



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Sistema de Control y Monitoreo  
de un Reómetro Extensional de  
Contracción Semi-hiperbólica**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniera Mecatrónica**

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

Nancy Reyna Lino

**DIRECTOR DE TESIS**

M. I. Miguel Ángel Bazán Ramírez



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017**



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.

## DEDICATORIA

A *Dios* por darme la oportunidad de vivir y ser tan generoso conmigo, por permitirme llegar hasta donde he llegado e iluminar mi camino, sobre todo por haber puesto en mi vida personas maravillosas que me han ayudado ser la persona que soy hoy.

A *mi familia* por ser mi mayor apoyo, gracias por la paciencia que siempre tienen para mí. Por compartir conmigo mis triunfos y también fracasos por todo su amor gracias. Este logro es de nosotros, por eso este trabajo está dedicado con amor para ustedes mi familia.

A *mi mamá* porque sin su guía no estaría donde estoy, gracias a ti por enseñarme a ser una persona responsable, por creer siempre en mí, por impulsarme a seguir creciendo, por tu amor, tengo tanto que agradecerte que nunca podre recompensarte todo lo que has hecho por mí. Gracias por todo el tiempo y dedicación que me has dado, te amo mucho.

A *mi papá*, gracias por ser mi padre, tengo mucho que agradecerte, gracias por siempre estar para mí apoyándome, impulsándome cada vez que sentía que no podía con un nuevo reto, gracias por todo tu esfuerzo, por tus regaños y tus abrazos, por todo el amor y tiempo que siempre hemos recibido de ti mis hermanos y yo, gracias papá. Te amo mucho. El que pueda terminar esta etapa de mi vida y tener la satisfacción de decir “lo he logrado” se lo debo a mi mamá y a ti.

A *mis hermanos*, Miguel Ángel, Diana Mayte y Luis Ángel por toda la alegría que han traído a mi vida, gracias por su motivación, porque aunque siempre bromean conmigo no importa lo que pase, siempre están apoyándome. Son unos de mis mayores impulsos cuando más lo necesito. Gracias por sus consejos y por su apoyo.

A *mi abuelo* por su ayuda y enseñanza, a mi mamacita (su amor y enseñanza a pesar de no estar en cuerpo siempre estará con migo), a mis tíos y primos.

A *mis amigos*, Fabi, Joel, Eli, Clau, Dul, Vero y Lau. Gracias por la amistad y apoyo que siempre me han brindado en los buenos y malos momentos. Gracias Fabi por estar conmigo a pesar de los malos momentos, por tus consejos y los momentos de diversión que hemos compartido por que a pesar de todo sé que siempre podré contar contigo y tú conmigo, te quiero, gracias por tu amistad.

## **AGRADECIMIENTOS**

A:

La *Universidad Nacional Autónoma de México* y la *Facultad de Ingeniería* que me permitieron formarme como profesionista y a crecer como persona.

Al *Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico* y al *Dr. Gabriel Ascanio* por permitirme desarrollar este proyecto, por el apoyo y su confianza.

Al *M.I. Miguel Angel Bazán Ramírez* mi asesor de tesis, por su guía y amistad brindada. Gracias por toda tu ayudada y consejos, por tus enseñanzas y tu confianza en mí. Gracias por ayudarme en mi formación profesional.

A la *Dra. María Soledad Córdova* por su apoyo, consejos y guía, gracias a la cual pude completar este proyecto.

A la *Dra. María del Pilar Corona*, al *M.I. Humberto Mancilla* y al *Fis. Sergio Arzamendi* por orientarme y brindarme su apoyo para poder cumplir este proyecto.

Al *Grupo de Ingeniería de Proceso*, a Jeni, Juan, Isaac, Jorge, Dani, Isa, Dany, Adrián, Perla, Magali, Toño, Hugo, e Inés gracias a su ayuda y consejos, las pláticas y divertidos momentos compartidos.

## *Índice*

RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	
<u>CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES</u>	1
1.1 Reología	1
1.2 Viscosidad	1
1.3 Flujo extensional uniaxial	2
1.4 Reómetros extensionales comerciales	3
1.5 Reómetro extensional CCADET-UNAM	4
Justificación	8
Objetivos	8
<u>CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA</u>	9
2.1 Sistema mecánico	9
2.2 Sistema eléctrico/electrónico	11
<u>CAPÍTULO 3 INTERFAZ DE CONTROL Y MONITOREO</u>	15
3.1 Variables de control y monitoreo	15
3.2 Diagrama de bloques y diagrama de flujo	17
3.3 Interfaz	19
<u>CAPÍTULO 4 PRUEBAS Y RESULTADOS</u>	21
4.1 Caracterización	21
4.2 Pruebas de operación	24
CONCLUSIONES	29
TRABAJO A FUTURO	29
BIBLIOGRAFÍA	30
ANEXOS	32

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Tipos de flujo extensional	2
<i>Figura 2.</i> SER de la empresa Anton Paar®	3
<i>Figura 3.</i> HAAKE CaBER 1®	4
<i>Figura 4.</i> Reómetro de orificio	5
<i>Figura 5.</i> Reómetro de orificio CCADET-UNAM	6
<i>Figura 6.</i> Reómetro extensional de orificio	9
<i>Figura 7.</i> Contracción semi-hiperbólica	10
<i>Figura 8.</i> Bomba de lóbulos	10
<i>Figura 9.</i> Cono de almacenamiento	10
<i>Figura 10.</i> Reómetro de orificio con sistema electrónico	11
<i>Figura 11.</i> NI DAQ6211	12
<i>Figura 12.</i> Tarjeta Kbmm- 125 con Kbmm SI-6	12
<i>Figura 13.</i> Termistor NTC	13
<i>Figura 14.</i> Transductor de presión	13
<i>Figura 15.</i> Balanza SCOUT® SPX 6201 e interfaz USB	14
<i>Figura 16.</i> Módulo de relevadores	14
<i>Figura 17.</i> Diagrama de bloques de las acciones del sistema	17
<i>Figura 18.</i> Diagrama de flujo del sistema	18
<i>Figura 19.</i> Interfaz de control y monitoreo desarrollada en LabVIEW®	20
<i>Figura 20.</i> Curva característica del transductor de presión a) transductor de 34.7 kPa	22
<i>Figura 20.</i> Curva característica del transductor de presión b) transductor de 172.4 kPa	22
<i>Figura 21.</i> Graficas registradas durante la experimentación con glicerina a) b) c)	25
<i>Figura 22.</i> Ejemplo de reporte generado durante la experimentación con glicerina a)	26

<i>Figura 22.</i> Ejemplo de reporte generado durante la experimentación con glicerina b)	27
<i>Figura 23.</i> Promedio de presiones de los fluidos con respecto al rpm de la bomba	27
<i>Figura 24.</i> Promedio de temperaturas	28
<i>Figura 25.</i> Flujo másico obtenido de los fluidos muestra	28
A.1 Circuito para control de bomba de lóbulos	32
A.2 Circuito de termistores NTC 10k	34

## ***RESUMEN***

El comportamiento reológico de los fluidos es importante tanto para el desarrollo de nuevos productos, procesos y maquinaria, como para mantener o mejorar la calidad de los productos, fundamentalmente para las industrias de alimentos, fármacos, cosméticos y pinturas. En varios procesos industriales, como extrusión, recubrimiento y moldeo por soplado, entre otros, el flujo extensional es muy importante. Sin embargo, la medición precisa de las propiedades extensionales de los materiales es complicada. En el grupo de Ingeniería de Proceso del CCADET-UNAM se desarrolló un reómetro de orificio para estimar la viscosidad extensional, tomando como base el análisis del flujo de entrada a través de una contracción de perfil semi-hiperbólico y obtener la caída de presión. El manejo y operación del instrumento es de forma manual y tediosa. En la caracterización de los distintos fluidos se requiere realizar los experimentos de manera sistematizada y controlada para obtener resultados confiables y reproducibles. Por ello, en este trabajo se describe el diseño y operación de un sistema para el monitoreo y control de las variables que intervienen en el reómetro extensional de diseño propio. El sistema de monitoreo, registra la temperatura, la presión de entrada, el flujo másico así como el control del flujo de alimentación.

El control del instrumento se realizó por medio de una interfaz que permite establecer: las condiciones de operación, definir los incrementos de la velocidad de rotación de la bomba de alimentación en los intervalos requeridos; monitorear la presión en la contracción, registrar el flujo másico y la temperatura, construir la gráfica con las variables y que se puede observar en tiempo real. Al finalizar cada prueba, se tiene el registro de todos los datos adquiridos durante el experimento a través de una bitácora. Se presentan resultados obtenidos durante las pruebas de implementación, calibración y aplicación del sistema de monitoreo y control propuesto.



## ***INTRODUCCIÓN***

En el presente trabajo se muestra el desarrollo de un sistema para el control y monitoreo de las variables que intervienen en la operación de un reómetro extensional de diseño propio del CCADET-UNAM, así como su implementación, calibración y resultados.

El primer capítulo aborda de manera general algunos conceptos básicos de reología, así como la descripción de reómetros extensionales comerciales. Se incluye la justificación del diseño y desarrollo del sistema de control y monitoreo del instrumento.

En el segundo capítulo se presenta la descripción de cada uno de los elementos que conforman al sistema mecánico y sistema eléctrico/electrónico del reómetro extensional de diseño propio así como las especificaciones de operación en el sistema.

En el tercer capítulo se presenta el protocolo de acciones que realiza el sistema y un diagrama de flujo que permita programar las acciones a realizar en el sistema lógico. Se describen los elementos que componen la interfaz de usuario y la función que realiza cada uno de ellos.

Por último, en el cuarto capítulo se explica cómo se realizó la calibración de los elementos de manera independiente y en conjunto con la interfaz, así como la descripción de los experimentos desarrollados para la comprobación de la operación en rutinas pre-establecidas por un usuario y la generación de un reporte con los datos obtenidos en cada conjunto de experimentos.

