



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## FACULTAD DE INGENIERÍA

### INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE MEZCLADO CON FINES DIDÁCTICOS

#### T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECATRÓNICO

PRESENTA:

**Jorge Isaac García López**

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. Miguel Ángel Bazán Ramírez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016

# Índice

RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	
<u>CAPITULO 1. ANTECEDENTES</u>	1
1.1 Conceptos de mezclado	1
1.2 Agitadores	1
1.3 Potencia de mezclado	4
1.4 Visualización de mezclado	5
1.5 Planteamiento del problema	7
1.6 Objetivos	7
<u>CAPITULO 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELECTROMECAÁNICO</u>	8
2.1 Sistema eléctrico/electrónico	8
2.2 Descripción del sistema mecánico	14
<u>CAPITULO 3. PROGRAMA DE CONTROL Y MONITOREO DEL PROTOTIPO</u>	17
3.1 Variables de control	17
3.2 Diagrama de flujo y control	20
<u>CAPITULO 4. DESARROLLO DE LA INTERFAZ DE USUARIO</u>	23
4.1 LabVIEW	23
4.2 Descripción de la interfaz de usuario	24
4.3 Adquisición de imágenes	26
<u>CAPITULO 5. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO</u>	30
5.1 Calibración del sistema de par de torsión.	30
5.2 Descripción de los experimentos	32
5.3 Fluidos de prueba	33
5.4 Resultados	33
CONCLUSIONES	39
TRABAJO A FUTURO	40
BIBLIOGRAFÍA	41
Anexos	43
Anexo 1.	43
Anexo 2.	43
Anexo 3.	44
Anexo 4.	45
Anexo 5.	45
Anexo 6.	45
Anexo 7.	50

# LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1)</i> a) turbina Rushton; b) agitador marino o hélice; c) turbina alta eficiencia con flujo axial; d) agitador de cinta helicoidal; e) agitador de ancla. (McCabe, et al., 2007).	2
<i>Figura 2)</i> Dimensionamiento de turbina según Rushton.	3
<i>Figura 3)</i> Dinamómetro para medir potencia a partir del torque en el motor.	4
<i>Figura 4)</i> Patrones de flujo para turbina Rushton y PBT (sol. CMC a 0.4% con carbopol al 0.05%) a 60 rpm. (Hidalgo, et al., 2014).	6
<i>Figura 5)</i> Esquema general del sistema de mezclado. FSR: Sensor de fuerza de tipo resistivo. M1: motorreductor para el elevador. M2: motorreductor para el agitador.	8
<i>Figura 6)</i> Tiva C TM4C123G Launchpad Tarjeta de evaluación.	9
<i>Figura 7)</i> Imagen general del modulo y esquema de partes. (Cruz, 2014)	10
<i>Figura 8)</i> Motorreductores del sistema.	11
<i>Figura 9)</i> Sensores del sistema; a) encoder pololu 64 CPR , b) Sensor de fuerza de tipo resistivo Sparkfun 402.	12
<i>Figura 10)</i> Cámara Logitech C920.	12
<i>Figura 11)</i> Diagrama electrico y trajerta electrónica del acondicionamiento de señales.	13
<i>Figura 12)</i> Esquema general y circuito de la fuente de alimentación.	13
<i>Figura 13)</i> Diagrama de partes mecánicas del prototipo.	14
<i>Figura 14)</i> Vista de sección del sistema.	15
<i>Figura 15)</i> Coples flexibles del sistema. a) cople en el tornillo sin fin, b) cople flecha del agitador.	16
<i>Figura 16)</i> Agitadores de tipo radial y helicoidal.	16
<i>Figura 17)</i> Posición máxima y mínima del agitador con respecto al tanque.	17
<i>Figura 18)</i> Simulación del comportamiento de un motor haciendo uso de un control PID.	18
<i>Figura 19)</i> Sistema de sensor de fuerza. $\omega$ =Velocidad angular del rodamiento, T=Par de torsión en el rodamiento, F=Fuerza aplicada en el sensor de fuerza. d=Distancia del brazo de palanca.	19
<i>Figura 20)</i> Diagrama de bloques de las acciones del prototipo.	20
<i>Figura 21)</i> Diagrama de entradas y salidas.	20
<i>Figura 22)</i> Diagrama de flujo del programa.	22
<i>Figura 23)</i> Panel de control con diferentes indicadores y controles.	23
<i>Figura 24)</i> Panel de control del mezclador.	24
<i>Figura 25)</i> Panel de visualización de las cámaras.	26
<i>Figura 26)</i> Modelo HSL.	27
<i>Figura 27)</i> Extracción del canal H.	28
<i>Figura 28)</i> Extracción de los pixeles con color final.	28
<i>Figura 29)</i> Imagen final con filtros.	29
<i>Figura 30)</i> Calibración del sistema de par de torsión.	30
<i>Figura 31)</i> Calibración del sistema de par de torsión.	31
<i>Figura 32)</i> Gráfica de calibración en el sensor de fuerza.	31
<i>Figura 33)</i> Escala de PH.	32
<i>Figura 34)</i> Excentricidades en el fluido.	34

<i>Figura 35)</i> Imágenes parte frontal, Glicerina pura y agitador Rushton.	35
<i>Figura 36)</i> Imágenes parte inferior del dispositivo, Glicerina pura y agitador Rushton.	35
<i>Figura 37)</i> Imágenes parte frontal del dispositivo, Glicerina pura y agitador Scaba.	36
<i>Figura 38)</i> Imágenes parte inferior del dispositivo, Glicerina pura y agitador Scaba.	36
<i>Figura 39)</i> Imágenes parte frontal del dispositivo, Glicerina PAA y agitador Rushton.	37
<i>Figura 40)</i> Imágenes parte inferior del dispositivo, Glicerina PAA y agitador Rushton.	37
<i>Figura 41)</i> Imágenes parte frontal del dispositivo, Glicerina PAA y agitador Scaba.	38
<i>Figura 42)</i> Imágenes parte inferior del dispositivo, Glicerina PAA y agitador Scaba.	38
<i>Figura A.1)</i> Modelado del motor de corriente directa.	
<i>Figura A.2)</i> Gráfica para la obtención de la resistencia	
<i>Figura A.3)</i> Constante de tiempo al 63.2 %	

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1.</i> Entradas y salidas del microcontrolador .....	21
<i>Tabla 2.</i> Mensaje recibido.....	21
<i>Tabla 3.</i> Mediciones de par para Glicerica con poliacrilamida .....	33
<i>Tabla 4.</i> Mediciones de par para Glicerica pura.....	34
<i>Tabla 5.</i> Mediciones de tiempo de mezclado .....	38

Este trabajo se desarrolló en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) en el laboratorio de Ingeniería de Proceso bajo la asesoría del M.I. Miguel Ángel Bazán Ramírez y el soporte técnico de la Dra. María Soledad Córdova Aguilar, la Dra. Leticia Vega Alvarado, el M.I. Juan Manuel Gómez y la M.I. Jennyfer Zapata Farfán. El apoyo financiero fue por recursos del PAPIME: PE105312.

## RESUMEN

Así como la tecnología ha avanzado, los procesos industriales se han hecho cada vez más complejos. En las industrias; química, alimentaria, farmacéutica, petroquímica, minera, entre otras, se hace uso de una operación llamada mezclado, la cual desempeña un papel fundamental en la dispersión y homogenización de las fases. Además, el aprendizaje de esta operación en universidades e institutos, como en los laboratorios de biotecnología, bioprocesos, mecánica de fluidos, etc., requiere de tecnología que muestre de forma práctica el comportamiento de las variables involucradas en el mezclado y que refuercen los conocimientos teóricos. En este trabajo se describe la construcción y operación de un sistema que permita desarrollar operaciones de mezclado a nivel escala en los laboratorios ya mencionados. Este sistema permite al usuario (alumno y/o profesor) estimar valores de la velocidad de rotación del agitador, el par de torsión generado por el movimiento del fluido, y evaluar el consumo de potencia del sistema con dos agitadores distintos. Además, de realizar un estudio de imágenes del proceso para determinar los tiempos de homogeneización (mezclado) según el tipo de agitador utilizado.

# INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se muestra el desarrollo de los elementos de un prototipo de mezclador para fines didácticos, así como su implementación, calibración y resultados.

En el primer capítulo se aborda de manera general la descripción sobre conceptos básicos del mezclador, elementos necesarios para el agitado y técnicas que permiten estimar potencia y tiempo de mezclador.

La descripción de los elementos que conforman al prototipo de mezclador se presenta en el capítulo dos, titulado como descripción del sistema electromecánico. Se describe cada elemento de la parte eléctrica/electrónica mencionando especificaciones de operación y función en el prototipo. De manera análoga se hace la descripción de las partes que integran al sistema mecánico mencionando la función y el material en el que cada elemento fue construido.

El tercer capítulo, titulado descripción programa de control y monitoreo del prototipo se mencionan los aspectos físicos a considerar así como el protocolo de acciones que debe realizar. Estableciendo un diagrama de flujo que permita programar lo anterior en el sistema lógico.

La interfaz de usuario se describe en el capítulo cuatro mencionando los elementos virtuales que lo componen así como las funciones que realizan. Además se explica el modelo y la implementación del algoritmo para adquirir imágenes que permiten la estimación del tiempo de mezclador.

Una vez armado el prototipo y calibrado, se realizaron pruebas para estimar la potencia en el agitado, así como el tiempo de mezclador para dos fluidos y dos agitadores. La descripción de los experimentos y los resultados obtenidos se muestran en el capítulo cinco.

A partir de los resultados obtenidos, se obtuvieron conclusiones que permitieron hacer una crítica constructiva del trabajo realizado y sugerencias para futuras mejoras en el prototipo y en el desarrollo de las prácticas.



# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES

### *1.1 Conceptos de mezclado*

El éxito de muchas operaciones industriales depende de una efectiva agitación y mezclado de los fluidos que los componen. La agitación se refiere a un movimiento inducido de un material de una forma específica, normalmente en un patrón circulatorio dentro de algún tipo de contenedor (McCabe, *et al.*, 2007). Por otra parte, el mezclado es una distribución aleatoria de distintas fases inicialmente separadas, puede definirse como la homogenización de dos, o más porciones de diferentes materiales, de manera que se alcance un nivel deseado de uniformidad física o química en el producto. Los tanques agitados y la operación unitaria de mezclado desempeñan un papel fundamental en procesos químicos y bioquímicos, es muy recurrente su uso en los procesos industriales que requieren de una dispersión y homogenización de varias fases (Holland *et al.*, 1996). Prácticamente, no existe industria en la que no esté presente el fenómeno de mezclado como parte fundamental de algún proceso industrial (Treybal, 1980).

De manera práctica, las operaciones de mezclado se pueden utilizar para:

- Suspensión de sólidos
- Dispersión líquido-líquido con transferencia de masa
- Dispersión gas-líquido con transferencia de masa
- Promover la transferencia de calor entre el líquido y un serpentín o encamisado

Estas operaciones pueden resultar complejas e involucrar varias operaciones de manera simultánea (McCabe, *et al.*, 2007).

### *1.2 Agitadores*

La agitación se realiza por la aplicación de energía neumática o mecánica. La agitación mecánica se puede llevar a cabo mediante agitadores de tipo impulsor o rodete, que son dispositivos que promueven la dispersión de sólidos, líquidos o gases en líquidos y aumentan la transferencia de masa en operaciones de mezclado (Olddshue, 1983).

Estos agitadores se dividen en dos tipos básicos; de flujo axial, que generan corrientes paralelas al eje del agitador, y de flujo radial, que generan corrientes en dirección radial, o tangencial al eje del agitador. Además, existen tres principales tipos de agitadores

para uso en líquidos de baja a moderada viscosidad son las hélices, turbinas y de paletas. La turbina *Rushton*, ver figura 1 a), es el agitador más conocido y empleado tanto en la industria como en la investigación y pertenece al grupo de los agitadores de flujo radial. Existe una variante de las turbinas que se denomina turbina de alta eficiencia, ver figura 1 b), esta permite generar una combinación de flujo axial y radial debido a sus paletas inclinadas.

Los agitadores de paletas pueden adaptar la forma del tanque, dando como resultado a los agitadores de ancla, ver figura 1 e), que evitan el depósito de sólidos impulsando al líquido en forma radial. Para los líquidos de alta viscosidad, los agitadores recomendados son los agitadores de ancla o de cinta helicoidal, ver figura 1 d).

La elección del agitador se basa en el conocimiento de los requerimientos del proceso, así como de las características físicas del sistema. Los agitadores de flujo axial presentan de 3 a 4 paletas, mientras que las de flujo radial están diseñadas con 6 paletas. El movimiento generado por el agitador refleja la potencia empleada en el sistema, la cual varía dependiendo de distintos factores como la viscosidad del fluido, la velocidad de agitado, entre otros.

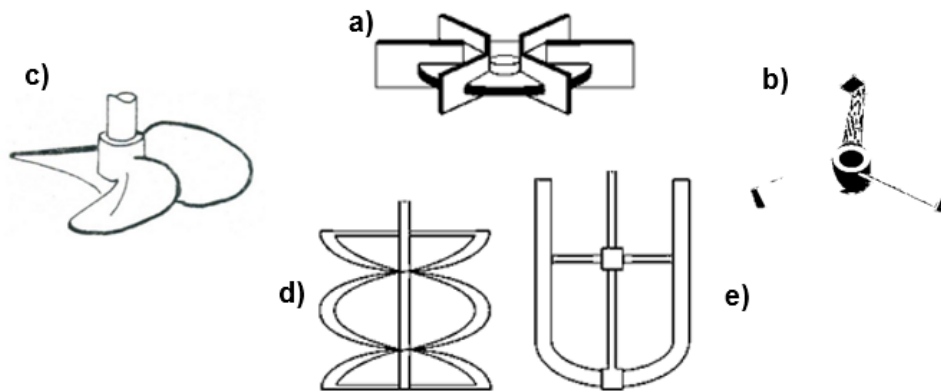


Figura 1) a) turbina Rushton; b) agitador marino o hélice; c) turbina alta eficiencia con flujo axial; d) agitador de cinta helicoidal; e) agitador de ancla. (McCabe, et al., 2007).

El diseño “estándar” de un agitador dispone de un número de elecciones sobre el tipo y localización del agitador, las proporciones del tanque, el número y las proporciones de los deflectores, entre otros parámetros. Cada una de estas decisiones afecta la velocidad de circulación del fluido, los patrones de velocidad y el consumo de potencia. Como punto de partida para el diseño, se utiliza un agitador de turbina, ver figura 2.

Las proporciones recomendadas por McCabe en Operaciones unitarias en ingeniería química son:

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}; \quad \frac{H}{D_t} = 1; \quad \frac{j}{D_t} = \frac{1}{12}$$

$$\frac{E}{D_t} = \frac{1}{3}; \quad \frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}; \quad \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

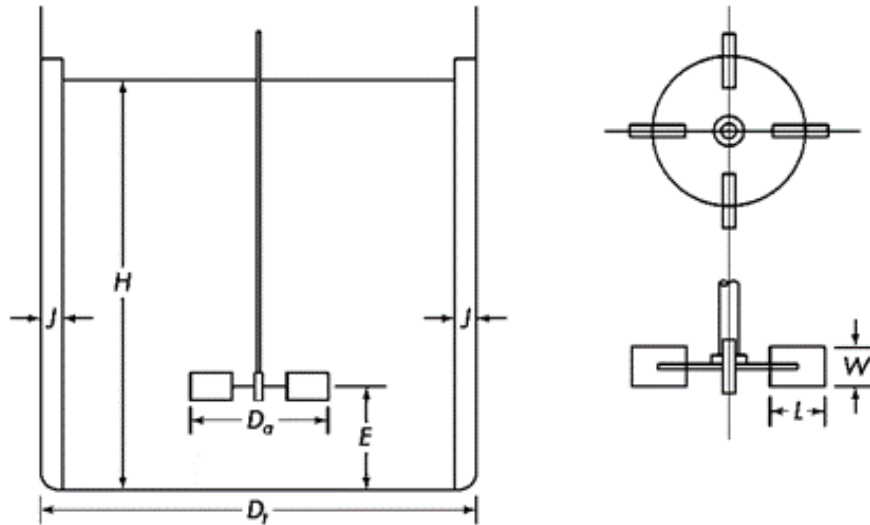


Figura 2) Dimensionamiento de turbina según Rushton.

donde:

$D_a$  = Diámetro del impulsor, m o ft.

$D_t$  = Diámetro del tanque, m o ft.

$E$  = Altura del agitador desde el fondo del tanque, m o ft.

$H$  = Profundidad (o altura) del líquido en el tanque, m o ft.

$W$  = Anchura de las palas del impulsor, m o ft.

$L$  = Longitud de las palas del impulsor, m o ft.

$J$  = Anchura de los deflectores, m o ft.

Por lo general, el número de deflectores en el tanque es 4 y son pequeñas paletas verticales colocadas a los lados del tanque de mezclado para evitar que se genere un vórtice en el centro de este. El número de paletas del agitador varía entre 4 y 16, aunque es común el uso 6 u 8, sin embargo, se pueden considerar proporciones diferentes a las que se acaban de indicar; por ejemplo, resulta ventajoso colocar el agitador a mayor altura respecto al fondo del tanque, o tal vez sea necesario utilizar un tanque con mayor altura.

