

Diseño y construcción de un banco de pruebas para bombas centrífugas

Juan Gabriel Daza Alba

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico

Director

Manuel del Jesus Martínez

PhD en Mecánica computacional

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería mecánica

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

A DIOS por ser el centro y el propósito de mi vida. A mí por creer, persistir y no desistir durante el transcurso de esta aventura. A mis maestros por que fueron y son guía de aprendizaje y formación de carácter. A las personas que de una u otra manera hicieron parte de este proceso de formación.

A las personas que alivianaron la carga a través de sus consejos, apoyo, amistad y acompañamiento.

Agradecimientos

A DIOS por permitirme cumplir este propósito de vida. A El, que a través de mis padres y familia hizo posible que fuese yo y no otra persona. A El, que me acompañó en muchos sube y bajas que me llevaron a esto. A EL, que puso personas como la profe Martha, mi querido amigo John, Raquel y Cecilia, don Jaime, el padre Fredy y muchos otros. A El, por proporcionarme techo, comida, comodidad y sobre todo amor a través de la familia Herrera Plata. A El, por darme la oportunidad de haber sido alumno de excelentes profesores. A EL, por siempre abrir puertas en lugares fantásticos, como lo fue comedores, donde tuve la oportunidad de conocer hombres y mujeres que harán parte de lo más bonito que pude disfrutar de la universidad industrial de Santander. A EL, y a los que hicieron parte de este proceso muchas gracias.

Tabla de Contenido

1	Objetivos	18
1.1	Objetivo general	18
1.2	Objetivos específicos	18
2	Base teórica	19
2.1	Bomba centrífuga	20
2.2	Bomba centrífuga radial	21
2.3	Configuración del impulsor	22
2.3.1	<i>Impulsor abierto</i>	22
2.3.2	<i>Impulsor cerrado</i>	23
3	Teoría y diseño de bombas centrífugas	24
3.1	Análisis externo	24
3.2	Análisis interno	28
3.3	Ecuación general de las bombas centrífugas	30
3.4	Curvas características	32
3.5	Potencias y rendimientos de una bomba centrífuga	33
3.6	Número de alabes	36
3.7	Clasificación de las bombas centrífugas mediante velocidad específica.	37

3.8	Cavitación en bombas	39
3.9	Curva del sistema	40
3.10	Normativa para bancos de prueba	41
3.11	Dispositivos de medición y adquisición de datos	41
3.11.1	Tarjeta de adquisición.	41
3.11.2	Sensor de presión	43
3.11.3	Sensor de caudal.	44
3.11.4	Encoder	44
3.11.5	sensor de corriente.	45
3.11.6	Variador de velocidad.	46
4	Diseño banco de pruebas.	47
4.1	diseño de bastidor	47
4.2	Diseño y cálculo de la red hidráulica	47
4.3	Bomba centrifuga.	56
4.4	Panel de control.	57
4.5	Diseño de algoritmo de programación en Arduino.	58
4.6	Diseño del entorno grafico en MATLAB.	62
4.7	Diseño impulsor.	68
4.7.1	Cálculo de las variables geométricas y de flujo en el impulsor	68
4.7.2	Trazo del impulsor.	74

DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA BOMBAS CENTRIFUGAS	6
4.7.3 Curva teórica del impulsor	74
4.8 Caracterización de los impulsores A y B	76
5 Conclusiones	79
6 Recomendaciones	80
Referencias Bibliográficas	81
Apéndices	82

Lista de Figuras

Figura 1	Clasificación de máquinas hidráulicas	19
Figura 2	Clasificación de bombas centrífugas en base a la geometría del impulsor	20
Figura 3	Clasificación de bombas centrífugas en base a la geometría del impulsor	21
Figura 4	Posible desarrollo para volutas de bombas centrífugas	22
Figura 5	Impulsor abierto y cerrado	23
Figura 6	Volumen de control	24
Figura 7	Volumen de control bomba centrífuga	25
Figura 8	Triángulos de velocidad a la entrada y a la salida del impulsor	28
Figura 9	Altura máxima teórica	31
Figura 10	Curvas características teórica y real para bombas centrífugas	33
Figura 11	Curvas características para bombas centrífugas	34
Figura 12	Distribución de potencias	35
Figura 13	Curva de eficiencia vs velocidad específica.	38
Figura 14	Curva del sistema	40
Figura 15	Curva del sistema	42
Figura 16	Curva del sistema	43
Figura 17	Sensor de presión	44
Figura 18	Sensor de caudal	45

Figura 19	Encoder	45
Figura 20	Sensor de corriente ACS 712.	46
Figura 21	Dimmer	46
Figura 22	Bastidor banco de pruebas.	47
Figura 23	Instalación hidráulica	48
Figura 24	Datos proporcionados de la red hidráulica digitados en EES	50
Figura 25	Ecuaciones para el cálculo de pérdidas mayores.	52
Figura 26	Determinación del flujo y cálculo de factores de fricción.	53
Figura 27	Ecuaciones para el cálculo de pérdidas menores en la tubería de succión.	54
Figura 28	Ecuaciones para velocidades de succión y descarga.	55
Figura 29	Curva característica del sistema hidráulico.	56
Figura 30	Motor-bomba de 180 w.	57
Figura 31	Panel de control banco de prueba.	58
Figura 32	Declaración de variables.	59
Figura 33	Bloque de configuración.	59
Figura 34	Bloque de ejecución sección 1.	60
Figura 35	Bloque de ejecución sección 2(impresión rpm y caudal).	61
Figura 36	Función para obtener señal de presión y de corriente.	61
Figura 37	Funciones para contar los pulsos.	62
Figura 38	Interfaz gráfica adquisición de datos.	63

Figura 39	Nombres de los componentes de la interfaz gráfica.	64
Figura 40	Comunicación placa Arduino y Matlab.	64
Figura 41	Botón de inicio encabezado	65
Figura 42	Estructura de programación botón de inicio (adquisición de datos desde la placa Arduino).	66
Figura 43	Estructura de programación botón de inicio (creación de vectores e impresión de valores en las caratulas de medida).	66
Figura 44	Estructura de programación botón de inicio (visualización de datos en la interfaz gráfica)	67
Figura 45	Estructura computacional del botón parar y exportar datos.	68
Figura 46	Constantes de diseño	70
Figura 47	Constantes de cabeza	71
Figura 48	Trazo del impulsor.	75
Figura 49	Curva característica teórica $QvsH$	75
Figura 50	Impulsores A y B	76
Figura 51	Curva característica $QvsH$ impulsor A a velocidades 3200 rpm y 2100 rpm.	77
Figura 52	Curva característica $QvsH$ impulsores A y B.	78

Lista de Tablas

Tabla 1	Relación entre el coeficiente de influencia y el número de alabes	37
Tabla 2	Datos de curva característica del sistema	55
Tabla 3	Geometría a la entrada y a la salida del impulsor	73
Tabla 4	condiciones de flujo a la entrada y a la salida del impulsor.	74
Tabla 5	Datos para la curva teórica del impulsor.	76

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A Código total de la adquisición de datos en Arduino.	82
Apéndice B Código de la interfaz gráfica en Matlab con los nombres y complementos internos de las caratulas.	85

Glosario

Bomba hidráulica : Una bomba es un tipo de máquina generadora para líquidos que transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio en energía cinética y potencial requerida.

Fluido Sustancia que cede inmediatamente a cualquier fuerza que tiende a cambiar su forma, con lo que fluye y se adapta a la forma del recipiente, los fluidos pueden ser líquidos o gases.

Presión Atmosférica Es la presión que ejerce la atmósfera sobre la superficie de la tierra y depende de la altura del sitio con respecto al nivel del mar.

Presión Manométrica Es una medida de la fuerza por unidad de área ejercida por un fluido, por encima de la presión atmosférica de un lugar. Esta presión, se mide con aparatos llamados manómetros

Presión de Vacío Es una presión menor que la presión atmosférica, y se mide como la diferencia entre la presión medida y la presión atmosférica, con un instrumento llamado vacuómetro.

Cabeza de la Bomba Es un parámetro fundamental para la selección de una bomba y consiste en la energía necesaria (en unidades de presión) que se le debe entregar al fluido para que pueda avanzar el líquido hasta la altura deseada y la fricción del mismo en las tuberías y accesorios de la red de distribución.

Cavitación Es un fenómeno que se produce siempre que la presión de algún punto o zona de la corriente de un líquido desciende por debajo de un cierto valor mínimo admisible, denominado

presión de vapor.

Resumen

Título: Diseño y construcción de un banco de pruebas para bombas centrífugas. *

Autor: Juan Gabriel Daza Alba **

Palabras Clave: Bomba centrífuga, banco de prueba, ahorro energético, adquisición de datos, laboratorio, rendimiento de bombas.

Descripción: En este proyecto se diseñó y construyó un sistema de bombeo tipo laboratorio que le permite al estudiante la interacción y comprensión del funcionamiento de las máquinas hidráulicas más exactamente las bombas centrífugas. La construcción del banco de pruebas tiene como base un sistema de bombeo que se compone de una electrobomba y una red hidráulica cuyos accesorios y tubería son de PVC. Las características a medir son: caudal, presión, velocidad de giro del motor y potencia eléctrica de consumo, para lo cual se implementó un Arduino como cerebro de adquisición de datos y los respectivos sensores receptores de señales eléctricas. Como complemento se genera una guía o procedimiento que permite al estudiante analizar las leyes de semejanza geométrica y su aplicación al ahorro energético de sistemas de bombeo.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Manuel del Jesus Martínez, PhD en Mecánica Computacional

Abstract

Title: Design and construction of a test bench for centrifugal pumps. *

Author: Juan Gabriel Daza Alba **

Keywords: Centrifugal pump, test bench, energy saving, data acquisition, laboratory, pump performance.

Description: In this project, a laboratory type pumping system was designed and built to allow the student to interact and understand the operation of hydraulic machines, more precisely centrifugal pumps. The construction of the test bench is based on a pumping system that consists of an electric pump and a hydraulic network whose accessories and piping are made of PVC. The characteristics to be measured are: flow, pressure, motor rotation speed and electrical power consumption, for which an Arduino was implemented as the data acquisition brain and the respective electrical signal receiver sensors. As a complement, a guide or procedure is generated that allows the student to analyze the laws of geometric similarity and their application to energy saving in pumping systems.

* degree thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías mecánica Director: Manuel del Jesus Martínez, PhD en Mecánica Computacional.

Introducción

Los cambios constantes en la industria les exigen a las instituciones de educación superior, estudiantes con altos estándares de aprendizaje teórico prácticos. Uno de los problemas más comunes en los profesionales amateur es el desconocimiento de procesos, instrumentos y metodologías de las industrias en las que podrían desempeñarse. Existen variedad de factores que son causa de lo antes mencionado y que involucran a diferentes partes que intervienen en el proceso de aprendizaje. A causa de las situaciones que se enfrentan los profesionales en los diferentes campos de la industria, es indispensable que estos adquieran conocimientos teóricos prácticos que sean la base sólida en la toma de decisiones cuando se enfrenten a los retos y dificultades. Es de gran importancia que los equipos y los procesos que se implementan en la formación de estudiantes sean didácticos e instructivos, los cuales permitan al estudiante tener una interacción más personal con los componentes de un proceso. Este tipo de aprendizaje permite identificar los materiales, las metodologías y los equipos de uso común en la industria. Debido a la versatilidad y todos los beneficios que tiene el educarse mediante equipos didácticos, el proceso de enseñanza y aprendizaje tienen la presunción de que los mismos generan aprendizajes significativos sobre el estudiantado. De tal manera se considera apropiado que las prácticas de laboratorio tengan una metodología de enseñanza estricta que comprometan al estudiante a vincularse más con los procesos de aprendizaje prácticos. La tenencia de equipos que permitan desarrollar, visualizar y analizar procesos de manera más detallada, sumado con el compromiso de los estudiantes que los usan, dan como resultado la generación de carácter y bases sólidas en el conocimiento de procesos industriales. Esto permite

a los estudiantes poseer un mejor criterio en la proposición de soluciones en los diferentes ámbitos laborales en los que se desempeñen. El laboratorio de sistemas de transporte y aprovechamiento de fluidos de la escuela de ingeniería mecánica de la universidad industrial de Santander dispone de variedad de equipos que permiten la observación y medición de procesos y fenómenos físicos. Para el caso de bombas centrifugas, aunque los equipos implementan tecnología relativamente moderna no le permiten al estudiante una interacción física con los componentes principales e importantes del proceso de bombeo. En lo que compete a este proyecto se diseñará y construirá un equipo que permita obtener las curvas características de bombas centrifugas de impulsor abierto con el propósito de evaluar el consumo energético, variando el impulsor y la velocidad de giro. Para ello se dispondrá de un motor de 180 w asíncrono de velocidad 3200 rpm el cual contará con variador de velocidad, lo que permitirá evaluar las características hidráulicas de la bomba a distintos rpm. Los componentes de construcción de la estructura se trabajarán mediante procesos de manufactura en el taller de la escuela de ingeniería mecánica con la ayuda de los laboratoristas.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Contribuir con la misión de la universidad industrial de Santander, de brindar conocimientos y soluciones a las diferentes necesidades de la industria y la educación, mediante el diseño de un banco de pruebas para bombas centrifugas el cual se dispondrá en el laboratorio de sistemas de transporte y aprovechamiento de fluidos de la escuela de ingeniería mecánica de la universidad industrial de Santander.

1.2. Objetivos específicos

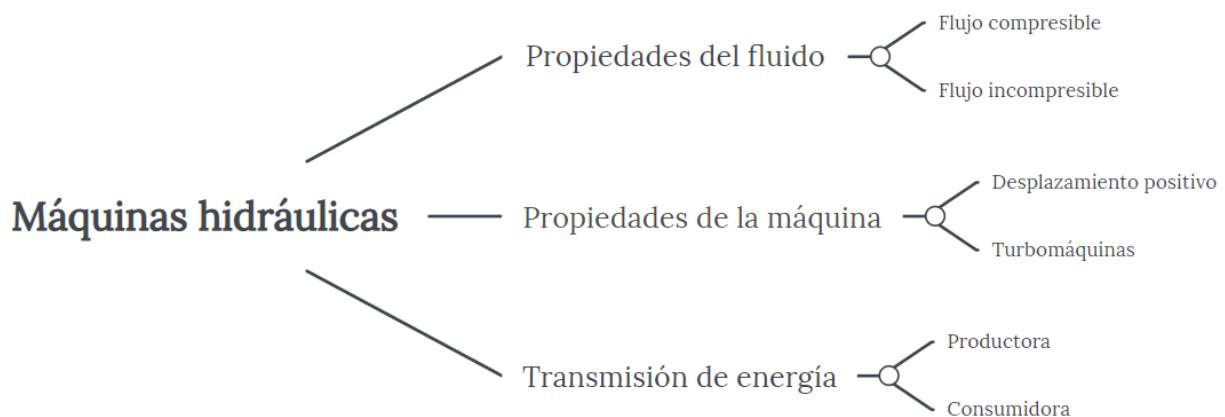
- Diseñar y construir un banco de pruebas para bombas centrífugas que permita medir: presión, caudal, y potencia, en bombas centrifugas con consumos de potencias inferiores a 1/3 hp.
- Implementar transductores de presión con señales de salida entre 1-5 voltios, flujómetros análogos y otros dispositivos electrónicos que permitan la medición de las variables del sistema utilizando como guía la norma ISO 9906: 1999
- Generar una guía de laboratorio que permita el análisis del consumo energético en bombas centrífugas implementado el concepto de las leyes de semejanza.
- Obtener las curvas características (presión estática vs caudal, curvas de potencia) de un impulsor construido a partir de una metodología de diseño.

2. Base teórica

Se considera como máquina hidráulica un sistema mecánico que intercambia energía con un fluido que este contenido y que circule a través de él. Las máquinas hidráulicas más comunes en el ámbito industrial son bombas, ventiladores, compresores, turbinas hidráulicas, turbinas de vapor y de gas, entre otros.(Zubicaray, 2003). Debido a la gran complejidad del flujo en estas máquinas existen investigaciones permanentes en las cuales se implementan simulaciones y teorías experimentales. Para clasificar las máquinas hidráulicas se consideran características de funcionamiento, como la transmisión de energía entre la máquina y el fluido, compresibilidad del fluido, principios de funcionamiento, propiedades del fluido entre otras. Para este proyecto se implementará la teoría de análisis y diseño de bombas centrifugas debido que el proyecto se refiere específicamente a estas.

Figura 1

Clasificación de máquinas hidráulicas



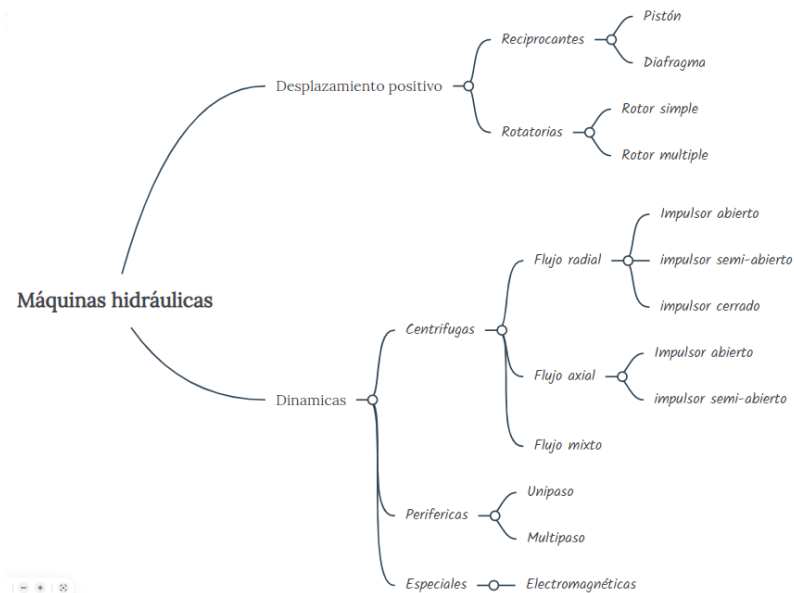
2.1. Bomba centrífuga

Se considera como una máquina hidráulica que trabaja con fluidos y combinaciones de fluido y sólidos; es una máquina a la cual se le entrega energía mecánica y la transforma en energía cinética y potencial mediante un sistema de impulsión. Los fluidos comúnmente utilizados en estas máquinas son considerados como fluidos incompresibles debido a que el cambio en la densidad dentro de la máquina es despreciable. (Stepanoff, 1957)

Los componentes primarios de la mayoría de las bombas son: el impulsor que obliga al líquido a hacer un movimiento rotatorio y la carcasa de la bomba, que dirige el líquido hacia el impulsor y lo aleja bajo una mayor presión. Las bombas centrífugas y en general las máquinas hidráulicas se clasifican por diferentes características entre las que se pueden mencionar, la geometría, el flujo, las características del impulsor y sus diversas aplicaciones.

