspecto mecánico y funcional, propuestos en el plan de proyecto.

- La implementación de mejoras en el laboratorio de Mecánica de Fluidos es un proyecto precursor en la Escuela de Ingeniería Mecánica ya que le permite a la Escuela crear y/o consolidar nuevas líneas de investigación en este campo y la realización de nuevos proyectos de grado y postgrado. Dichos trabajos podrán hacer uso de los recursos, que gracias al desarrollo de este proyecto y naturalmente a la inversión de recursos financieros quedan materializados y disponibles en el laboratorio.

11. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones derivadas del trabajo realizado para lograr un Viscosímetro Rotativo Automatizado como el que se ha descrito en los capítulos precedentes, se refieren a tres aspectos que pueden tenerse en cuenta para asegurar la continuidad y mejora del mismo. El primer aspecto relaciona sugerencias de tipo técnico, con el fin de cuidar y preservar los equipos y elementos propios de la propuesta. El segundo aspecto presenta sugerencias ligadas al desarrollo de las prácticas de calibración y mantenimiento del viscosímetro. Finalmente, bajo un tercer aspecto, se enumeran algunas recomendaciones generales.

Recomendaciones técnicas

- Los equipos, elementos y partes mecánicas poseen una estructura delicada para su actuación. Se recomienda el uso racional de ellos, evitando que sean expuestos a niveles de humedad muy altos y por supuesto evitar el contacto de éstos con cualquier tipo de líquidos. Las cajas, armarios o lugares donde estos dispositivos sean almacenados deben estar libres de toda humedad.

- El módulo electrónico de la propuesta está construido con dispositivos electrónicos de alta sensibilidad, la manipulación y uso de este equipo, así como de los accesorios y elementos asociados a éste, debe hacerse estrictamente utilizando las indicaciones y bajo las condiciones de uso normal.

- Es interesante estudiar la posibilidad por parte de la Escuela de adquirir un equipo Field Point o los módulos, equipos y/o elementos tendientes a su

construcción a través de futuros proyectos de grado. La construcción de este sistema puede constituirse en un medio de comparación y análisis con la tecnología aquí propuesta.

Recomendaciones metodológicas

- Como sugerencia de tipo metodológico se propone la realización de sesiones cortas de calibración y/o prueba al inicio de cada una de las prácticas que involucren el viscosímetro, con el objetivo de comprobar que los elementos, equipos y/o accesorios cumplen con los aspectos mínimos e importantes para la operación de los mismos.
- Vale la pena anotar que pueden considerarse aspectos interesantes para la creación de una base de datos, aquellos incluidos en informes de laboratorio como cálculos, aproximaciones, gráficos y/o mediciones realizados con el Viscosímetro Rotativo Automatizado.
- Para un mejor uso del dispositivo y por ende un mejor desarrollo de las prácticas en que sea utilizado, se recomienda la lectura de la información relacionada con la calibración y el mantenimiento del mismo.
- Un componente importante del laboratorio de Mecánica de Fluidos, como lo es un Viscosímetro Rotativo Automatizado, debe estar sujeto al menos a un mantenimiento cada año, por lo que se recomienda seguir los procedimientos recomendados.

Recomendaciones generales

- Se sugiere que una persona idónea se responsabilice del Viscosímetro Rotativo Automatizado de manera que, en primer lugar, mantenga disponible

el equipo y, en segundo lugar, se encargue del cuidado y conservación del mismo.

- Es interesante además continuar con el proceso de ampliación y mejora de los recursos de la Escuela de Ingeniería Mecánica mediante la adquisición de equipos y elementos que puedan complementar sus laboratorios o hacer parte de uno o más bancos de pruebas.

- Se resalta también que es importante el desarrollo de otros proyectos de grado relacionados con el tema, de forma que se consolide una línea de investigación en el área y sus aplicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

BALCELLS, Joseph y ROMERAL, José Luis. Autómatas Programables. México: Alfaomega Grupo Editor S.A. de CV, 1998.

BROOKFIELD, Viscometer/Rheometer Catalog 2001. Brookfield Engineering Laboratories, Inc.

CHAPMAN J, Stephen. Máquinas eléctricas. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw Hill, 3ª Edición, 1997.

CREUS SOLE, Antonio. Instrumentación Industrial. Barcelona, España: Marcombo S.A., 6ª Edición, 1997.

FOX, Robert W y McDONALD, Alan T, Introducción a la mecánica de los fluidos, México, Mc Graw Hill, 1989.

HORENSTEIN, Mark N. Microelectrónica: Circuitos y Dispositivos. México: Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 1995.

MOTOROLA. Libro de Motorota para microcontroladores.

PABÓN, Edgar M. Adecuación y Automatización de un Viscosímetro para pruebas de laboratorio.

RASHID, Muhammad H. Electrónica de Potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones. México: Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 1993.