### 1.3 Potencia de mezclado

El desempeño de un sistema de agitación dentro de un tanque de mezclado puede ser evaluado mediante la medición de la potencia de mezclado. La cual es definida como la cantidad de energía necesaria, en un período de tiempo, para generar el movimiento del fluido dentro de un recipiente, generalmente por agitación mecánica (Ascanio *et al.*, 2004). La potencia está influenciada por las características reológicas del sistema, así como las condiciones de operación, las características geométricas del tanque y el diseño del agitador (Córdova, 2003).

La potencia de mezclado influye en la transferencia de calor y de masa, en los tiempos de circulación y de mezclado. Hay diversos métodos para determinar la potencia en tanques agitados, para los que se emplean calorímetros, dinamómetros, ver figura 3, torquímetros y sistemas basados en calibración de tensión. La estimación de potencia con el dinamómetro presenta la ventaja de que puede utilizarse en tanques a nivel laboratorio y piloto, con un amplio rango de operación, además de calcular en forma precisa el par de torsión. Cuando el líquido contenido dentro del tanque presenta cierta resistencia a la fuerza mecánica impartida por el impulsor, se produce un par de torsión que es transmitido al motor por medio de la flecha y el tanque rota libremente en su base, en la misma dirección equivalente que el impulsor. De esta forma se puede medir el par de torsión como una fuerza transmitida a una plataforma calibrada (Reséndiz, *et al.*, 1991).

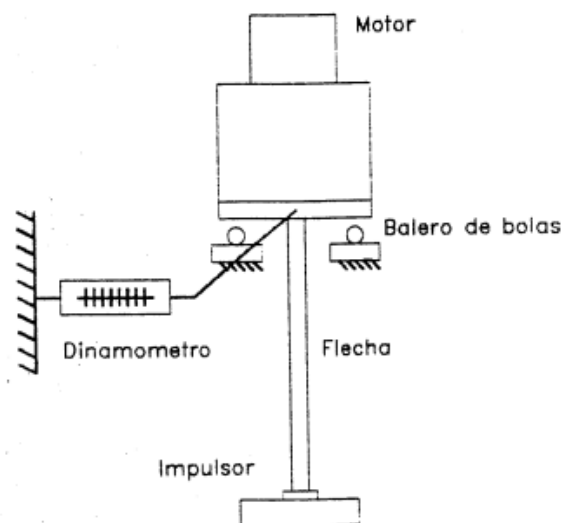


Figura 3) Dinamómetro para medir potencia a partir del torque en el motor.

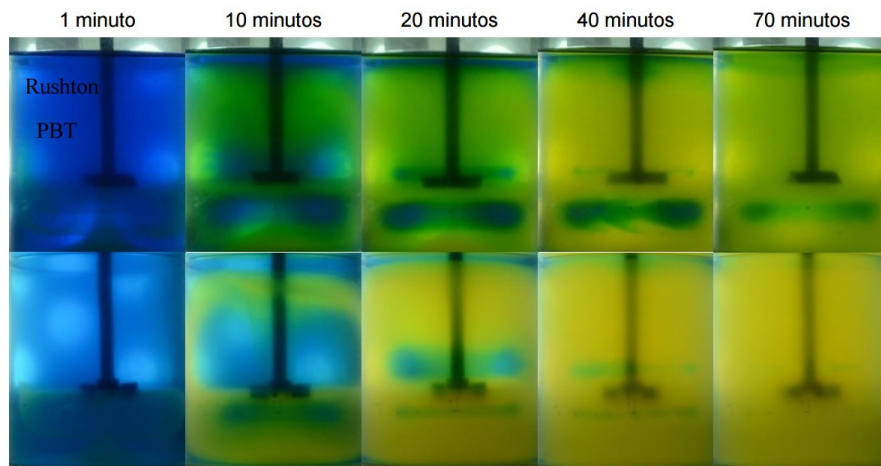
## 1.4 Visualización de mezclado

Para observar que es lo que ocurre durante los procesos de mezclado, existen diversas técnicas para la caracterización de las dispersiones multifásicas, tales como espectrometría capilar láser, fotografía y/o videos directos, entre otras. Por lo general, la mayoría de los sistemas con varias fases son muy complejos y difíciles de caracterizar, debido a la dinámica de las interacciones entre las fases y la turbulencia que se da al efectuarlos, por lo que se han utilizado diversos enfoques para lograr una mejor comprensión de la hidrodinámica de estos sistemas y las implicaciones en el desempeño y la productividad de los mismos. Para ello se distinguen dos tipos de evaluación; el invasivo, que ocasiona cambios en la dispersión y el no invasivo que no afecta a la dispersión (Middleton y Smith, 2004).

En estudios recientes se ha demostrado que mediante técnicas avanzadas de análisis de imágenes, es posible caracterizar las dispersiones de burbujas y gotas en bioprocesos de fermentación, lo que hace posible establecer las condiciones de operación para realizar un proceso con mayor productividad (Galindo, *et al.*, 2005). Se han desarrollado técnicas avanzadas de análisis de imágenes para medir velocidades, densidad, concentración, tamaño de objetos y flujos, existiendo también otros métodos de visualización como la tomografía y la velocimetría de partículas.

También se han desarrollado métodos para determinar el tiempo de mezclado (tiempo requerido para alcanzar un grado de homogeneidad), usando un trazador como medida de concentración (Ruszkowski y Muskett, 1985). Se pueden utilizar diferentes trazadores, como de conductividad o cambio de pH y diferentes detectores como sensores de temperatura o termistores que permiten observar la distribución de temperatura presente cuando se le adiciona el trazador (Espinosa, *et al.*, 2002).

Recientemente se han propuesto técnicas de visualización de imágenes; que son menos complejas y no intrusivas como el caso del método de colorimetría, ver figura 4 , el cual se fundamenta en la fluctuación del pH de la solución y se genera un cambio de tonalidad en el fluido de estudio de acuerdo al pH que variará de color en función de una reacción ácido-base, de tal forma que se pueda efectuar una caracterización cuantitativa y dinámica de las dispersiones y entender a detalle los fenómenos que ocurren dentro del sistema.



*Figura 4) Patrones de flujo para turbina Rushton y PBT (sol. CMC a 0.4% con carbopol al 0.05%) a 60 rpm. (Hidalgo, et al., 2014).*

## *1.5 Planteamiento del problema*

En universidades y centros de investigación se requiere de tecnología en laboratorios dedicados al área de bioprocesos, biotecnología, mecánica de fluidos, etc., que puedan apoyar la investigación en el proceso de aprendizaje de operaciones de mezclado. Además, dada su continua utilización en la industria, sigue generando problemas desafiantes a solucionar. Esta situación se vuelve problemática cuando no se cuenta con el equipo necesario para la experimentación, provocando que los alumnos aprendan en condiciones no óptimas y por consiguiente no se generen soluciones a los problemas de mezclado.

Debido a que la operación de mezclado es ampliamente utilizada en las industrias química, alimenticia, farmacéutica, petroquímica, etc., existe la necesidad de diseñar y construir un equipo funcional, que pueda simular a escala las operaciones de mezclado industriales, que permita la adquisición de datos y sea sencillo de operar todo esto con el fin de apoyar en proceso de aprendizaje de los alumnos.

## *1.6 Objetivos*

General

- Construcción y automatización de un prototipo de mezclado a escala con fines didácticos

Específicos

- Desarrollo de un sistema de mezclado
- Diseño de un protocolo de comunicación entre el usuario y el prototipo de mezclado
- Desarrollo de un sistema de adquisición y análisis de imágenes del proceso de mezclado
- Implementación de un sensor de fuerza de tipo resistivo FSR (*Force Sensing Resistor*) para estimar la potencia del mezclado
- Caracterización del prototipo
- Implementación de prácticas con alumnos de la Facultad de Química.

# CAPÍTULO 2

## DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELECTROMECAÁNICO

En este capítulo se realiza una breve descripción de los sistemas que constituyen al prototipo que se instrumenta y controla. Estos son; el mecánico, el eléctrico/electrónico y la interfaz de usuario. En la figura 5 se muestra un esquema de los sistemas.

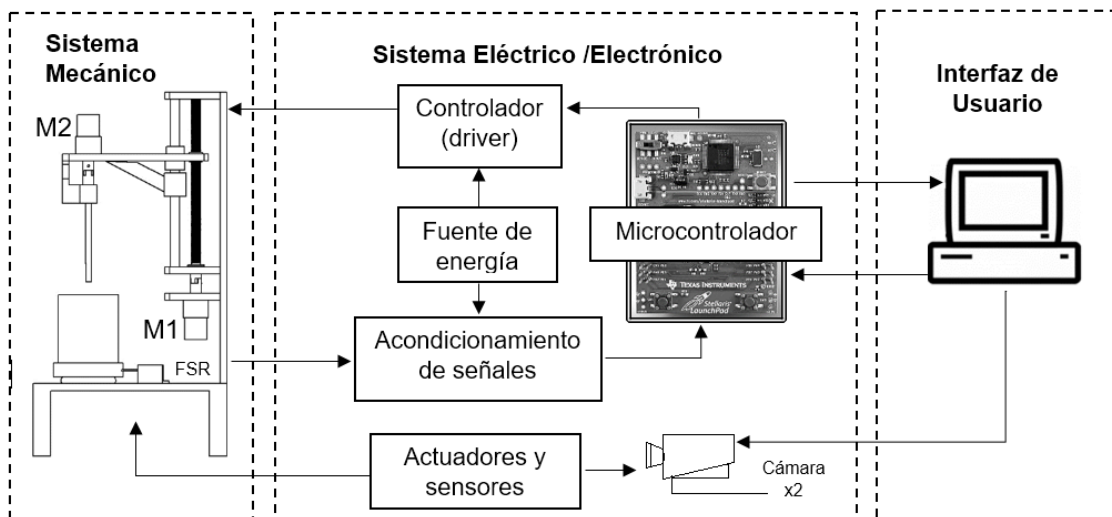


Figura 5) Esquema general del sistema de mezclado. FSR: Sensor de fuerza de tipo resistivo. M1: motorreductor para el elevador. M2: motorreductor para el agitador.

### 2.1 Sistema eléctrico/electrónico

El sistema eléctrico-electrónico permite llevar a cabo la operación de los actuadores (M1 y M2) y sensores, así como la interpretación y acondicionamiento de las señales de entrada y salida de los elementos. El sistema se descompone en:

- Lógica (Microcontrolador)
- Controlador de los motorreductores (driver)
- Motorreductores
- Sensores
- Acondicionamiento de señales
- Fuente de suministro de energía

Cada una 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



del fenómeno de agitación. Es necesario mencionar que el sistema se considera eléctrico/electrónico porque trabaja con voltajes de corriente alterna y directa para suministrar potencia eléctrica y transferir información. Por otro lado, es conveniente mencionar que las cámaras se consideran como un elemento de los sensores debido a que el elemento interno de la cámara es un dispositivo electrónico que convierte la luz en una señal eléctrica, la cual es digitalizada y almacenada posteriormente.

## Microcontrolador

El microcontrolador es un *TM4C123GH6PM*, *Texas Instruments*, el cual está montado en una tarjeta *Tiva™ C TM4C123G LaunchPad*, ver figura 6. Esta tarjeta tiene una interfaz de depuración (*ICDI*, por sus siglas en inglés) por conexión micro *USB* y permite la transmisión de datos por comunicación serial a una computadora. El microcontrolador tiene un núcleo *ARM® Cortex™-M4* de 32 *bits* que opera con una velocidad máxima de 80 MHz, tiene dos módulos convertidor analógico-digital de 12 *bits* de resolución, lo que permite una discretización para la detección de señales analógicas de hasta 3.4 V<sub>DC</sub>. El microcontrolador se alimenta de 4.75 a 5.25 V<sub>DC</sub> y opera con un voltaje a la entrada mínimo de -0.3 V<sub>DC</sub> y máximo de 5.5 V<sub>DC</sub>, mientras que a la salida opera con voltajes de 3.3 y 5 V<sub>DC</sub> con una corriente máxima de 25 mA, ver Anexo 1.

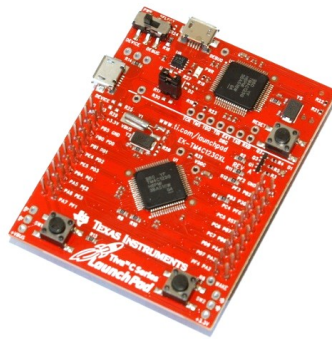


Figura 6) *Tiva C TM4C123G Launchpad Tarjeta de evaluación.*

## Controlador de los motorreductores (*driver*)

El controlador L298N es un módulo que permite manipular la rotación y sentido de giro de hasta dos motores, ver figura 7 a), por medio de señales de lógica de transistor a transistor (TTL, por sus siglas en inglés) provenientes del microcontrolador que interrumpen o activan un voltaje en las terminales de cada motor. El módulo está conformado por un circuito integrado L298N de *STMicroelectronics*, un regulador LM7805 del mismo fabricante y diodos de protección que evitan el regreso de corriente

del motor al circuito y bornes de tornillo para conectar las terminales del motor y el suministro de energía.

El módulo tiene tres terminales de control por cada motor, ver figura 7 b); dos de ellas sirven para establecer el sentido de giro y un freno, y la tercera sirve para establecer el voltaje en el motor. El voltaje del motor se regula a través de la modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés), que es un método que varía la frecuencia y el ciclo de trabajo de una señal ocasionando que tenga un comportamiento de una señal analógica sobre una carga.

El controlador opera con voltajes de alimentación de 5 a 35 V<sub>DC</sub> con una corriente máxima de 2 A por motor, dando un consumo de potencia máxima de 20 W. La parte lógica del módulo opera con voltajes de 0 a 5 V<sub>DC</sub> y una corriente de 0 a 36 mA.

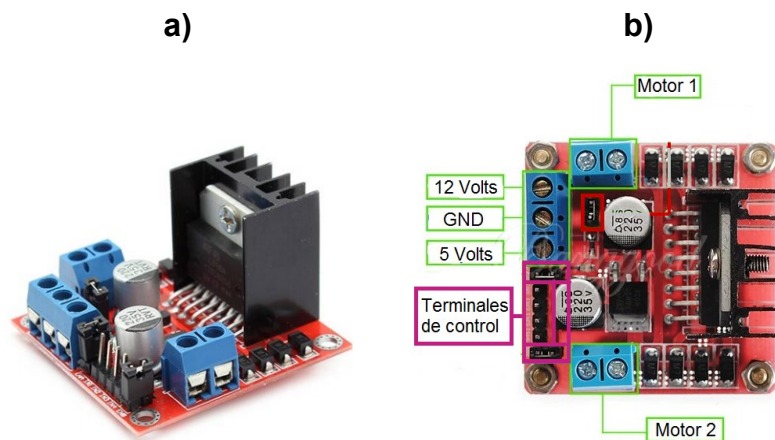


Figura 7) Imagen general del módulo y esquema de partes. (Cruz, 2014)

## Motorreductores

Motorreductor de escobillas (M1) Pololu. En la figura 8 se observa el motorreductor que cuenta con un par de torsión de salida de 1.5554 Nm, una velocidad angular máxima de 100 rpm. Se alimenta con un voltaje de 12 V<sub>DC</sub> y tiene un consumo de corriente de 300 mA a rotor libre. El diámetro del motor es de 36.8 mm, tiene una longitud de 55 mm y un diámetro de flecha de salida de 6 mm y 15.5 mm de largo de la misma. Este motor se acopla a un tornillo sin fin que permite elevar el sistema de agitado.

El motor que le da potencia al agitador es un motorreductor de escobillas (M2) Pololu, cuenta con un par de torsión de salida de 0.7768 Nm, una velocidad angular máxima de 350 rpm. Se alimenta con un voltaje de 12 V<sub>DC</sub> y tiene un consumo de corriente de

300 mA a rotor libre. El diámetro del motor es de 36.8 mm, tiene una longitud de 55 mm y un diámetro de flecha de salida de 6 mm y 15.5 mm de largo de la misma. Este motor se acopla a un eje que permite la rotación del agitador, ver Anexo 2.

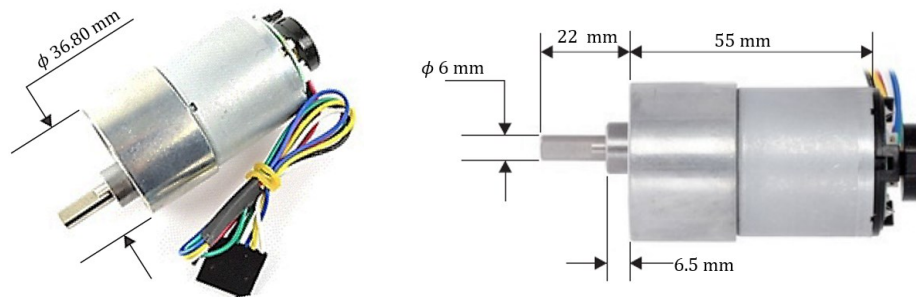


Figura 8) Motorreductores del sistema.