Figura 2

Clasificación de bombas centrífugas en base a la geometría del impulsor

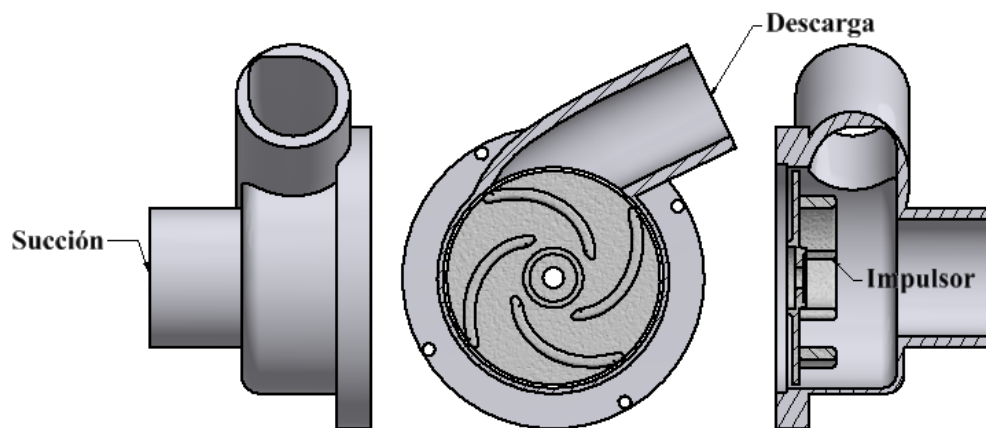


2.2. Bomba centrífuga radial

La forma del rodete y de la carcasa son variables según el tipo de bomba centrífuga. En las bombas de flujo radial el líquido entra axialmente en el rodete por la brida de succión y se descarga radialmente hacia la carcasa.

Figura 3

Clasificación de bombas centrífugas en base a la geometría del impulsor



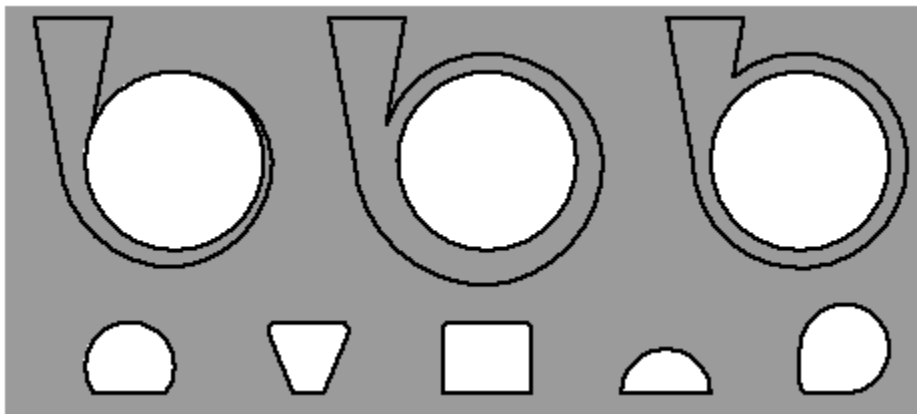
Nota. En esta imagen se ve la estructura general de una bomba centrífuga de flujo radial.

La configuración geométrica juega un papel muy importante en la eficiencia de la bomba, para cada una de las configuraciones expuestas existen pros y contras que afectarán el rendimiento de la máquina.

En la figura 4. se muestra la variedad de configuraciones de la voluta que se utilizan en la construcción de bombas centrífugas de flujo radial, su implementación se limita a la forma de construcción y los rendimientos en cuanto a la energía entregada al fluido.

Figura 4

Posible desarrollo para volutas de bombas centrífugas



Nota. En esta imagen se muestra dos tipos de configuraciones geométricas, donde una de ellas representa el desarrollo de la carcasa de manera constante y otra de manera progresiva

2.3. Configuración del impulsor

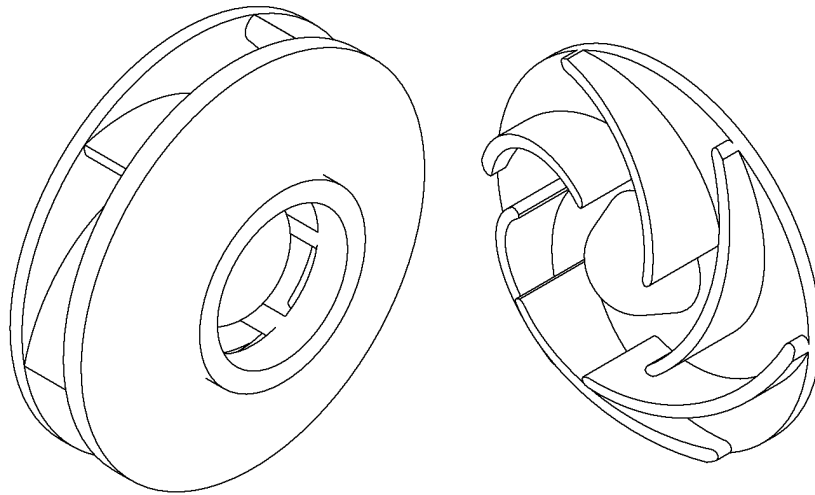
Para las bombas centrífugas de flujo radial existen diferentes tipos de impulsores, la geometría que conlleva el diseño y construcción de estas piezas depende de la aplicación y las características hidráulicas de diseño. A continuación se explicarán algunas configuraciones comúnmente encontradas en la industria. Ideal (1974).

2.3.1. Impulsor abierto. Toman su nombre porque sus aspas o alabes son abiertos, los impulsores tienen un mínimo de tolerancia entre sus caras y las paredes de la carcasa (aproximadamente de 0.1 a 0.34 mm) de tal manera que las pérdidas volumétricas o por recirculación internas del fluido se reduzcan al mínimo. Estos son ampliamente utilizados para fluidos abrasivos o que contienen sólidos.

2.3.2. Impulsor cerrado. Altamente utilizado en flujos teóricamente limpios, el flujo en estos impulsores es guiado a través de los canales compactos del impulsor desde la succión hasta la carcasa.

Figura 5

Impulsor abierto y cerrado



Nota. En esta imagen se visualizan las disposiciones generales en la geométricas de impulsores para bombas centrífugas de flujo radial.

3. Teoría y diseño de bombas centrífugas

3.1. Analisis externo

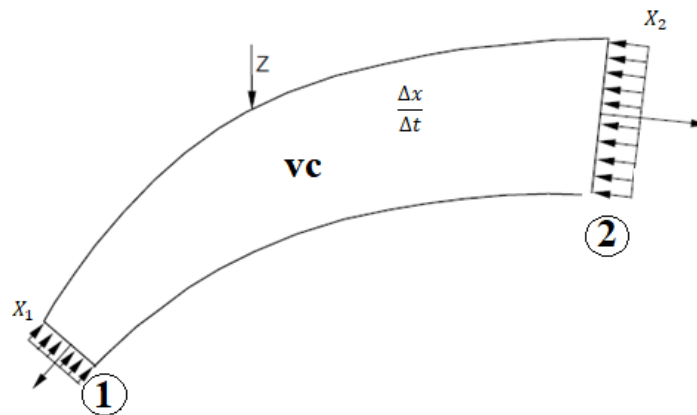
Es de vital importancia conocer algunos principios matemáticos para el análisis y el cálculo de las variables presentes en el diseño de bombas centrífugas. Las leyes de conservación de la masa, la energía y la cantidad de momentum son la base de la mecánica de fluidos, debido a que la energía no se crea ni se destruye. Si se considera representar un sistema mediante un volumen de control se puede formular una ecuación que represente las leyes mencionadas.

$$X_1 - X_2 + \left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right) + Z = 0 \quad (1)$$

En donde X_1 y X_2 son las propiedades a la entrada y la salida respectivamente, $\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)$ es el cambio de las propiedades en el volumen de control con respecto al tiempo y la variable Z representa la ganancia o pérdida (trabajo, calor o masa).

Figura 6

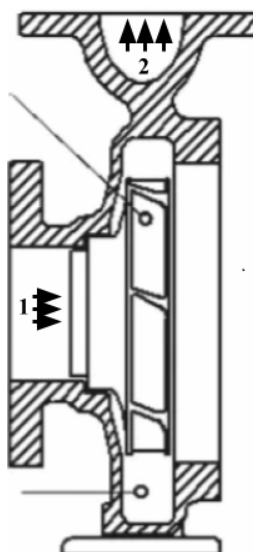
Volumen de control



Nota. Para formular las leyes de conservación se toma como base la figura(6) en la cual se ejemplifica un volumen de control en donde se establece una entrada y una salida, las cuales se representan con los subíndices 1 y 2 sucesivamente. Para la figura (7) se establece el volumen de control en una bomba centrífuga en donde se establecen la entrada y la salida con los subíndices mencionados.

Figura 7

Volumen de control bomba centrífuga



Para establecer la ley de conservación de la masa se sobreponen las variables de velocidad C , densidad ρ y área A en los puntos de entrada y salida (1,2). Siguiendo el enunciado de esta ley que expresa, que el flujo de masa a la entrada(m_1) es igual al que sale(m_2) o expresado de otra manera el cambio de masa dentro del volumen de control es igual a cero.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = A_1 C_1 \rho_1 = A_2 C_2 \rho_2 = cte \quad (2)$$

Esta ecuación es aplicable a fluidos incompresibles y compresibles que para el caso del diseño de bombas centrífugas son los que más se utilizan.

Otra de las leyes implementadas en el diseño de bombas centrífugas es la ley de conservación de la energía o conocida también como la primera ley de la termodinámica, la cual se resume en la siguiente fórmula.

$$\Delta U = Q + W \quad (3)$$

Esta fórmula expresa que el cambio de la energía interna ΔU de un volumen de control es igual al calor total que se transmite Q , más el trabajo total W que se hace sobre él. Para el caso de las bombas centrífugas si se tiene una máquina que impulsa un caudal constante y estable de masa (m), la ecuación de conservación de energía está representada por la siguiente expresión matemática.

$$(u_2 - u_1) + \frac{(p_2 - p_1)}{\rho} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) = w_b - q \quad (4)$$

$$\Delta U = (u_2 - u_1) \quad (5)$$

$$\Delta U_m = \frac{(p_2 - p_1)}{\rho} \quad (6)$$

$$\Delta U_c = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \quad (7)$$

$$\Delta U_p = g(z_2 - z_1) \quad (8)$$

En la cual el trabajo entregado por la bomba es igual al cambio de la energía interna ecuación (5) más la suma del cambio de presión manométrica en el fluido ecuación (6) y el cambio de la energía

potencial ecuación (8) y la energía cinética ecuación (7) a la entrada y salida de la máquina es igual a la ganancia de calor q en el fluido menos el trabajo w_b de la máquina por unidad de masa.

Debido a la viscosidad y la interacción del fluido este suele calentarse, pero si se considera que el tiempo de estadía del fluido dentro de la máquina no supera unos segundos, el calor presente en la ecuación de conservación de la energía, ecuación (4) se desprecia. Por otro lado, es importante resaltar que el fluido implementado en estos diseños es incompresible por ende se aplica la ley de conservación de la masa.

El termino altura manométrica se conoce como el incremento de energía por unidad de peso del fluido bombeado. Utilizando el análisis de la primera ley de la termodinámica ecuación (4) en donde la suma diferencial de las energías presentes en el volumen de control que corresponde a una bomba es igual al trabajo que esta trasmite al fluido por unidad de masa, se puede obtener la ecuación de altura manométrica dividiendo la ecuación en la variable que corresponde a la gravedad.

$$H_m = \frac{P_2 - P_1}{g\rho} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + (z_2 - z_1) \quad (9)$$

$$H_m = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + (z_2 - z_1) \quad (10)$$

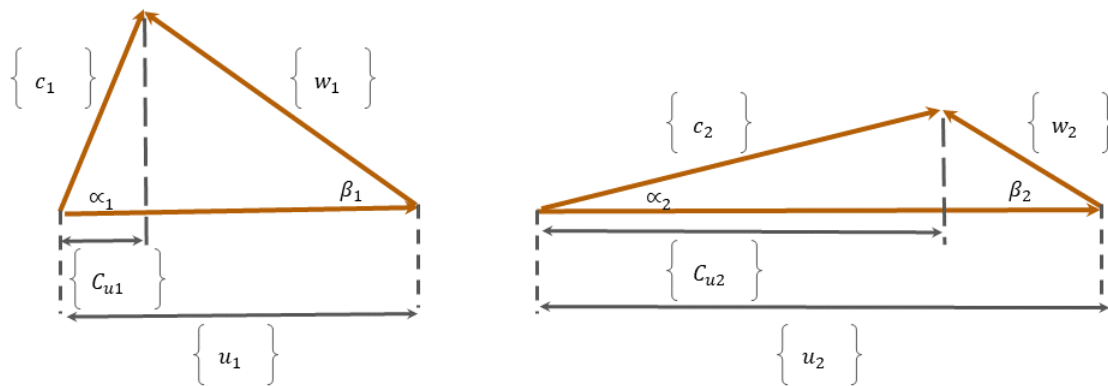
El analisis externo generaliza el comportamiento de las propiedades del fluido en la ecuación de Bernoulli (10), en donde el volumen de control es la bomba figura (7) y los limites corresponden a la entrada y la salida de la misma.

3.2. Análisis interno

Existe un procedimiento gráfico en el que se utilizan técnicas vectoriales para estudiar las componentes de la velocidad del flujo en una bomba. Este procedimiento se conoce como triángulos de velocidades y se aplica normalmente en dos puntos de la trayectoria del flujo en el impulsor, estos puntos son la entrada y la salida de este. Las componentes de la velocidad del flujo son: u velocidad periférica o circunferencial del impulsor. w velocidad relativa del flujo. c velocidad absoluta del flujo.

Figura 8

Triángulos de velocidad a la entrada y a la salida del impulsor



Nota. En la figura se presentan las componentes de las velocidades en la entrada y salida del impulsor. La velocidad relativa se considera con respecto al impulsor y su dirección lleva incorporada la curvatura del álabe del rotor; la absoluta, es la velocidad del flujo y con respecto a la carcasa; esta última es siempre igual a la suma vectorial de la relativa y la circunferencial o de arrastres. Step-

noff (1957). Las velocidades citadas llevan subíndices 1 o 2 según sean a la entrada o a la salida, respectivamente. Se considera que las velocidades son velocidades promedio a menos de que se especifique algo diferente. Este método es uno de los que se implementa en el diseño práctico de bombas, pero no es un método exacto.

Considerando la teoría de los triángulos de velocidad también se puede generar un análisis interno del comportamiento energético en la bomba, con lo cual se establece que existe una altura total creada por la bomba H_t y una altura manométrica H_m . Estas variables se relacionan mediante el término η_{man} en el cual se analizan las pérdidas internas que ocurren durante el tiempo de transición de las partículas del fluido por la bomba. Por ende, se tiene que:

$$H_t = \Delta i + \Delta e + H \quad (11)$$

$$H_m = \Delta e + H \quad (12)$$

$$H_m = H_t - \Delta i \quad (13)$$

Donde Δi son las pérdidas de carga interna de la bomba, las cuales se presentan por el choque del fluido con las paredes del impulsor y de la carcasa, además para este término se consideran también las pérdidas por rozamiento dentro de la bomba. Pumps (2010). Para el término Δe se considera como las pérdidas en la tubería de succión y descarga, donde se tienen en cuenta los valores de R_e (Reynolds) y sus respectivos factores de fricción.

Por consiguiente, el rendimiento manométrico se define como:

$$\eta_{man} = \frac{H_m}{H_t} \quad (14)$$

3.3. Ecuación general de las bombas centrífugas

.Partiendo del análisis externo del volumen de control (bomba centrífuga) descrito en la ecuación (10) se puede establecer un análisis interno en base a los triángulos de velocidad de la siguiente manera.

$$\frac{P_s}{\rho g} + \frac{V_s^2}{2g} + z_s + H_{ps} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{C_2^2}{2g} + r_2 \quad (15)$$

$$\frac{P_e}{\rho g} + \frac{V_e^2}{2g} + z_e = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{C_1^2}{2g} + r_1 + H_e \quad (16)$$

Implementando el análisis del segundo teorema de Euler descrito por Stepanoff (1957) en base a los triángulos de velocidad a la entrada y a la salida del impulsor figura (8), se tiene que el par motor del disco o impulsor en rotación con un número infinito de alabes, esta descrito por la siguiente ecuación:

$$T = \frac{Q\gamma}{g}(r_2 c_2 \cos \alpha_2 - r_1 c_1 \cos \alpha_1) \quad (17)$$

Si se establece que al eje de la máquina se le aplica una potencia P en donde se condiciona el sistema a que no hay pérdidas de ninguna índole y se sigue considerando un número infinito de alabes en el impulsor.

$$p = \frac{Q\gamma}{g}(u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}) \quad (18)$$

Condicionando el sistema a que la velocidad de entrada $c_{u1} = 0$, se determina la altura manométrica máxima que genera la bomba de manera teórica.

$$H_t = \frac{u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}}{g} \quad (19)$$

$$H_{t(max)} = \frac{u_2 c_{u2}}{g} \quad (20)$$

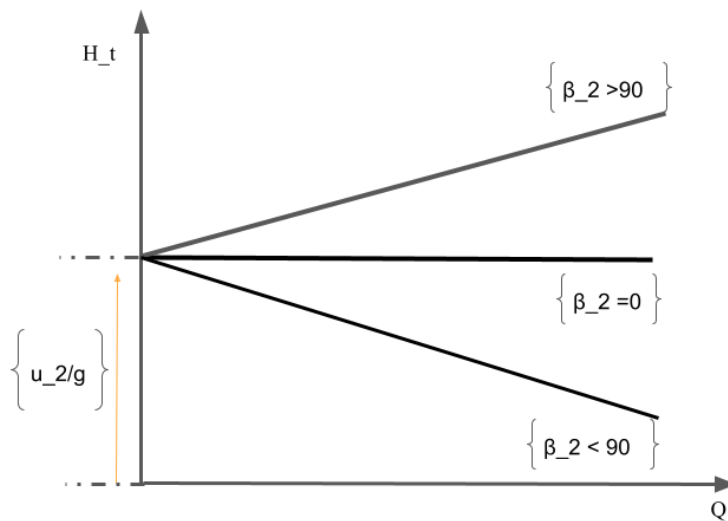
Teniendo en cuenta el triángulo de velocidades se establecen algunas relaciones geométricas que nos llevan a que:

$$H_{t(max)} = \frac{u_2^2}{g} + \frac{Q u_2}{g k_2 A_a} \cot \beta_2 \quad (21)$$

$$H_{t(max)} = A + QB \quad (22)$$

Figura 9

Altura máxima teórica



Nota. (a). Para $\beta_2 > 90, B < 0$ que el coeficiente angular de la ecuación $Ht = f(q)$ es positivo. (b). Para $\beta_2 = 90, B = 0$ que el coeficiente angular de la ecuación $Ht = f(q)$ es cero, recta paralela al eje q . (c). Para $\beta_2 < 90, B > 0$ que el coeficiente angular de la ecuación $Ht = f(q)$ es negativo. En la ecuación (21) se representa la altura teórica de Euler en términos del caudal Q , la velocidad $U_2 = \frac{\pi D_2 n}{60}$ que esta dada en terminos del diametro y la velocidad de giro, además, k_2 que representa un factor de área de salida del impulsor y cuyo valor oscila (0,90 – 0,95) y el A_a que es el área de salida del fluido en el impulsor.