## ***ABREVIATURAS***

- $^{\circ}\text{C}$ : grado Celsius
- $Q$ : flujo volumétrico del fluido
- Pa: Pascal
- $T$ : tiempo
- $\dot{\gamma}$ : velocidad de deformación
- $\eta_{\varepsilon}$ : viscosidad extensional
- $\mu$ : viscosidad
- $\sigma$ : esfuerzo cortante
- $\dot{\varepsilon}$ : tasa de deformación elongacional
- $\epsilon_h$ : constante de deformación de Hencky

# ***CAPITULO 1***

## ***ANTECEDENTES***

### **1.1 Reología**

La reología es una parte de la Física que estudia el flujo y la deformación de los materiales sometidos a la acción de fuerzas externas. Su estudio es esencial para varios procesos industriales, incluyendo las de plásticos, pinturas, alimentación, entre otras.

La reología analiza la relación entre el esfuerzo ( $\sigma$ ), la deformación producida ( $\gamma$ ), gradiente de velocidad o velocidad de deformación ( $\frac{d\gamma}{dx} = \dot{\gamma}$ ) y tiempo ( $t$ ) (Maestro et al, 2002).

### **1.2 Viscosidad**

Es el coeficiente de proporcionalidad que existe en la ley de viscosidad de Newton y, dependiendo de si el fluido es newtoniano o no, será una constante o bien tendrá dependencia con la rapidez de corte, respectivamente. Físicamente el significado de la viscosidad es la resistencia que presenta un fluido a ser deformado. Así mismo, tenemos dos tipos de viscosidades:

Viscosidad de corte, que es la resistencia que presenta un fluido, debida a la fricción de las moléculas del mismo. La viscosidad de acuerdo a la Ley de viscosidad de Newton se describe por la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}}$$

$\mu$  = viscosidad [Pa · s]

$\sigma$  = esfuerzo cortante [Pa]

$\dot{\gamma}$  = velocidad de deformación [ $s^{-1}$ ]

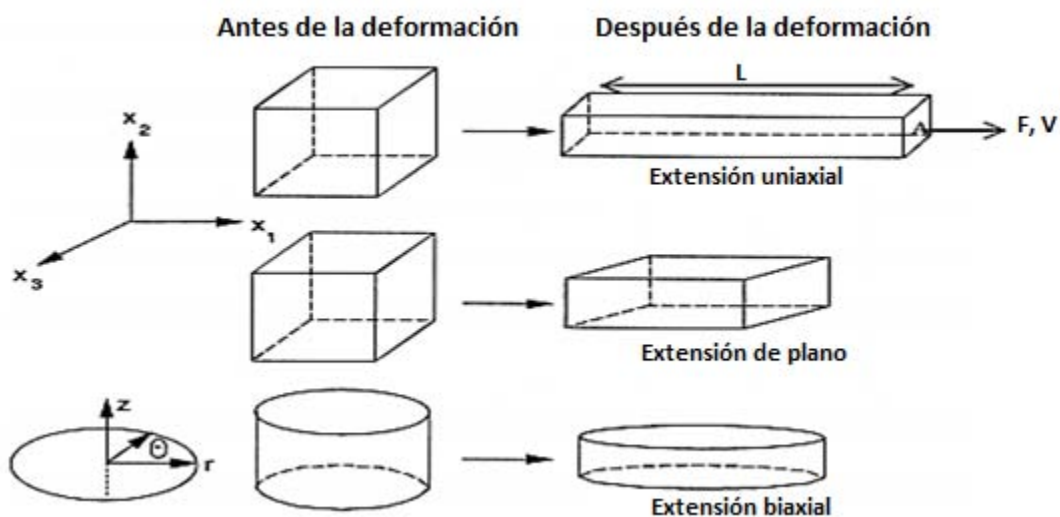
Las unidades de viscosidad son acotadas a las del sistema internacional [Pa · s].

Viscosidad extensional, que es la resistencia que presenta un fluido a la elongación o en su caso, a ser “estirado”.

Existe importancia de medir los flujos extensionales, lo que ha hecho que se desarrollen diversos métodos para estimar la viscosidad extensional. Aún hay poca información disponible por la dificultad de generar flujos puramente extensionales, especialmente para fluidos de viscosidades menores a 1000 Pa·s (Ascanio et al., 2002). Sin embargo, la forma más simple es considerar una deformación uniaxial y un flujo de entrada, es decir que fluye desde un área transversal grande hacia una más pequeña. La reducción en la sección transversal y la condición de continuidad hacen que el flujo se acelere y desacelere, disipando energía, la cual se expresa como caída de presión. La caída de presión, en función del flujo volumétrico, es utilizada para estimar la viscosidad extensional.

### 1.3 Flujo extensional uniaxial

El flujo extensional que consiste cuando un fluido se somete a un esfuerzo de elongación o compresión normal en una sola dirección y en los ejes restantes se experimenta una contracción, figura 1. Esto ocasiona la alineación de las partículas del fluido como fibras de manera rápida y eficiente (Lubansky et al, 2011).



*Figura 1.* Tipos de flujo extensional.

El reto de estimar la viscosidad extensional es alcanzar un estado estacionario de equilibrio. En 1906, Trouton propuso una ecuación que relaciona la viscosidad extensional con la viscosidad de corte para fluidos newtonianos, la relación obtenida es:

$$\eta_{\varepsilon} = 3\mu$$

donde  $\eta_{\varepsilon}$  representa la viscosidad extensional y  $\mu$  la viscosidad de corte. En el caso de fluidos no newtonianos, el cociente de Trouton relaciona la viscosidad extensional y la de cizalla.

#### 1.4 Reómetros extensionales comerciales

Algunos ejemplos de reómetros extensionales comerciales son:

- El sistema de reología extensional SER 3 el cual puede ser observado en la figura 2 de la empresa *Anton Paar*® y el accesorio extensional universal (UXF), cuya configuración está formada por dos tambores de contra-rotación en los cuales la muestra es fijada, el movimiento giratorio del reómetro es transferido directamente a los tambores que estiran la muestra. El tambor del centro mide la tensión con la mayor precisión posible debido al acoplamiento directo a la transmisión montada en cojinete de aire. Además, cuenta con un *software* que permite obtener la adquisición y visualización de datos experimentales reológicos en extensión y la toma de video del desarrollo del fenómeno extensional con la tecnología de *Ocular digital*.



*Figura 2.* SER de la empresa Anton Paar®

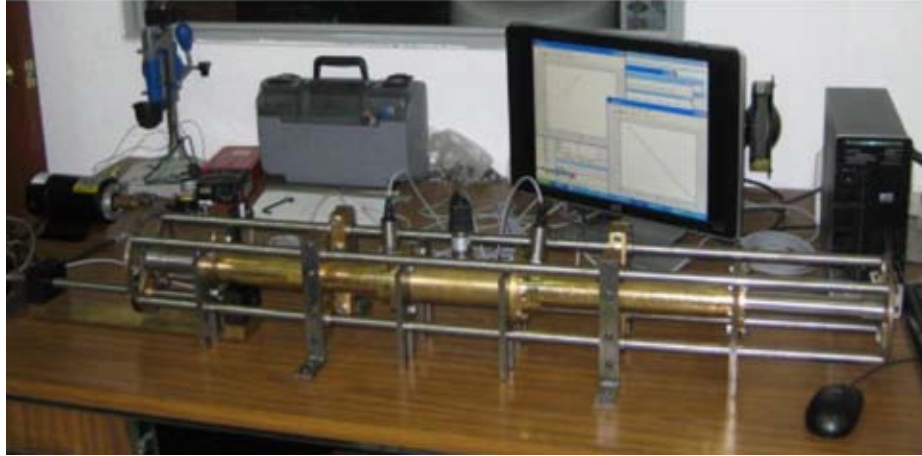
- El reómetro extensional con división capilar HAAKE CaBER 1®, figura 3, provoca un adelgazamiento y la ruptura de un filamento fluido, por medio de un video se analiza el fenómeno y proporciona la información del material: como la viscosidad extensional, tensión superficial, la elasticidad, tiempos de relajación y el tiempo de ruptura del filamento. Los análisis se realizan a través de una interfaz de usuario.



**Figura 3.** HAAKE CaBER 1®

### ***1.5 Reómetro extensional CCADET-UNAM***

En el 2010 se desarrolló un reómetro extensional con contracción simétrica de perfil parabólico, figura 4, para determinar las propiedades reológicas extensionales de fluidos newtonianos y no newtonianos, a diferentes velocidades de deformación. El equipo tiene un sensor de presión instalado en cada cilindro, entrada y salida de la contracción, cerca de la brida de acoplamiento a la contracción, y un tercer sensor instalado en el centro de la contracción, en la sección de menor área de la contracción. Cuenta con dos fotodiodos que están localizados a una distancia entre sí de 250 mm, de tal manera que el tiempo que tarda la estructura para cortar la señal de los fotodiodos es el tiempo de registro de las lecturas de presión. También tiene un codificador de velocidad acoplado a la flecha secundaria del motor con el fin de proporcionar información para el control de su velocidad rotacional. Con la velocidad del motor y el paso del tornillo ACME se estima la velocidad lineal del desplazamiento de los pistones y, así, el flujo volumétrico que pasa por la contracción.



**Figura 4.** Reómetro de orificio

El diseño del sistema de control consta de un módulo de control automático programable (*PAC*, por sus siglas en inglés). El *PAC* cuenta con 4 canales, 16 bits, señal de salida de +10V, 8 ranuras integradas a 400MHz de control en tiempo real y una fuente de potencia de 24DCV. El sistema de adquisición captura los datos de presión y velocidad del motor. Los datos anteriores son procesados para estimar la viscosidad extensional.

Mediante una interfaz gráfica en una computadora personal o en un archivo en formato ASCII (acrónimo inglés de *American Standard Code for Information Interchange*), permite que todos los datos, tales como la tasa de deformación, viscosidad extensional, razón de Trouton, número de datos, etc. sean observados.

Recientemente, se le hicieron algunas modificaciones al reómetro extensional para minimizar los errores sistemáticos y humanos del diseño inicial, que permita llevar a cabo experimentos con una mayor gama de fluidos y velocidades de elongación, y así como simplificar la obtención de resultados y la operación del sistema, figura 5. También se basa en el uso de una contracción semi-hiperbólica y hacer pasar un flujo a velocidad constante.