## Sensores

La estimación de la velocidad y posición de los motores se realiza por medio del codificador rotatorio (*encoder*), ver figura 9 a), que viene integrado en cada motor. Estos codificadores están compuestos por un sensor de efecto *Hall*, que proporciona dos señales digitales (canales) de onda cuadrada desfasadas  $90^\circ$ . Esta señal cuadrada se genera cuando el sensor detecta una de las 16 secciones magnéticas de un disco acoplado al eje del motor, es decir, cada pulso de la señal cuadrada indica que el sensor detectó una sección magnética, teniendo 16 pulsos al completar una vuelta por canal. Así la frecuencia de estas transiciones en un canal indica la velocidad y el orden activación de los pulsos en los dos canales indica el sentido giro y por ende posición del eje del motor. El voltaje de alimentación es de 5 V<sub>DC</sub> y la corriente máxima es de 10 mA.

El sensor de fuerza, ver figura 9 b), es de tipo resistivo (FSR, por sus siglas en ingles), y su principio de operación se basa en la disminución de la resistencia con un incremento de la fuerza aplicada en la superficie activa del sensor. El área activa mide 12.7 mm de diámetro y el sensor tiene una longitud de 12.7 mm. Se energiza con 5 V<sub>DC</sub> y su corriente máxima es de  $1 \text{ mA cm}^{-2}$ . El rango de sensibilidad de la fuerza es de 0.100 hasta 10 kg y la resolución es de 5 gr, ver Anexo 3.

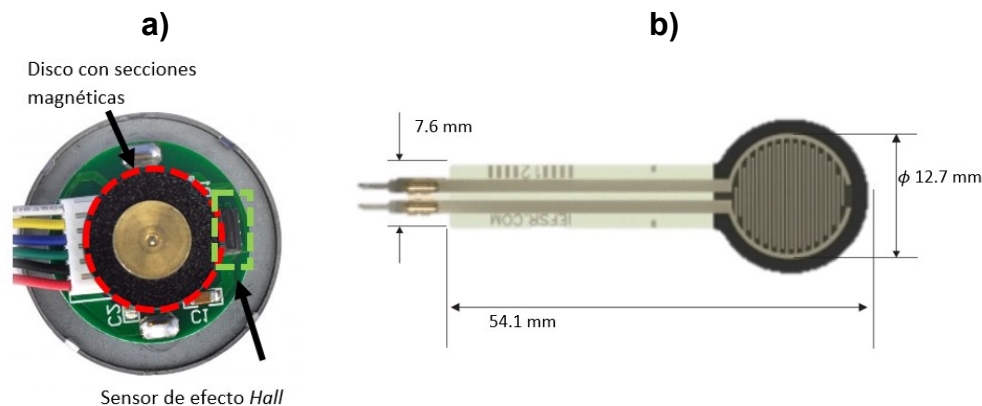


Figura 9) Sensores del sistema; a) encoder pololu 64 CPR , b) Sensor de fuerza de tipo resistivo Sparkfun 402.

Los dispositivos para adquirir las imágenes son cámaras web Logitech c920, ver figura 10. El sensor de imagen es un lente “Carl Zeiss” con enfoque automático y una resolución en video de hasta 1920x1080 píxeles a 30 cuadros por segundo, mientras que para fotografías cuenta con 15 mega-píxeles de resolución, ambos casos en alta definición. La conexión es por cable *USB 2.0* o 3.0 y la longitud del cable es de 1.83 m.



Figura 10) Cámara Logitech C920.

## Acondicionamiento de señales

El circuito construido para el acondicionamiento de señales permite acoplar la señal del sensor de fuerza de tipo resistivo para ser leída por el microcontrolador, ya que el voltaje del sensor podría exceder los niveles de operación del microcontrolador. Este circuito consta de; una alimentación, un divisor de voltaje del cual se obtiene el total o parte del voltaje con que se alimenta dicho divisor, un seguidor de voltaje que elimina los efectos de la carga y una amplificación que multiplica el voltaje por una ganancia de dos y además es limitado por la alimentación del amplificador cuando excede un límite de fuerza. El circuito de acondicionamiento de señales es el que se muestra en la figura 11. Anexo 4.

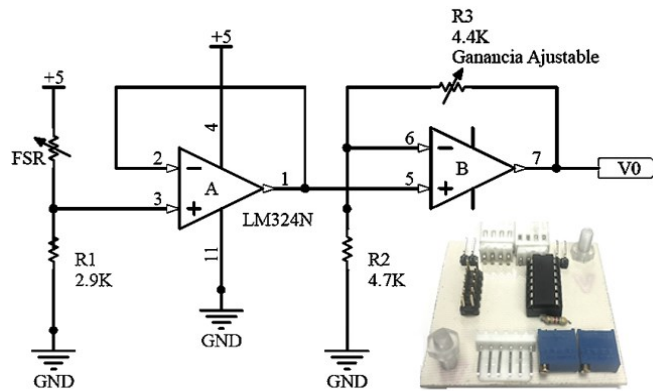


Figura 11) Diagrama eléctrico y tarjeta electrónica del acondicionamiento de señales.

## Fuente de suministro de energía

La fuente de suministro, o fuente de alimentación, acondiciona la energía eléctrica del suministro; es decir, reduce el voltaje, transforma la señal senoidal en una continua, elimina los rizados en la señal y regula el voltaje a 12 y 5 V<sub>DC</sub>.

La fuente de energía está compuesta por los siguientes elementos, ver figura 12:

- Transformador
- Rectificador
- Filtro
- Regulador

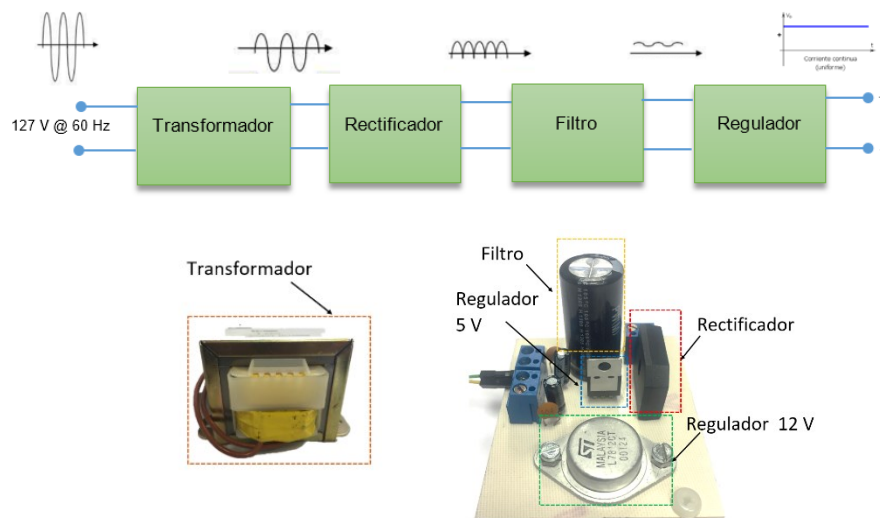


Figura 12) Esquema general y circuito de la fuente de alimentación.

El transformador reduce el voltaje a 124 V<sub>AC</sub> y permite circular hasta 3A en sus terminales, mientras que el rectificado es por medio de un puente de diodos de onda completa. La señal se filtra a través de un capacitor 47000 μF, ver Anexo 5, mientras el voltaje se mantiene constante a 5 y 12 V<sub>DC</sub> a través de dos reguladores LM7805 y LM7812, respectivamente El circuito construido de la fuente se muestra en la figura 12.

## 2.2 Descripción del sistema mecánico

La estructura del prototipo está construida en placa de aluminio y una columna de 9.525 mm de espesor. Esta soportada por cuatro perfiles cuadrados de aluminio estructural de la serie 30 con canal de 8 mm, ver figura 13.

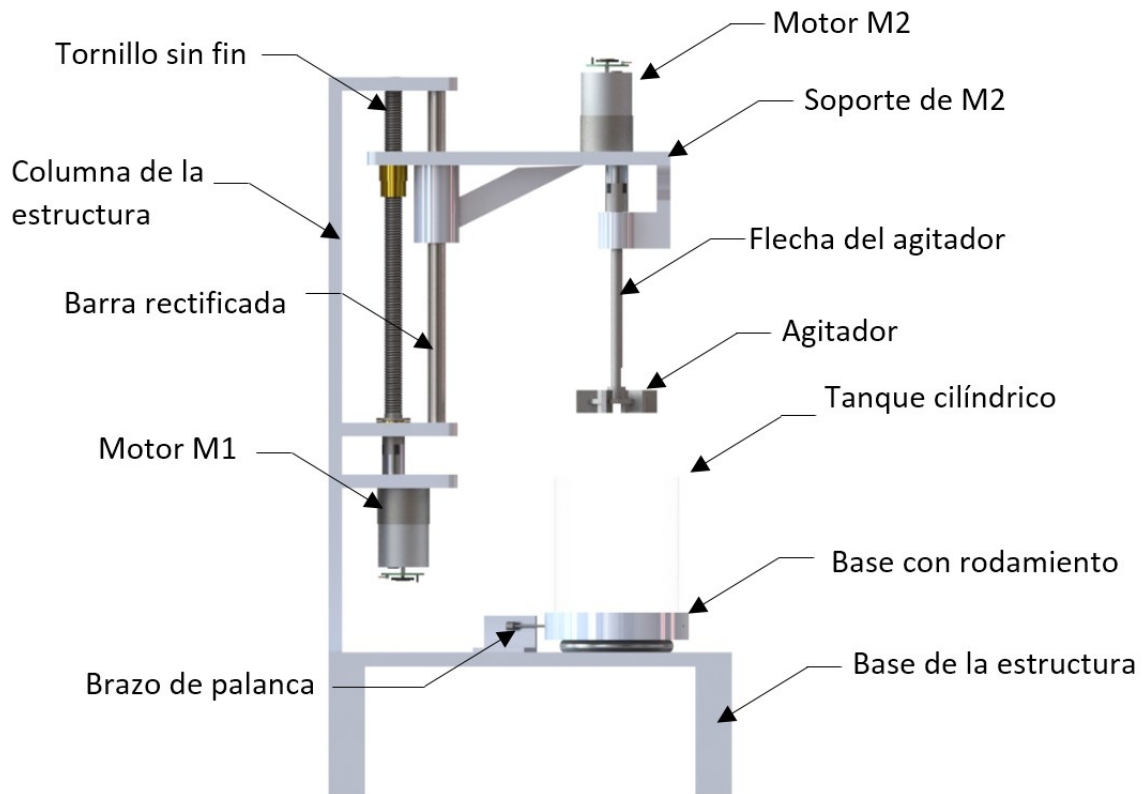
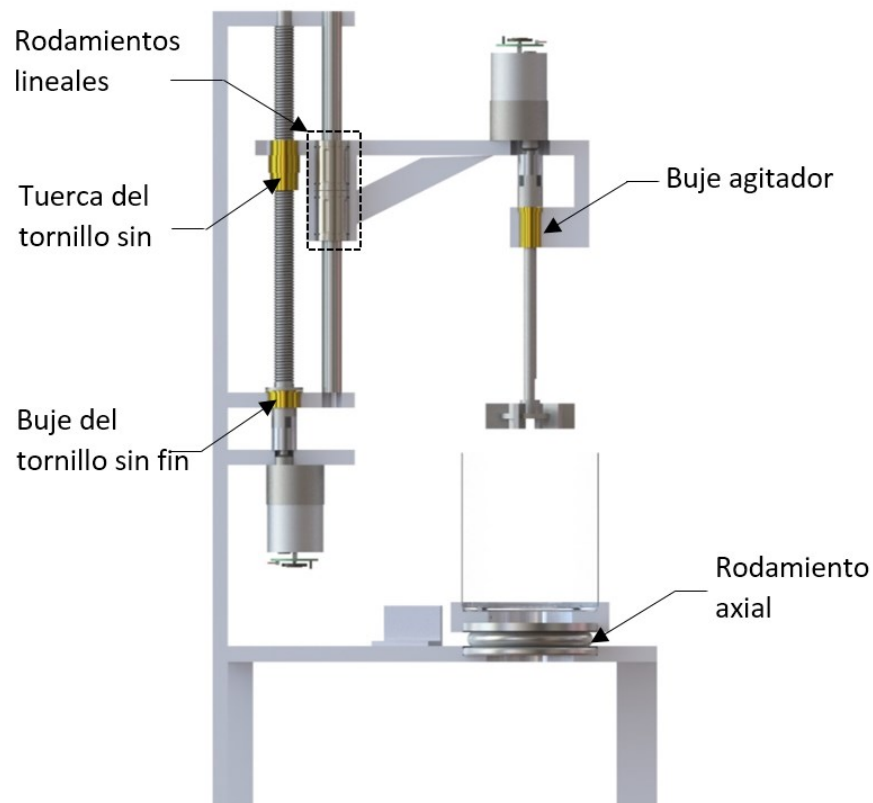


Figura 13) Diagrama de partes mecánicas del prototipo.

Se tiene un mecanismo de tornillo sin fin, ver figura 13, el tornillo está conectado por medio de un cople flexible al motorreductor M1, ver figura 15. El tornillo tiene un diámetro de 12.7 mm, un paso de 1.954 y una longitud de 85 mm, mientras que la tuerca tiene un diámetro de 12.7 mm, un paso de 1.954 y una longitud de rosca de 31.53 mm (rosca standard americana 0.5" 13UNC), ver figura 14. De manera paralela al

tornillo se encuentra una barra rectificada de acero inoxidable 304 de 12.7 mm de diámetro y dos rodamientos lineales de 12.7mm de diámetro interior ensamblados a un casquillo, ver figura 14. La tuerca y el casquillo se encuentran fijos a una misma placa para restringir el desplazamiento del mecanismo a una dirección vertical, subir o bajar, mientras que los rodamientos reducen el momento angular que genera el peso del motor M2. El motor M2 se encuentra ensamblado en el extremo contrario del tornillo.



*Figura 14) Vista de sección del sistema.*

En cuanto al agitador, el motor M2, se conecta a la flecha del agitador mediante un cople flexible, ver figura 15. Se colocó un buje concéntrico a la flecha del motor M2 fabricado en latón con un diámetro interno de 8 mm que restringe al eje del agitador a solo un movimiento de rotación (eje axial del agitador). El buje está soportado por una base fabricada en aluminio en forma de  $L$  que se sujeta a la placa de soporte del motor M2, ver figura 14.

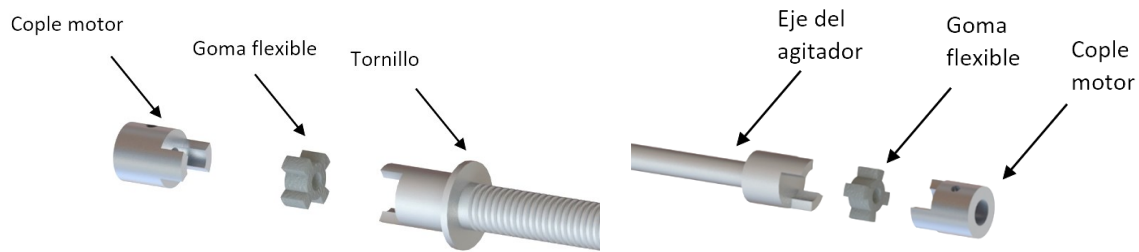


Figura 15) Coples flexibles del sistema. a) cople en el tornillo sin fin, b) cople flecha del agitador.

El sistema cuenta con un tanque cilíndrico transparente de vidrio con fondo plano, de un diámetro interior de 80 mm y una altura de 110 mm. El tanque cilíndrico descansa en una base con rodamiento axial, ver figura 14, y evita su deslizamiento con dos pernos fijos en la base. La base tiene un agujero concéntrico que permite la visualización del fondo del tanque al colocar una cámara en la parte inferior de este mismo.

Los agitadores están contruidos en acero inoxidable 304, se tienen tres agitadores de flujo radial y uno de cinta helicoidal que son intercambiables manualmente, ver figura 16. El agitador 1 se conoce como un agitador de paletas inclinadas, el 2 se conoce como un agitador *Rushton*, el 3 como un Scaba y el 4 es un agitador helicoidal.

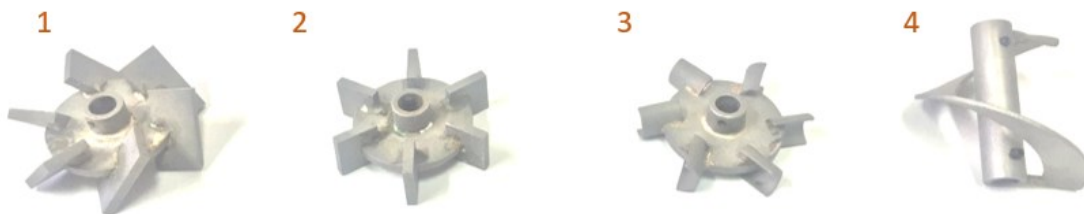


Figura 16) Agitadores de tipo radial y helicoidal.