3.4. Curvas características

La ecuación característica de las bombas centrífugas H vs Q es una función $H_m = f(Q)$ de donde recordamos la relación que existe entre la altura total y las perdidas internas de la bomba, las cuales según lo explica Stepanoff (1957). pueden reducirse a:

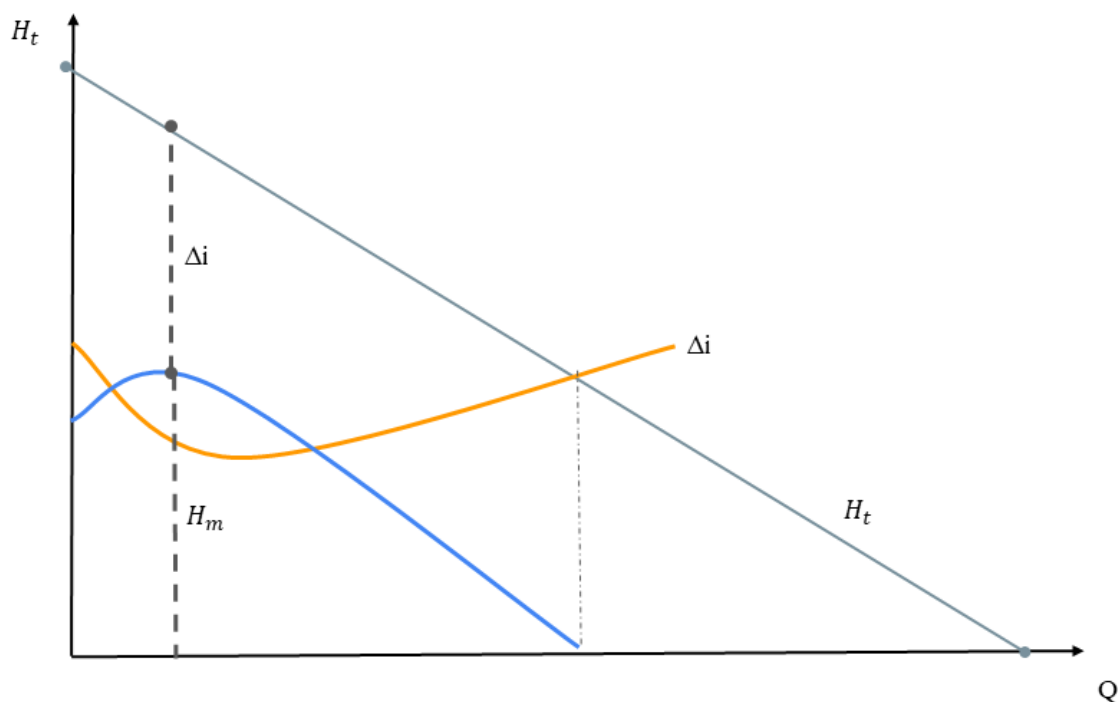
$$\Delta i = cQ^2 \quad (23)$$

$$H_{m(max)} = A + QB - cQ^2 \quad (24)$$

La representación gráfica se obtiene, restando las pérdidas internas de la altura total para cada caudal Q . Se debe tener presente que para $Q = 0$ las pérdidas de carga internas Δi no son nulas, aunque la tubería de impulsión esté cerrada, caudal nulo, los álabes seguirán girando y en consecuencia produciendo rozamientos que implican pérdidas de carga.

Figura 10

Curvas características teórica y real para bombas centrífugas

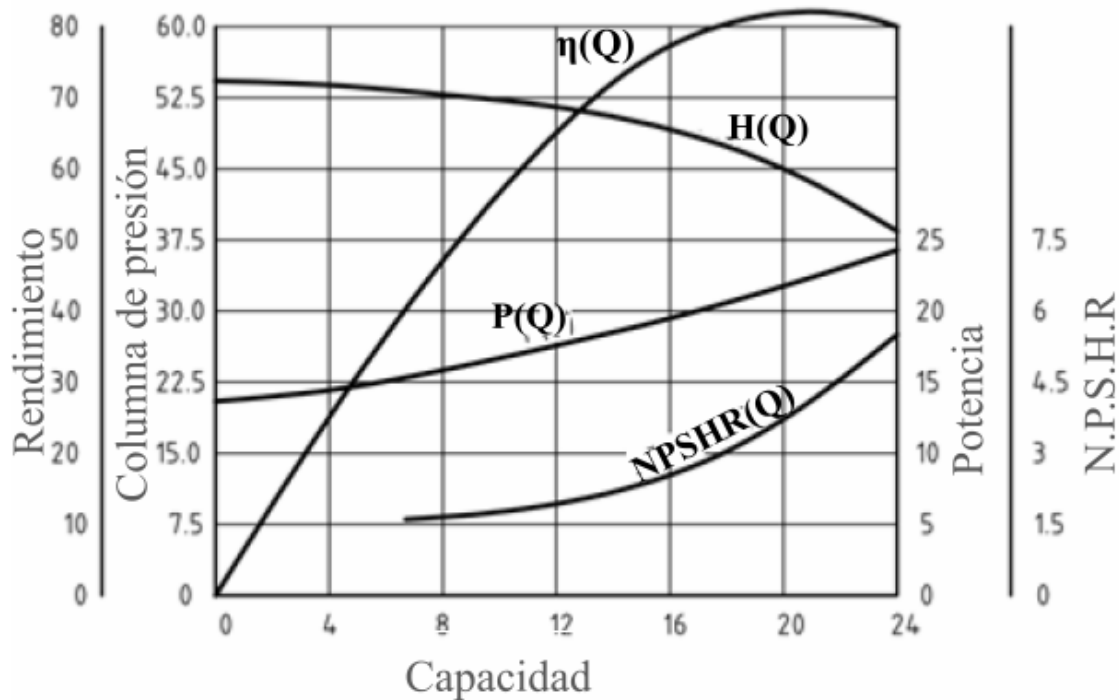


Nota. Se representan las curvas de altura y pérdidas internas con base al caudal para un número infinito de alabes.

Las curvas de funcionamiento son proporcionadas por el fabricante después de un ensayo previo en un banco de pruebas. Es de vital importancia el conocimiento de estas curvas ya que en ellas se especifica: el punto de máxima eficiencia, curvas de iso-eficiencia, una curva para cada modelo de impulsor admisible en la bomba y la altura neta de succión positiva.

3.5. Potencias y rendimientos de una bomba centrífuga

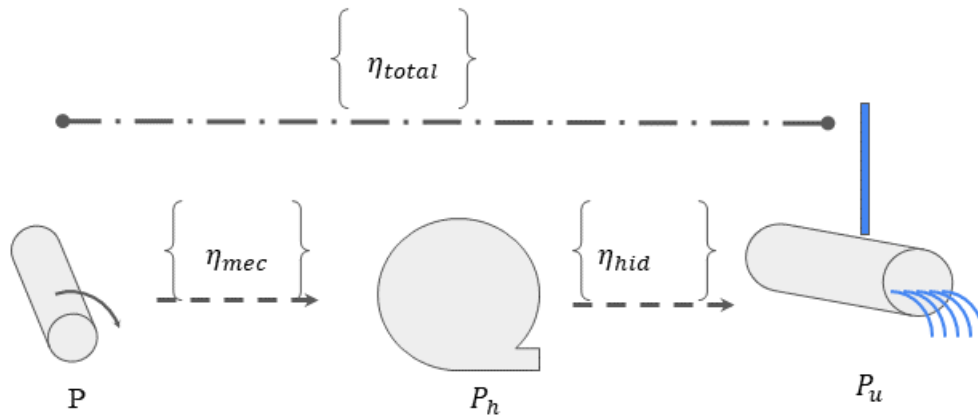
El diagrama de funcionamiento de la potencia actuante en una bomba centrífuga se visualiza en la siguiente figura.

Figura 11*Curvas características para bombas centrífugas*

Donde: P Potencia aplicada al eje. P_h Potencia cedida por la bomba. P_u Potencia útil o disponible en el líquido. η Rendimiento global. η_{hid} Rendimiento hidráulico. η_{vol} Rendimiento volumétrico. η_{mec} Rendimiento mecánico.

En las bombas centrífugas se presentan dos tipos de pérdidas de caudal, la primera debido a la recirculación e incremento de presión dentro de la bomba; la otra pérdida de caudal se presenta de manera externa en las bridas en la junta del eje con la carcasa. Esto quiere decir que el caudal

Figura 12
Distribución de potencias



impulsado q es menor que el caudal aspirado q_1 .

$$q_1 = q + q^* \quad (25)$$

Donde q^* es el caudal perdido o recirculado.

$$\eta_{vol} = \frac{q_1 - q^*}{q_1} \quad (26)$$

La eficiencia volumétrica evidencia, la existencia de fugas de caudal y representa el porcentaje de caudal energizado. Por otro lado las pérdidas por fricción en el fluido dan paso al concepto de eficiencia hidráulica debido a que la energía total entregada al fluido se descompone en un segmento útil y un segmento de entropía.

$$P_u = \gamma q H_m \quad (27)$$

$$P_u = \gamma(qA - Bq^2) \quad (28)$$

$$P_h = \gamma q_1 H_t \quad (29)$$

$$P_h = \gamma \frac{q H_m}{\eta_h} \quad (30)$$

$$P = \gamma \frac{q_1}{g} (c_{2n} u_2 - c_{1n} u_1) \quad (31)$$

$$\eta = \eta_h \eta_{mec} \quad (32)$$

$$\eta_h = \eta_m \eta_{vol} \quad (33)$$

Para el caso del rendimiento mecánico, la energía que se transmite desde el motor al fluido se disminuye por el rozamiento que existe en las partes móviles que unen al motor con la bomba por ejemplo la fricción por rozamiento que hay en el sello mecánico, la fricción y el calentamiento de los rodamientos en los casos donde se aplican.

3.6. Número de alabes

En la teoría unidimensional se considera un número infinito de álabes, pero en la realidad no es conveniente implementar este análisis ya que los valores reales distan de estos cálculos, por ende, se debe tener en cuenta la influencia del número de álabes. Díez (2007), expone el número de Eckert coeficiente (μ) que no depende del régimen de trabajo de la bomba (punto de funcionamiento), es decir, del caudal q , de la altura manométrica H_m y del número de rpm n , sino

de la geometría del rodete impulsor, por lo que es constante para un determinado rodete.

$$\mu_a = \frac{1}{1 + \frac{\pi \sin \beta_2}{2Z(1 - \frac{r_1}{r_2})}} \quad (34)$$

Tabla 1

Relación entre el coeficiente de influencia y el número de alabes

z	4	6	8	10	12	16	24
μ_a	0.624	0.714	0.768	0.806	0.834	0.87	0.908

Con el coeficiente μ_a , se pueden calcular los valores de potencia y altura multiplicando los valores anteriormente descritos por el coeficiente. De esta manera se conseguirá una valoración más cercana de las características de la bomba diseñada.

$$P_h = \mu_a \gamma \frac{qH_m}{\eta_h} \quad (35)$$

$$P = \mu_a \gamma \frac{q_1}{g} (c_{2n}u_2 - c_{1n}u_1) \quad (36)$$

3.7. Clasificación de las bombas centrífugas mediante velocidad específica.

Este método consiste en relacionar las características medibles de la bomba (caudal, cabeza de presión y revoluciones de giro) mediante una expresión matemática. Se precisa una clasificación numérica asignando a toda la familia de bombas un valor numérico.

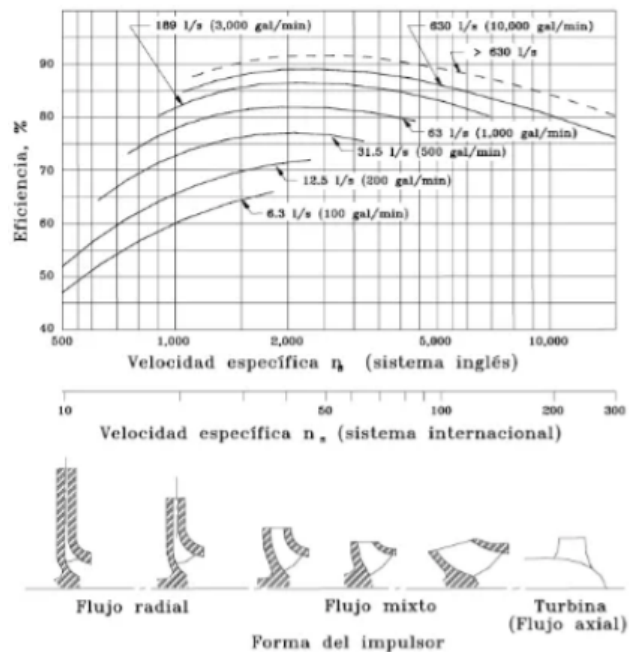
$$N_s = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{0,75}} \quad (37)$$

N_S Velocidad específica. N revoluciones por minuto (rpm). H altura total de impulsión (pies). Q caudal (gpm).

La semejanza de bombas a permitido la creación de curvas que facilitan la obtención de datos importantes en el cálculo y diseño de máquinas hidráulicas. A continuación se visualiza una relación grafica de la velocidad específica, el caudal y la eficiencia de un grupo de bombas.

Figura 13

Curva de eficiencia vs velocidad específica.



Nota. Mediante la figura (14) se puede aproximar la eficiencia en el diseño de una bomba, además se puede obtener la geometría y su familia, utilizando la velocidad específica. La figura (14) se obtuvo de Stepanoff (1957).

3.8. Cavitación en bombas

La cavitación es una condición anormal de los sistemas de bombeo que se presentan principalmente en la succión de las bombas. Quiroga et al. (2012) El fenómeno de cavitación consiste en un proceso en donde la primera etapa se genera burbujas en el fluido. Se crea una baja presión que hace que las burbujas se evaporen y se expandan. El proceso de baja presión se da en la tubería de succión, las burbujas son llevadas por el ojo del impulsor al centro de este, donde por la alta presión se producen pequeñas implosiones que generan erosión en las superficies cercanas al hecho.

Para solucionar la generación de cavitación se hace referencia al comportamiento del fluido aguas abajo de la bomba, el propósito de la variable a considerar, es caracterizar las condiciones para una buena aspiración. El $NPSH$ representa la energía medida en columna de líquido con el que el fluido entra a la brida de succión, este debe cumplir un requisito fundamental que es que su valor debe ser superior a la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo. Este concepto nos sirve de manera práctica para poner limitaciones a las condiciones de aspiración de la bomba.

Existen dos tipos de $NPSH$ los cuales son $NPSH_r$ y $NPSH_d$ el primero de ellos es la altura neta positiva de aspiración requerida y el último es la disponible. El $NPSH_r$ es una característica propia de la bomba que solo se puede obtener de manera experimental y comúnmente está incluida en las curvas características de las bombas. El $NPSH_d$ es una característica de la instalación en donde se tienen en cuenta los accesorios de la tubería de aspiración es de vital importancia que el ingeniero

o proyectista de una instalación calcule esta variable para una óptima selección de la bomba.

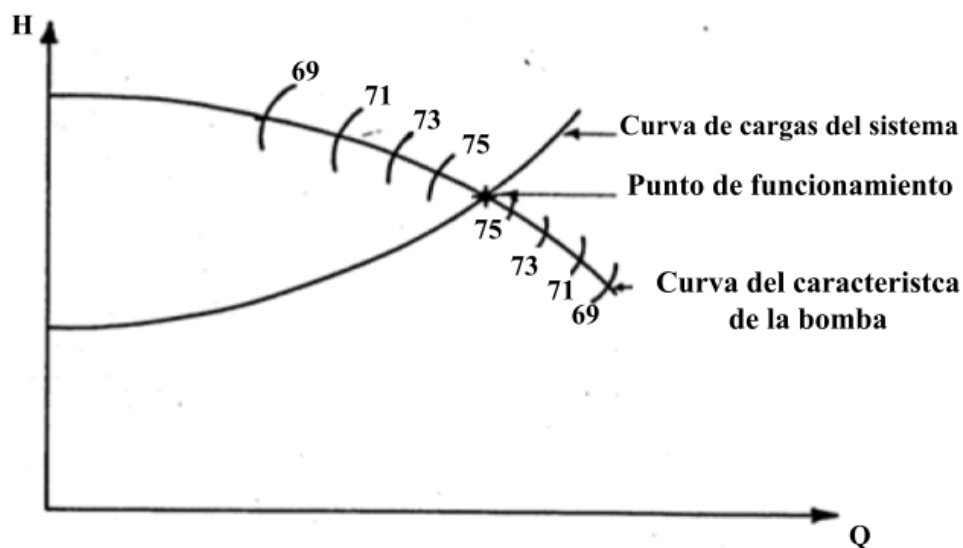
$$NPSH_d = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_v}{\gamma} \quad (38)$$

3.9. Curva del sistema

La curva del sistema representa el comportamiento de la presión con respecto al caudal que por ella fluye, es necesario conocerla para determinar si la bomba propuesta funciona adecuadamente. Al seleccionar una bomba la curva del sistema debe superponerse en la curva característica $H - Q$ de la bomba, el punto de cruce de estas dos curvas ofrecerá el punto de funcionamiento de la bomba el cual debe estar en el área de mayor eficiencia.

Figura 14

Curva del sistema



Nota. Se deben tener en cuenta los accesorios las alturas y los detalles que afecten el flujo de la red.

3.10. Normativa para bancos de prueba

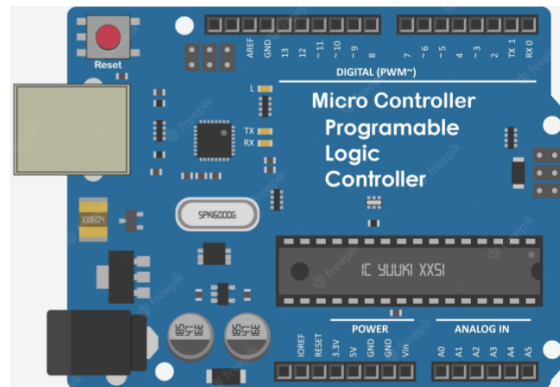
Existen variedad de normas que regulan las pruebas hechas en bombas rotodinámicas de flujo axial, de flujo mixto y centrífugas. Para el caso de Colombia se aplican: la norma ISO 9906 de 2012 y su similar la NTC 4990 2001 ambas vigentes. La norma NTC 4990 de 2001, es una norma internacional que especifica los ensayos de aceptación de desempeño hidráulico en bombas rotodinámicas, es aplicable a cualquier tamaño y cualquier líquido bombeado que se comporte como agua fría. Esta norma es aplicable a la bomba sola y acompañada con accesorios aguas arriba y aguas debajo de la misma. Rojas Castro et al. (2011).