**Figura 5.** Reómetro de orificio CCADET-UNAM

La determinación de las propiedades extensionales se fundamenta en el análisis de Binding (1989), el cual incluye los efectos inerciales, elongacionales y cortantes sobre flujos convergentes. Este análisis considera que la disipación viscosa es dominante y que la velocidad axial en la superficie de la pared es igual a cero. De esta forma:

$$\eta_e \propto \Delta P \dots a)$$

Así, el cálculo de la viscosidad extensional con el reómetro extensional con bomba de lóbulos está dado en función de la caída de presión experimentada por el fluido al pasar a través de la contracción de modo que la viscosidad extensional efectiva puede ser calculada mediante la siguiente expresión.

$$\eta_e = \frac{-\Delta P}{\dot{\epsilon} \epsilon_h} \dots b)$$

donde

$\dot{\epsilon}$  es la tasa de deformación elongacional

$\epsilon_h$  es la constante de deformación de Hencky

Esta última, la constante de deformación de Hencky, se escribe en función de los parámetros geométricos de la contracción por la que pasa el fluido.

$$\epsilon_h = \ln \frac{A_e}{A_0} = \ln \frac{r_e^2}{r_0^2} \dots c)$$



Para el caso del reómetro extensional desarrollado, las contracciones diseñadas, presentan un perfil semi-hiperbólico que permite producir un flujo con extensión pura y esfuerzos de corte mínimos que pueden ser despreciables.

La viscosidad extensional también depende de la tasa de deformación efectiva, que se define a continuación:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{e^{\varepsilon_h} - 1}{\pi r_0^2 L} Q \dots d)$$

donde

$Q$  es el flujo volumétrico del fluido al pasar por la contracción con ayuda de la bomba de lóbulos.

Si se sustituye la ecuación d) en la ecuación b) se obtiene la relación de la viscosidad extensional en función de la presión y el flujo volumétrico, parámetros que se pueden determinar de forma experimental, (Ascanio et al, 2015).

$$\eta_e = \frac{\pi r_0^2 L}{\varepsilon_h (e^{\varepsilon_h} - 1)} \frac{-\Delta P}{Q} \dots e)$$

## ***JUSTIFICACIÓN***

Este reómetro monitorea la presión en la contracción, esto a través de una interfaz que controla un actuador lineal que provoca el flujo másico y la velocidad lineal del flujo volumétrico, con una tarjeta de adquisición de datos *National Instruments* NICR10-9014® con conexión *Ethernet*, mientras se almacenan los datos de presión en una hoja de datos. Este procedimiento requiere la asistencia de 2 a 3 usuarios, con el manejo manual de la bomba de lóbulos y la utilización del software y componentes electrónicos del reómetro de orificio de pistones (García, 2013) para la obtención y almacenamiento de datos de voltaje, que son traducidos a datos de presión. Se propone desarrollar un sistema integral de monitoreo de la presión a la entrada de la contracción, la temperatura en el cono de almacenamiento y a la salida de la contracción, el flujo volumétrico y el control de velocidad de rotación de una bomba de lóbulos para la alimentación del fluido a la contracción. Este sistema reduce el número de pasos para llevar a cabo un experimento y el número de personas involucradas en la operación del equipo. Además, permite reducir errores de medición durante el desarrollo del experimento y hace posible la repetitividad sistematizada de las condiciones de operación, así como la caracterización de los distintos fluidos en las mismas condiciones experimentales.

## ***OBJETIVOS***

### *General*

- Diseñar e implementar de un sistema mecatrónico para el monitoreo y control de un reómetro extensional de contracción semi-hiperbólica.

### *Específicos*

- Establecer las variables de control y monitoreo del reómetro.
- Desarrollar el algoritmo de control de velocidad de la bomba de lóbulos en la interfaz de usuario.
- Establecer la comunicación entre el instrumento y la interfaz para el usuario.
- Caracterizar la operación del instrumento, adquisición de datos y generar una bitácora experimental.

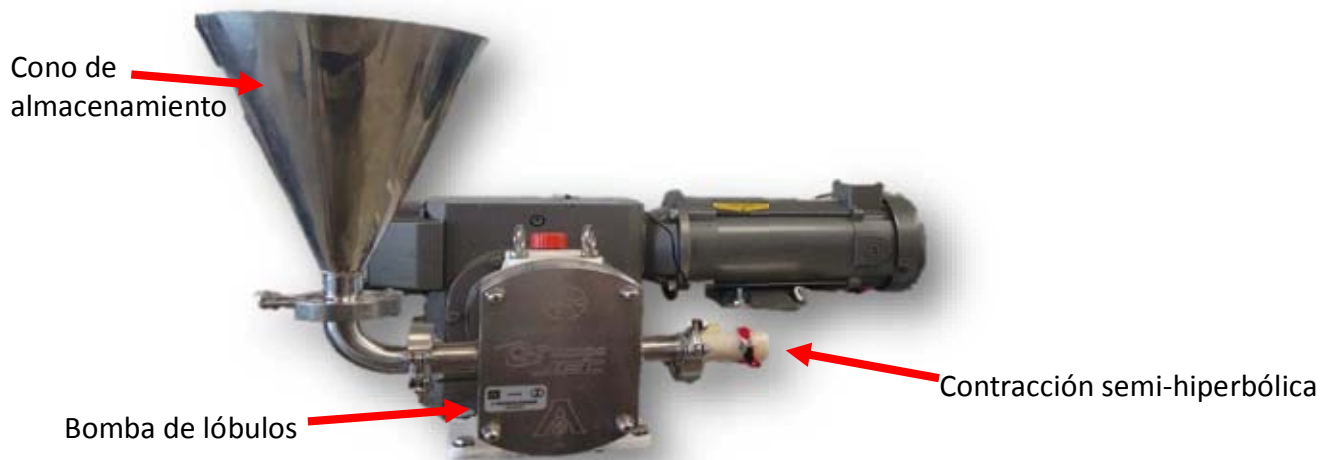
## **CAPITULO 2**

### **DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA**

En este capítulo se realiza una breve descripción del sistema mecánico y el eléctrico/electrónico.

#### **2.1 Sistema mecánico**

El sistema mecánico, figura 6, está conformado de un cono de almacenamiento del fluido de prueba, un codo de unión, tres pinzas de conexión tipo Clamp, tres anillos de sellado, una bomba de lóbulos, dos contracciones semi-hiperbólicas.



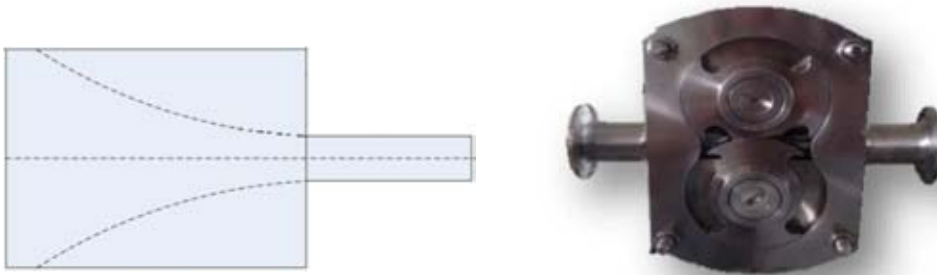
**Figura 6.** Reómetro extensional de orificio

#### **- Contracción semi-hiperbólica**

Se cuenta con dos contracciones semi-hiperbólicas, figura 7, una es de reducción de salida de 1:8 y la otra de 1:4, respecto al área de entrada de 0.0254 m de diámetro. Están fabricadas de un polímero RGD525 de alta resistencia que fueron manufacturadas por sistemas de manufactura aditiva del Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva, Digitalización 3D y Tomografía Computarizada (MaDIT). Estas contracciones cuentan en uno de sus extremos con una conexión tipo Clamp de 0.0508 m y de manera transversal una entrada de ¼ plg 18 NPT para la instalación de los transductores de presión.

- *Bomba de lóbulos*

La bomba que genera el flujo de alimentación a la contracción es de lóbulos grado alimenticio, figura 8, modelo ZL-110-SS-M, genera un caudal de hasta 33.4 l/s, con una presión máxima de 2000 kPa; puede desplazar fluidos de una viscosidad de hasta 1000 Pa·s y temperatura de 120°C. Las partes en contacto con el fluido son de acero inoxidable 316 L. La potencia máxima de la bomba es de 0.6 kW a una velocidad angular de 35 rpm.



**Figura 7.** Contracción semi-hiperbólica    **Figura 8.** Bomba de lóbulos

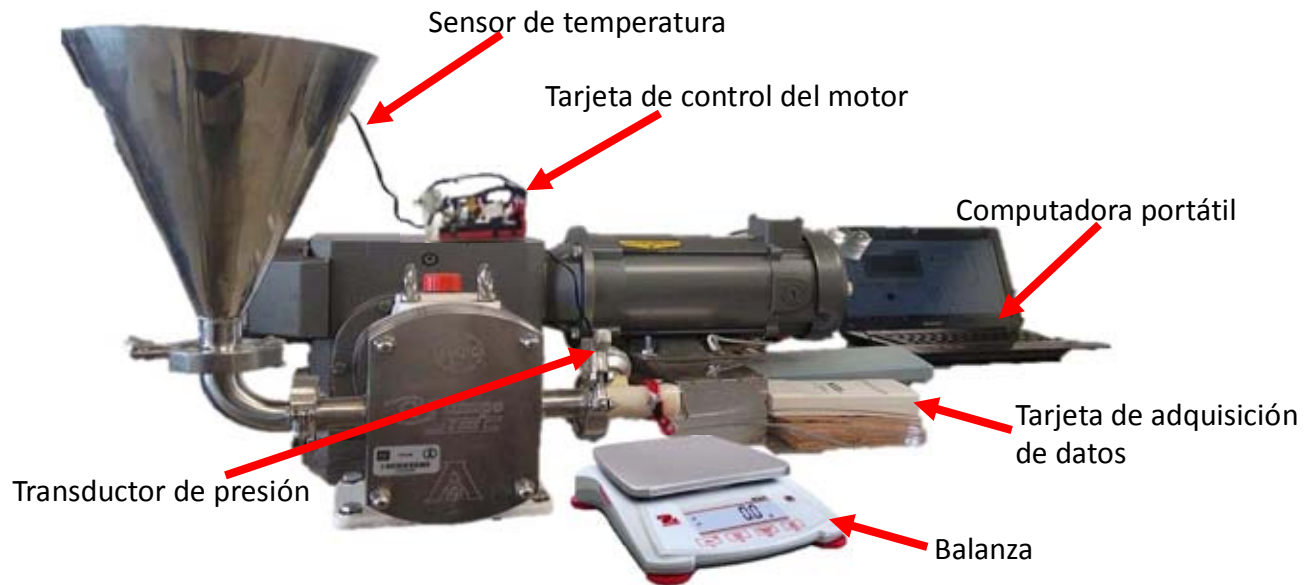
- *El cono de almacenamiento*

El cono de almacenamiento está fabricado de acero inoxidable 304, figura 9, con una capacidad de 2 l, una altura de 0.3 m y un ángulo de 75° con conexión tipo clamp de 0.0508 m de diámetro en su base.