# CAPÍTULO 3

## PROGRAMA DE CONTROL Y MONITOREO DEL PROTOTIPO

En este capítulo se describe el desarrollo del sistema de control, las variables a interpretar o manipular a partir de la lectura de las señales de los sensores. Además, el cómo se establece la operación del prototipo mediante un diagrama de flujo que permita la programación del microcontrolador.

### *3.1 Variables de control*

Las variables de control son aquellas que 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.

#### Posición

La variable de posición refiere a la distancia entre el fondo del tanque y el agitador, ver figura 17.

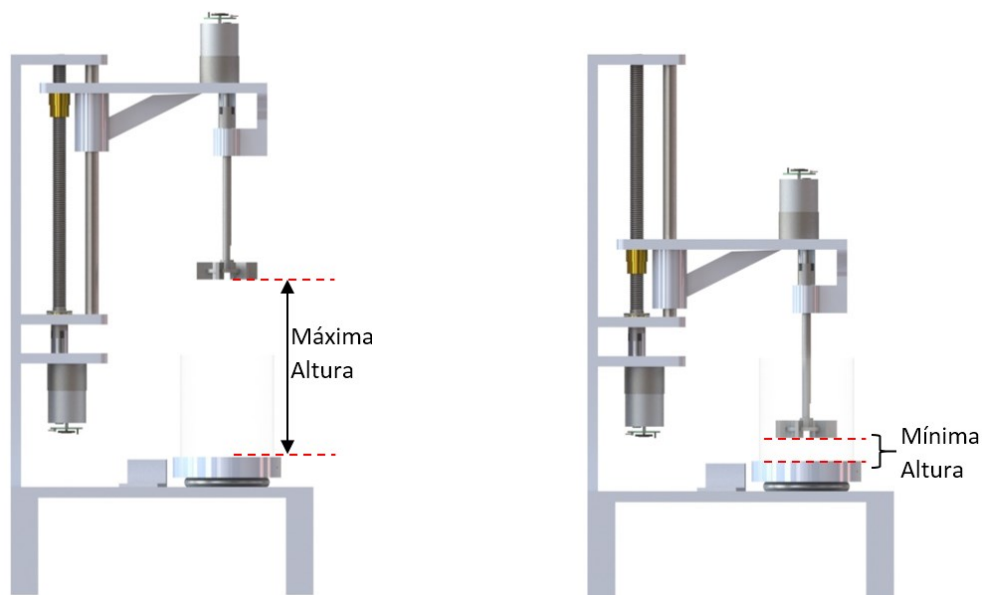


Figura 17) Posición máxima y mínima del agitador con respecto al tanque.

La longitud lineal entre la altura máxima y mínima es aquella que recorre el agitador y se relaciona con el número de pulsos que el *encoder* del motor M1 realiza. El resultado fue 42,000 pulsos en una longitud de 120 mm. Se determina un avance controlado por esta referencia de pulsos. En el supuesto de establecer solo dos posiciones del agitador en el sistema, el tornillo gira el equivalente de los 42,000 pulsos para subir y bajar el sistema de agitado.

## Velocidad

La agitación se realiza de manera controlada y constante, por lo que se hace uso de un control proporcional, integral y diferencial (*PID por sus siglas en inglés*), el cual se desarrolla a partir de las condiciones deseadas de tiempo de asentamiento, que determina el tiempo en que se estabiliza la señal controlada y el porcentaje de sobrepaso, que refleja el valor máximo que requiere la señal controlada para alcanzar el valor final deseado. La respuesta está restringida a un 3% de sobrepaso y un tiempo de asentamiento de 0.5 segundos, por lo que se obtuvieron las siguientes constantes para el control *PID*, ver anexo 6.

- $k_i=742.89$
- $k_d=5.354$
- $k_p=102.69$

El comportamiento se simuló para verificar los resultados obtenidos para el control *PID*, ver figura 18.

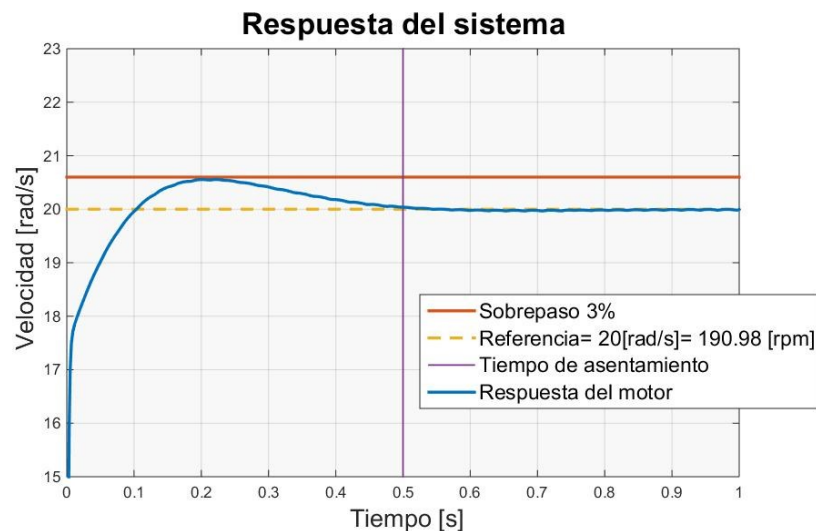


Figura 18) Simulación del comportamiento de un motor haciendo uso de un control *PID*.

## Fuerza

El sensor de fuerza permite realizar una estimación del par de torsión equivalente al movimiento transmitido al tanque de vidrio por el fluido en movimiento. El movimiento de rotación en el tanque hace que un brazo de palanca conectado a la base choque en el área activa de sensor, generando un voltaje que es sentido y posteriormente procesado para obtener la fuerza que se aplicó y por ende un par de torsión equivalente al movimiento de rotación, ver figura 19.

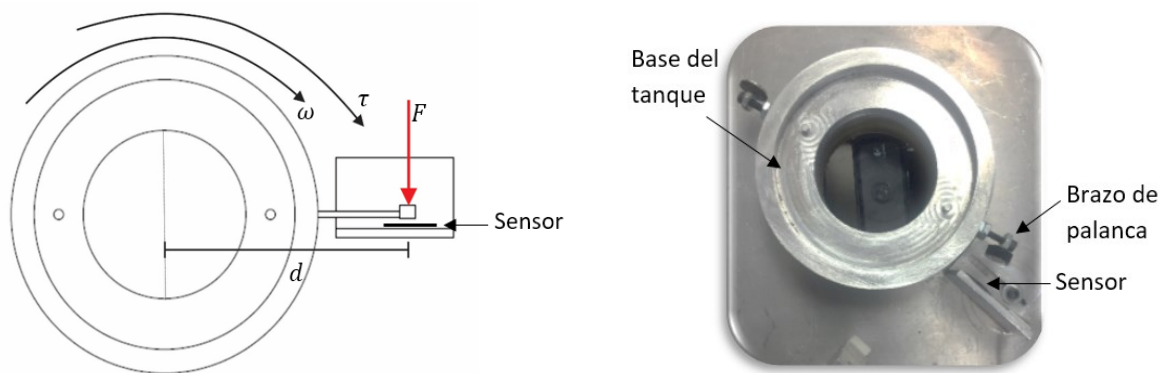


Figura 19) Sistema de sensor de fuerza.  $\omega$ =Velocidad angular del rodamiento,  $T$ =Par de torsión en el rodamiento,  $F$ =Fuerza aplicada en el sensor de fuerza.  $d$ =Distancia del brazo de palanca.

Una vez que se registra la señal de la fuerza aplicada, se hace uso de la ecuación (1) para obtener el par de torsión equivalente a partir del voltaje sentido.

$$T = F * d = (0.9212 * V_F + 0.1833) * d \quad (1)$$

donde:

$V_F$  = Voltaje en el sensor

$F$  = Fuerza en el sensor

$d$  = Brazo de palanca

### 3.2 Diagrama de flujo y control

El control y operación del prototipo establece el orden en que las diferentes acciones deben ser activadas. Por lo que se estable un diagrama de bloques donde se ordenan las acciones que se deben realizar para que el prototipo opere, ver figura 20.

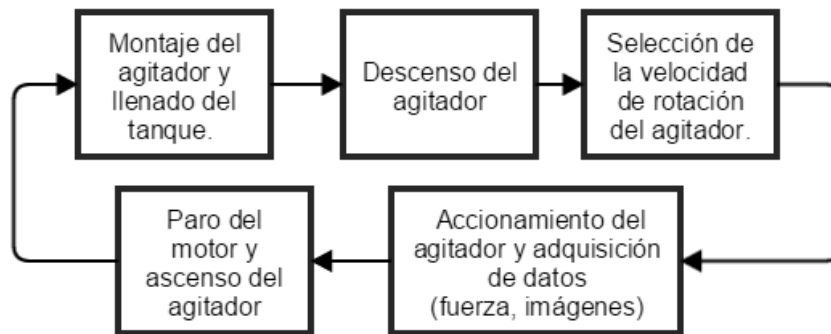


Figura 20) Diagrama de bloques de las acciones del prototipo.

Se establecieron las entradas y salidas del sistema como se muestra la figura 21.

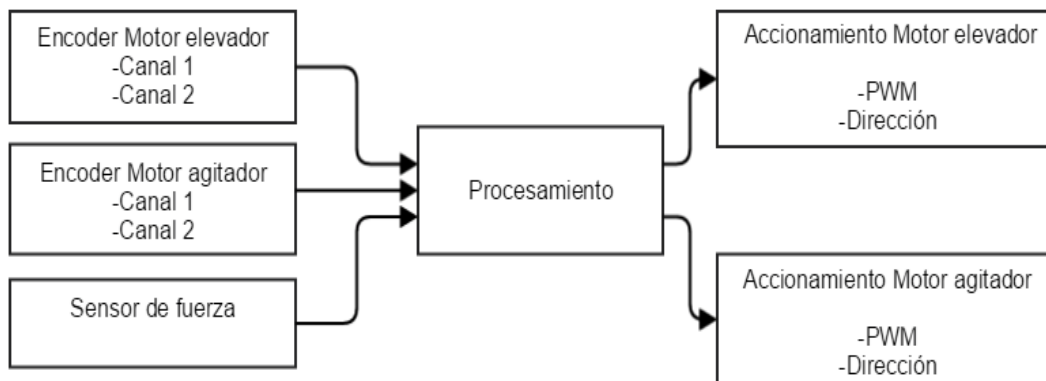


Figura 21) Diagrama de entradas y salidas.

La tabla 1 muestra las entradas y salidas utilizadas con su identificador o etiqueta, asignado para llevar a cabo la programación en el microcontrolador.

*Tabla 1. Entradas y salidas del microcontrolador*

Nombre	Entrada/Salida	Etiqueta	Tipo
Encoder canal 1 elevador	Entrada	EncA11	Digital
Encoder canal 2 elevador	Entrada	EncB12	Digital
Encoder canal 1 agitador	Entrada	EncA21	Digital
Encoder canal 2 agitador	Entrada	EncB22	Digital
Sensor de fuerza	Entrada	S_FSR	Analógica
Señal PWM elevador	Salida	Motor1	Analógica
Sentido de giro elevador	Salida	DirM11	Digital
Freno elevador	Salida	BrkM11	Digital
Señal PWM agitador	Salida	Motor2	Analógica
Sentido de giro agitador	Salida	DirM21	Digital
Freno agitador	Salida	BrkM21	Digital

La programación se realizó en el Ambiente de Desarrollo Integrado (IDE, por sus siglas en inglés) *Energía*. Este IDE facilita la configuración para establecer algún tipo de comunicación con diferentes periféricos externos. Se elige una comunicación serial mediante el *UART* (Unidad Asíncrona de Recepción y Transmisión de datos), debido a que la comunicación se realiza mediante la conexión *USB*. La transmisión de datos es de 9600 *bps* (*Baudios* por segundo) y se usa una cadena de 5 *bytes* para la transmisión de información. Esta cadena es enviada desde la interfaz de usuario y el mensaje es decodificado en el microcontrolador para saber qué acción debe ejecutar. La cadena contiene la información mostrada en la tabla 2.

*Tabla 2. Mensaje recibido.*

A	B	1	2	5	0
Computador	Micro	Acción	Velocidad de rotación del agitador		

Basado en lo establecido para el desarrollo de la programación se realizó el diagrama de flujo que se muestra en la figura 22.

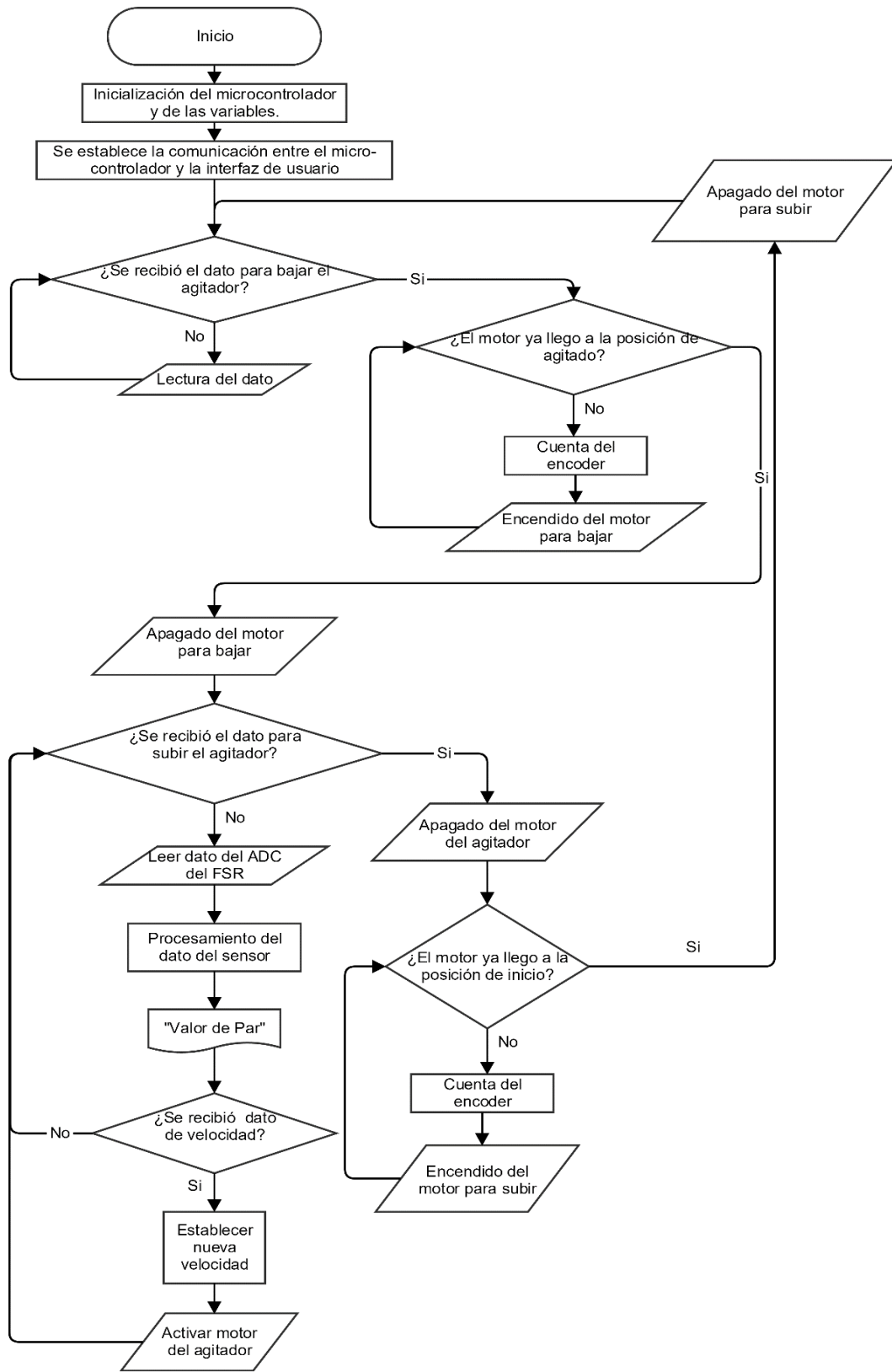


Figura 22) Diagrama de flujo del programa.

# CAPÍTULO 4

## DESARROLLO DE LA INTERFAZ DE USUARIO

En este capítulo se abordará sobre el desarrollo de la interfaz de usuario, haciendo una breve descripción de los sistemas que lo componen y la lógica en que opera, además de describir el sistema de adquisición de imágenes.

### 4.1 LabVIEW

*LabVIEW* es un *software* destinado al desarrollo de instrumentos virtuales (*VI*, por sus siglas en inglés) que permiten realizar la adquisición y el análisis de datos experimentales, la automatización de procesos y el control instrumental mediante la programación gráfica con lenguaje G. Además de las funciones básicas de todo lenguaje de programación, también incluye librerías específicas para comunicarse con distintos tipos de *hardware*, tanto del fabricante como de terceros, ya sea para adquirir datos o ejecutar alguna acción.

Por otro lado, los indicadores de datos o controles del sistema se visualizan mediante objetos virtuales como leds, botones, perillas, pantallas, etc., con lo que la programación gráfica muestra cifras, o algún control donde se establezcan parámetros de operación, ver figura 23.