3.11. Dispositivos de medición y adquisición de datos

Debido a la generación tecnológica presente, se precisa implementar equipos acordes a esta. La selección de los equipos para este proyecto se basó en la economía y la versatilidad para mantenimiento o recambio.

3.11.1. Tarjeta de adquisición.. Se implementará la tarjeta de adquisición hardware Arduino uno, con la cual se obtendrán los pulsos eléctricos de los sensores de presión, caudal, velocidad y corriente, que por medio del software del mismo y mediante otra aplicación se visualizará el comportamiento de las propiedades físicas a medir. Arduino uno es un micro controlador que posee pines digitales que funcionan como entrada y salida, además posee entradas análogas, conexión USB, botón de reset y entrada de alimentación. Esta placa tiene infinidad de usos, pero lo más importante es su adaptabilidad.

Figura 15
Curva del sistema



Debido a que el hardware y software son de estructura libre, cualquiera puede utilizarlo y modificarlo. Arduino ofrece una estructura de programación donde cualquier persona puede crear aplicaciones para placas Arduino. Está compuesta por un editor de texto para escribir el código, un área de mensajes, una consola de texto, una barra de herramientas con botones para las funciones comunes, y una serie de menús. Bell (2014).

En el entorno de programación Arduino, se tiene un bloque de inclusión de módulos y declaración de variables presente en la primera sección del código, antes del void setup o bloque de configuraciones, en el cual se indican el modo de funcionamiento de los pines de entrada y salida, comunicación serie entre otras. Finalmente, la estructura cuenta con un bloque de ejecución llamado void loop, en el bloque se pueden incluir acciones que se deseen realizar, en esta sección las acciones se repetirán de manera secuencial y continua.

Figura 16
Curva del sistema

```

Knob
// Controlling a servo position using a potentiometer (variable resistor)
// by Michal Rinott <http://people.interaction-ivrea.it/m.rinott>
#include <Servo.h>
Servo myservo; // create servo object to control a servo
int potpin = 0; // analog pin used to connect the potentiometer
int val; // variable to read the value from the analog pin

void setup()
{
  myservo.attach(9); // attaches the servo on pin 9 to the servo object
}

void loop()
{
  val = analogRead(potpin);
  val = map(val, 0, 1023, 0, 179);
  myservo.write(val);
  delay(15);
}

```

Descripción del programa

Módulos y declaración de variables

Bloque de configuración

Bloque de ejecución continua

// reads the value of the potentiometer (value between 0 and 1023)
// scale it to use it with the servo (value between 0 and 180)
// sets the servo position according to the scaled value
// waits for the servo to get there

Nota. En la figura (16) se presente el diagrama general de la estructura de programación de Arduino donde se especifican cada uno de los bloques.

3.11.2. Sensor de presión. En la actualidad se emplean transductores que convierten la presión en una señal eléctrica analógica mediante extensómetros, capacitores y resistencias eléctricas. El principio de estos equipos consiste en la deformación física del diafragma de presión, lo cual produce un cambio en la resistencia eléctrica proporcional al cambio de presión. En este proyecto se implementará el sensor MPX5010DP figura (17). Este sensor de presión diferencial, se usa para medir nivel de líquidos, presión en tuberías y otras aplicaciones donde se requiere medir una señal diferencial.

Figura 17
Sensor de presión



3.11.3. Sensor de caudal.. Existen diversos métodos de medir el caudal en una instalación hidráulica, por ejemplo, la norma ISO 4185 describe el método de peso que consiste en pesar el caudal promedio vertido en un recipiente durante un lapso de tiempo, este método suele ser el más exacto, pero no el más práctico. Para el caso aquí expuesto se implementa un sensor de turbina figura (18) con una capacidad de medida de 30 l/min el cual funciona en base al principio de efecto hall. Este sensor posee tres pines en su conexión, dos de ellos son la alimentación (5v) y el tercero la línea de datos. Este tipo de sensores se gradúan mediante programación implementando el método del peso o de volumen.

3.11.4. Encoder. Para la medición del rpm se implementa un tacómetro, el cual se puede hacer utilizando diferentes principios. El sistema de infrarrojo es uno de ellos, pero también se puede implementar el principio hall que es la creación de un campo eléctrico. El sensor implementado en la captación de la velocidad del motor es el encoder fotoeléctrico Hco20k figura (19) para Arduino con dos pines de alimentación de 5v y un pin analógico de señal de salida.

Figura 18
Sensor de caudal



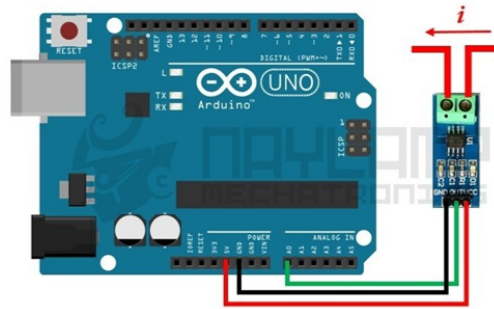
Figura 19
Encoder



3.11.5. sensor de corriente.. Debido a que no es posible medir la potencia mecánica del motor es necesario intervenir en la potencia eléctrica que este consume. Para tal fin se implementa un sensor para medir el paso de corriente, el sensor internamente trabaja con el principio de efecto hall. El sensor implementado es de la serie ACS 712 5 A figura (20), el cual se conecta a una línea de alimentación de corriente del motor. Dispone de dos pines de alimentación y uno de toma de datos.

Figura 20

Sensor de corriente ACS 712.



3.11.6. Variador de velocidad.. Existen diferentes medios para variar la velocidad rotacional de un motor. Mecánicamente se utilizan mecanismos como las transmisiones por correas por ejemplo las implementadas en los taladros de árbol, además se pueden implementar cajas de cambios comúnmente vistas en sistemas automotrices. Para el caso que compete este proyecto se implementa un mecanismo eléctrico, que consiste en la variación de la resistencia en la línea de alimentación del motor, sistema comúnmente implementado en la variación de intensidad de luz.

El instrumento que permite esta variación de corriente se conoce como dimmer y se implementa el

SKU: DIMMER-2KW figura(21)

Figura 21

Dimmer



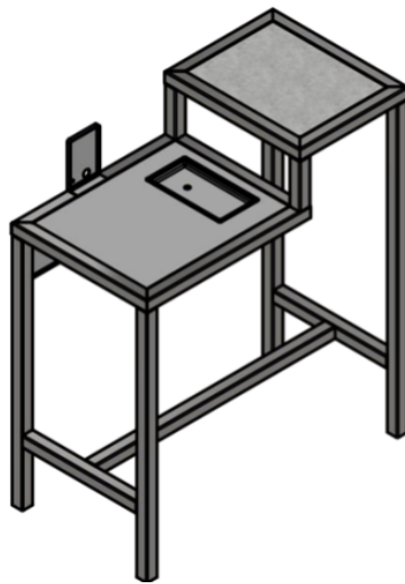
4. Diseño banco de pruebas.

4.1. diseño de bastidor

Se plantea una estructura rígida de acero comercial cuyas dimensiones generales son 1m x 0,5 m x 0,9 m. Se disponen dos niveles, el nivel superior alberga el tanque de alimentación proporcionando al sistema hidráulico una altura de succión positiva. El nivel dos contiene la bomba, el sistema de control y el sistema de adquisición de datos.

Figura 22

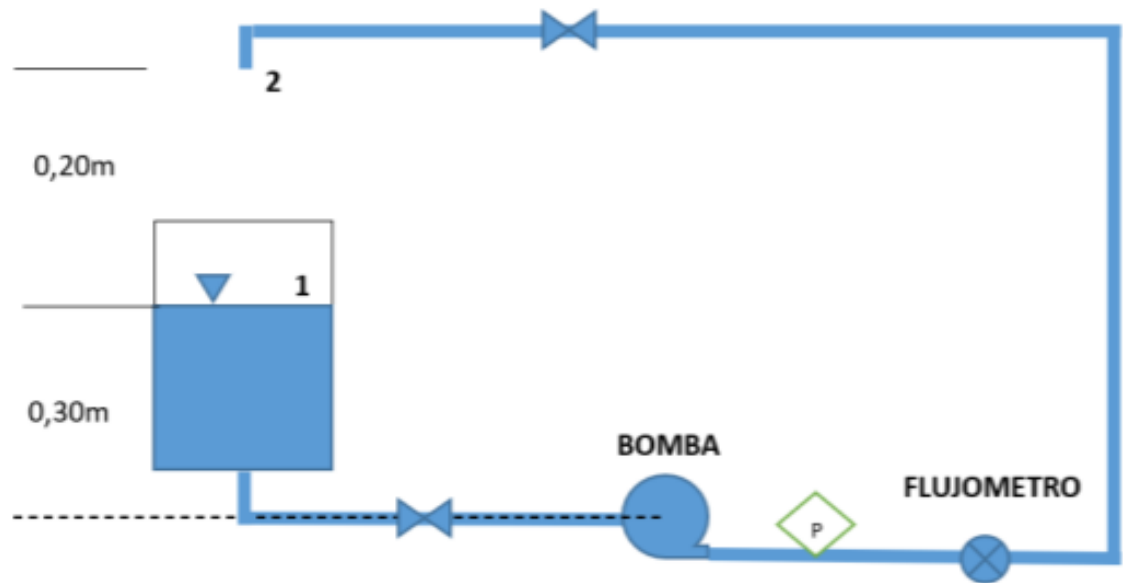
Bastidor banco de pruebas.



4.2. Diseño y cálculo de la red hidráulica

Se dispone de una red hidráulica que consta de un tanque y un sistema de tuberías que en su trayecto tiene instalados algunos accesorios (codos, sensor de presión, sensor de caudal y una bomba).

Figura 23
Instalación hidráulica



Nota. El diámetro de succión se divide en dos partes, la inicial es de 26.7 mm (tubería de 1 pulgada) su longitud es de 0.35 m. En la segunda parte el diámetro de la tubería es de 39 mm (tubería de 1 ¼ pulgada) y su longitud es de 10 cm. Para el caso de la tubería de descarga se tienen igualmente dos secciones de línea, que comienzan con una tubería de diámetro nominal 26.7 mm (tubería de 1 pulgada) y cuya longitud es de 10 cm y termina con una tubería de 15 mm (tubería de ½ pulgada) con longitud de 40 cm.

En el sistema se tienen dos válvulas de bola, con diámetros de 1 ¼ y 1 de pulgada según las tuberías de succión y descarga. Además, se implementan dos sensores de presión que se instalan mediante conexiones T a la entrada y a la salida de la bomba tal como se muestra en la figura anterior. Para

obtener el flujo del sistema se instala un sensor de presión de efecto hall de ½ pulgada de diámetro en sus extremos. También se incluyen otros accesorios como codos y reducciones en diferentes puntos de las líneas de succión y de descarga. Con las dimensiones de la red hidráulica se procede a determinar la ecuación que la rige, para ello se debe implementar la ecuación de la energía del punto 1 al punto 2. De donde se obtiene que:

$$E_{punto1} + E_{bomba} - E_{perdidas} = E_{punto2} \quad (39)$$

Esta ecuación expresa que la energía acumulada en el punto 1 más la energía que suministra la bomba menos las pérdidas que se generan en la tubería y en los accesorios es igual a la energía del fluido en el punto 2. Si se representa la ecuación de la energía en términos de la cabeza de presión se tiene que:

$$\left[\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \right] + H_{TB} - H_F = \left[\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \right] \quad (40)$$

De esta ecuación se puede decir que $P_1 = P_2 = P_{atm}$, lo cual hace que se cancelen los dos términos, además, se considera que la velocidad en el punto 1 es cero y por ende este término tampoco es tenido en cuenta. Para establecer la curva que representa la red hidráulica se despeja H_{TB} y queda de la siguiente manera:

$$H_{TB} = \frac{V_2^2}{2g} + (Z_2 - Z_1) + H_F \quad (41)$$

Mediante el programa EES versión académica se desglosa la ecuación de H_{TB} y se adiciona los valores que en ella intervienen.

Figura 24

Datos proporcionados de la red hidráulica digitados en EES

DATOS CONOCIDOS

- $D_{1s} = 0,0267$ [m] Diámetro de succión sección 1
 $L_{s1} = 0,35$ [m] longitud de línea de succión sección 1
 $D_{2s} = 0,039$ [m] Diámetro de succión sección 2
 $L_{s2} = 0,1$ [m] longitud de línea de succión sección 2
 $D_{1d} = 0,0267$ [m] Diámetro de descarga sección 1
 $L_{d1} = 0,1$ [m] longitud de línea de descarga sección 1
 $D_{2d} = 0,015$ [m] Diámetro de descarga sección 2
 $L_{d2} = 0,4$ [m] longitud de línea de descarga sección 2
 $\mu = 0,001$ [pa·s] viscosidad dinámica del agua a 20 °c
 $\rho = 1000$ [kg/m³] densidad del agua a 20 °c
 $g = 9,81$ [m/s²] gravedad
 $e = 0,000005$ [m] rugosidad del pvc
 $z1 = 0,3$ [m] altura centro de la bomba al punto 1
 $z2 = 0,5$ [m] altura centro de la bomba al punto 2

Nota. En esta primera parte se digitan los datos conocidos del sistema, además, de las propiedades físicas del fluido utilizado, que para este caso es agua a 20 °C y presión de 1 atm.

El desglosamiento de la ecuación característica de la red hidráulica se comienza por el cálculo de las pérdidas, las cuales se dividen en pérdidas menores y mayores, que a su vez también se dividen

en pérdidas de succión y de descarga.

$$H_F = H_{m\dot{y}} + H_{m\dot{n}} \quad (42)$$

Las pérdidas mayores representan las pérdidas producidas por la fricción en los tramos de tubería que la rugosidad del material y el flujo generan. Cengel and Cimbala (2013) expresa que la pérdida de carga en un tramo de tubería es igual a:

$$H_L = f \frac{LV_{prom}^2}{2gD} \quad (43)$$

En esta ecuación se aplica el factor de fricción f que depende del tipo de flujo que atraviesa la tubería. Para el caso que se trata, se comprueba que el flujo se comporta en su mayoría como flujo turbulento, ya que se tienen valores del número de Reynolds superiores a los que establecen en la literatura.

$$Re = \frac{\rho V_{prom} D}{\mu} \quad (44)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log \left[\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\epsilon}{3,7D} \right)^{1,11} \right] \quad (45)$$

La fórmula para el cálculo del factor de fricción es la planteada por Haaland en flujos turbulentos ($Re > 3000$).

Nota. En la figura (25) se expresan los valores en la tubería de succión y de descarga por separado

Figura 25

Ecuaciones para el cálculo de perdidas mayores.

CALCULO DE PERDIDAS

$$H_{TB} = \frac{v_{d2}^2}{2 \cdot g} + H_f + z_2 - z_1$$

$$H_f = H_{my} + H_{mn} \quad \text{perdidas en la línea hidráulica}$$

$$H_{my} = H_{mys} + H_{myd} \quad \text{perdidas mayores}$$

$$H_{mys} = H_{mys1} + H_{mys2} \quad \text{perdidas mayores en la línea de succión}$$

$$H_{myd} = H_{myd1} + H_{myd2} \quad \text{perdidas mayores en la línea de descarga}$$

$$H_{mys1} = f_{s1} \cdot L_{s1} \cdot \frac{v_{s1}}{2 \cdot D_{1s} \cdot g} \quad \text{perdidas mayores en la línea de succión sección 1}$$

$$H_{mys2} = f_{s2} \cdot L_{s2} \cdot \frac{v_{s2}}{2 \cdot D_{2s} \cdot g} \quad \text{perdidas mayores en la línea de succión sección 2}$$

$$H_{myd1} = f_{d1} \cdot L_{d1} \cdot \frac{v_{d1}}{2 \cdot D_{1d} \cdot g}$$

perdidas mayores en la línea de descarga sección 1

$$H_{myd2} = f_{d2} \cdot L_{d2} \cdot \frac{v_{d2}}{2 \cdot D_{2d} \cdot g}$$

perdidas mayores en la línea de descarga sección 2

debido a que los diámetros son distintos y por ende también el comportamiento del flujo.

Nota. En la figura (26) se determina el comportamiento del flujo para el cálculo de las perdidas en la tubería, mediante un cálculo previo se establece que el flujo suele comportarse como flujo turbulento por ende se implementan las ecuaciones expuestas.

Figura 26

Determinación del flujo y cálculo de factores de fricción.

DETERMINACION DEL TIPO DE FLUJO Y CALCULO DE FACTOR DEL FRICCION

$$Re_{1s} = \rho \cdot v_{s1} \cdot \frac{D_{1s}}{\mu} \quad \text{Reynolds del flujo de succión sección 1}$$

$$Re_{2s} = \rho \cdot v_{s2} \cdot \frac{D_{2s}}{\mu} \quad \text{Reynolds del flujo de succión sección 2}$$

$$Re_{1d} = \rho \cdot v_{d1} \cdot \frac{D_{1d}}{\mu} \quad \text{Reynolds del flujo de descarga sección 1}$$

$$Re_{2d} = \rho \cdot v_{d2} \cdot \frac{D_{2d}}{\mu} \quad \text{Reynolds del flujo de descarga sección 2}$$

$$f_{s1} = \left[\frac{1}{-1,8 \cdot \log \left(\frac{6,9}{Re_{1s}} + \left[\frac{e}{3,7 \cdot D_{1s}} \right]^{1,11} \right)} \right]^2$$

factor de fricción de succión sección 1

$$f_{s2} = \left[\frac{1}{-1,8 \cdot \log \left(\frac{6,9}{Re_{2s}} + \left[\frac{e}{3,7 \cdot D_{2s}} \right]^{1,11} \right)} \right]^2$$

factor de fricción de succión sección 2

$$f_{d1} = \left[\frac{1}{-1,8 \cdot \log \left(\frac{6,9}{Re_{1d}} + \left[\frac{e}{3,7 \cdot D_{1d}} \right]^{1,11} \right)} \right]^2$$

factor de fricción de descarga sección 1

$$f_{d2} = \left[\frac{1}{-1,8 \cdot \log \left(\frac{6,9}{Re_{2d}} + \left[\frac{e}{3,7 \cdot D_{2d}} \right]^{1,11} \right)} \right]^2$$

factor de fricción de descarga sección 2

Para el cálculo de las pérdidas menores (perdidas por accesorios) se implementa la ecuación utilizada por Cengel and Cimbala (2013). En la cual K_L representa un factor que depende del accesorio y su geometría.

$$H_L = K_L \frac{V_{prom}^2}{2} \quad (46)$$

Los valores de K_L para los distintos accesorios se extrajeron de Cengel and Cimbala (2013). Los accesorios que se analizan en la tubería de succión son: entrada de tubería, válvula de bola totalmente abierta e instalación del sensor de presión mediante una unión T.

Figura 27

Ecuaciones para el cálculo de pérdidas menores en la tubería de succión.