**Figura 9.** Cono de almacenamiento

## 2.2 Sistema eléctrico/electrónico



**Figura 10.** Reómetro de orificio con sistema electrónico

El sistema eléctrico-electrónico, figura 10, permite llevar a cabo la operación del actuador (motor que acciona a la bomba de lóbulos), sensores de temperatura, transductores de presión, balanza, así como la interpretación y acondicionamiento de las señales de entrada/salida de los elementos.

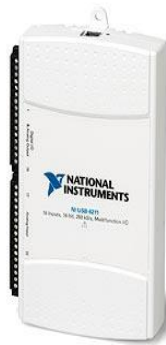
El sistema está conformado por una tarjeta de adquisición de datos, un controlador del motorreductor, sensores de presión y temperatura, balanza, acondicionamiento de señales y una fuente de suministro de energía. Cada uno de estos elementos desarrolla una parte esencial para la adquisición y escritura de señales que permiten controlar los movimientos del sistema mecánico y el registro de las variables. El sistema se considera eléctrico/electrónico porque trabaja con voltajes de corriente alterna y directa para suministrar potencia eléctrica y transferir información.

- *Tarjeta de adquisición NI DAQ 6211®*

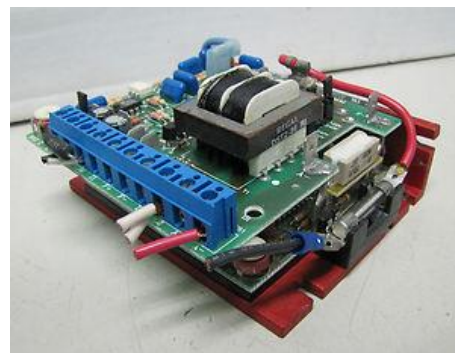
El módulo NI USB-6211 de *National Instruments* ®, figura 11, es un módulo de adquisición de datos (DAQ, por sus siglas en inglés) multifunción USB de la Serie M energizado por bus y optimizado para una precisión superior a velocidades de muestreo más altas. Ofrece 16 entradas analógicas, velocidad de muestreo de 250 kS/s, dos salidas analógicas, cuatro líneas de entrada digital, cuatro líneas de salida digital, cuatro rangos de entrada programable ( $\pm 0.2$  V a  $\pm 10$  V) por canal, disparo digital y dos contadores/temporizadores.

- *Tarjeta de control de velocidad*

La bomba de lóbulos es accionada por un motorreductor con una relación 60:1. La bomba se acciona y se controla de manera manual y automática por una tarjeta de control de velocidad KBMM-125 de *KB Electronics* y un driver KBMMSI-6 (9444). Se alimenta de 115 V de CA y proporciona un voltaje de salida de 90V CD, corriente máxima de 8 A y potencia máxima de 0.6 kW. La tarjeta KBMM 9444 aislador de señal (SI-6) KBIC® estándar y la tarjeta KBMM™ controla a una entrada aislada. Mediante el uso de resistencias externas, la señal de entrada se puede cambiar a 0-100VDC, 0-200VDC y de 4-20 mA. La tensión de salida es 0-10VCC que puede ser reescalada a través de los potenciómetros mínimo y máximo incorporadas. Ver figura 12.



**Figura 11.** NI DAQ6211



**Figura 12.** Tarjeta Kbm- 125 con Kbm SI-6

- *Termistor NTC 10K*

Los sensores de temperatura MF58 modelo NTC-JY011528, figura 13, son de tipo termistor NTC (con una resistencia de 10 k $\Omega$ , la cual tiene 24.8 °C como temperatura de referencia, 1% de exactitud,  $\beta$  3470 donde  $\beta$  es una constante con una tolerancia de  $\pm 10\%$ .), impermeable, son utilizados para estimar la temperatura de los fluidos. Tiene un intervalo de medición de -20 a 120 °C.

*Transductores de Presión*

Los transductores de presión Cole Parmer® modelo 68075, figura 14, cuentan con cuerpo de acero inoxidable 316L, con un intervalo de operación de 0 a 34.5 kPa y de 0 a 172.4 kPa, con conexión ¼ a plg 18 NPT. Se alimentan de 12 a 28 V y proporciona un voltaje de salida de 0.5 a 5.5 V.



**Figura 13.** Termistor NTC



**Figura 14.** Transductor de presión

- *Balanza*

La balanza SCOUT® SPX 6201, figura 15, tiene una capacidad máxima de 6,200 g, con lectura mínima de 0.1 g, estabilidad de 1 s, dimensiones de 54mm x 224 mm x 202 mm, acero inoxidable, adaptador de CA o 4 baterías AAA y comunicación USB ®.



**Figura 15.** Balanza SCOUT® SPX 6201 e interfaz USB

- *Módulo de relevadores*

Este módulo es utilizado para la protección de los transductores de presión; se trata de un módulo de 2 relés (o relays) que funcionan a 5 V capaces de manejar cargas de hasta 10 A en 250 V, convenientemente aislados mediante optocopladores de las entradas, las que cuentan con leds individuales que sirven como indicadores de estado, figura 16.



**Figura 16.** Módulo de relevadores



## ***CAPITULO 3***

### ***INTERFAZ DE CONTROL Y MONITOREO***

En este capítulo se describirá el desarrollo de la interfaz para el control y monitoreo de las variables que intervienen en el funcionamiento del reómetro extensional de diseño propio (CCADET-UNAM).

#### ***3.1 Variables de control y monitoreo***

Las variables de control son aquellas permiten limitar y corregir el comportamiento de un sistema en uno deseado. La variable controlada es la cantidad, o condición a manipular, que es medida o estimada, mientras que la variable manipulada es la cantidad o condición que es variada por el controlador de tal manera que afecte el valor de la variable controlada. (García, 2016).

##### *- Velocidad de rotación*

La velocidad de rotación se refiere a la velocidad de la bomba de lóbulos, la cual es controlada por medio de un suministro de voltaje al motor que al que está conectado, esto a través de la comunicación de la interfaz y la tarjeta DAQ. La tarjeta DAQ a través de una salida analógica proporciona el voltaje al motor, de tal manera que hay una relación entre el suministro de voltaje con la velocidad de rotación de la bomba de lóbulos. La variación de la velocidad de rotación se realiza de forma automática, de acuerdo a la programación de la interfaz; el cambio de la velocidad da un inicio desde 5 rpm hasta 29 rpm con un incremento de 1.5 rpm, por cada cierto periodo de tiempo establecido por el usuario.

El reómetro está conformado por instrumentos que miden ciertas variables y que son capaces de transmitir información a la tarjeta de adquisición de datos, estas son las variables que se declaran de monitoreo. A continuación se describen brevemente cada una de ellas.

- *Presión*

Los transductores de presión son capaces de convertir la presión manométrica en una señal eléctrica analógica, dando así una medición capaz de ser interpretada por la tarjeta DAQ.

La caída de presión se registra a la entrada de la contracción con transductores piezoeléctricos con un intervalo de 0 a 34.5 kPa y de 0 a 172.4 kPa. Esta presión es monitoreada en tiempo real, con lo cual el usuario es capaz de visualizar si el fluido tiene el comportamiento esperado.

- *Temperatura*

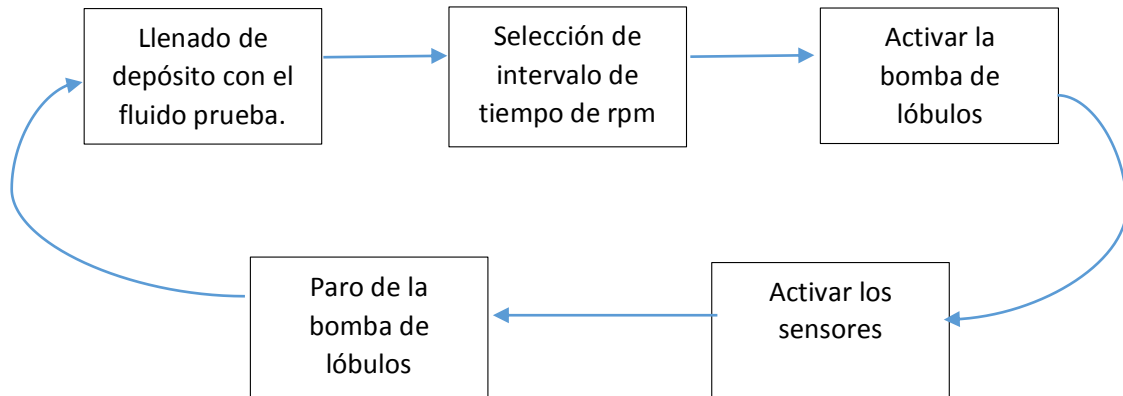
Los sensores de temperatura instalados son termistores NTC (Negative Temperature Coefficient) que se basan en la variación de resistividad que se presenta en respuesta a la temperatura. Implementado un acondicionamiento de señales de la tarjeta DAQ es posible medir los cambios de temperatura como variación de voltaje. De esta manera el registro de temperatura se realiza al colocar un sensor en el cono de almacenamiento (temperatura de entrada) y otro a la salida de la contracción (temperatura de salida). Con lo que el usuario es capaz de visualizar si existe aumento o disminución de temperatura en el fluido durante el experimento.

- *Flujo másico*

El flujo másico se estima por medio de una balanza, así el sistema es capaz de realizar un reporte de las mediciones que esta realiza y convirtiendo las lecturas en un archivo de datos. El flujo másico del fluido se estima al colocar la balanza a la salida de la contracción.