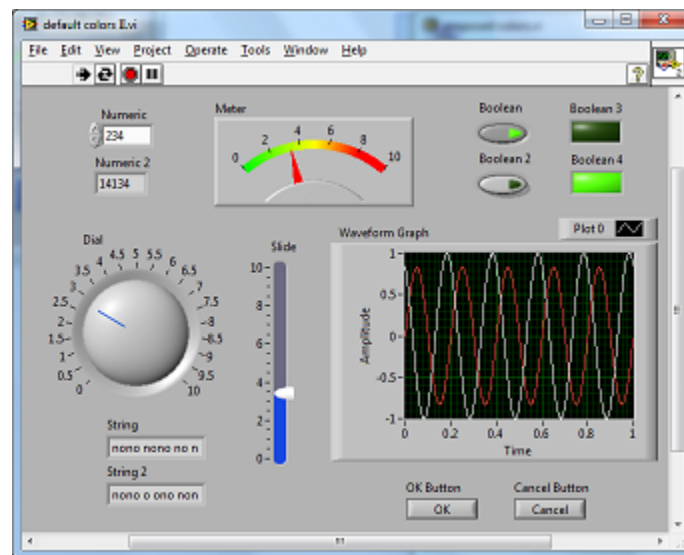


Figura 23) Panel de control con diferentes indicadores y controles.

## 4.2 Descripción de la interfaz de usuario

La interfaz gráfica de usuario muestra los accesorios virtuales de control del sistema y adquiere imágenes del proceso. La comunicación entre la computadora y el microcontrolador se lleva a cabo por una comunicación serial. Esta comunicación inicia cuando en el cuadro de control se elige el identificador del microcontrolador llamado *COM-X*, donde la *X* representa un número que le fue asignado a ese microcontrolador en específico. En la interfaz gráfica se crea un mensaje con la información de la acción que se quiere realizar y es enviada a través del puerto *USB* al microcontrolador, ver figura 24.

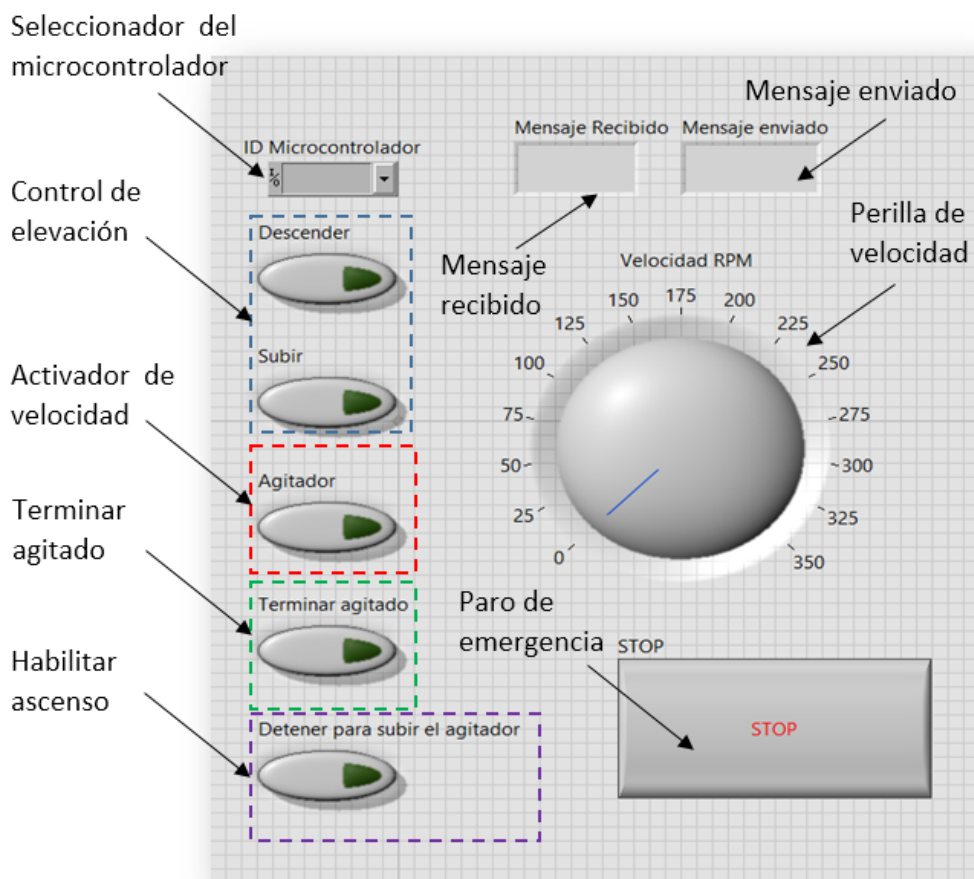
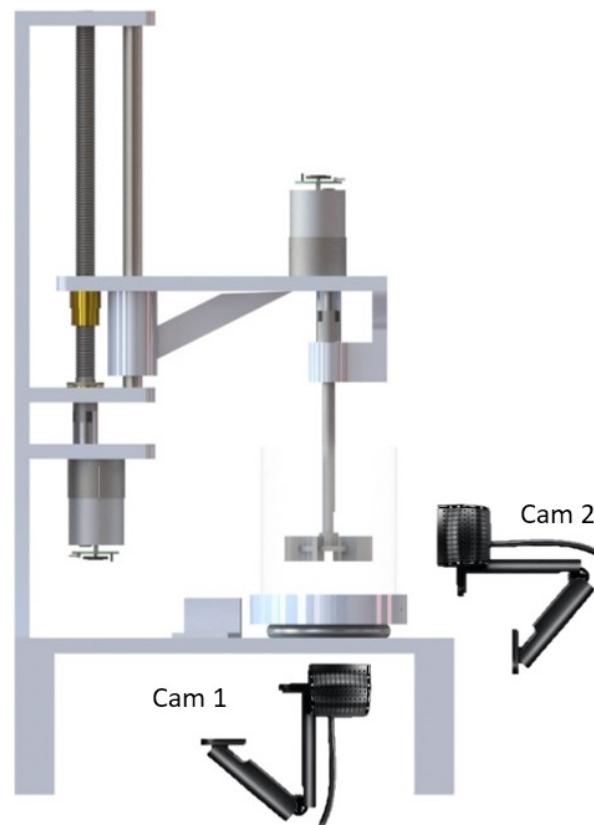


Figura 24) Panel de control del mezclador.

La interfaz contiene 5 botones colocados en la parte izquierda de la pantalla y acomodados de forma vertical, ver figura 24; el par de botones superiores, permiten establecer la posición del agitador y son de tipo pulsador. El siguiente botón es enclavado y permite activar la velocidad de rotación del agitador.



Los botones siguientes son de tipo pulsador, uno detiene la operación de rotación del agitador y el otro detiene el proceso completo de agitado para poder habilitar el botón de subir el agitador. Existe un botón en la parte inferior derecha que sirve como un paro de emergencia, es de tipo pulsador. En la parte central de la interfaz se muestra una perilla que permite establecer la velocidad de rotación del agitador. En la parte superior de la interfaz, el cuadro de texto nombrado como mensaje recibido muestra el par de torsión calculado a través de la lectura del sensor de fuerza resistivo. Además, en la etapa de ascenso y descenso muestra un mensaje que confirma que si se están ejecutando estas acciones.



*Figura 25) Configuración de las cámaras en el equipo.*

La parte de la adquisición de imágenes en la interfaz está formada por dos pantallas que muestran las imágenes que proporciona cada cámara, ver figura 26. Siendo la pantalla izquierda la cámara inferior y la derecha la cámara frontal, ver figura 25. En la misma interfaz, existen dos controles que permiten seleccionar las cámaras que se van a utilizar y dos controles que permiten elegir el directorio o el lugar específico en la que las fotos se van almacenar, ver figura 26.

Estas pantallas muestran la imagen con una serie de filtros que permitan obtener una visualización de referencia del proceso de agitación; es decir, muestran dos tonos que permiten contrastar la homogeneidad de la mezcla, el tono blanco corresponde al tono del líquido en la región del tanque y el negro representa todo aquello que no corresponde a este.

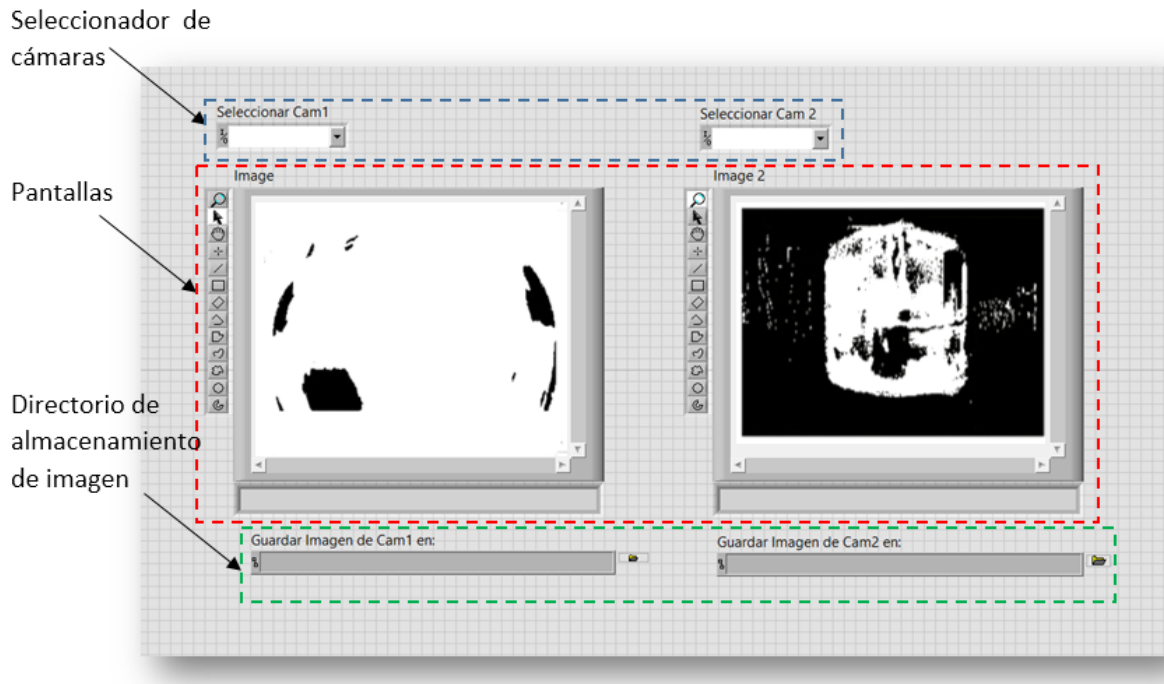


Figura 26) Panel de visualización de las cámaras.

### 4.3 Adquisición de imágenes

La adquisición de imágenes se realiza por medio de *NI-IMAQdx*, que es una interfaz de programación de aplicaciones (*API*, por sus siglas en inglés) integrada en *LabVIEW* y de filtros que permiten identificar las fases de la mezcla por medio de la percepción del color, identificando longitudes de onda que están asociadas a los colores de cada fase. La identificación de los colores se realiza por medio del canal *H* del modelo *HSL* (por sus siglas en inglés *Hue Saturation Lightness*). La representación gráfica de estas tres propiedades genera una geometría en forma de doble cono, ver figura 27 a), donde la circunferencia generatriz corresponde a la representación del canal *H*. Este sistema favorece el desarrollo de algoritmos para el procesamiento de imágenes, ya que el canal *H* por medio del ángulo, respecto a la horizontal, con valores de 0 a 360°, asigna a cada grado un tono en específico, facilitando la identificación de estos en una imagen.

Los colores primarios rojo, verde y azul se encuentran  $120^\circ$  uno del otro, donde  $0$  y  $360^\circ$  representan la misma tonalidad de rojo, ver figura 27 b). El canal  $L$  corresponde a la coordenada en el eje vertical del cono y representa la intensidad luminosa del color en una imagen, oscilando entre los valores de  $0$  a  $1$ . El canal  $S$  representa la distancia al centro (radio) e indica la saturación de la imagen la cual representa una densidad de color y tiene la misma escala que el canal  $L$ . El canal  $H$ , es el único que se extrae para el análisis, debido a que los otros dos canales se consideran variaciones de reflejo y de densidad de color, por lo que el matiz sigue siendo el mismo bajo condiciones específicas de iluminación o variación de las anteriores.

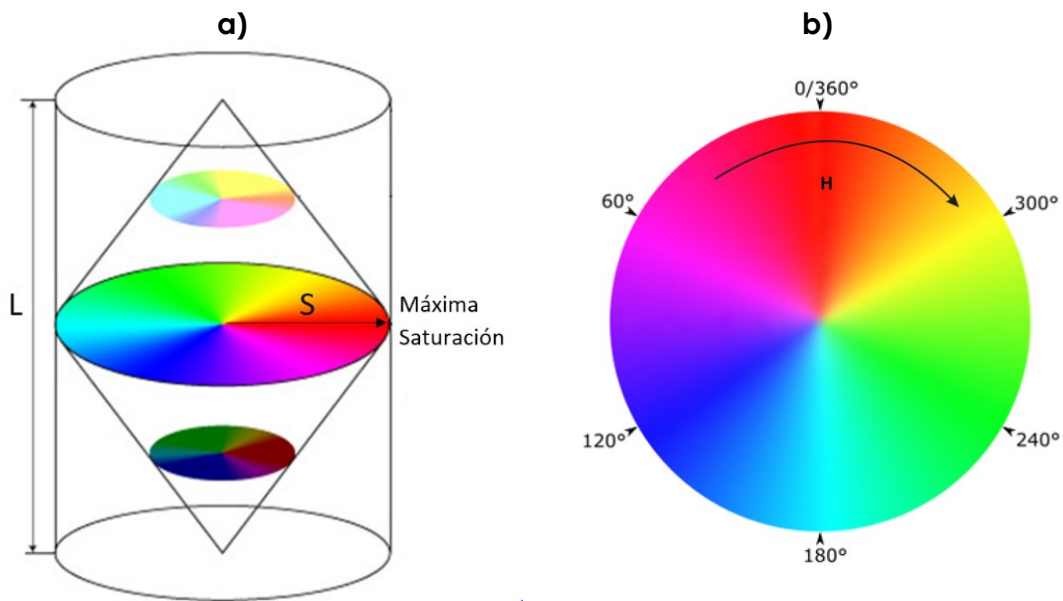


Figura 27) Modelo HSL.

La separación de los canales del sistema HSL se hizo a través del Asistente de Visión de *LabVIEW*. Un módulo de extracción de color de plano permitirá obtener el canal  $H$ . Esta separación genera una nueva imagen con la información solo de las tonalidades y a cada pixel de la imagen original se le asigna el valor de tono que le corresponde. Así, cuando se tiene una imagen completamente de color rojo, ver figura 28 a), se le asignará a cada pixel el valor cercano a  $0^\circ$  o  $360^\circ$ . Sin embargo, la imagen que se genera utiliza como base una imagen de 8 bits y cada pixel tiene como máximo 8 bits para asignar información por lo que el intervalo será de  $0$  a  $255$  únicamente, donde  $0$  es equivalente a  $0^\circ$  y  $255$  es equivalente a  $360^\circ$ . Finalmente, la imagen de color rojo después del filtro tendrá valores cercanos a  $0$  y  $255$ , ver figura 28 b).

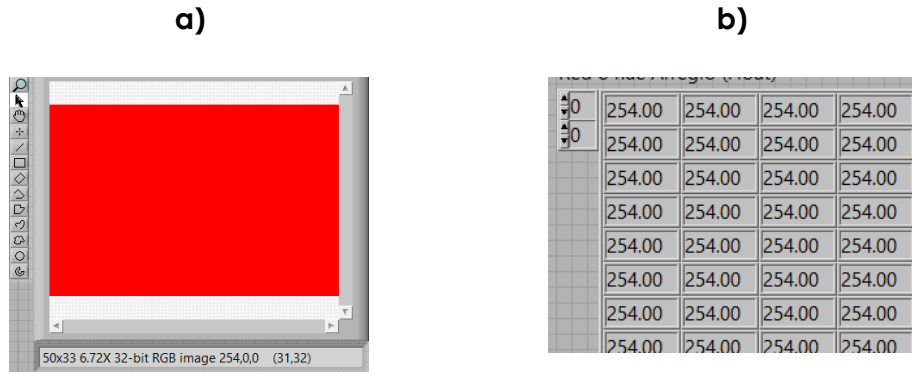


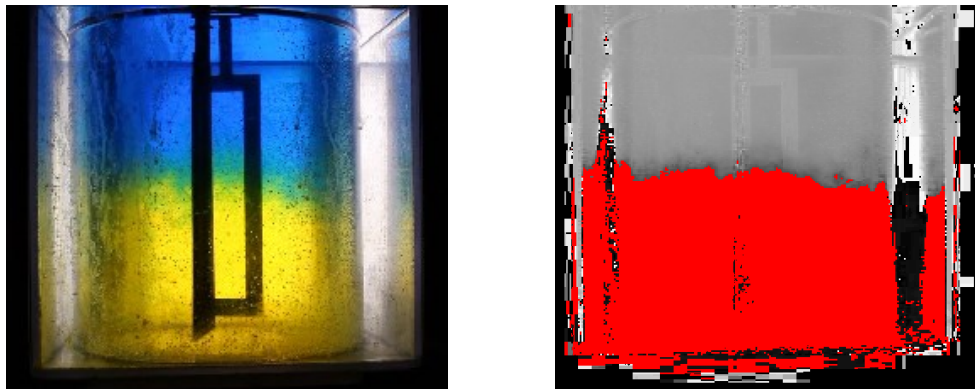
Imagen original de 50x30 pixeles    Información de cada pixel en el canal H

*Figura 28) Extracción del canal H.*

La segunda parte del proceso consta de la caracterización de las fases del fluido para identificar cuáles son los valores en el canal  $H$  de la mezcla final. Esto genera un umbral de valores en el canal  $H$  que permitirá distinguir los pixeles que ya alcanzaron la tonalidad final de la mezcla, ver imagen 29.