CALCULO DE PERDIDAS MENORES

$$H_{mn} = H_{mns} + H_{mnd} \text{ pérdidas menores}$$

$$H_{mns} = H_{ents} + H_{cds} + H_{vals} + H_{ampliacion} \text{ pérdidas menores de succión}$$

$$H_{mnd} = H_{vald} + H_{reduccion} + 2 \cdot H_{cdd} \text{ pérdidas menores de descarga}$$

$$H_{ents} = k_{ents} \cdot \frac{v_{s1}}{2 \cdot g}$$

$$H_{reduccion} = k_{mred} \cdot \frac{v_{d2}}{2 \cdot g} \text{ pérdida reducción en la línea de descarga}$$

$$H_{cds} = k_{mcds} \cdot \frac{v_{s1}}{2 \cdot g} \text{ pérdida de codo de succión}$$

$$k_{mcds} = 0,9$$

$$k_{mcdd} = 0,9$$

$$H_{cdd} = k_{mcdd} \cdot \frac{v_{d2}}{2 \cdot g} \text{ pérdida de codo de succión}$$

$$k_{mvald} = 0,05$$

$$H_{vald} = k_{mvald} \cdot \frac{v_{d1}}{2 \cdot g} \text{ pérdida valvula de descarga}$$

$$k_{mvals} = 0,05$$

$$k_{mamp} = 0,04$$

$$H_{vals} = k_{mvals} \cdot \frac{v_{s1}}{2 \cdot g} \text{ pérdida valvula de succión}$$

$$k_{mred} = 1$$

$$k_{ents} = 0,8$$

$$H_{ampliacion} = k_{mamp} \cdot \frac{v_{s2}}{2 \cdot g} \text{ pérdida ampliacion en la línea de succión}$$

Los accesorios implementados en la descarga son: conexión bomba tubería, sensor de presión mediante unión T, válvula de bola, codos de 90° y sensor de caudal. Expresadas las pérdidas del sistema en términos de la velocidad, se sustituye la velocidad en términos del caudal y mediante EES se parametriza el caudal $1e(-30) < Q_S < 0,00083 [m^3/s]$ y se genera la ecuación $H_{TBvs}Q_S$. Estos valores se presentan en figura (28). Además del cálculo de las velocidades y áreas en las tuberías de succión y descarga.

Debido a que para el sistema se implementa un motor de 180 w la parametrización del sistema y el diseño se limita a que el sistema no supere este consumo y es importante para el diseño de la bomba. en la tabla 2.

Figura 28

Ecuaciones para velocidades de succión y descarga.

CALCULO DE LAS VELOCIDADES EN TERMINOS DEL CAUDAL

$$V_{s1} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_{1s}^2}$$

$$V_{s2} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_{2s}^2}$$

$$V_{d1} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_{1d}^2}$$

$$V_{d2} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_{2d}^2}$$

$$Q = \frac{Q_{GPM}}{15850,3}$$

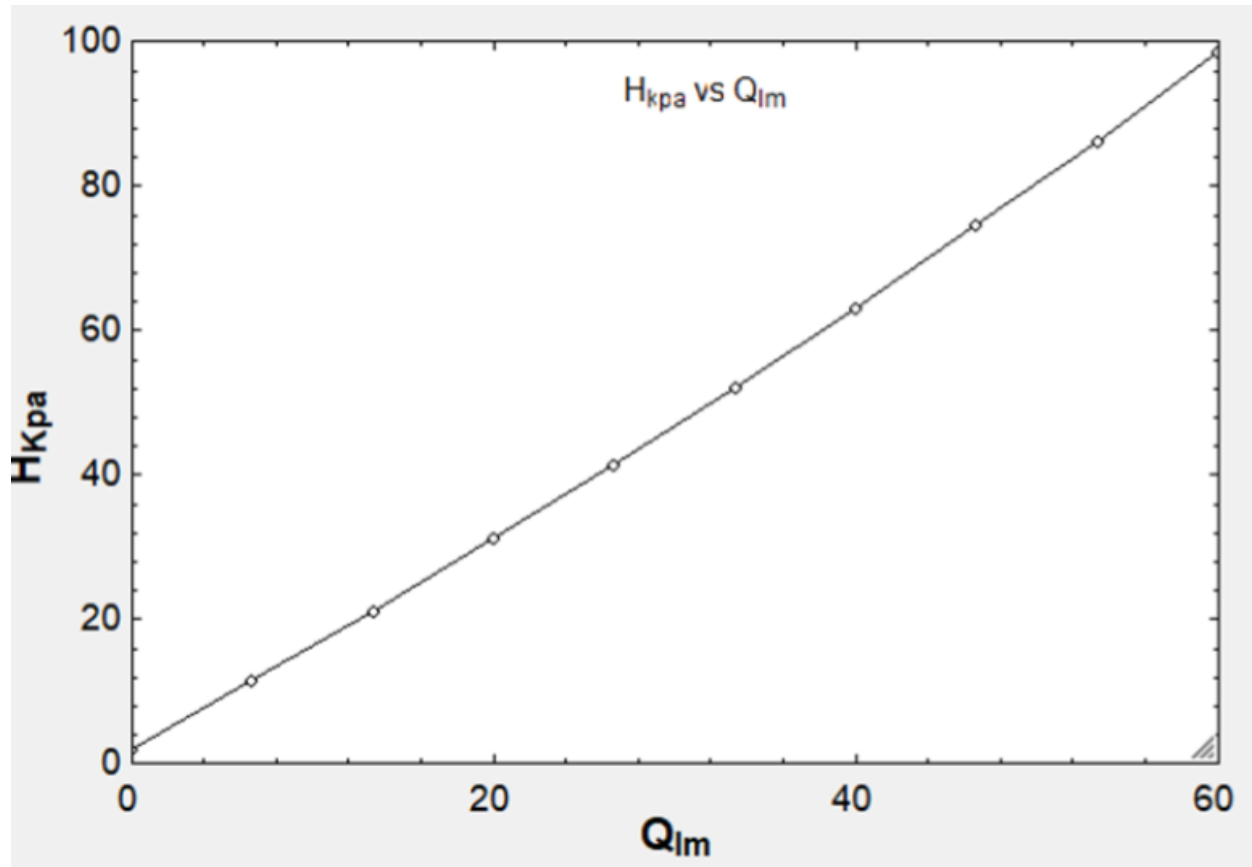
Tabla 2

Datos de curva característica del sistema

Q (m ³ /s)	H (Kpa)	H _{tb} (mca)
0	1.96	0.2
6.667	11.64	1.186
13.3	21.26	2.167
20	31.19	3.179
33.33	52.12	5.13
40	63.14	6.433
46.67	74.54	7.599
53.33	86.33	8.8
60	98.5	10.04

Figura 29

Curva característica del sistema hidráulico.



Nota. Al obtener la curva característica del sistema se establece el punto de funcionamiento de la bomba que se va a utilizar.

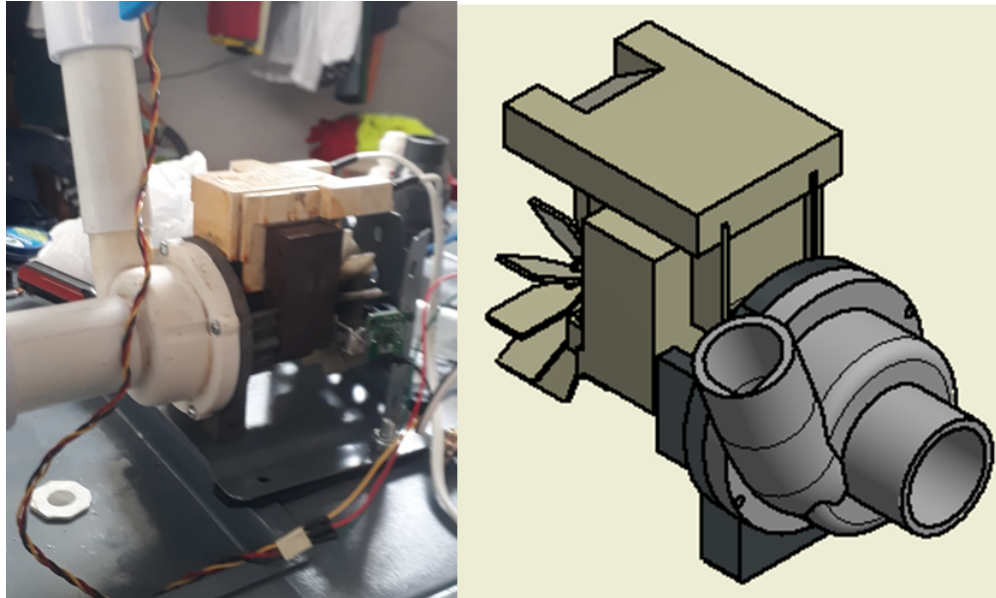
4.3. Bomba centrífuga.

Se implementa un motor de 180 w de potencia y cuya velocidad máxima con carga es de 3180 rpm. Tiene acoplada una bomba centrífuga cuyo diámetro interno es de 60 mm y su desarrollo es circular; originalmente trae un impulsor semiabierto de 6 alabes y las holguras internas

superan a las recomendadas en la literatura.

Figura 30

Motor-bomba de 180 w.



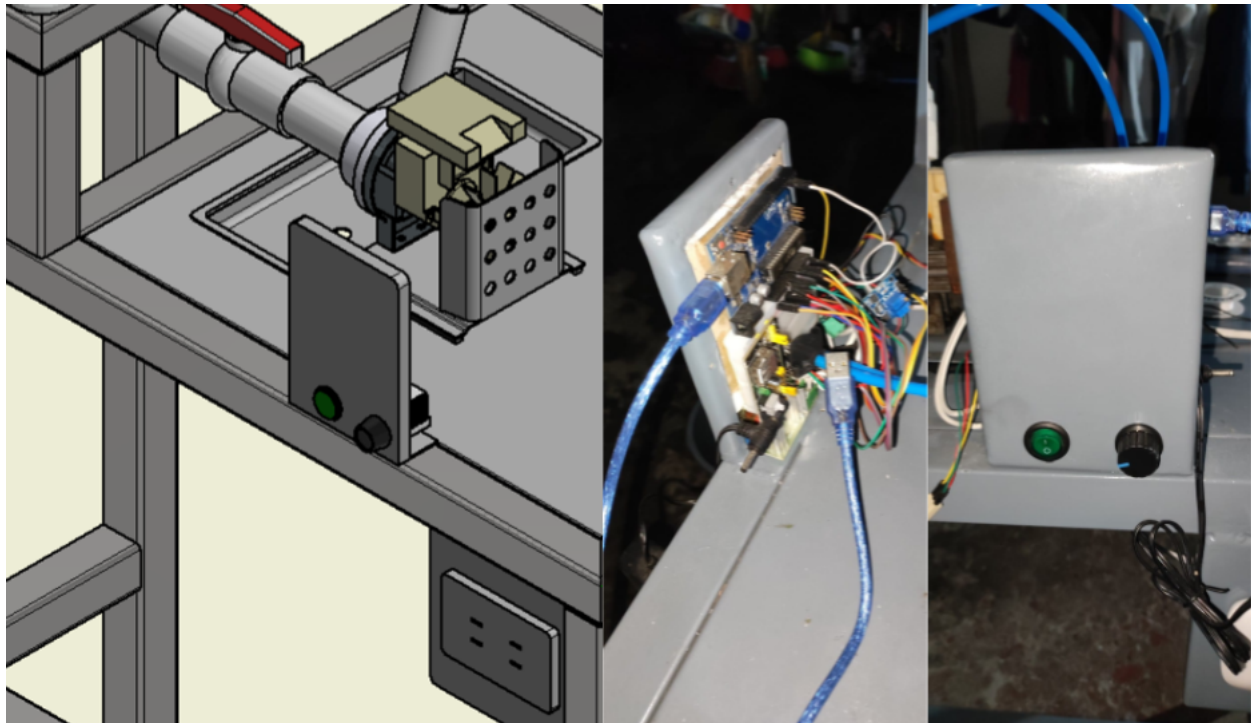
Nota. En la figura (30) se expone la bomba implementada. Es una bomba de bajo consumo, funciona con un motor de corriente alterna y permite la variación de su velocidad mediante un dispositivo dimmer. Se mantendrá el impulsor original, sin embargo, se diseña un modelo para su caracterización.

4.4. Panel de control.

Se especificaron los componentes electrónicos a utilizar, los cuales se instalaron en el tablero de control ubicado en la parte inferior del bastidor. Los accionamientos principales son un interruptor de inicio para el motor y el variador de velocidad, los secundarios son: una fuente de 5v conectada en la parte posterior del panel que cuenta con un botón de accionamiento y que es la responsable de alimentar los sensores que se distribuyen en el banco de pruebas.

Figura 31

Panel de control banco de prueba.



4.5. Diseño de algoritmo de programación en Arduino.

Mediante los sensores instalados se pretende adquirir señales eléctricas que se transformaran mediante programación en los valores de las propiedades medidas, para tal fin se debe crear un algoritmo que de manera repetitiva adquiera las señales en tiempo real. Como se menciona anteriormente, la tarjeta de adquisición es la Arduino uno; la cual cuenta con su plataforma de software propia. Debido a que el software es libre, se obtuvo la programación individual de los sensores. Con la experticia y la información recopilada, se logra una programación conjunta que hace posible la adquisición de las señales eléctricas y su transformación a los valores deseados.

Figura 32*Declaración de variables.*

```

//variables del sensor de caudal
volatile int NumPulsos; //variable para la cantidad de pulsos recibidos en el sensor de caudal
int PinSensor = 2; //Sensor conectado en el pin 2 sensor de caudal
float factor_conversion=7.6; //factor de conversion de los pulsos por segundo a caudal

//--Datos y variables para sensor de velocidad
volatile int contador = 0;

//Datos o variables del senso de presion diferencial
float Sensibilidad_p=0.35; //sensibilidad en V/A para nuestro sensor
float offset_p=-0.2; // Equivale a la amplitud del ruido TIENE variar

//Datos o variables del sensor de corriente
float Sensibilidad=0.133; //sensibilidad en V/A para nuestro sensor
float offset=2.45; // Equivale a la amplitud del ruido

volatile int puerta = 0;

```

Nota. En la figura (32) se declaran las variables pertinentes para los 4 sensores, teniendo en cuenta las recomendaciones del fabricante y los posibles ajustes en la calibración según la norma NTC 4990.

Figura 33*Bloque de configuración.*

```

void setup() {

  Serial.begin(9600); //velocidad de comunicacion con el monitor serial.
  attachInterrupt(1,interrupcion0,RISING); // Interrupcion para la toma de pulsos sensor de caudal.
  pinMode(PinSensor, INPUT);
  attachInterrupt(0,ContarPulsos,RISING); // Interrupcion para la toma de pulsos sensor de velocidad.
}

```

Nota. Para la figura (33) en el bloque de configuración se especifica la velocidad de comunicación,

y la activación de funciones de interrupción que ayudaran a la obtención de los pulsos generados por los sensores de caudal y velocidad en determinado tiempo según la programación.

Figura 34

Bloque de ejecución sección 1.

```

void setup() {

  Serial.begin(9600); // velocidad de comunicacion con el monitor serial.
  attachInterrupt(1, interrupcion0, RISING); // Interrupcion para la toma de pulsos sensor de caudal.
  pinMode(PinSensor, INPUT);
  attachInterrupt(0, ContarPulsos, RISING); // Interrupcion para la toma de pulsos sensor de velocidad.
}

void loop() {
  //ejecucion de la adquisicion de los datos del sensor de presion
  if(puerta == 0){
    float Ipre=get_corriente(); //se llama la funcion que obtiene la señal de voltaje medido por el sensor
    float Presion_m=(Ipre-0.04*5)/(0.09*5)*1.6*9810; // calculo de la presion en kpa
    Serial.println(Presion_m,3);

    puerta = 1;
  }
  //ejecucion de la adquisicion de los datos del sensor de presion
  if(puerta == 1){
    float Ip=get_corriente(); //se llama la funcion que obtiene la señal de la corriente pico
    float Irms=Ip*0.707; //Intensidad RMS = Ipico/(2^1/2) aplicable para el motor en uso.
    float Pot=Irms*120; // P=IV watts
    //Serial.println("Potencia: ");
    Serial.println(Pot,3);
    //delay(500);
    puerta = 0;
  }
}

```

Nota. La figura (34) muestra que las señales eléctricas de los sensores de corriente y presión se obtienen mediante los pines análogos A0 y A1. Estas señales son obtenidas mediante un mismo esquema de programación en la cual se incluye un filtrado de la señal. Lo primero que se hace según el esquema mostrado es llamar a la función donde se van a adquirir los datos y seguido a esto se hacen las operaciones pertinentes para calcular el valor de la señal que se mide.

Nota. Al igual que la sección anterior la figura (35) muestra como el programa lee las funciones

Figura 35

Bloque de ejecución sección 2(impresión rpm y caudal).

```

Serial.println(contador*30); // Como son dos interrupciones por vuelta (contador * (60/2))
float caudal_L_m=NumPulsos/factor_conversion;
Serial.println (caudal_L_m);
contador = 0;
NumPulsos = 0;

}

```

establecidas para cada sensor. Para los sensores de velocidad y caudal se implementa la función de interrupción de bajo y alto las cuales están dispuestas en el Arduino uno, en los pines digitales 1 y 2.

Figura 36

Función para obtener señal de presión y de corriente.

```

float get_corriente(){
if( puerta == 0)//si se cumple la condicion se obtendra la señal del sensor de presion
{
float voltajeSensor_p;
float corriente_p=0;
long tiempo=millis();
float Imax_p=0;
float Imin_p=0;
while(millis()-tiempo<500)//realizamos mediciones durante 0.5 segundos
{
voltajeSensor_p = analogRead(A1) * (5.0 / 1023.0);//lectura del sensor
corriente_p=0.9*corriente_p+0.1*((voltajeSensor_p)/Sensibilidad_p); //Ecuación para obtener la corriente
if(corriente_p>Imax_p)Imax_p=corriente_p;
if(corriente_p<Imin_p)Imin_p=corriente_p;
}
return(((Imax_p-Imin_p)/2)-offset_p);
}
else{//si no se cumple la condicion anterior se obtendra la señal de la corriente del motor
float voltajeSensor;
float corriente=0;
long tiempo=millis();
float Imax=0;
float Imin=0;
while(millis()-tiempo<500)//realizamos mediciones durante 0.5 segundos
{
voltajeSensor = analogRead(A0) * (5.0 / 1023.0);//lectura del sensor
corriente=0.9*corriente+0.1*((voltajeSensor-2.5)/Sensibilidad); //Ecuación para obtener la corriente
if(corriente>Imax)Imax=corriente;
if(corriente<Imin)Imin=corriente;
}

return(((Imax-Imin)/2)-offset);
}
}

```

Nota. En la figura (36) se plantea una única función para la obtención de dos señales, implemen-

tando un condicional para cada uno de los casos. Este condicional se activa y desactiva secuencialmente a medida que se avanza con el código.