### 3.2 Diagrama de bloques y diagrama de flujo

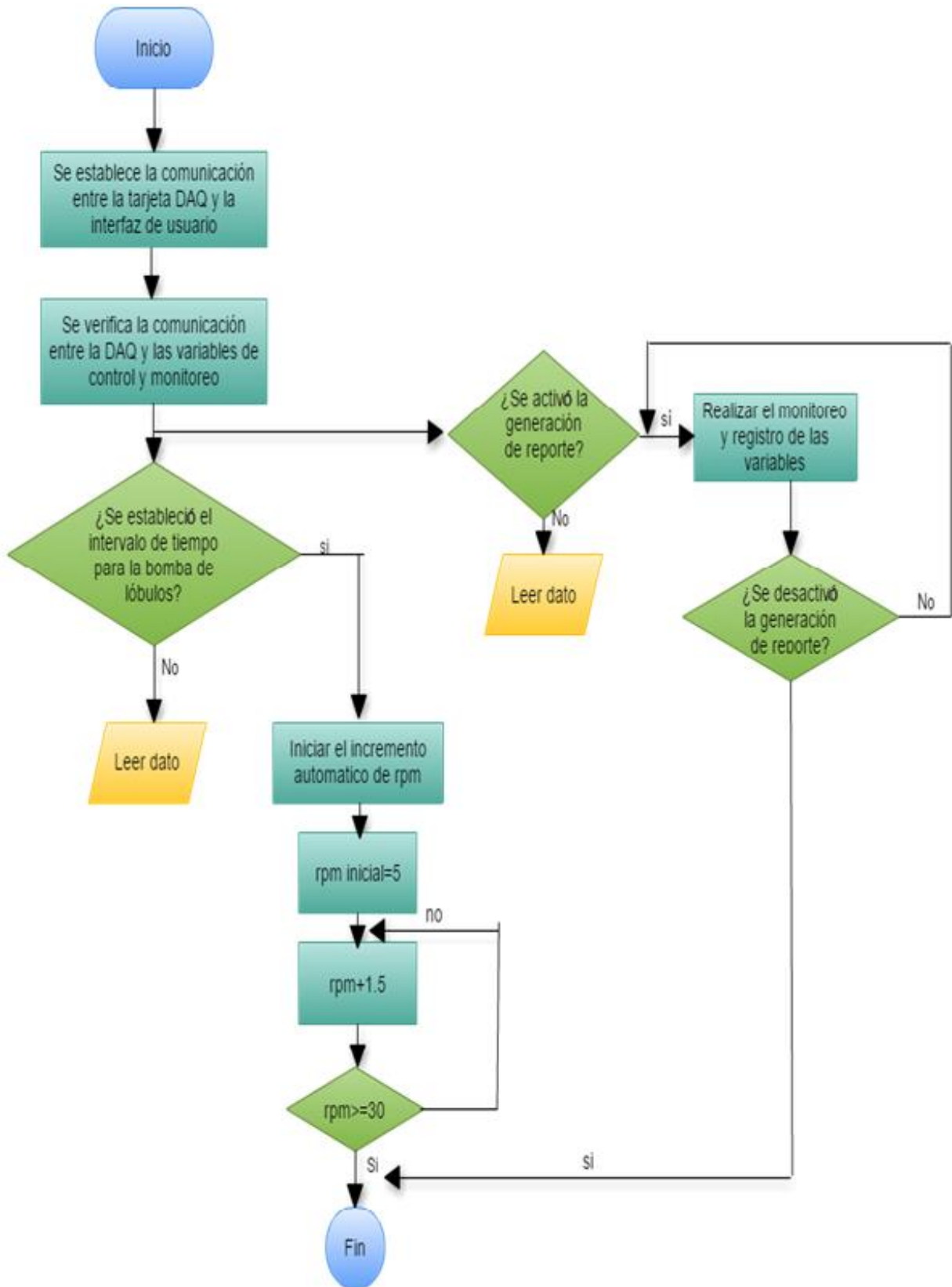
En la figura 17 se muestra un diagrama a bloques que representa las acciones que el sistema realiza para llevar a cabo la experimentación.



**Figura 17.** Diagrama a bloques de las acciones del sistema

El sistema controla los incrementos de velocidad de rotación de la bomba en el intervalo de tiempo establecido o deseado. De manera simultánea, se monitorean los datos que proporcionan los transductores de presión y temperatura, así como el flujo de masa a la salida de la contracción. Es posible observar las gráficas de presión vs tiempo, temperatura vs tiempo y masa vs tiempo. El sistema está controlado de tal manera que opera con incrementos de la velocidad de rotación de la bomba en intervalos de tiempo requeridos; monitorea presión en la contracción, el flujo másico y la temperatura, se registran los datos y construye una gráfica por medio de la interfaz que se puede observar en tiempo real. Al finalizar cada prueba, se puede tener el registro de todos los datos adquiridos durante el experimento a través de una bitácora.

El diagrama de flujo que se observa en la figura 18 es una representación gráfica de las actividades que se van a realizar en el reómetro. En él se da una breve descripción de cada actividad en el proceso, mostrando la secuencia de estas, así como las decisiones a tomar en determinados casos.



**Figura 18.** Diagrama de flujo del sistema

### **3.3 Interfaz**

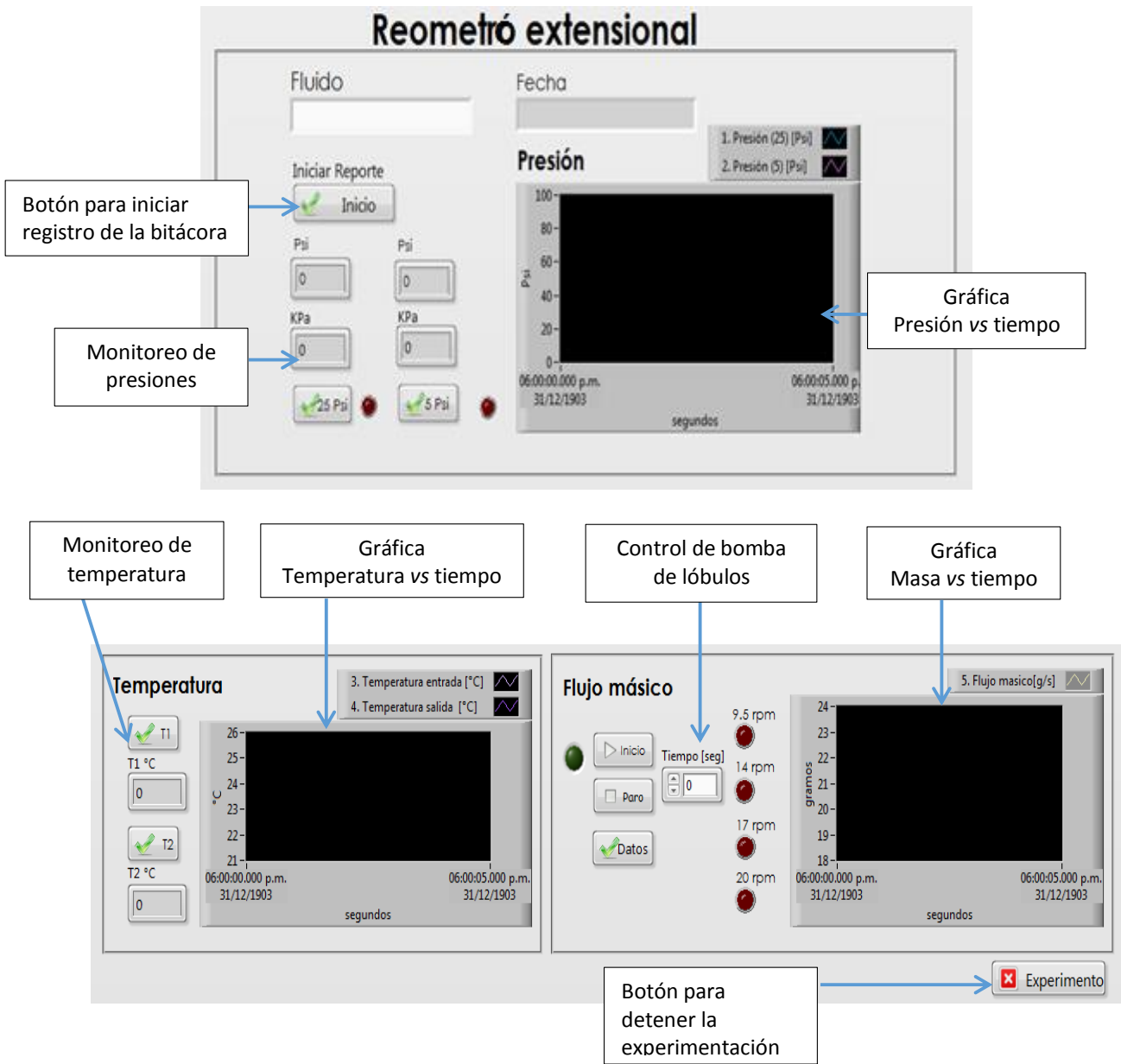
El software LabVIEW® (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) de National Instruments es un lenguaje de programación gráfico para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control. Su particularidad es que se basa en el lenguaje G es decir; que se basa en la programación por gráficos. Con este software se puede visualizar los datos adquiridos en las pruebas, se puede desarrollar interfaces de usuario rápidamente para visualización de datos y entrada de comandos del operador.

Se propone una interfaz, figura 19, para que el usuario establezca las condiciones de operación, observe en pantalla el comportamiento de la presión, temperatura y flujo másico en tiempo real. Además de adquirir y almacenar los datos experimentales al generar una bitácora que permite el análisis y la estimación de la viscosidad extensional de fluidos newtonianos y no newtonianos.

En la figura 19 se puede observar en la parte superior izquierda los indicadores numéricos de presión en la entrada de la contracción, y los indicadores visuales que alertan al usuario cuando un transductor de presión sobre pasa su capacidad de lectura. A la derecha se muestra una ventana que permite observar el comportamiento de la presión durante el desarrollo del experimento, la cual puede ser habilitada o deshabilitada según el usuario por medio de los botones virtuales. Se incorpora un botón de inicio de reporte (bitácora) que al ser accionado exporta los datos del experimento a una hoja de datos.

En la parte inferior izquierda de la interfaz se realiza el monitoreo de la temperatura que cuenta con una ventana para observar su desarrollo durante el experimento y de indicadores numéricos. Un par de botones virtuales permiten desactivar o activar las gráficas de las temperaturas, como es el caso de la presión.