Imagen original

Imagen con filtro



*Figura 29) Extracción de los pixeles con color final.*

Posteriormente, el algoritmo hace uso de una máscara y asigna un color blanco a los pixeles del tono original, conforme el proceso avanza esa máscara desaparece cuando detecta que ha alcanzado valores del tono final. Esta máscara se genera en una nueva imagen, que se actualiza y guarda cada que se toma una nueva imagen, ver figura 30.

Imagen original

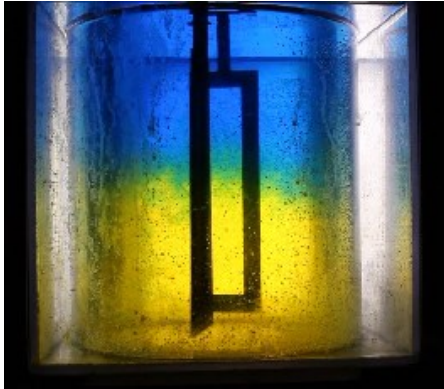
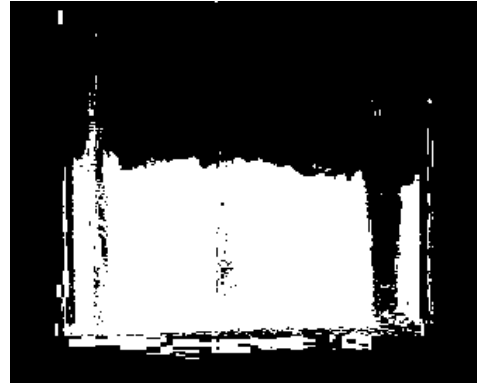


Imagen final con mascara



*Figura 30) Imagen final con filtros.*

Una vez que los pixeles blancos hayan desaparecido de la imagen la mezcla se considera que es homogénea. La adquisición de las imágenes se realiza en 5 fotos por segundo, lo que permite cuantificar un tiempo aparente de mezclado haciendo un conteo de las imágenes hasta que se vuelve homogénea la mezcla. Esta visualización se realizó con un fluido translucido y un identificador de pH que funciona como colorante, el método se describirá posteriormente.

# CAPÍTULO 5

## IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

En este capítulo se describe la caracterización del sistema de adquisición de par de torsión, así como de los experimentos que se realizaron con el prototipo final, ver figura 31, para la obtención de resultados al llevar a cabo una práctica en grupo piloto de la Facultad de Química.

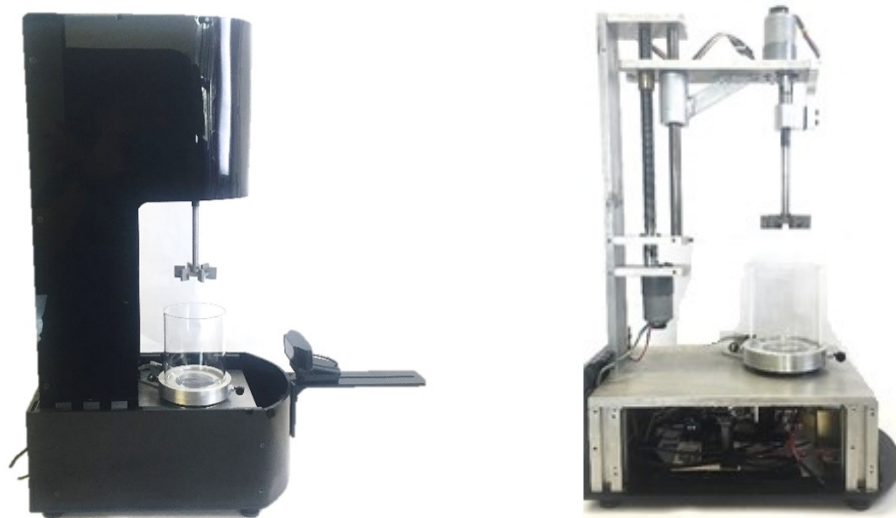


Figura 31) Prototipo final.

### 5.1 Calibración del sistema de par de torsión

El sistema de adquisición de par de torsión se calibró por medio del cálculo de una fuerza auxiliar inducida por diferentes pesos establecidos. El sistema para calibrar el sensor, consta de un hilo colocado a  $90^\circ$  que sujeta en un extremo el brazo de palanca a una distancia de 14.13 mm del punto de choque en el sensor y del otro extremo del hilo se sujetan objetos que previamente se cuantificaron su peso, ver figura 32 a). Los objetos al ser colocados en el arreglo generan un movimiento de rotación en la base del tanque y por consecuencia una fuerza de tensión en hilo permitiendo obtener una estimación de la fuerza aplicada en el sensor, debido a que el par en el sistema obedece a la ecuación (2).

$$F_{sensor}(r + d_1 + d_2) = F_{auxiliar}(r + d_1) \quad (2)$$

La fuerza auxiliar y la fuerza en el sensor generan el mismo par de torsión pero con un diferente brazo de palanca, ver figura 32 b).

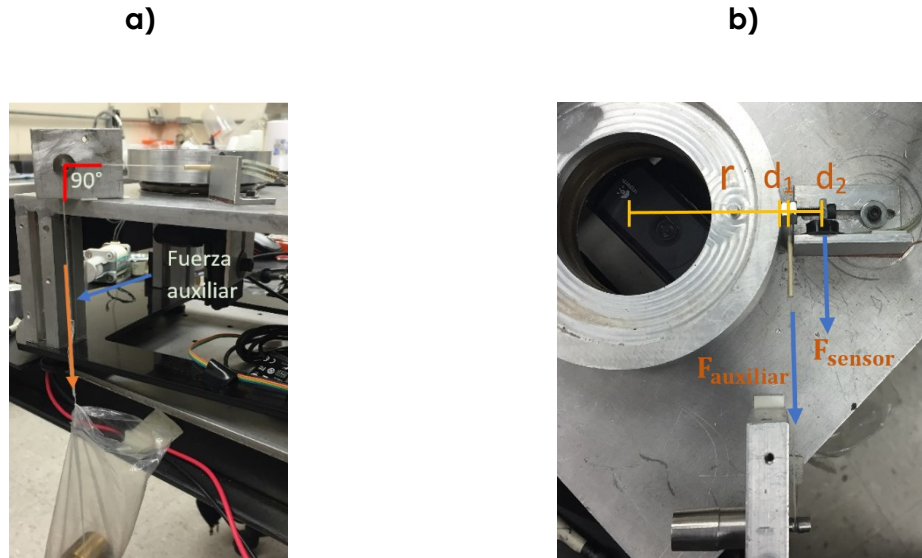


Figura 32) Calibración del sistema de par de torsión.

En la calibración se registra el voltaje que genera la masa de cada objeto establecido y se calcula la fuerza como  $F=mg$ ; siendo  $m$  la masa de los objetos y  $g$  la aceleración de la gravedad. Posteriormente, por medio de la ecuación (2) se obtiene la fuerza equivalente en el sensor para generar el mismo movimiento de rotación en la base con el mismo par de torsión. Una regresión de los datos registrados anteriormente, permite obtener una ecuación que describe el comportamiento de la fuerza en función del voltaje sentido, ver figura 33. Finalmente esta fuerza calculada permite obtener la ecuación (1) que proporciona el par de torsión realizado por la fuerza ejercida en el área activa del sensor, dato que se necesita para él cálculo de la potencia en los experimentos.

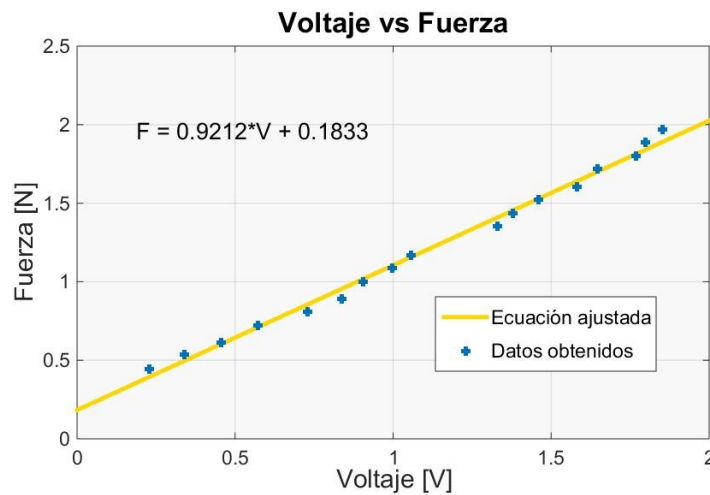


Figura 33) Gráfica de calibración en el sensor de fuerza.



## 5.2 Descripción de los experimentos

Una vez caracterizado el sistema de par de torsión y la adquisición de imágenes para estimar tiempo de mezclado aparente se llevaron a cabo una serie de experimentos para corroborar el funcionamiento del sistema de adquisición de par de torsión y la adquisición de imágenes.

Los experimentos para la estimación de par de torsión consisten en colocar fluido en el tanque y aplicarle una agitación desde una velocidad de rotación baja hasta la velocidad máxima que permite el motor. Se registran los valores para cada velocidad de 0 a 350 RPM con un incremento de 50 RPM. El proceso se repite para otro agitador y se realiza la misma variación de velocidad. Una vez calculado el par de torsión se puede obtener la potencia como  $P=\omega \cdot T$ , donde  $\omega$  es la velocidad de rotación del agitador en radianes por segundo y T el par de torsión calculado.

Para la adquisición de imágenes se utiliza un fluido translucido que permita observar visualmente el efecto de colorimetría por medio del verde de bromocresol que es un indicador de potencial hidrógeno (pH, por sus siglas). Una vez colocado el fluido en el tanque, se le aplica una agitación con una velocidad angular de 300 RPM, posteriormente se ingresa un solución de 5 ml que permita aumentar el índice de basicidad en el líquido, esto con el fin de hacer actuar al indicador desde un medio base a uno ácido. Posteriormente, se vierten 20 gotas de verde bromocresol, observando que el indicador tiñe al líquido de un tono azul correspondiente a la base. Enseguida se vierten 10 ml de una solución acida para cambiar el tono de color a un tono amarillo que corresponde a un líquido ácido haciendo que actúe el indicador de pH, ver figura 34, es ahí cuando se empiezan a contabilizar las imágenes para poder determinar un tiempo estimado de mezclado en la sustancia que se agita.

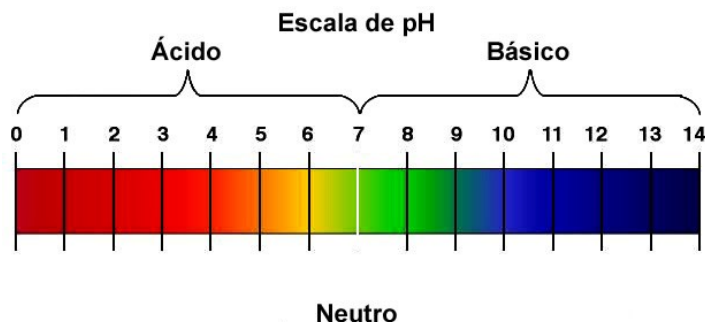


Figura 34) Escala de PH.



### 5.3 Fluidos de prueba

Se utilizó glicerol o glicerina ( $C_3H_8O_3$ ) como fluido de prueba, que es un líquido incoloro, inodoro, de sabor azucarado y que expuesto al aire atrae humedad. Es un solvente y en mayores concentraciones tiene una acción conservadora de alimentos. Disuelve sales, gomas, hidratos de carbono solubles, almidón, etc., lo que proporciona condiciones ideales para ser usado en campos de aplicación; alimenticios, farmacéuticos, cosméticos, fabricación de explosivos, automotrices, y conservador en algunas formulaciones líquidas, etc. Tiene una densidad de  $1261 \text{ kg m}^{-3}$  y una viscosidad de  $1.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , ver Anexo 7.

Además de utilizar la glicerina en su forma pura, se hace uso de una solución de Glicerol-agua-0.5% Poliacrilamida (PAA, gli-PPA), también de propiedades traslucidas. Sin embargo este fluido es no newtoniano, con un índice de consistencia  $K= 2.067 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  y un índice de flujo de  $n=0.64$ .

### 5.4 Resultados

Los resultados obtenidos por el sistema de estimación de par de torsión para 350 ml de glicerina con poliacrilamida se observan en la tabla 3.

Tabla 3. Mediciones de par para Glicerica con poliacrilamida

Velocidad angular [RPM]	Agitador Rushton			
	Fuerza [ $\text{N}\cdot 10^{-3}$ ]	Par de torsión [ $\text{N}\cdot\text{m}\cdot 10^{-3}$ ]	Desviación estándar	Potencia [mW]
250	2385.4252	160.4437	14.234841	4200.4062
300	3498.4835	235.308	66.463733	7392.4188
350	6323.2233	425.3	43.7543	15588.059
Velocidad angular [RPM]	Agitador Scaba			
	Fuerza [ $\text{N}\cdot 10^{-3}$ ]	Par de torsión [ $\text{N}\cdot\text{m}\cdot 10^{-3}$ ]	Desviación estándar	Potencia [mW]
250	1968.83586	132.4239	18.575298	3466.84959
300	2657.72673	178.7587	47.757982	5615.87018
350	5954.21647	400.4806	57.604364	14678.3806

Los datos son el promedio de 100 muestras con un tiempo de muestreo de 200 ms.

El sensor de fuerza de tipo resistivo muestra datos a partir de una velocidad mayor a 250 RPM, aunque a menores velocidades el movimiento de rotación también era visible.

Se observó un incremento de fuerza en el sensor al incrementar la velocidad de rotación ocasionando también un incremento en el par de torsión y la potencia de agitado. En el caso de la glicerina con poliacrilamida se observó un comportamiento en el que se generaban excentricidades de masa alrededor del eje de agitación, ver figura 35.

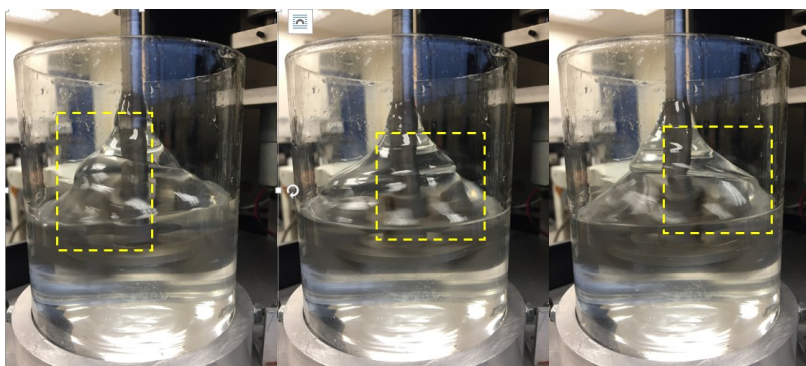


Figura 35) Excentricidades en el fluido.

La tabla 4 muestra los datos estimados por el sistema de par de torsión para 350 ml de glicerina pura. El agitador Rushton proporcionó información, mientras que el agitador Scaba no lo hizo, debido a la baja viscosidad de la glicerina pura y la configuración del agitador Scaba. El comportamiento de la glicerina durante el agitado presentó pequeñas excentricidades, que el sensor evidenció en las mediciones.

Tabla 4. Mediciones de par para Glicerina pura

Velocidad angular	Agitador Rushton			
	Fuerza [ $N \cdot 10^{-3}$ ]	Par de torsión	Desviación estándar	Potencia [mW]
		[ $N \cdot m \cdot 10^{-3}$ ]		
200	0	0	0	0
250	0	0	0	0
300	1542.96759	103.78	23.013	3260.34486
350	2355.78353	158.45	31.6531	5807.49582

Para la adquisición de imágenes la cámara frontal se colocó a 80 mm del tanque de agitado y la inferior a 38 mm aproximadamente. Se utilizaron 300 ml de glicerina pura y una velocidad de rotación de 300 RPM para un agitador *Rushton*. En la figura 36 se muestran las seis imágenes más representativas del experimento con el tiempo estimado en que se generó cada una.