Figura 37

Funciones para contar los pulsos.

```
//----Funcion contador de pulsos sensor de velocidad
void interrupcion0() // Funcion que se ejecuta durante cada interrupcion
{
    contador++; // Se incrementa en uno el contador
}
//----Funcion contador de pulsos sensor de caudal
void ContarPulsos ()
{
    NumPulsos++; //incrementamos la variable de pulsos
}
```

Nota. En la figura (37) se desglosa una función que se activa cada vez que hay una interrupción en los sensores, y aumenta el valor de la constante que posee.

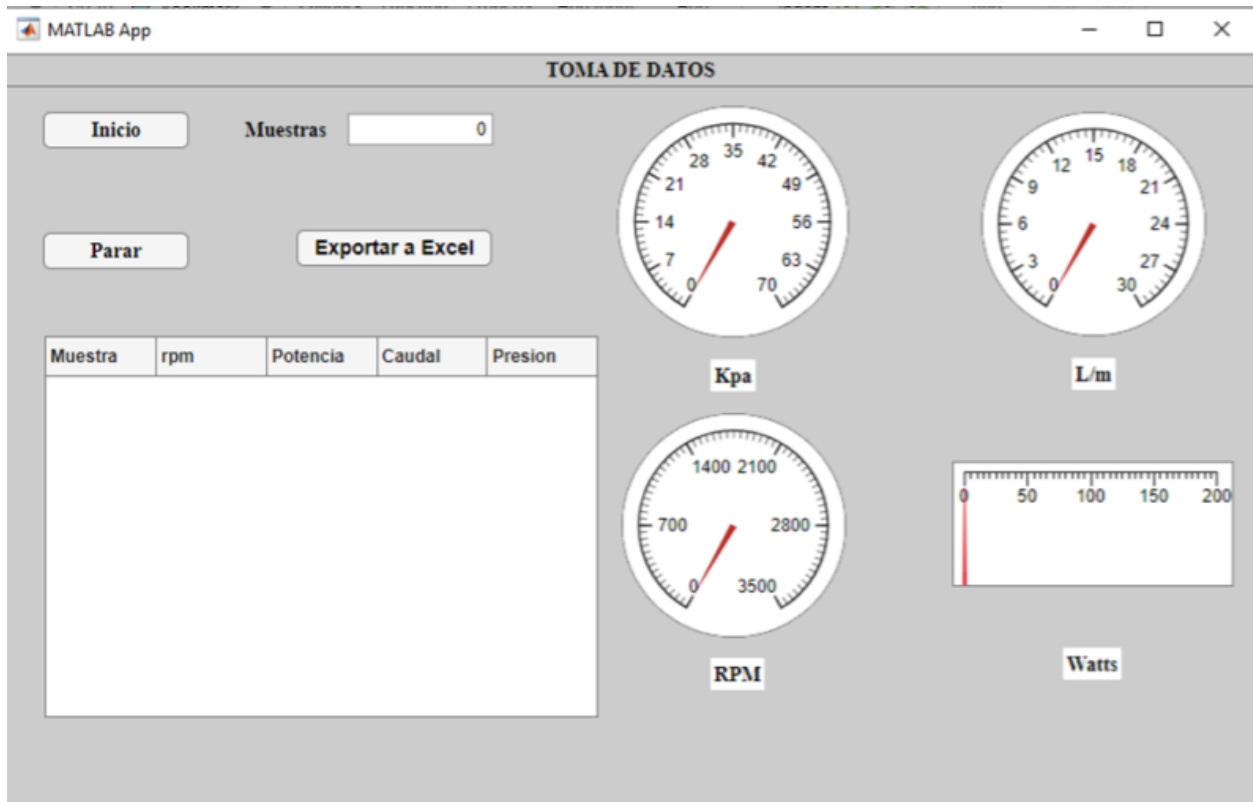
4.6. Diseño del entorno grafico en MATLAB.

Matlab es una plataforma de programación y calculo numérico, que permite analizar, modelar, simular y obtener un sin número de aplicaciones en la investigación de fenómenos. Para el proyecto en mención, se implementa el entorno integrado para diseñar la interfaz de usuario. App Designer integra las dos tareas principales en la creación de una app: la distribución de los componentes visuales de una interfaz gráfica de usuario (GUI) y la programación del comportamiento de la app. Como se implementa Arduino como programa principal de adquisición de datos se debe crear una comunicación serial entre la tarjeta Arduino y la aplicación creada en Matlab. Esta co-

municación se hace posible por medio del soporte Arduino Matlab.

Figura 38

Interfaz gráfica adquisición de datos.

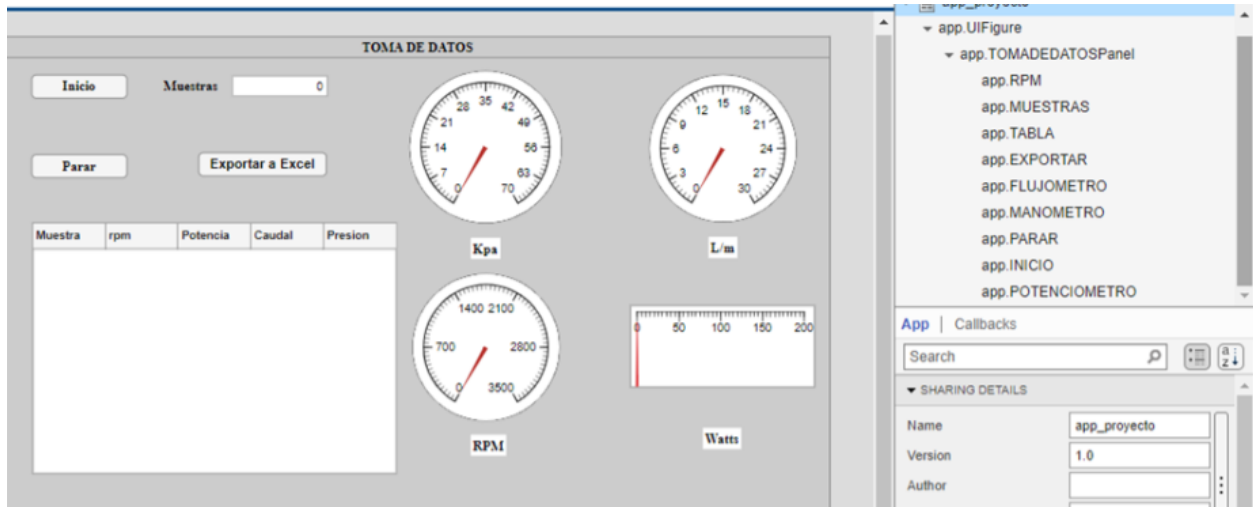


Nota. En la figura (38) se muestra el entorno gráfico que cuenta con 4 caratulas de medición, las cuales permiten visualizar el comportamiento de la presión, caudal, velocidad de giro y potencia eléctrica. Además, cuenta con una tabla de tabulación que recopila los datos en tiempo real para que el estudiante disponga de los mismos al final de la prueba. Los botones de inicio, parar y exportar a Excel son mecanismos de control de la app y el cajón de muestras es la cantidad de valores que se desean adquirir.

Para que la interfaz gráfica sea un ejecutable, Matlab ofrece un entorno complementario de programación en el cual se establece el funcionamiento y visualización de el comportamiento del sistema medido.

Figura 39

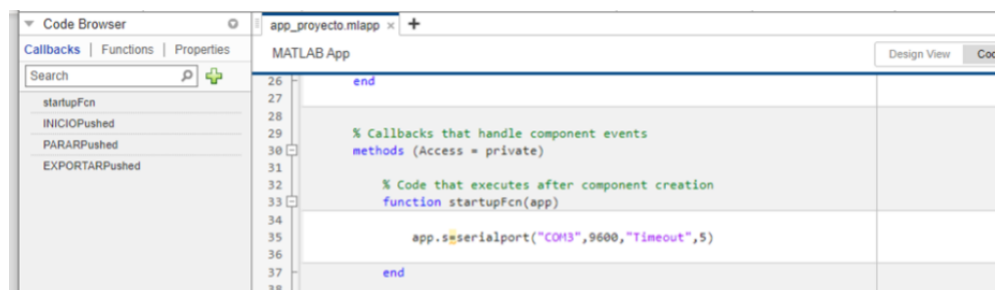
Nombres de los componentes de la interfaz gráfica.



Nota. En la figura (39) se ven Los objetos que aparecen en la interfaz gráfica, poseen un nombre el cual se puede visualizar en la parte derecha de la imagen. Estos nombres son implementados en la programación interna de la App.

Figura 40

Comunicación placa Arduino y Matlab.



Nota. En la figura (40) se crea una función interna, que permite que se genere una comunicación entre la placa Arduino y Matlab. La función se ejecuta automáticamente con el inicio de la aplicación, por ende, es importante que cuando se ejecute la aplicación el Arduino esté conectado.

Figura 41

Botón de inicio encabezado

```
% Button pushed function: INICIO
function INICIOPushed(app, event)
    close all
    clc
    global Parar Datos rpm const caudal Potencia Presion
    Parar=0;
    muestras=app.MUESTRAS.Value
    contador=1;
```

Nota. En la figura (41) se programa el botón de inicio que se cataloga como el centro de la aplicación, aquí se ejecutan la mayoría de funciones de visualización de la interfaz gráfica. Lo primero a ejecutar es la limpieza y cierre de programas abiertos en Matlab que pueda interferir con el código actual, además se establecen las variables que se utilizaran y se lee la cantidad de muestras que se digitaron en la interfaz las cuales son el límite del ciclo repetitivo.

Para la lectura continua de los datos en la interfaz gráfica, en la figura (42), se crea un ciclo repetitivo a partir del tamaño de muestras que el usuario asigna. Dentro del ciclo se implementa un condicional el cual está en lasado con el botón parar y su función es dejar de tomar datos. La estructura importante del condicional se centra en la lectura de los datos enviados por el Arduino, los cuales se deben adquirir de forma separada y se debe tenerse en cuenta el orden de impresión

Figura 42

Estructura de programación botón de inicio (adquisición de datos desde la placa Arduino).

```
while contador<=muestras
    if Parar == 1;
        break;
    else
        valorADC = fscanf(app.s, '%0.5f');
        valorADC2 = fscanf(app.s, '%0.5f');
        valorADC3 = fscanf(app.s, '%0.5f');
        valorADC4 = fscanf(app.s, '%0.5f');
```

inscrito en el código Arduino. Mediante el código de adquisición de datos es posible establecer el formato en el cual se desean ver los valores de medida y se hace mediante la expresión que se encuentra dentro del apostrofe en las variables valorADC.

Figura 43

Estructura de programación botón de inicio (creación de vectores e impresión de valores en las caratulas de medida).

```
Presion(contador)=valorADC(1);
app.MANOMETRO.Value = Presion(contador)/1000;

Potencia(contador)=valorADC2(1);
app.POTENCIOMETRO.Value = Potencia(contador);

rpm(contador)=valorADC3(1);
app.RPM.Value = rpm(contador);

caudal(contador)=valorADC4(1);
app.FLUJOMETRO.Value = caudal(contador);
```

Nota. En la figura (43) se crean los vectores donde se almacenan los datos en tiempo real y a su vez se imprimen en las caratulas de la interfaz gráfica. Este comando hace parte de la programación del botón de inicio.

Figura 44

Estructura de programación botón de inicio (visualización de datos en la interfaz gráfica)

```
tiempo(contador)=contador;  
Datos(contador,1) = tiempo(contador);  
Datos(contador,2) = rpm(contador);  
Datos(contador,3) = Potencia(contador);  
Datos(contador,4) = caudal(contador);  
Datos(contador,5) = Presion(contador);  
  
app.TABLA.Data = Datos;  
contador=contador+1;
```

Nota. En la figura (44), se crea la matriz de datos y se imprime en la tabla de la interfaz gráfica, la acción se hace una secuencia de valores a la vez según como avanza el ciclo repetitivo de las muestras.

Nota . Para el caso de la programación del botón de parar se crea una variable con el mismo nombre que hace que se cambie el estado del ciclo repetitivo. En cuanto a la función exportar se llevan los datos guardados en formato Matlab a el formato *xls* de manera que se hacen más trabajables para el usuario.Lo anterior se visualiza en la figura (45).

Figura 45

Estructura computacional del botón parar y exportar datos.

```
function PARARPushed(app, event)
    global Parar
    Parar = 1;
end

% Button pushed function: EXPORTAR
function EXPORTARPushed(app, event)
    global Datos
    writematrix(Datos, 'Datos.xls');
    xlsread('Datos.xls')
end
```

4.7. Diseño impulsor.

Para el diseño de bombas centrifugas se consideran parámetros experimentales descritos por algunos autores que han investigado el comportamiento de estas máquinas. El libro Zubicaray (2003). hace una descripción detallada del diseño de bombas centrifugas y se utiliza parte de este análisis, para el diseño de un impulsor.

4.7.1. Cálculo de las variables geométricas y de flujo en el impulsor.

- Velocidad específica en el punto de mayor eficiencia.
- Velocidades meridionales a la entrada y a la salida del impulsor (cm1 y cm2).
- Diámetro exterior del impulsor.

- Ángulos de entrada y salida del aspa del impulsor.

En primera instancia se procede a calcular la velocidad específica ya que algunas constantes dependen de este valor. Mediante la curva característica del sistema hidráulico, se seleccionó un punto de funcionamiento, que tiene un caudal de 12 gpm y genera una carga de 1,818 mca. Es importante resaltar que la velocidad de giro con la cual se va a diseñar la bomba es de 3450 rpm y está limitada por el motor que se implementa. Para el cálculo de las variables de este subcapítulo se implementa nuevamente el programa EES versión académica; los resultados se expresan al final de cada análisis.

El primer paso es el cálculo de la velocidad específica, obtenida de la ecuación (37). $Q_d = 20(\text{gpm})$, $H_T = 12(\text{ft})$, $\text{rpm} = 3180$ y $N_s = 1709$

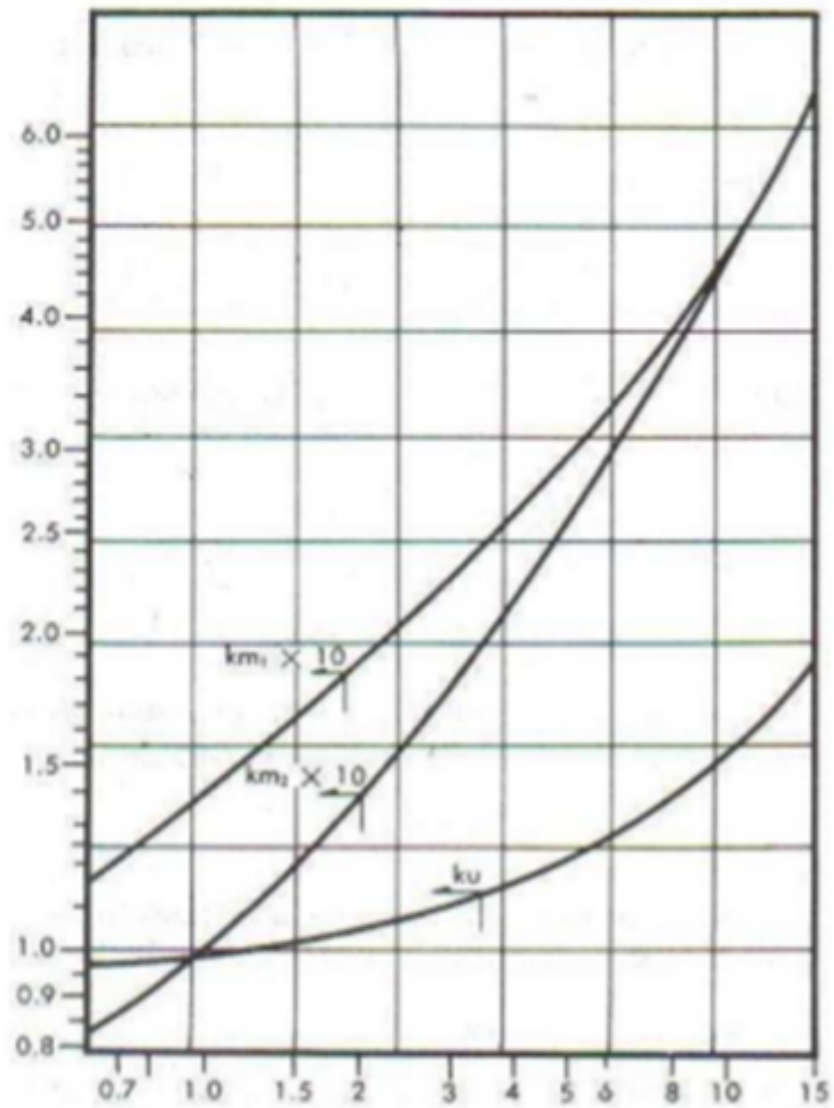
La constante de velocidad es definida como un factor que relaciona la velocidad periférica y la carga total de la bomba Zubicaray (2003).

$$k_u = \frac{u_2}{\sqrt{2gH_t}} \quad (47)$$

Donde k_u se usa para el cálculo del diámetro del impulsor cuando se conoce la carga y la velocidad, la cual es igual a $u_2 = \frac{\text{rpm}\pi D_2}{60}$. Existen diferentes gráficas para el cálculo de este factor en las cuales se halla con relación a la cantidad y al ángulo de salida de los alabes. Como parámetro inicial de selección se toma la gráfica con la que Zubicaray (2003). determina las constantes de diseño.

Nota. En esta figura (46) se especifican tres constantes de diseño, los valores del eje de las abscisas son la velocidad específica multiplicada por 10^{-3} y la gráfica está basada en un ángulo $\beta_2 = 22,5$.

Figura 46
Constantes de diseño



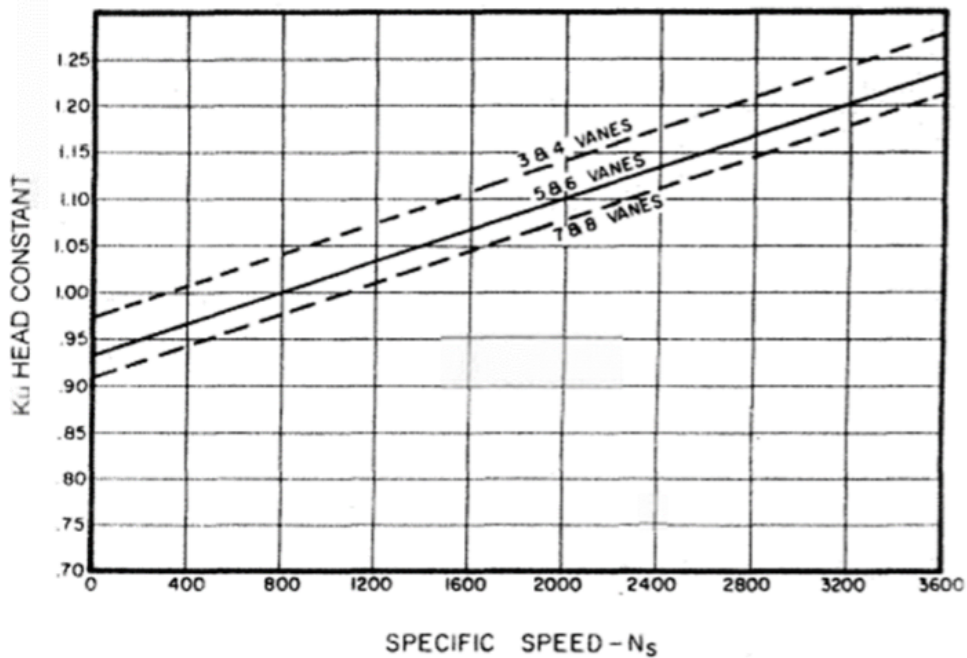
$k_u = 1,09$ y se obtiene un diametro de descarga de $D_2 = 0,5545m$.

$$D_2 = \frac{60k_u\sqrt{2gH_t}}{\pi r p m} \quad (48)$$

La segunda variable se define como constante de capacidad k_{m2} , y se implementa para calcular la altura de salida del alabe; es importante definir la cantidad de alabes lo cual se hace mediante el análisis de Lobanoff and Ross (2013). en el que se implementa una gráfica donde por medio de la constante de velocidad k_u y la velocidad especifica se determina la cantidad de alabes.