En la parte inferior derecha se puede observar que, para la bomba de lóbulos, hay un control numérico, de tal manera que el usuario puede determinar el intervalo de tiempo que desea entre cada incremento de velocidad rotacional. Cuenta con indicadores visuales que se accionan al llegar a las revoluciones por minuto especificadas y se incorpora una ventana en la que visualiza una gráfica de flujo másico vs tiempo. Por último, se tiene un botón para detener la experimentación en cualquier momento deseado por el usuario, con lo que se desactivan todos los actuadores, sensores y transductores.



**Figura 19.** Interfaz de control y monitoreo desarrollada en LabVIEW®

## ***CAPITULO 4***

### ***PRUEBAS Y RESULTADOS***

En este capítulo se describirá la metodología que se empleó para la caracterización y pruebas del reómetro, lo cual se realizó en etapas. La primera fue la caracterización de los elementos y la segunda fue pruebas de operación.

#### ***4.1 Caracterización***

Los elementos que fueron caracterizados para el sistema del reómetro fueron:

- *Bomba de lóbulos*
- *Transductor de presión*
- *Sensor de temperatura*
- *Balanza*

El primer elemento que se caracterizó fue la bomba de lóbulos. De inicio, la bomba de lóbulos se caracterizó en modo manual con ayuda de la Tarjeta Kbmm- 125. Se suministró voltaje al motor de la bomba de lóbulos y se obtuvieron los datos mostrados en la tabla 1.

**Tabla 1.** *Velocidad de rotación de la bomba de lóbulos vs voltaje suministrado.*

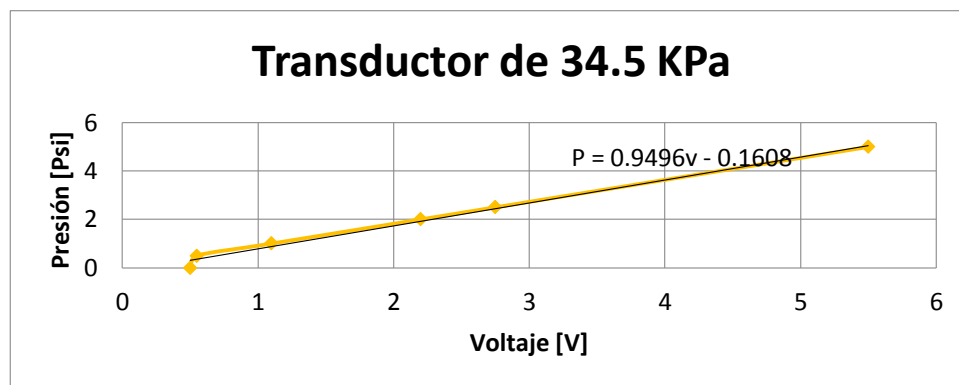
<b>rpm</b>	<b>Voltaje [v]</b>
<b>0</b>	<b>0</b>
<b>5</b>	<b>1.39</b>
<b>10</b>	<b>2.8</b>
<b>15</b>	<b>4.2</b>
<b>20</b>	<b>5.6</b>
<b>25</b>	<b>7</b>
<b>29</b>	<b>8.4</b>

Después de obtener los datos de la tabla 1, se estableció la comunicación entre la bomba de lóbulos con la computadora a través de la tarjeta de adquisición de datos y la tarjeta

Kbmm-125, para controlar la velocidad a través de una interfaz. En dicha interfaz de comunicación se logró programar una serie de niveles que son equivalentes a un voltaje de salida. Logrando la comunicación, para la bomba de lóbulos se establecieron los intervalos de operación de 5 a 29 rpm y los incrementos de 1.5 rpm en un tiempo deseado. Con base en estos datos se amplificó la salida analógica de la tarjeta *DAQ* (ver anexo 1) y se programó en el software *LabVIEW®* la ecuación característica. Así, la bomba de lóbulos realizará los incrementos de rpm's de acuerdo al nivel y el tiempo deseados de forma automática.

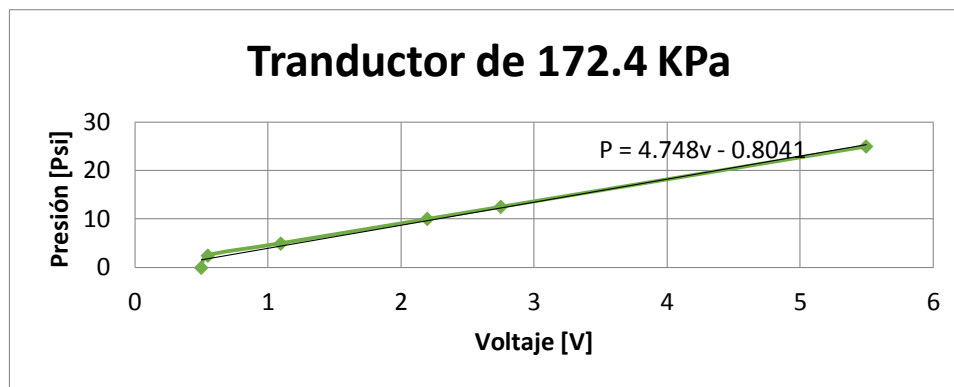
- *Transductor de presión*

Los siguientes elementos que se caracterizaron fueron los transductores de presión, obteniendo una relación de voltaje y presión de la cual se obtuvo una ecuación. En la caracterización del transductor de presión se utilizó una compresora de aire, en la línea de salida del compresor se instaló el transductor y un sensor con indicador FESTO (modelo SDE1-D10-G2-HQ4-C-PU-M8). Se registraron los valores obtenidos del sensor digital y con ayuda de la tarjeta *DAQ* se obtuvo el voltaje de respuesta del transductor. Obteniendo así una curva característica y de esta la ecuación de presión con relación al voltaje de cada transductor que se implementa en la interfaz de usuario, figura 20.



a)





b)

**Figura 20.** Curvas características de los transductores de presión.

a) transductor de 34.5 kPa b) transductor de 172.4 kPa

Una vez establecidas las ecuaciones para los transductores, se desarrolló una interfaz en la cual se puede visualizar de manera gráfica y con indicadores numéricos el valor equivalente a la señal que está registrando el transductor de acuerdo a las ecuaciones. En esta etapa se añadió la función seguridad para desactivar los transductores cuando su voltaje de excitación sobrepase el valor de 5.5 V, auxiliados del módulo de relevadores descrito anteriormente.

- *Sensor de temperatura*

El sensor de temperatura se caracterizó haciendo uso después de que se obtuvo una ecuación para poder obtener una relación de voltaje con la temperatura (Anexo 2), la cual fue implementada en la interfaz.

Una vez implementada la ecuación en la interfaz junto con el divisor de voltaje, se utilizó una sonda termopar tipo K, la cual es un accesorio del multímetro 80 Series V de FLUKE, junto con el termistor NTC, para que en diversos fluidos a diferentes temperaturas fueran comparados los valores registrados (ver tabla 2), obteniendo de esta manera valores semejantes; siendo de esta manera válida la ecuación del termistor.

**Tabla 2.** Comparación de termómetros.

<b>Termopar K [°C]</b>	<b>Termistor NTC [°C]</b>
24.1	24.12
23.9	24.06
23.7	24.06
23.8	24
24	24

- *Balanza*

La balanza se caracterizó con la implementación de diversas masas y se buscó que al terminar el experimento se generara una bitácora.

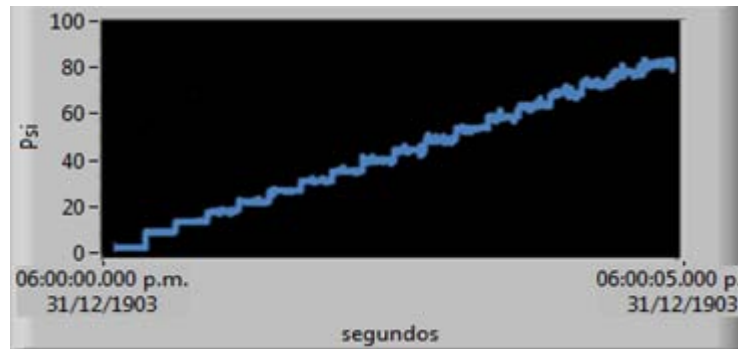
Para el registro del flujo másico se realizó la calibración y programación en la balanza para obtener un registro cada segundo. Finalmente se diseñó una interfaz que fuera capaz de extraer es datos y realizar una bitácora.

#### **4.2 Pruebas de operación**

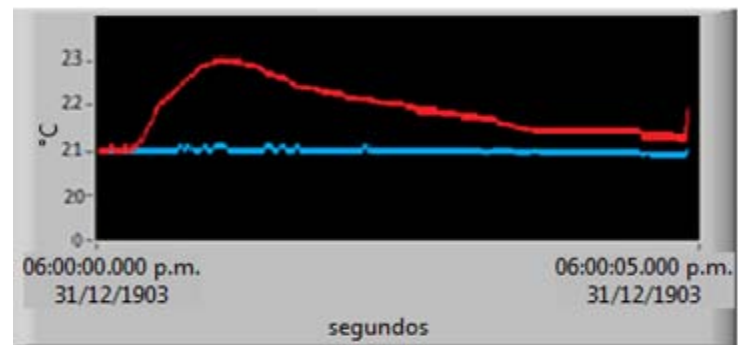
Posteriormente se implementaron todos los elementos en una sola interfaz, y se realizaron pruebas que consistieron en la caracterización de fluidos a través de la contracción y con los datos obtenidos se logró estimar las viscosidades de extensión de diferentes fluidos para asegurar el funcionamiento correcto del sistema de monitoreo y control.

La operación en conjunto de todos los elementos del sistema del reómetro y la interfaz de usuario se llevó a cabo con fluidos newtonianos y no newtonianos. Como fluido newtoniano se utilizó la Glicerina con una viscosidad de 0.67 Pa.s y una densidad de 1270 kg.m<sup>-3</sup> y un Polietilenglicol 50-50 %, diluido en agua y en porcentaje en peso, con una viscosidad de 0.06 Pa.s y una densidad de 1065 kg.m<sup>-3</sup>. Los fluidos no newtonianos fueron: 60% glicerina, 40% agua, 0.5% CMC (carboximetilcelulosa) y otro con 70% glicerina, 30% agua, 2% CMC.