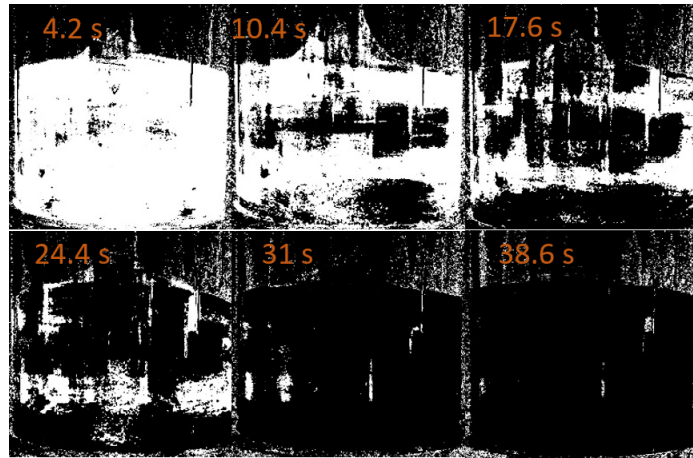


Figura 36) Imágenes parte frontal, Glicerina pura y agitador *Rushton*.

Se observa el cambio de color en los píxeles debido a la coloración por medio del indicador de pH. Teniendo un total de 193 imágenes al término del experimento y un tiempo total de mezclado de 38.6 segundos. Análogamente se tomaron las imágenes de la parte inferior del tanque, con un total de 45 imágenes y un tiempo de 9 segundos, ver figura 37.

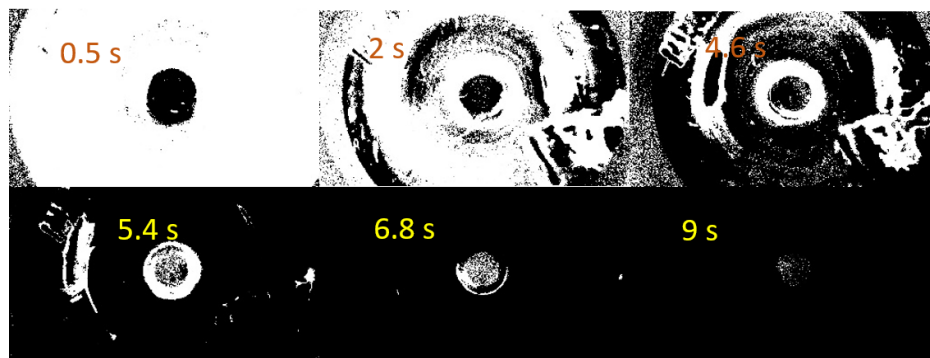


Figura 37) Imágenes parte inferior del dispositivo, Glicerina pura y agitador *Rushton*.

El agitador *Scaba* se utilizó de la misma manera que el *Rushton*. En la figura 38 se muestran las seis imágenes más representativas de la parte frontal del experimento con un tiempo de estimado de 42.6 s y un total de 213 imágenes.

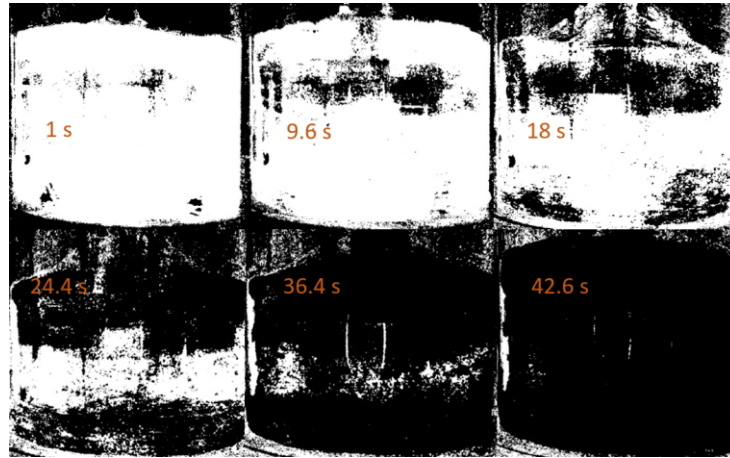


Figura 38) Imágenes parte frontal del dispositivo, Glicerina pura y agitador *Scaba*.

La figura 39 muestra las imágenes tomadas por la cámara inferior con tiene un tiempo de 14.2 s y con un total de 71 imágenes.

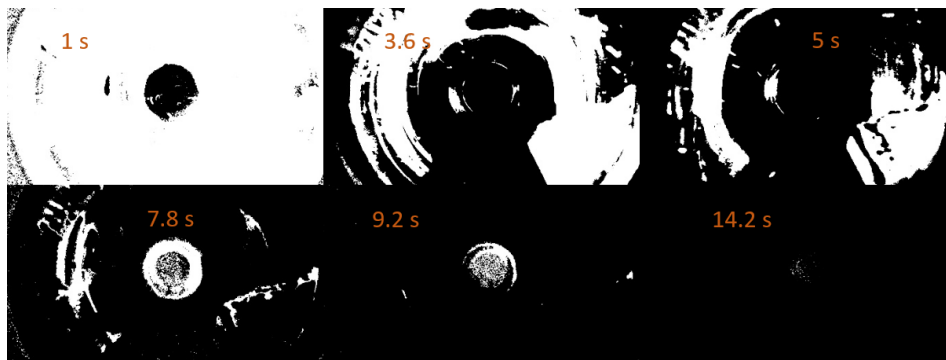


Figura 39) Imágenes parte inferior del dispositivo, Glicerina pura y agitador *Scaba*.

Para los experimentos con glicerina con poliacrilamida las cámaras se configuraron de la misma manera que para los experimentos con glicerina pura y se utilizaron 300 ml de glicerina con poliacrilamida.

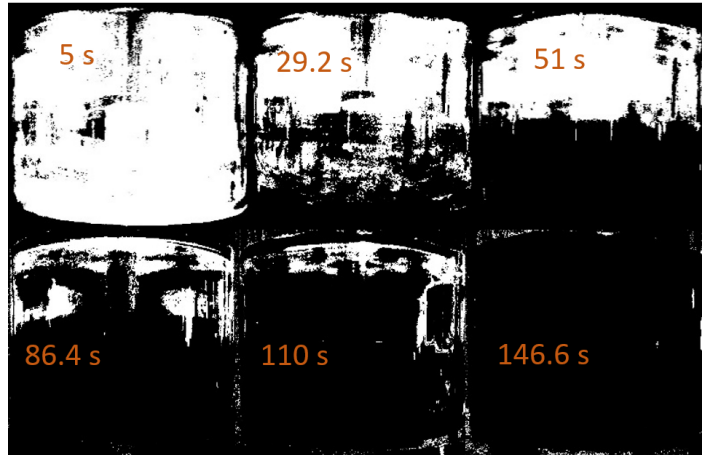


Figura 40) Imágenes parte frontal del dispositivo, Glicerina-PAA y agitador Rushton.

Se observa para este fluido el cambio de color en los píxeles, el total es de 733 imágenes al término del experimento y un tiempo total de mezclado de 146.6 segundos, ver figura 40. De manera análoga se tomaron las imágenes de la parte inferior del tanque con un total de 404 imágenes y un tiempo de 80.8 segundos, ver figura 41.

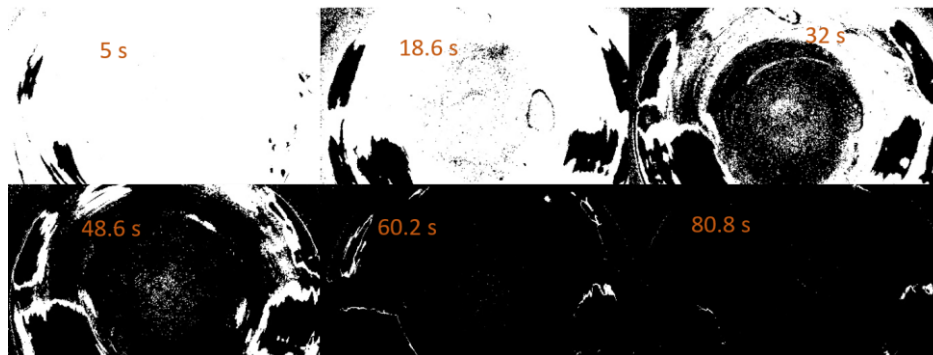


Figura 41) Imágenes parte inferior del dispositivo, Glicerina PAA y agitador Rushton.

Posteriormente se utilizaron 300 ml de glicerina con poliacrilamida para el agitador *Scaba* con la misma configuración del sistema para el experimento con el agitador *Rushton*. Se observa el cambio de color en los píxeles con un total de 993 imágenes al término del experimento y un tiempo total de mezclado de 198.6 segundos, ver figura 42.

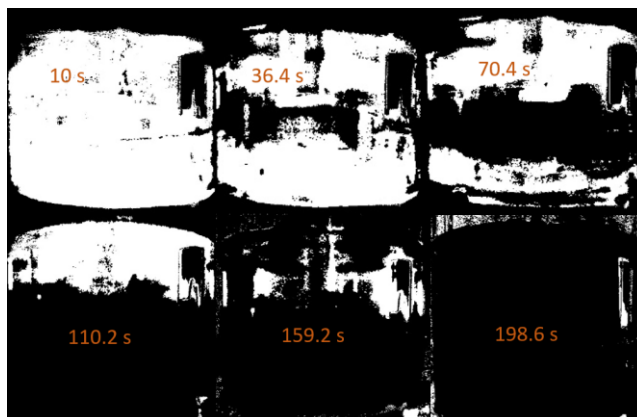


Figura 42) Imágenes parte frontal del dispositivo, Glicerina PAA y agitador Scaba.

De manera análoga se tomaron las imágenes de la parte inferior del tanque, dando como resultado un total de 45 imágenes y un tiempo de 9 segundos, ver figura 43.

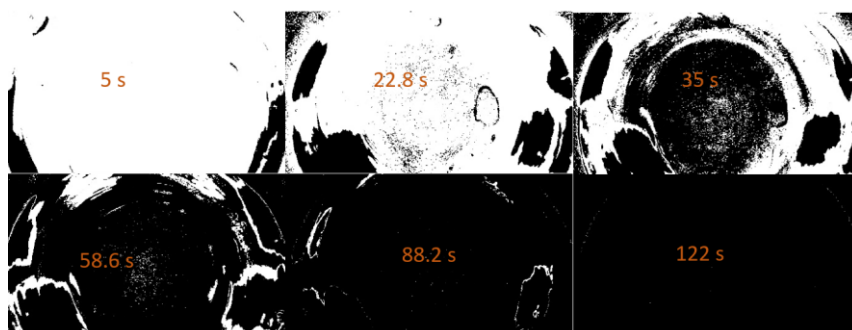


Figura 43) Imágenes parte inferior del dispositivo, Glicerina PAA y agitador Scaba.

Finalmente en la tabla 5 se muestran los tiempos de mezclado con respecto al agitador utilizado.

Tabla 5. Mediciones de tiempo de mezclado

Agitador/ Fluido	Rushton		Scaba	
	Vista frontal	Vista inferior	Vista frontal	Vista inferior
Glicerina pura	38.6 s	9 s	42	14.2 s
Glicerina PAA	146.6 s	80.8 s	198.6 s	122 s

## CONCLUSIONES

En esta tesis se presentó la construcción y operación de un prototipo de mezclado con fines didácticos que permite realizar pruebas para estimar el tiempo de mezclado por colorimetría en tanques agitados mecánicamente, así como determinar el par de torsión equivalente y por tanto el consumo de potencia. La interfaz de usuario desarrollada en LabVIEW es funcional y permite la interacción del usuario con la operación del sistema de mezclado, posicionamiento del agitador, velocidad de rotación del agitador y la selección de imágenes.

El sistema construido permite obtener datos representativos de distintos fluidos del par de torsión y potencia a partir de la implementación de un sensor de fuerza de tipo resistivo y un brazo de palanca. Así mismo, demuestra su funcionalidad al ser evaluado con los agitadores tipo *Rushton* y *Scaba*. Se realizaron experimentos con glicerina pura y glicerina-PPA con ambos agitadores, demostrando que el agitador *Rushton* genera valores de mayor magnitud que el *Scaba*, en el caso gli-PPA, lo que presume un consumo de mayor potencia. Mientras que con la glicerina pura el agitador *Rushton* es el único que genera datos de par.

El sistema de adquisición de imágenes permite adquirir 5 fotos por segundo, con una calidad de 1920x1080 pixeles y con un filtro que permite identificar la homogeneidad en una mezcla a partir de la tonalidad final de esta. La velocidad de captura de imágenes puede ser configurada para tener mayor o menor velocidad reduciendo la calidad de la imagen. Se observó que el tiempo de mezclado es menor para el agitador *Rushton* en ambos fluidos. El tiempo de mezclado menor para las imágenes inferiores en comparación con las frontales se debe a que la base con rodamiento ocupa cierta área del fondo del tanque, haciendo que la cámara capture una parte proporcional al tamaño del orificio de la base.

Los resultados obtenidos con este equipo muestran una forma didáctica y visual de los dos parámetros necesarios para caracterizar el mezclado de un fluido y tener un panorama general de esta operación.

## TRABAJO A FUTURO

De acuerdo a las pruebas realizadas y los resultados obtenidos se generaron ideas para mejorar el funcionamiento del equipo y se enlistan a continuación.

-Mejorar el sistema de estimación de par en un mayor intervalo de operación y poder obtener potencia de mezclado para fluidos que presenten una viscosidad baja hasta una alta.

-Se propone realizar un nuevo mecanismo de elevación que corrija el cabeceo generado por el tornillo sin fin, haciendo más rápido el ascenso y descenso del agitador. Además de poder controlar manualmente esta posición.

-Mejorar el sistema de adquisición de imágenes, haciendo que sea capaz de detectar el tono de cualquier tipo de fluido sin importar su apariencia y propiedades reológicas. Posteriormente esto servirá para poder predecir el tono final de la mezcla sin que sea una caracterización previa de cada fase.

-Construir un sistema de emergencia en caso de falla eléctrica, donde una batería de respaldo servirá para posicionar el agitador en su condición de inicio.

-Realizar un reporte automático técnico al término de cada prueba donde se muestren los datos obtenidos así como graficas que representen las condiciones de operación.

-Diseñar un protocolo de pruebas formal para la implementación de prácticas con alumnos.



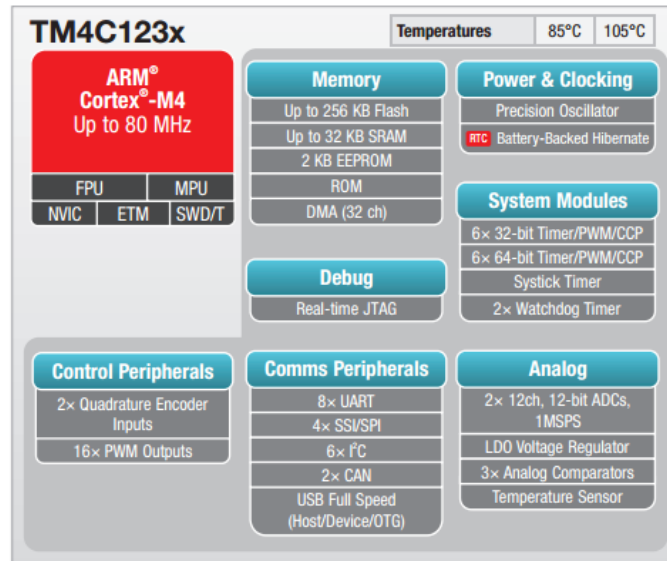
# BIBLIOGRAFÍA

1. Ascanio, G., Castro, B., & Galindo, E. (2004). Measurement of power consumption in stirred vessels: A review. *Chemical Engineering Research and Design*, 82(A9), 1282-1290.
2. Córdova-Aguilar, M. S. (2003). Estudio de las dispersiones de aceite, biomasa y aire en un sistema modelo de fermentación tetrafásica. Tesis de doctorado en Biotecnología., Universidad Nacional Autónoma de México.
3. Cruz, A. (17 de Mayo de 2014). Tutorial: Uso de Driver L298N para motores DC y paso a paso con Arduino. Obtenido de <http://electronilab.co/tutoriales/tutorial-de-uso-driver-dual-l298n-para-motores-dc-y-paso-a-paso-con-arduino/>
4. Espinosa Solares, T., Brito De la Fuente, E., Tecante, A., Medina-Torres, L., & Tanguy, P. (2002). Mixing time in rheologically evolving model fluids by hybrid dual mixing systems. *Chemical Engineering Research and Design*, 80, 817-823.
5. Floyd, T. L. (2008). *Dispositivos electrónicos* (Octava ed.). México: Pearson educación.
6. Galindo, E., Larralde, P., Brito, T., Córdova-Aguilar, M., Taboada, B., Vega-Alvarado, L., & Corkidi, G. (2005). Development of advanced image analysis techniques for the in situ characterization of multiphase dispersions occurring in bioreactors. *Journal of Biotechnology*, 116,261-270.
7. García, V. (10 de Abril de 2013). *Electrónica práctica aplicada*. Obtenido de <http://www.diarioelectronicohoy.com/blog/controladores-basicos-drivers>
8. García Haro, J. M. (Noviembre de 2011). Desarrollo de un controlador para motores. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Sistemas y Automática, Leganés.
9. Hidalgo Millán Antonio, Espinosa Rodríguez Miguel Ángel, Del Rosario Vázquez Ana Bertha (2014). Estudio hidrodinámico en tanques agitados con fluidos no-newtonianos. Obtenido de <http://somi.ccadet.unam.mx/somi29/memoriassomi29/PDFS/mecanica/45-SYSOMI-65-45.pdf>
10. Holland, F. A., & Chapman, F. S. (1996). *Liquid and Mixing Processing in Stirred Tanks*. New York: Reinhold.
11. Lázaro, A. M. (2001). *LabVIEW. Programación Gráfica para el control de instrumentación*. Paraninfo.
12. McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. México: McGraw-Hill Interamericana.