Figura 47

Constantes de cabeza



Nota. Por medio de la velocidad específica calculada y la constante de velocidad se intercepta la línea de los alabes de 5,6,8 Lobanoff and Ross (2013); para lo cual se selecciona $Z=6$ que más adelante se comparara con la definición del análisis planteado por Díez (2007).

$$k_{m2} = \frac{C_{m2}}{\sqrt{2gH_t}} \quad (49)$$

$$c_{m2} = \frac{Q}{(D\pi - z s_u) b_2} \quad (50)$$

Mediante las ecuaciones (49) y (50) se calculan los datos $k_{m2} = 0,14$ $Z = 4$ $b_2 = 0,0071m$

El siguiente paso es calcular las condiciones y geometría a la entrada del impulsor, lo cual se hace aplicando la constante de velocidad k_{m1} Zubicaray (2003). por medio de las siguientes ecuaciones.

$$c_{m1} = k_{m1} \sqrt{2gH_t} \quad (51)$$

$$1,03Q = \frac{c_{m1} \pi D_1^2}{4} \quad (52)$$

Se considera que la bomba tendrá una eficiencia volumétrica de $\eta_{vol} = 0,97$, y el valor de $k_{m1} = 0,22$ que da como resultado $c_{m1} = 1,863(m/s)$ $D_1 = 0,029(m)$ Lobanoff and Ross (2013) recomienda junto con otros autores que el ángulo de salida del alabe este en el rango de $20 < \beta_2 < 25$ y el ángulo de entrada este en un rango de $15 < \beta_1 < 50$. Se establece que el ángulo de salida $\beta_2 = 22,5$ y mediante el análisis que implementa Zubicaray (2003). se calcula el ángulo de entrada. Mediante el paralelogramo de velocidad a la salida del impulsor se determina el valor de la velocidad $w_2 = 10,17(ft/s)$.

$$w_2 = \frac{c_{m2}}{\text{sen } \beta_2} \quad (53)$$

Para que el diseño de una bomba se optimice la relación de las velocidades w_1/w_2 debe estar en los valores 1,15 a 1,25. Zubicaray (2003). Para el caso, se establece que esta relación es de 1,2.

$$w_1 = 1,2w_2 \quad (54)$$

Tabla 3*Geometría a la entrada y a la salida del impulsor*

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
ENTRADA			
Altura alabe	b_1	10	mm
Espesor alabe	S_{ue}	3	mm
Diámetro	D_1	29	mm
Ángulo de ataque	β_1	30	°
SALIDA			
Altura alabe	b_2	10	mm
Espesor alabe	S_u	3	mm
Diámetro	D_2	58	mm
Ángulo de ataque	β_2	22.5	°

$$w_1 = \frac{c_{m1}}{\text{sen } \beta_1} \quad (55)$$

Mediante las condiciones de flujo que se han calculado en la entrada del impulsor, se procede a calcular la geometría faltante. Para calcular la anchura útil del impulsor se parte de la velocidad meridiana c_{m1} y se tiene en cuenta la estrangulación de los alabes; esta depende de la cantidad y el espesor y se estima de 5 a 15 por ciento. En este análisis se deben considerar las pérdidas volumétricas Zubicaray (2003).

$$1,03Q = 0,85D_1\pi b_1 c_{m1} \quad (56)$$

De la ecuación (56) se obtiene que $b_1 = 0,001021(m)$ Se considera que el espesor de los alabes a la entrada es de 2 mm y el espesor del cuerpo del alabe será 3 mm.

Mediante el programa EES académico se calculan los valores de las velocidades a la entrada y a la salida del impulsor. Las ecuaciones se obtienen mediante el análisis de los triángulos de velocidad.

No se considera que la velocidad a la entrada es totalmente meridional lo que expresa que: $c_{u1} \neq 0$.

Tabla 4

condiciones de flujo a la entrada y a la salida del impulsor.

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
ENTRADA			
Velocidad periférica	U_1	4.96	m/s
Velocidad absoluta periférica	C_{u1}	3.191	m/s
Velocidad absoluta meridional	C_{m1}	1.863	m/s
velocidad relativa	w_1	3.718	m/s
SALIDA			
Velocidad periférica	U_2	9.232	m/s
Velocidad absoluta periférica	C_{u2}	2.676	m/s
Velocidad absoluta meridional	C_{m2}	1.186	m/s
velocidad relativa	w_2	3.1	m/s

4.7.2. Trazo del impulsor.. Para el trazo del impulsor se implementa el método llamado por Kaplan “method of error triangles” el cual se explica en detalle en Zubicaray (2003). La geometría del impulsor se lleva a formato CAD mediante el programa de diseño inventor y se muestra en la figura (48). las dimensiones se dan en unidades de mm, su posterior construcción se hace mediante impresión 3D y el material implementado es PLA.

4.7.3. Curva teórica del impulsor . Mediante la suposición experimental que plantea Zubicaray (2003). en relación a la gráfica del caudal vs la cabeza de presión de la bomba diseñada, se establece una tabla de valores que representa la curva de $QvsH$. La figura (49) se toma como fuente de comparación para los datos obtenidos en la teoría y la experimentación.

Figura 48
Trazo del impulsor.

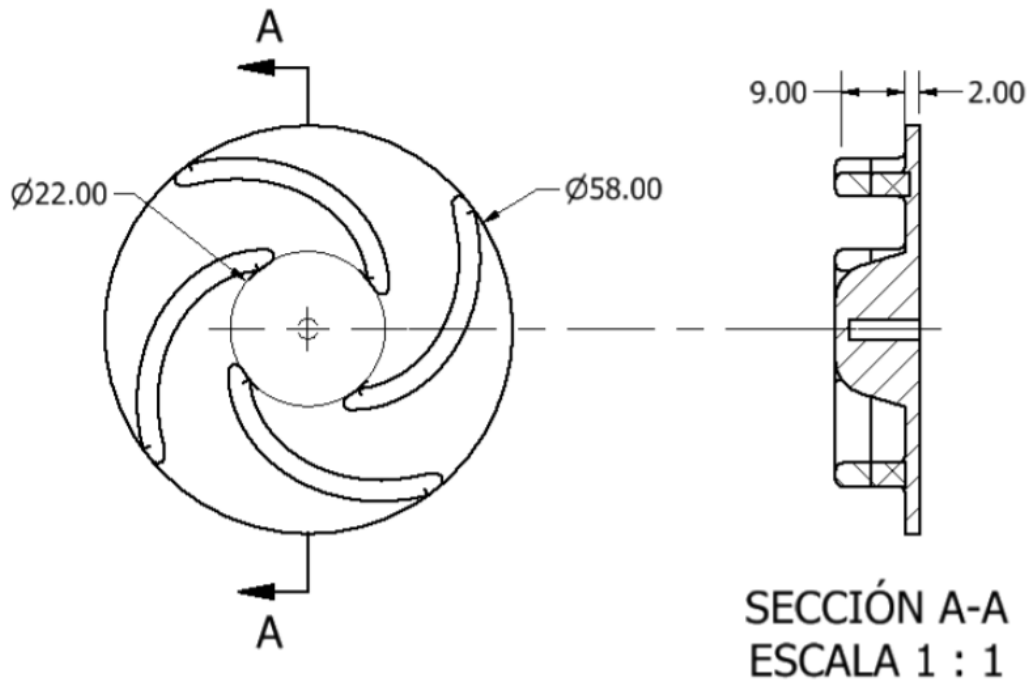


Figura 49
Curva característica teórica Q vs H

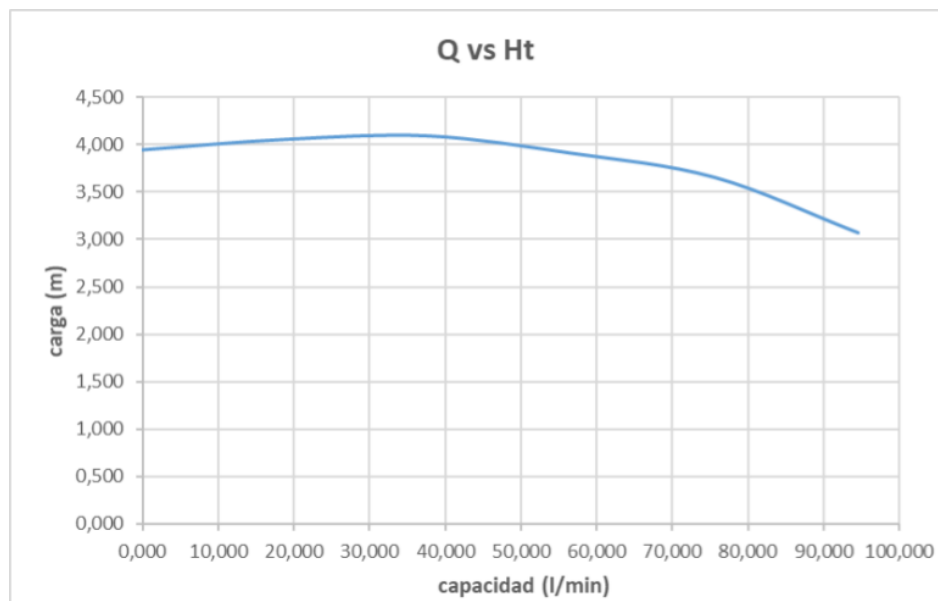


Tabla 5*Datos para la curva teórica del impulsor.*

PORCENTAJE CAPACIDAD	CAPACIDAD (lpm)	PORCENTAJE CARGA	CARGA (m)
0	0	108	3.95
25	18.925	111	4.060
50	37.850	112	4.097
75	56.775	107	3.914
100	75.7	100	3.658
125	94.625	84	3.072

Nota. Se extraen los valores de carga y capacidad de la tabla anterior, los cuales son calculados implementando el análisis de Zubicaray (2003) y graficados en la figura (48).

4.8. Caracterización de los impulsores A y B

Mediante el banco de pruebas se caracterizó el impulsor diseñado, además, se recortó el diámetro y también se caracterizó este segundo impulsor. Los primeros datos a medir fueron los del impulsor con diámetro superior obteniendo de manera separada las curvas de funcionamiento Q vs H a velocidades de 3200 y 2100 sucesivamente.

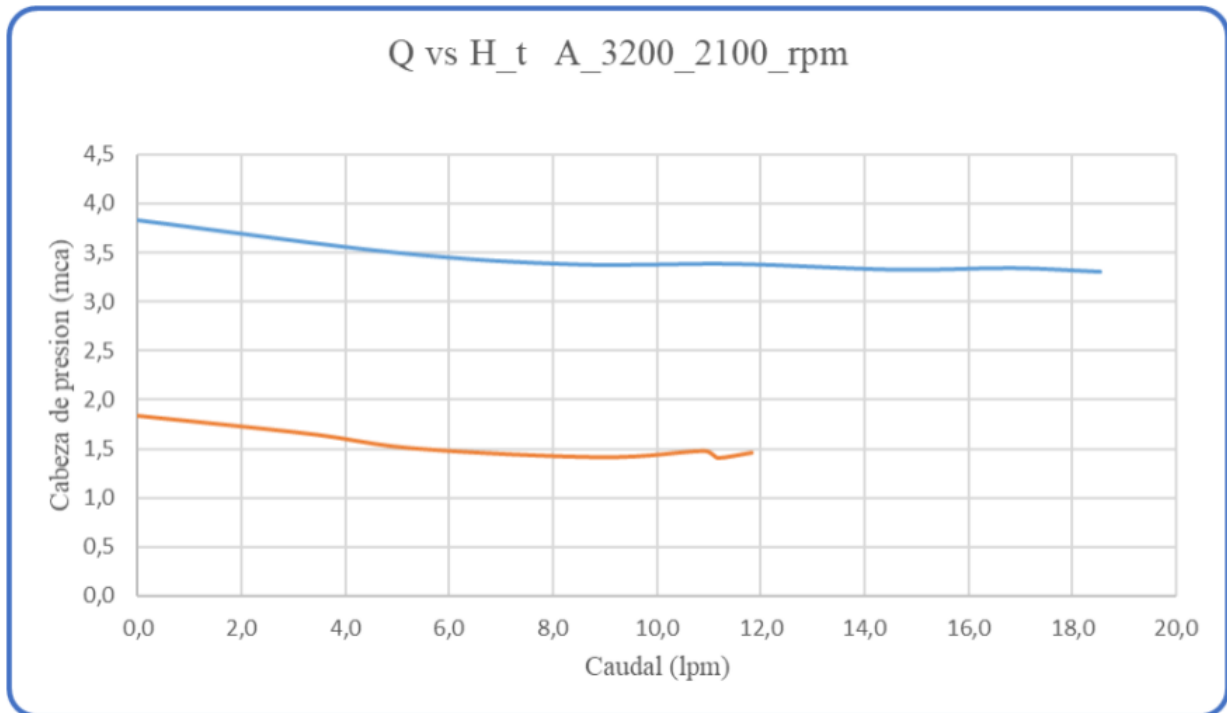
Figura 50*Impulsores A y B*

Nota. A partir del del diseño en cad del impulsor A se obtiene el impulsor B. Mediante impresión 3d, se construyen y posteriormente se ponen a prueba. La figura (50) muestra los impulsores im-

presos.

Figura 51

Curva característica $Q_v s_H$ impulsor A a velocidades 3200 rpm y 2100 rpm.

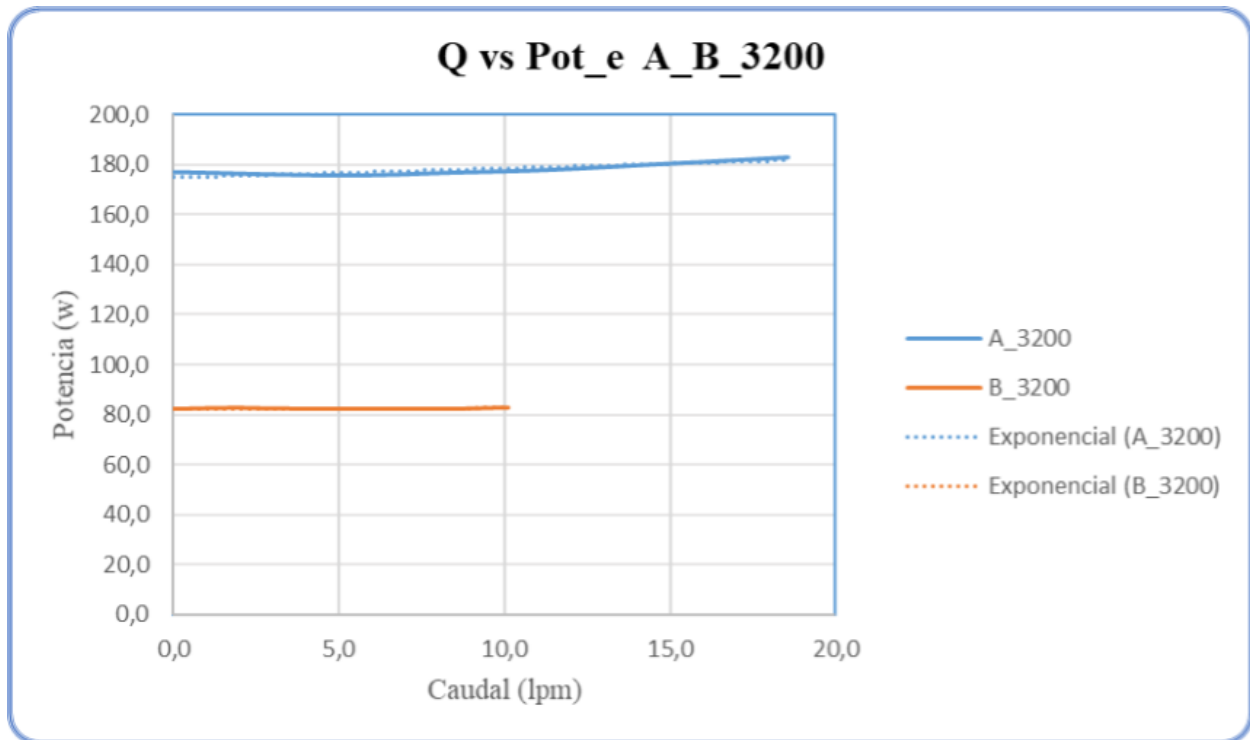


Nota. Los datos obtenidos en el banco de pruebas pasaron por un análisis estadístico en donde a través de la mediana de cada intervalo de medición se calcularon los puntos de la gráfica. En el análisis estadístico se calculó también la desviación estándar la cual se implementa para el concepto de incertidumbre de medición.

Nota. En la gráfica se representa la curva característica del impulsor a diámetros diferentes, la graficación de los datos del impulsor recortado se obtienen de la misma forma que los datos de la

Figura 52

Curva característica $Q_v s_H$ impulsores A y B.



gráfica anterior y se les aplica el mismo análisis estadístico.

5. Conclusiones

- Se construyó un sistema de bombeo que permite acceder al cambio de impulsor, como también la variación de la velocidad en el giro del motor, dando al estudiante la oportunidad de generar variedad de pruebas que le ayuden a conocer el funcionamiento de las bombas centrifugas. El funcionamiento del banco de pruebas cumple con la reglamentación establecida en la norma ISO 9906: 1999.
- Se realizó una interfaz gráfica que implementa módulos de programación en los software Matlab y Arduino que permiten la adquisición de datos en tiempo real de las señales adquiridas a través de los sensores Acs712, mpx5010, yf-5201 y encoder fotoeléctrico.
- Se hace una guía de laboratorio que describe los componentes del banco de pruebas, las prácticas a desarrollar y las personas involucradas en el uso del mismo. El objetivo de la guía es encaminar al estudiante a que genere análisis y crítica de las posibles alternativas de ahorro energético que se pueden aplicar en sistemas de bombeo.
- Se diseñó y construyó un impulsor aplicando el método de Zubicaray (2003). El impulsor se caracterizó mediante la obtención de las curvas $Q - H_t$ y $Q - P_e$ a través del banco de pruebas en donde se implementó dos diámetros y dos velocidades para tal fin.