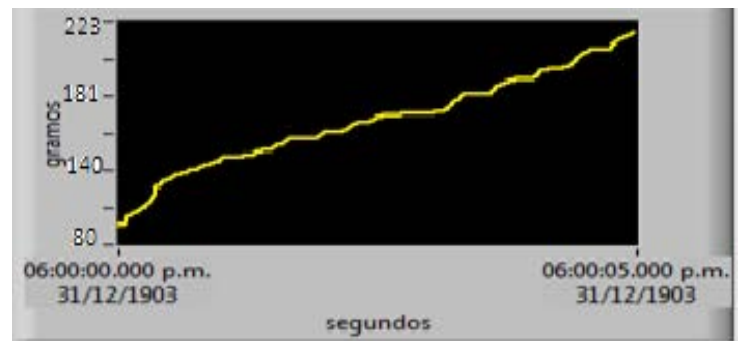
En la figura 21 se pueden observar las gráficas que se desarrollan durante el experimento con la Glicerina 50-50% en ellas se observa el comportamiento de la presión, temperatura y flujo másico.



a)



b)



c)

**Figura 21.** Gráficas registradas durante la experimentación con glicerina. a) Monitoreo de la presión. b) Monitoreo de la temperatura. c) Monitoreo de la masa.

En la figura 21a se observa como la presión aumenta conforme la velocidad de alimentación aumenta, este comportamiento expresa que la presión es directamente proporcional al aumento del flujo volumétrico, se verifica que el sensor y la interfaz de usuario operan de manera correcta y permiten monitorear el fenómeno. En la figura 21b, se puede observar que el cambio de temperatura a la entrada (grafica azul) y a la salida (grafica roja) de la contracción, presentan una mínima diferencia, es decir, el fluido no sufre cambios de temperatura por efecto de la bomba o la contracción, se verifica que la operación de los sensores y la interfaz es correcta. En la figura 21c se observa el aumento del flujo másico conforme se desarrolla el experimento y se verifica la correcta operación entre la balanza y la interfaz.

Al finalizar el experimento se generó un reporte en una hoja de datos donde la presión y temperatura fueron registrados dos datos por segundo, figura 22, y el flujo másico un dato por segundo.

En la figura 22a se puede observar la primera hoja donde se indica el número de datos, la fecha, nombre del fluido y el nombre de cada variable monitoreada. En la figura 22b se observa la segunda hoja donde se visualizan 5 columnas con los datos adquiridos durante el experimento y dos columnas donde una es la numeración de los datos adquiridos y otra proporciona la fecha y hora en la que el dato fue registrado.

1	Root Name	Title	Author	Data/Time	Groups	Description					
2	Monitoreo de reometro extensional_001.tdms		alien		1						
3											
4	Group	Channels	Description	Columns							
5	glicerina	5	One								
6											
7	Untitled										
8	Channel	Datatype	Unit	Length	Minimum	Maximum	Description	NI_ChannelName	NI_ExpRelativeTime	NI_ExpStartTimeStamp	NI_ExpTimeStamp
9	Time	DT_DATE	s	523							
10	1. Presión (25) [kPa]	DT_DOUBLE		523			1. Presión (25) [kPa]		0	31/12/1903 06:00:00,000 PM	15/02/2017 12:46:05,439 AM t
11	2. Presión (5) [kPa]	DT_DOUBLE		523			2. Presión (5) [kPa]		0	31/12/1903 06:00:00,000 PM	15/02/2017 12:46:05,439 AM t
12	3. Temperatura entrada [°C]	DT_DOUBLE		523			3. Temperatura entrada [°C]		0	31/12/1903 06:00:00,000 PM	15/02/2017 12:46:05,441 AM t
13	4. Temperatura salida [°C]	DT_DOUBLE		523			4. Temperatura salida [°C]		0	31/12/1903 06:00:00,000 PM	15/02/2017 12:46:05,441 AM t
14	4. Flujo masico [g/s]	DT_DOUBLE		523			4. Flujo masico [g/s]		0	31/12/1903 06:00:00,000 PM	31/12/1903 06:00:00,000 PM
15	Implicit	Start	Interval	Length							
16	Time	0	1	523							

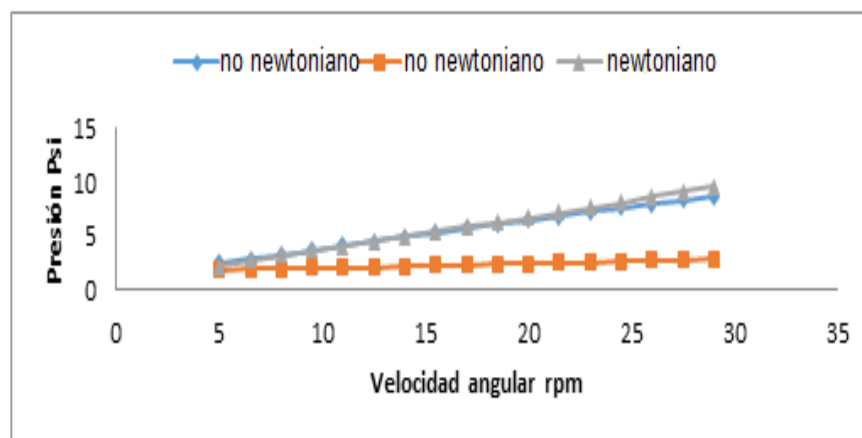
a)

1	Time	Time*	1. Presión (25) [KPa]	2. Presión (5) [KPa]	3. Temperatura entrada [°C]	4. Temperatura salida [°C]	5. Flujo masico [g/s]
2	20/10/2016 01:36:31.485 p.m.	0	10.89156537		17.52044086	17.40142487	18,26487037
3	20/10/2016 01:36:32.020 p.m.	1	10.89156537		17.06128415	17.57144328	18,26487037
4	20/10/2016 01:36:32.549 p.m.	2	10.89156537		16.42584836	17.59127688	18,26487037
5	20/10/2016 01:36:33.077 p.m.	3	10.88079795		17.29656421	17.43543099	18,26487037
6	20/10/2016 01:36:33.603 p.m.	4	10.89156537		16.82591983	17.31640373	18,26487037
7	20/10/2016 01:36:34.132 p.m.	5	10.89156537		17.51477377	17.48077053	18,26487037
8	20/10/2016 01:36:34.658 p.m.	6	10.90233278		17.76976417	17.50910664	18,26487037
9	20/10/2016 01:36:35.185 p.m.	7	10.90233278		17.08963532	17.12649004	18,26487037
10	20/10/2016 01:36:35.714 p.m.	8	10.87003053		16.84010106	17.54027543	18,26487037
11	20/10/2016 01:36:36.241 p.m.	9	10.88079795		16.70961982	17.44109855	18,26487037
12	20/10/2016 01:36:36.769 p.m.	10	10.89156537		16.2753776	17.54027543	20,03435435
13	20/10/2016 01:36:37.297 p.m.	11	10.88079795		17.58561018	17.53177495	21,00869063
14	20/10/2016 01:36:37.824 p.m.	12	10.90233278		16.59613132	17.37875339	21,00869063
15	20/10/2016 01:36:38.349 p.m.	13	10.84849569		17.39292313	17.54877585	21,00869063
16	20/10/2016 01:36:38.877 p.m.	14	10.9131002		16.68976117	17.30506692	21,00869063
17	20/10/2016 01:36:39.405 p.m.	15	10.89156537		17.42409576	17.29656421	21,00869063
18	20/10/2016 01:36:39.932 p.m.	16	10.88079795		16.43720253	17.58277681	21,00869063
19	20/10/2016 01:36:40.459 p.m.	17	10.85926311		17.09247037	17.04427287	21,00869063

b)

**Figura 22.** Ejemplo de reporte generado durante la experimentación con glicerina

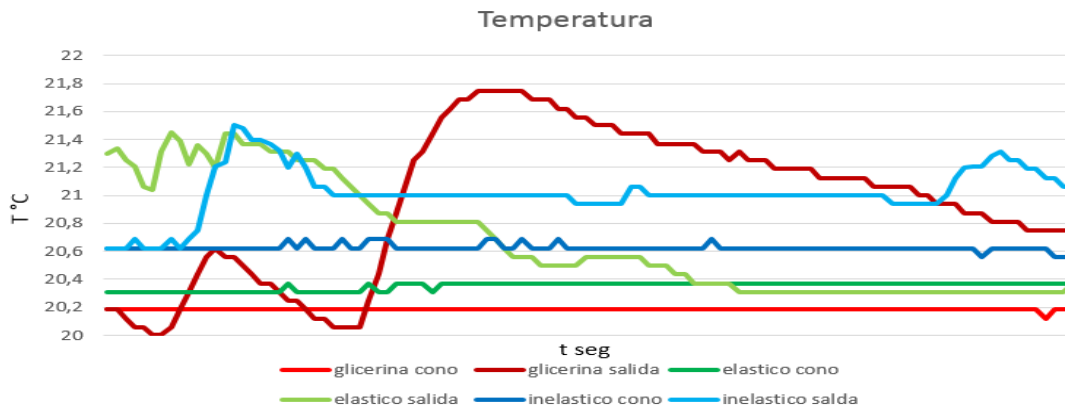
De fluidos modelos se realizaron diversas pruebas, obteniendo datos que son representados en las gráficas posteriores para analizar el comportamiento de dichos fluidos.



**Figura 23.** Promedio de presiones de los fluidos con respecto al rpm de la bomba

En la gráfica de la figura 23, de la presión vs velocidad angular, se puede apreciar que a medida que las rpm aumentan, la presión registrada al final de la contracción aumenta, es decir, que existe una relación directamente proporcional de la presión con la velocidad angular y esto se puede apreciar mejor en los resultados de la glicerina y el elástico.