13. Middleton, J., & Smith, J. (2004). Chap. 11 Gas-Liquid Mixing in Turbulent Systems. En E. Paul, V. Atiemo-Obeng, & S. Kresta (Edits.), Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice. Wiley-Interscience.
14. Olddshue, J. Y. (1983). Fluid mixing technology. New York, USA: McGraw-Hill.
15. Pallás Areny, R. (1993). Adquisición y distribución de señales. Barcelona : Marcombo.
16. Quintero M., C. G., Oñate López, J. A., & Arias de la Hoz, H. J. (2011).
17. Instrumentación electrónica Aplicada. Barranquilla, Colombia: Universidad del Norte.
18. Reséndiz, R., Martínez, A., Ascanio, G., & Galindo, E. (1991). A new neumatic bearing dynamometer for power input measurement in stirred tanks. Chemical Engineering Technology, 14, 105-108.
19. Ruszkowski, S., & Musckett, M. (1985). Comparative mixing times for stirred tank agitators. 5th European Conference on Mixing (págs. 89-103). Würzburg, Germany: BHRA Fluid Engineering Centre, Cranfield, Bedford.
20. Sánchez López, J. d. (2002). Dispositivos electrónicos de potencia. Mexicali, Baja California , México: UABC.
21. Texas Instruments Incorporated. (2015). Tiva™ TM4C123GH6PM Microcontroller Datasheet. Austin, Texas.
22. Treybal, R. (1980). Mass Transfer Operations (Tercera ed.). New York, USA: McGraw-Hill.

# Anexos

## Anexo 1. Especificaciones del microcontrolador TM4C123GH6PM.



Fuente: Texas Instruments Incorporated. (2015). Tiva™ TM4C123GH6PM Microcontroller Datasheet.

## Anexo 2. Especificaciones del motorreductor 30:1 37Dx68L.

### Dimensions

Size:	37D x 68L mm <sup>1</sup>
Weight:	215 g
Shaft diameter:	6 mm

### General specifications

Gear ratio:	30:1
Free-run speed @ 6V:	175 rpm <sup>2</sup>
Free-run current @ 6V:	250 mA <sup>2</sup>
Stall current @ 6V:	2500 mA <sup>2</sup>
Stall torque @ 6V:	55 oz·in <sup>2</sup>
Free-run speed @ 12V:	350 rpm
Free-run current @ 12V:	300 mA
Stall current @ 12V:	5000 mA
Stall torque @ 12V:	110 oz·in
Lead length:	11 in

### Notes:

- <sup>1</sup> Length measurement does not include gearbox shaft or the raised area immediately around it.
- <sup>2</sup> This motor will run at 6 V but is intended for operation at 12 V.

Fuente: Catalogo Pololu Robotics and Electronics.

### Anexo 3. Especificaciones del Sensor de fuerza de tipo resistivo.



## General FSR Characteristics

These are typical parameters. The FSR is a custom device and can be made for use outside these characteristics. Consult Sales Engineering with your specific requirements.

### Simple FSR Devices and Arrays

PARAMETER	VALUE	NOTES
<b>Size Range</b>	Max = 20" x 24" (51 x 61 cm) Min = 0.2" x 0.2" (0.5 x 0.5 cm)	Any shape
<b>Device thickness</b>	0.008" to 0.050" (0.20 to 1.25 mm)	Dependent on materials
<b>Force Sensitivity Range</b>	< 100 g to > 10 kg	Dependent on mechanics
<b>Pressure Sensitivity Range</b>	< 1.5 psi to > 150 psi (< 0.1 kg/cm <sup>2</sup> to > 10 kg/cm <sup>2</sup> )	Dependent on mechanics
<b>Part-to-Part Force Repeatability</b>	± 15% to ± 25% of established nominal resistance	With a repeatable actuation system
<b>Single Part Force Repeatability</b>	± 2% to ± 5% of established nominal resistance	With a repeatable actuation system
<b>Force Resolution</b>	Better than 0.5% full scale	
<b>Break Force (Turn-on Force)</b>	20 g to 100 g (0.7 oz to 3.5 oz)	Dependent on mechanics and FSR build
<b>Stand-Off Resistance</b>	> 1MΩ	Unloaded, unbent
<b>Switch Characteristic</b>	Essentially zero travel	
<b>Device Rise Time</b>	1-2 msec (mechanical)	
<b>Lifetime</b>	> 10 million actuations	
<b>Temperature Range</b>	-30°C to +70°C	Dependent on materials
<b>Maximum Current</b>	1 mA/cm <sup>2</sup> of applied force	
<b>Sensitivity to Noise/Vibration</b>	Not significantly affected	
<b>EMI / ESD</b>	Passive device	
<b>Lead Attachment</b>	Standard flex circuit techniques	

Fuente: Catálogo de productos Sparkfun .

*Anexo 4.* Acondicionamiento de señal. Ganancia para el amplificador de voltaje. Para obtener una ganancia de 2 se propusieron  $R_2=4.7K \Omega$  y  $R_3=4.4 \Omega$  en una configuración de amplificador no inversor, se tiene que:

$$V_0 = \left(1 + \frac{4.7}{4.4}\right) * V_{entrada} = 2.068 * V_{entrada}$$

*Anexo 5.* Cálculo del capacitor para la fuente de alimentación.

$$C = 2.4 \frac{I_{cd}}{V_r}$$

Donde:

$C$  = Valor del capacitor [ $\mu F$ ]

$I_{cd}$  = Corriente consu [ $mA$ ]

$V_r$  = Valor de rizo deseado [ $V$ ]

La corriente de la carga es de aproximadamente de 2000 mA, y el voltaje de rizo de 120 mV.

*Anexo 6.* Cálculo del control PID para la velocidad del motor.

Para obtener la función de transferencia de la planta se tiene el siguiente diagrama del motor.

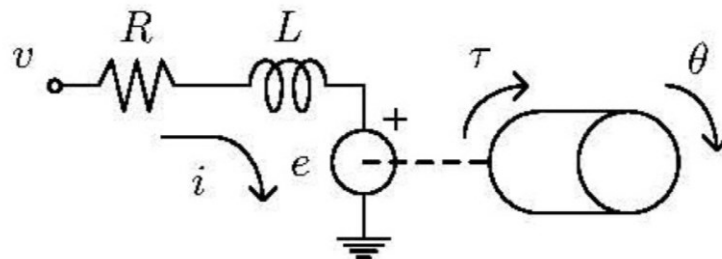


Figura A.1. Modelado del motor de corriente directa.

Donde:

$v$  = Voltaje de alimentación

$R$  = Resistencia de armadura

$L$  = Inductancia del embobinado

$i$  = Corriente en el motor

$e$  = Fuerza contraelectromotriz

$\tau$  = Par de torsión del motor

$\theta = \text{Posición}$

El modelado motor se divide en dos análisis básicos, uno mecánico y otro electrónico.

Parte Eléctrica

$$v = Ri + L * \frac{di}{dt} + ka * \omega$$

Siendo:

$\omega = \text{velocidad angular en el eje del motor.}$

$ka = \text{Constante de fuerza contraelectromotriz.}$

Parte Mecánica

$$\tau = kb * i = J * \frac{d\omega}{dt} + B * \omega$$

Siendo:

$B = \text{Coeficiente de fricción viscosa.}$

$J = \text{Momento de inercia polar.}$

$kb = \text{Constante de par.}$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, es posible obtener la función de transferencia de la velocidad en función de su voltaje de entrada:

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{kb}{(sL + R)(Js + B) + kb ka}$$

Despreciando la inductancia y el coeficiente de fricción viscosa, la función de transferencia se reduce a:

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{kb}{(RJs + kb ka)}$$

Las constantes del motor se determinan a través de pruebas que determinan el comportamiento dinámico y eléctrico del motor, sin embargo el fabricante menciona que para la constante de fuerza contraelectromotriz y de par, pueden ser calculadas de la siguiente manera.

$$ka_{@12Volts} = \frac{\text{Voltaje}_{nominal}}{\text{Velocidad}_{nominal}} = \left( \frac{12V}{350 \frac{Rev}{min}} \right) \left( \frac{60 s}{1 min} \right) \left( \frac{1Rev}{2\pi rad} \right) = 0.3274 \frac{V * s}{rad}$$

$$kb = \frac{T_{max}}{I_{max}} = \left( \frac{0.7768 N * m}{5 A} \right) = 0.15536 \frac{N * m}{A}$$

Para el cálculo de la resistencia se realizó una prueba donde el objetivo es bloquear el rotor del motor a diferentes voltajes y registrar la corriente que consume en ese instante. Con base en esas lecturas, se generó una gráfica corriente contra voltaje y con ello se obtuvo una regresión lineal, de tal forma que se conozca la pendiente, la cual será la resistencia de armadura.

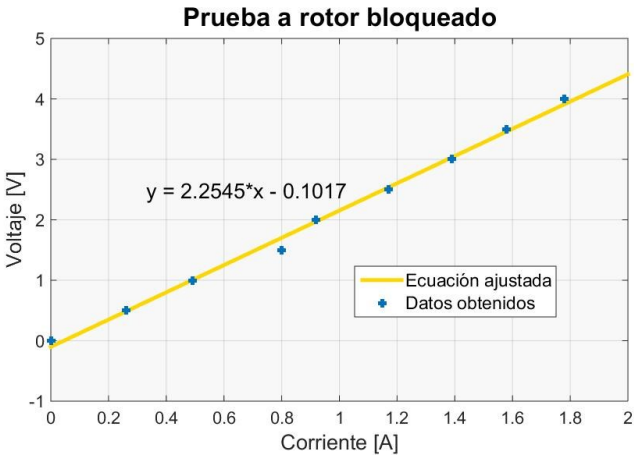


Figura A.2. Gráfica para la obtención de la resistencia

Para el cálculo de la inercia se realizó una prueba con entrada escalón, donde se acopló el motor con otro de las mismas características eléctricas y mecánicas que funcionara como generador. Se aplicó un voltaje escalón de 12 volts y se obtuvo la señal mostrada en la figura A.3.

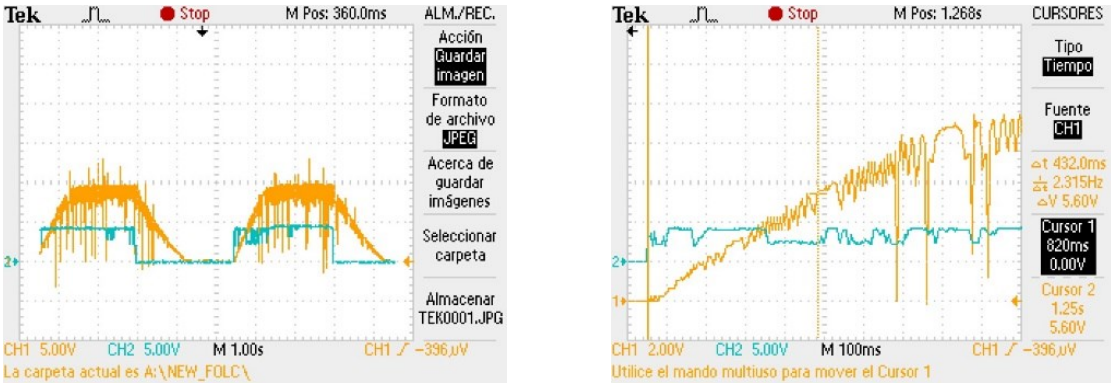


Figura A.3. Constante de tiempo al 63.2 %

A partir de la señal anterior se obtuvo una constante de tiempo  $\tau$  de 432 ms, donde el voltaje generado alcanza el 63.2% de su valor en estado permanente. Sin embargo, como

el pulso no fue unitario es necesario obtener una velocidad en estado permanente generado por el voltaje generado. De este modo se calcula como:

$$\omega_{\infty} = \frac{Vg_{\infty}}{k_a} = \frac{8.88}{0.3274} = 27.1227 \frac{rad}{s}$$

Esta velocidad en estado permanente se utiliza en la función de transferencia en tiempo cero quedando como:

$$T(0) = \frac{V_{escalon_{\infty}}}{\omega_{\infty}} = \frac{12}{27.12} = \frac{a}{b}$$

Además se sabe que:

$$b = \frac{1}{\tau}, \quad b = \frac{k_a k_b}{RJ}, \quad a = \frac{k_b}{RJ}$$

Resolviendo las ecuaciones anteriores se tiene dos valores de  $J$  y se tomó el valor más grande.

$$J_1 = 0.06741 \quad J_2 = 0.009786$$

Una vez obtenidos los parámetros del motor, se procedió a calcular  $\omega_n$ , que es la frecuencia natural del sistema y  $\xi$  que es el coeficiente de amortiguamiento de tal forma que cumplan las condiciones de diseño para un sistema de segundo orden, las cuales son:

$$t_a = 0.5 [s] \text{ y } \%SP = 3$$

Para ello se emplean las ecuaciones correspondientes:

$$\%SP = 100 * e^{-\frac{\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$$

$$t_a = \frac{4}{\omega_n \xi}$$

Obteniendo los siguientes valores para  $\omega_n$  y  $\xi$  respectivamente:

$$\omega_n = 10.7411$$

$$\xi = 0.7448$$



Con polos:

$$P_{1,2} = -8 \pm j7.1674$$

Formando un polinomio:

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = s^2 + 16s + 115.371$$

Siendo la función de transferencia PID:

$$G_{PID}(s) = \frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{s}$$

Y teniendo una ecuación de lazo cerrado, se tiene:

$$G_2(s) = \frac{G_{PID}(s) * G(s)}{1 + G_{PID}(s) * G(s)}$$

Donde el denominador es:

$$1 + G_{PID}(s) * G(s) = (R_J + k_b k_d) s^2 + (k_a k_b + k_p k_b) s + k_b k_i$$

A partir de la comparación entre el polinomio deseado y el denominador de  $G_2(s)$ , se tiene lo siguiente:

$$k_i = \frac{115.371}{k_b} = 742.89$$

$$k_p = \frac{16 - k_a k_b}{k_b} = 102.69$$

$$k_d = \frac{1 - R_J}{k_b} = 5.354$$

## Anexo 7. Especificaciones de la glicerina.



### HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

GLICEROL

Rev. 0  
Fecha de Elaboración: 14/Ene/09  
Fecha de Actualización: 14/Ene/09

#### SECCIÓN I. DATOS GENERALES

Nombre de la empresa: **QUÍMICA SUASTES, S.A. DE C.V.**  
En caso de emergencia comunicarse al: Tel: 5859 8976 / 5859 8975  
Fax: 5859 8976  
Domicilio: Calle Pámpano No. 7  
Col. Del Mar, Delegación Tláhuac  
C.P. 13270, México, Distrito Federal

#### SECCIÓN II. DATOS GENERALES DE LA SUSTANCIA QUÍMICA

Nombre químico del producto: **GLICEROL**  
Sinónimos: 1,2,3-Propanotriol; Glicerol, glicerina  
Fórmula molecular:  $\text{CH}_2\text{OH-CHOH-CH}_2\text{OH}$   
Peso molecular: 92.09  
Familia química: **ALCOHOLES**  
Uso del producto: Reactivo de laboratorio.

#### SECCIÓN III. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA QUÍMICA

##### III.1 Identificación

Numero CAS: 56-81-5  
Numero ONU: N/A  
LMPE (PPT, CT, F): 15 mg/m<sup>3</sup>  
IPVS: N/A

##### III.2 Clasificación de riesgos NFPA

Salud: 1 Ligeramente peligroso  
Inflamabilidad: 1 Ligeramente peligroso  
Reactividad: 0 Mínimamente peligroso  
EPP: B Antojos de seguridad y guantes  
Color de almacenaje: VERDE

#### SECCIÓN IV. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Aspecto físico y olor: Líquido aceitoso transparente. Sin olor  
Peso específico: 1.25 @ 20°C/4°C  
Presión de vapor (mmHg): 0.0025 @ 50°C (122°F)  
Solubilidad en agua @ 25 °C: Miscible en agua.  
Punto de fusión: 18°C (64°F)  
Punto de ebullición: 290°C (554°F)  
Densidad del vapor (aire = 1): 3.17  
Temperatura de inflamabilidad: 197°C (390°F) CC  
Temperatura de auto ignición: 370°C (698°F)  
pH: (neutra al tomasol)

Fuente: Catálogo de productos Reactivos Meyer