6. Recomendaciones

- Mantener el tanque desocupado cuando no se realicen prácticas, para prevenir impactos de salud para los estudiantes o las personas que manejen el equipo. Si se implementan agentes repelentes de mosco se debe considerar el impacto de corrosión en el equipo.
- Se recomienda diseñar otras configuraciones de bomba (voluta) para observar los diversos comportamientos de estos equipos.
- Debido al desboque del motor cuando se anula la carga en el caudal se ve una pequeña variación en la velocidad de giro para lo cual se recomienda implementar un sistema de control.
- Para posibles modificaciones se recomienda calcular una red hidráulica que contenga menos pérdidas y que permita extender la medida de las curvas características de la bomba.

Referencias Bibliográficas

- Bell, C. (2014). *Beginning sensor networks with Arduino and Raspberry Pi*. Apress.
- Cengel, Y. and Cimbala, J. (2013). *EBOOK: Fluid Mechanics Fundamentals and Applications (SI units)*. McGraw Hill.
- Díez, P. F. (2007). Bombas centrífugas y volumétricas. *BOMBAS CENTRÍFUGAS Y VOLUMÉTRICAS*, 100.
- Ideal, B. (1974). Datos técnicos de hidráulica.
- Lobanoff, V. S. and Ross, R. R. (2013). *Centrifugal pumps: design and application*. Elsevier.
- Pumps, S. (2010). *Centrifugal pump handbook*. Butterworth-Heinemann.
- Quiroga, J., Oviedo, S., and García, A. (2012). Detección de cavitación en una bomba centrífuga usando emisiones acústicas. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 20(3):343–349.
- Rojas Castro, I. D. et al. (2011). Prueba de desempeño de una bomba de flujo axial para diferentes condiciones de funcionamiento.
- Stepanoff, A. J. (1957). Centrifugal and axial flow pumps. *Theory, Design, and Application*.
- Zubicaray, M. V. (2003). *Bombas: teoría, diseño y aplicaciones*. Editorial Limusa.

Apéndices

Apéndice A. Código total de la adquisición de datos en Arduino.

```

Pot_Pre_rpm_Q
//variables del sensor de caudal
volatile int NumPulsos; //variable para la cantidad de pulsos recibidos en el sensor de caudal
int PinSensor = 2; //Sensor conectado en el pin 2 sensor de caudal
float factor_conversion=7.6; //factor de conversion de los pulsos por segundo a caudal

//--Datos y variables para sensor de velocidad
volatile int contador = 0;

//Datos o variables del senso de presion diferencial
float Sensibilidad_p=0.35; //sensibilidad en V/A para nuestro sensor
float offset_p=-0.2; // Equivale a la amplitud del ruido TIENE variar

//Datos o variables del sensor de corriente
float Sensibilidad=0.133; //sensibilidad en V/A para nuestro sensor
float offset=2.45; // Equivale a la amplitud del ruido

volatile int puerta = 0;

void setup() {

  Serial.begin(9600); //velocidad de comunicacion con el monitor serial.
  attachInterrupt(1,interrupcion0,RISING); // Interrupcion para la toma de pulsos sensor de caudal.
  pinMode(PinSensor, INPUT);
  attachInterrupt(0,ContarPulsos,RISING); // Interrupcion para la toma de pulsos sensor de velocidad.
}

void loop() {
//ejecucion de la adquisicion de los datos del sensor de presion
if(puerta == 0){
  float Ipre=get_corriente(); //se llama la funcion que obtiene la señal de voltaje medido por el sensor
  float Presion_m=(Ipre-0.04*5)/(0.09*5)*1.6*9810; // calculo de la presion en kpa
  Serial.println(Presion_m,3);

  puerta = 1;
}
//ejecucion de la adquisicion de los datos del sensor de presion
if(puerta == 1){
  float Ip=get_corriente(); //se llama la funcion que obtiene la señal de la corriente pico
  float Irms=Ip*0.707; //Intensidad RMS = I pico/(2^1/2) aplicable para el motor en uso.
  float Pot=Irms*120; // P=IV watts
  //Serial.println("Potencia: ");
  Serial.println(Pot,3);
  //delay(500);
  puerta = 0;
}
}

```

```

serial.println(contador*30); // como son dos interrupciones por vuelta (contador * (40/2))
float caudal_L_m=NumPulsos/factor_conversion;
Serial.println (caudal_L_m);
contador = 0;
NumPulsos = 0;
}

float get_corriente(){
if( puerta == 0)//si se cumple la condicion se obtendra la señal del sensor de presion
{
float voltajeSensor_p;
float corriente_p=0;
long tiempo=millis();
float Imax_p=0;
float Imin_p=0;
while(millis()-tiempo<500)//realizamos mediciones durante 0.5 segundos
{
voltajeSensor_p = analogRead(A1) * (5.0 / 1023.0);//lectura del sensor
corriente_p=0.9*corriente_p+0.1*((voltajeSensor_p/Sensibilidad_p); //Ecuación para obtener la corriente
if(corriente_p>Imax_p)Imax_p=corriente_p;
if(corriente_p<Imin_p)Imin_p=corriente_p;
}
return(((Imax_p-Imin_p)/2)-offset_p);
}
else {//si no se cumple la condicion anterior se obtendra la señal de la corriente del motor
float voltajeSensor;
float corriente=0;
long tiempo=millis();
float Imax=0;
float Imin=0;

while(millis()-tiempo<500)//realizamos mediciones durante 0.5 segundos
{
voltajeSensor = analogRead(A0) * (5.0 / 1023.0);//lectura del sensor
corriente=0.9*corriente+0.1*((voltajeSensor-2.5)/Sensibilidad); //Ecuación para obtener la corriente
if(corriente>Imax)Imax=corriente;
if(corriente<Imin)Imin=corriente;
}

return(((Imax-Imin)/2)-offset);
}
}

//----Funcion contador de pulsos sensor de velocidad
void interrupcion0() // Funcion que se ejecuta durante cada interrupcion
{
contador++; // Se incrementa en uno el contador
}
//----Funcion contador de pulsos sensor de caudal
void ContarPulsos ()
{
NumPulsos++; //incrementamos la variable de pulsos
}

```

```

serial.println(contador*30); // como son dos interrupciones por vuelta (contador * (40/2))
float caudal_L_m=NumPulsos/factor_conversion;
Serial.println (caudal_L_m);
contador = 0;
NumPulsos = 0;
}

float get_corriente(){
if( puerta == 0)//si se cumple la condicion se obtendra la señal del sensor de presion
{
float voltajeSensor_p;
float corriente_p=0;
long tiempo=millis();
float Imax_p=0;
float Imin_p=0;
while(millis()-tiempo<500)//realizamos mediciones durante 0.5 segundos
{
voltajeSensor_p = analogRead(A1) * (5.0 / 1023.0);//lectura del sensor
corriente_p=0.9*corriente_p+0.1*((voltajeSensor_p/Sensibilidad_p); //Ecuación para obtener la corriente
if(corriente_p>Imax_p)Imax_p=corriente_p;
if(corriente_p<Imin_p)Imin_p=corriente_p;
}
return(((Imax_p-Imin_p)/2)-offset_p);
}
else {//si no se cumple la condicion anterior se obtendra la señal de la corriente del motor
float voltajeSensor;
float corriente=0;
long tiempo=millis();
float Imax=0;
float Imin=0;

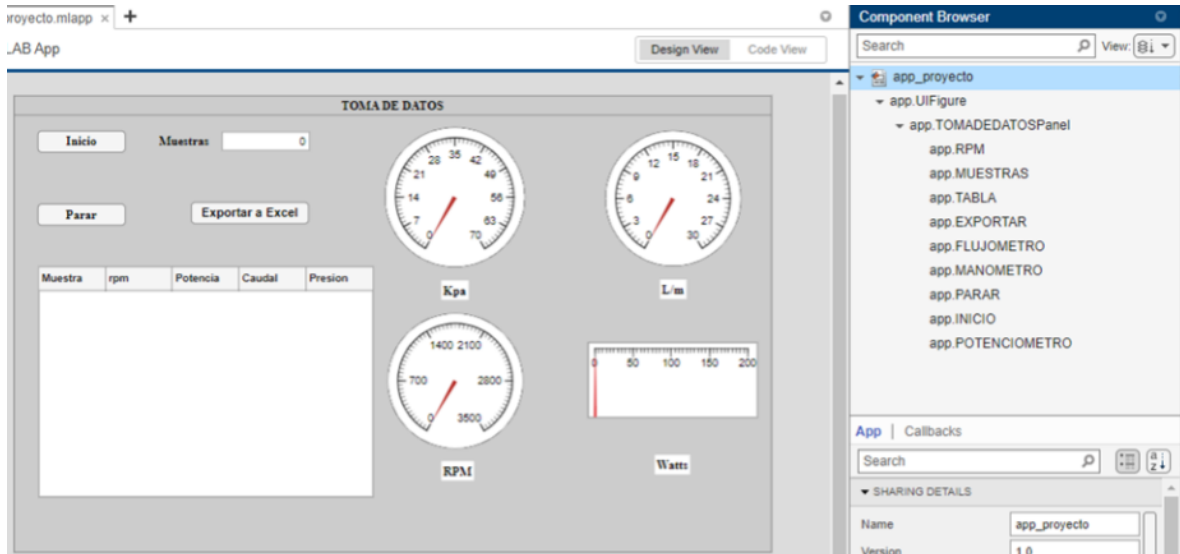
while(millis()-tiempo<500)//realizamos mediciones durante 0.5 segundos
{
voltajeSensor = analogRead(A0) * (5.0 / 1023.0);//lectura del sensor
corriente=0.9*corriente+0.1*((voltajeSensor-2.5)/Sensibilidad); //Ecuación para obtener la corriente
if(corriente>Imax)Imax=corriente;
if(corriente<Imin)Imin=corriente;
}

return(((Imax-Imin)/2)-offset);
}
}

//----Funcion contador de pulsos sensor de velocidad
void interrupcion0() // Funcion que se ejecuta durante cada interrupcion
{
contador++; // Se incrementa en uno el contador
}
//----Funcion contador de pulsos sensor de caudal
void ContarPulsos ()
{
NumPulsos++; //incrementamos la variable de pulsos
}

```

Apéndice B. Código de la interfaz gráfica en Matlab con los nombres y complementos internos de las caratulas.



```

1  |  | classdef app_proyecto < matlab.apps.AppBase
2  |  |
3  |  |     % Properties that correspond to app components
4  |  |     properties (Access = public)
5  |  |         UIFigure                matlab.ui.Figure
6  |  |         TOMADEDATOSPanel        matlab.ui.container.Panel
7  |  |         RPM                      matlab.ui.control.Gauge
8  |  |         RPMGaugeLabel           matlab.ui.control.Label
9  |  |         MUESTRAS                matlab.ui.control.NumericEditField
10 |  |         MuestrasEditFieldLabel  matlab.ui.control.Label
11 |  |         TABLA                   matlab.ui.control.Table
12 |  |         EXPORTAR                matlab.ui.control.Button
13 |  |         FLUJOMETRO             matlab.ui.control.Gauge
14 |  |         LmLabel                 matlab.ui.control.Label
15 |  |         MANOMETRO              matlab.ui.control.Gauge
16 |  |         KpaLabel                matlab.ui.control.Label
17 |  |         PARAR                   matlab.ui.control.Button
18 |  |         INICIO                  matlab.ui.control.Button
19 |  |         POTENCIOMETRO          matlab.ui.control.LinearGauge
20 |  |         WattsLabel              matlab.ui.control.Label
21 |  |     end
22 |  |
23 |  |
24 |  |     properties (Access = private)
25 |  |         s % Description
26 |  |     end
27 |  |
28 |  |
29 |  |     % Callbacks that handle component events
30 |  |     methods (Access = private)
31 |  |
32 |  |         % Code that executes after component creation
33 |  |         function startupFcn(app)
34 |  |
35 |  |             app.s=serialport("COM3",9600,"Timeout",5)
36 |  |
37 |  |         end
38 |  |
39 |  |         % Button pushed function: INICIO
40 |  |         function INICIOPushed(app, event)
41 |  |             close all
42 |  |             clc
43 |  |             global Parar Datos rpm const caudal Potencia Presion
44 |  |             Parar=0;

```

```
45     muestras=app.MUESTRAS.Value
46     contador=1;
47     while contador<=muestras
48         if Parar == 1;
49             break;
50         else
51             valorADC = fscanf(app.s,'%0.5f');
52             valorADC2 = fscanf(app.s,'%0.5f');
53             valorADC3 = fscanf(app.s,'%0.5f');
54             valorADC4 = fscanf(app.s,'%0.5f');
55             const(contador) = 5;
56
57             Presion(contador)=valorADC(1);
58             app.MANOMETRO.Value = Presion(contador)/1000;
59
60             Potencia(contador)=valorADC2(1);
61             app.POTENCIOMETRO.Value = Potencia(contador);
62
63             rpm(contador)=valorADC3(1);
64             app.RPM.Value = rpm(contador);
65
66             caudal(contador)=valorADC4(1);
67             app.FLUJOMETRO.Value = caudal(contador);
68
69             tiempo(contador)=contador;
70             Datos(contador,1) = tiempo(contador);
71             Datos(contador,2) = rpm(contador);
72             Datos(contador,3) = Potencia(contador);
73             Datos(contador,4) = caudal(contador);
74             Datos(contador,5) = Presion(contador);
75
76             app.TABLA.Data = Datos;
77             contador=contador+1;
78             Datos;
79
80
81         end
82     end
83
84 end
85
86 % Button pushed function: PARAR
87 function PARARPushed(app, event)
88     global Parar
89     Parar = 1;
90 end
91
92 % Button pushed function: EXPORTAR
```

```

140 app.INICIO.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @INICIOPushed, true);
141 app.INICIO.FontName = 'Times New Roman';
142 app.INICIO.FontSize = 14;
143 app.INICIO.FontWeight = 'bold';
144 app.INICIO.Position = [27 454 100 25];
145 app.INICIO.Text = 'Inicio';
146
147 % Create PARAR
148 app.PARAR = uibutton(app.TOPADEDATOSPanel, 'push');
149 app.PARAR.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @PARARPushed, true);
150 app.PARAR.FontName = 'Times New Roman';
151 app.PARAR.FontSize = 14;
152 app.PARAR.FontWeight = 'bold';
153 app.PARAR.Position = [27 371 100 25];
154 app.PARAR.Text = 'Parar';
155
156 % Create KpaLabel
157 app.KpaLabel = uilabel(app.TOPADEDATOSPanel);
158 app.KpaLabel.BackgroundColor = [1 1 1];
159 app.KpaLabel.HorizontalAlignment = 'center';
160 app.KpaLabel.FontName = 'Times New Roman';
161 app.KpaLabel.FontSize = 14;
162 app.KpaLabel.FontWeight = 'bold';
163 app.KpaLabel.Position = [485 287 31 22];
164 app.KpaLabel.Text = 'Kpa';
165
166 % Create MANOMETRO
167 app.MANOMETRO = uigaUGE(app.TOPADEDATOSPanel, 'circular');
168 app.MANOMETRO.Limits = [0 70];
169 app.MANOMETRO.Position = [421 324 150 150];
170
171 % Create LmLabel
172 app.LmLabel = uilabel(app.TOPADEDATOSPanel);
173 app.LmLabel.BackgroundColor = [1 1 1];
174 app.LmLabel.HorizontalAlignment = 'center';
175 app.LmLabel.FontName = 'Times New Roman';
176 app.LmLabel.FontSize = 14;
177 app.LmLabel.FontWeight = 'bold';
178 app.LmLabel.Position = [733 288 30 22];
179 app.LmLabel.Text = 'L/m';
180
181 % Create FLUJOMETRO
182 app.FLUJOMETRO = uigaUGE(app.TOPADEDATOSPanel, 'circular');
183 app.FLUJOMETRO.Limits = [0 30];
184 app.FLUJOMETRO.Position = [671 325 154 154];
185
186 % Create EXPORTAR
187 app.EXPORTAR = uibutton(app.TOPADEDATOSPanel, 'push');
188 app.EXPORTAR.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @EXPORTAR
189 app.EXPORTAR.FontSize = 14;
190 app.EXPORTAR.FontWeight = 'bold';
191 app.EXPORTAR.Position = [201 373 134 25];
192 app.EXPORTAR.Text = 'Exportar a Excel';
193
194 % Create TABLA
195 app.TABLA = uitable(app.TOPADEDATOSPanel);

```

```

196     app.TABLA.ColumnName = {'Muestra'; 'rpm'; 'Potencia'; 'Caudal'; 'Presion'};
197     app.TABLA.RowName = {};
198     app.TABLA.SelectionType = 'column';
199     app.TABLA.Interruptible = 'off';
200     app.TABLA.FontName = 'Times New Roman';
201     app.TABLA.FontSize = 14;
202     app.TABLA.Position = [28 63 380 262];
203
204     % Create MuestrasEditFieldLabel
205     app.MuestrasEditFieldLabel = uilabel(app.TOMADEDATOSPanel);
206     app.MuestrasEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'center';
207     app.MuestrasEditFieldLabel.FontName = 'Times New Roman';
208     app.MuestrasEditFieldLabel.FontSize = 14;
209     app.MuestrasEditFieldLabel.FontWeight = 'bold';
210     app.MuestrasEditFieldLabel.Position = [163 456 61 22];
211     app.MuestrasEditFieldLabel.Text = 'Muestras';
212
213     % Create MUESTRAS
214     app.MUESTRAS = uieditfield(app.TOMADEDATOSPanel, 'numeric');
215     app.MUESTRAS.Position = [236 456 100 22];
216
217     % Create RPMGaugeLabel
218     app.RPMGaugeLabel = uilabel(app.TOMADEDATOSPanel);
219     app.RPMGaugeLabel.BackgroundColor = [1 1 1];
220     app.RPMGaugeLabel.HorizontalAlignment = 'center';
221     app.RPMGaugeLabel.FontName = 'Times New Roman';
222     app.RPMGaugeLabel.FontSize = 14;
223     app.RPMGaugeLabel.FontWeight = 'bold';
224     app.RPMGaugeLabel.Position = [485 82 37 22];
225     app.RPMGaugeLabel.Text = 'RPM';
226
227     % Create RPM
228     app.RPM = uigauge(app.TOMADEDATOSPanel, 'circular');
229     app.RPM.Limits = [0 3500];
230     app.RPM.Position = [424 118 154 154];
231
232     % Show the figure after all components are created
233     app.UIFigure.Visible = 'on';
234     end
235 end
236
237 % App creation and deletion
238 methods (Access = public)
239
240     % Construct app
241     function app = app_proyecto
242
243         % Create UIFigure and components
244         createComponents(app)
245
246         % Register the app with App Designer
247         registerApp(app, app.UIFigure)

```

```
248
249           % Execute the startup function
250           runStartupFcn(app, @startupFcn)
251
252           if nargin == 0
253               clear app
254           end
255       end
256
257       % Code that executes before app deletion
258       function delete(app)
259
260           % Delete UIFigure when app is deleted
261           delete(app.UIFigure)
262       end
263   end
264 end
```