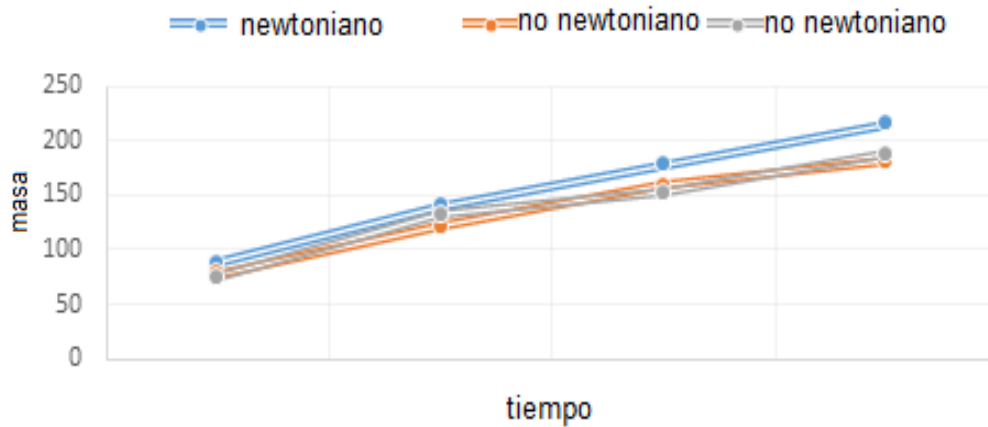
Las gráficas de la figura 24 se muestran la temperatura en el cono de almacenamiento y a la salida de la contracción, de los fluidos modelo, en la que se puede descartar, por análisis visual, que los fluidos no sufren cambios fisicoquímicos debidos al leve aumento de la temperatura en la bomba o la contracción.



**Figura 24.** Promedio de temperaturas

Los datos obtenidos del flujo másico, son utilizados para transformarlos a flujo volumétrico con base a la densidad de los fluidos prueba.

En la figura 25 se visualiza el flujo másico de los fluidos muestra donde se puede notar el incremento de masa conforme transcurre el tiempo.



**Figura 25.** Flujo másico obtenido de los fluidos muestra

## **CONCLUSIONES**

Se implementó un sistema de control y monitoreo por medio de una interfaz de usuario que permite la adquisición de datos de presión, temperatura y masa. La operación del reómetro se lleva a cabo por una sola persona que preestablece los intervalos de tiempo deseados para el incremento de la velocidad rotacional de la bomba de lóbulos.

El sistema de control permite realizar una serie de experimentos sistemáticos y reproducibles bajo las mismas condiciones de operación que garanticen el duplicado o triplicado de los experimentos.

El sistema de control y monitoreo reduce la intervención del usuario durante la experimentación, limitándolo a la verificación del comportamiento de las variables que se monitorean en tiempo real y el abastecimiento del fluido. Al finalizar los experimentos, el usuario exporta una hoja de datos para realizar el análisis reológico correspondiente.

## **TRABAJO A FUTURO**

Se propone implementar un sistema de control de temperatura que permita realizar experimentos a temperaturas distintas a la temperatura ambiente. Además, añadir a la interfaz la posibilidad de que el usuario pueda establecer los intervalos de incremento de velocidad de rotación de la bomba de lóbulos.

## BIBLIOGRAFÍA

Bazán-Ramírez, M. Valera, B. D, R. Brito, E. Solís, L. Morales, M. Ocampo, I Córdova-Aguilar, M.S. Ascanio G. Manual de ensamblaje y operación. CCADET UNAM.

Hernández-Lucas, M.J. Reología y Textura. Universidad de València. Valencia.

Maestro-Garriga, A. Reología de espesantes celulósicos para pinturas al agua: modelización y mecanismo de espesamiento asociativo. Tesis de doctorado Universidad de Barcelona, Barcelona 2002

Muñoz-Díaz, E. Nuevo reómetro de orificio. Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2012.

Naranjo-Chávez, F.J. Desarrollo y construcción de un reómetro de orificio para determinar propiedades extensionales. Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de México, México, 2010.

Reyes I, Solis U. Sistema de reómetro de orificio con bomba de lóbulos. SOMI Congreso de Instrumentación XXIX Edición, Puerto Vallarta, Jalisco, México, octubre 2014.

Reyes-Ocampo. Aguayo-Vallejo, JP. Ascanio, G and Córdova-Aguilar, MS. Rheological characterization of modified foodstuffs with food grade thickening agents. 2nd International Conference on Rheology and Modelling of Materials International Conference on Rheology and Modeling of Materials Miskolc Lillafüred, Hungary.

Soto-Maldonado, G. Aplicación de fécula de maíz para el tratamiento de disfagia. Un estudio sensorial y reológico. Tesis de Licenciado, Universidad Autónoma de México, México, 2015.

Anton Paar. Disponible: <http://www.anton-paar.com/mx-es/productos/detalles/reologia-extensional/> (Accedido en agosto 2016).

NATIONAL INSTRUMENTS. Disponible:

<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/207096> (Accedido en agosto 2016).

Thermo Scientific. Disponible:

[http://www.rheowin.com/files/Manual\\_CaBER1\\_v.1.8\\_\(E\).pdf](http://www.rheowin.com/files/Manual_CaBER1_v.1.8_(E).pdf) (Accedido en septiembre 2016).

ELECTRONILAB. Disponible: <https://electronilab.co/tienda/termistor-de-precision-10k-3950-ntc/> (Accedido en octubre 2016).

Q-Pums. Disponible:



<http://www.qpumps.com/docs/615718ManualdeInstalacionyMantenimientoZL.pdf>

(Accedido en octubre 2016).

OHAUS. Disponible: <http://mx.ohaus.com/es-mx/products/balances-scales/portable-balances/scout-spx/spx6201> (Accedido en enero 2017).

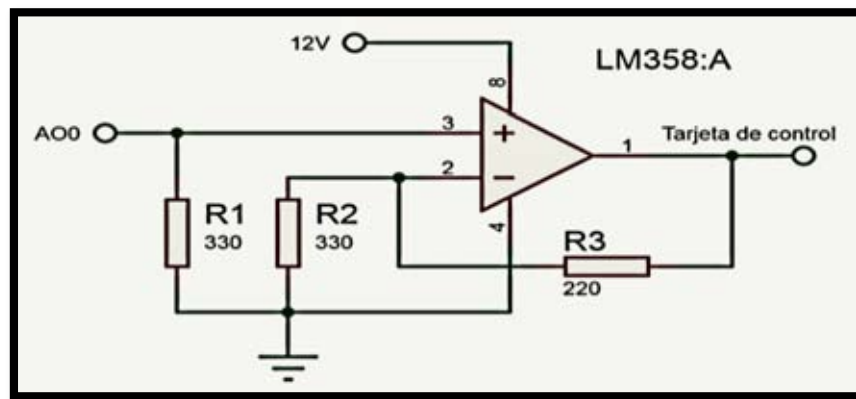
SANICO Disponible: <http://www.sanicoarg.com.ar/public/product/view/id/122> (Accedido febrero 2017).

## ANEXOS

### ANEXO 1. ACONDICIONAMIENTO BOMBA DE LÓBULOS

El acondicionamiento de señal en el caso del control de la bomba de lóbulos, se amplifica el voltaje proporcionado por la tarjeta DAQ, se implementó un amplificador lm358 en configuración no inversor cuya salida será implementada en la tarjeta de control KBMM-125.

El circuito de acondicionamiento de señal para la bomba de lóbulos se muestra en la figura A.2



A.1 Circuito para control de bomba de lóbulos

Acondicionamiento de señal. Ganancia para el amplificador de voltaje. Para obtener una ganancia de 1.6 se propuso  $R_1=330 \Omega$

Donde A00: Salida analógica DAQ

Cálculo:

$$V_o = V_i \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)$$

$$R_2 = R_1 \left( \frac{V_o}{V_i} - 1 \right)$$

Sí:

$$V_o = 8 V$$

$$V_i = 5 V$$

$$R_1 = 330 \Omega$$

$$R_2 = 330 \left( \frac{8}{5} - 1 \right) = 198$$

$$R_2 = 200\Omega$$

## ANEXO 2. CIRCUITO DE ACCIONAMIENTO TERMISTOR NTC

El circuito de los termistores se diseñó a través del conocimiento de que los termistores son resistencias que varían con la temperatura. La resistencia  $R$  de un termistor para una temperatura  $T$  puede ser modelada por:

$$R = R_R \exp\left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R}\right)\right] \quad (1)$$

Donde  $R_R$  es la resistencia de la temperatura de referencia  $T_R$  y  $\beta$  es una constante. Hay que tener en cuenta que la temperatura en esta ecuación esta en unidades Kelvin. El termistor utilizado en este proyecto tiene una resistencia  $R_R = 10,000 \text{ ohms}$  y la temperatura  $T_R = 298K$  y  $\beta = 3470$  con una tolerancia de  $\pm 10\%$ .

De la ecuación anterior se despeja en función de la temperatura:

$$T = \left[ \frac{1}{T_R} + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{R}{R_R}\right) \right]^{-1} \quad (2)$$

El circuito implementado para el acondicionamiento de señales permite que la tarjeta de DAQ sea capaz de interpretar los valores del termistor NTC, dado que la tarjeta solo es capaz de medir voltaje y no resistencia, se implementó un divisor de voltaje. El voltaje de alimentación (+ 5v) y AI 2,3 que son los pines de lectura analógica de la DAQ.

$$V = V_i \frac{R}{R_R + R} \quad (3)$$

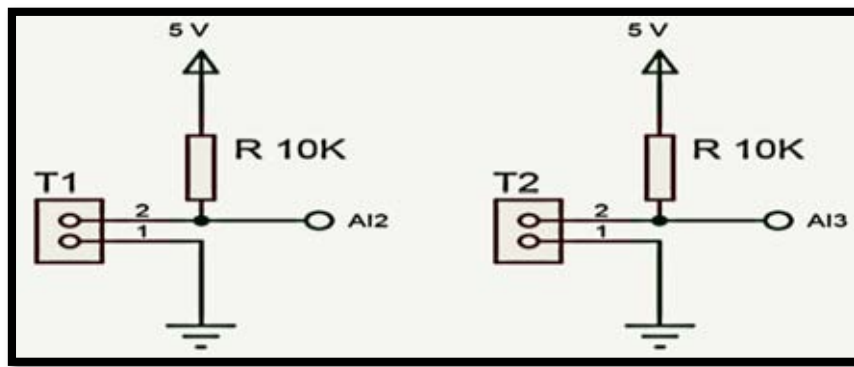
Despejando de la ecuación del divisor de voltaje se obtiene la resistencia del termistor.

$$R = \frac{R_R V}{V_i - V} \quad (4)$$

Sustituyendo la ecuación (4) en la ecuación (2) se obtiene la temperatura en función del voltaje medido por la DAQ.

$$T = \left[ \frac{1}{T_R} + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{R_R V}{R_R (V_i - V)}\right) \right]^{-1} \quad (5)$$

El circuito de acondicionamiento de señales para los termistores es el que se muestra en la figura A.2



A.2 Circuito de termistores NTC 10k