



**SIMULADOR PARA ARREGLOS
DE BOMBAS DE PRESIÓN
DINÁMICA**

Autores: Pérez M. Luis E.
C.I.: 19.760.108
Mejia R. Efrain D.
C.I.: 20.896.466

Urb. Yuma II, Calle N° 3, Municipio San Diego
Teléfono: (0241) 8714240 (Master) - Fax: (0241) 871239



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE MECÁNICA**

SIMULADOR PARA ARREGLOS DE BOMBAS DE PRESIÓN DINÁMICA

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

Autores: Pérez M. Luis E.

C.I.: 19.760.108

Mejía R. Efrain D

C.I.: 20.896.466

Tutor: Ing. Gruber Caraballo

San Diego, Noviembre de 2015



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE MECÁNICA

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Gruber Caraballo portador de la cédula de identidad N° 12.014.108, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por los ciudadanos Luis Pérez y Efrain Mejia, portadores de la cédulas de identidad N° 19.760.108 y 20.896.466, (respectivamente), titulado **“SIMULADOR PARA ARREGLOS DE BOMBAS DE PRESIÓN DINÁMICA”** presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 6 días del mes de noviembre del año dos mil quince.

Ing. Gruber Caraballo.
C.I.: 12.014.108

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer a Dios por guiar mi camino y darme la fortaleza para seguir adelante y luchar para alcanzar mis metas. Por colocar en mi camino a todas las personas que han sido parte de este éxito.

A mi familia por ser el pilar más importante de mi vida, en especial a mi madre Haydee, quien ha sido el mejor ejemplo que puede pedir un hijo, con su amor y dedicación gran parte de este logro ha sido alcanzado es gracias a ella, tan solo unas líneas no serían suficientes para agradecer todo el esfuerzo con el que ha orientado mis pasos y por ser mi gran apoyo incondicional, a mi abuela María y abuelo Jorge por motivarme y darme un ejemplo a seguir, a mi tía María por ser como mi segunda madre y por llenarme de entusiasmo y palabras de cariño y comprensión.

A mi compañero Efraín que gracias a nuestro esfuerzo combinado se pudo realizar este gran proyecto con éxito.

Leonardo mi gran amigo prácticamente mi hermano, Carlos mi primo el cual no considero mi primo sino mi hermano, quienes han recorrido este largo camino conmigo, por su valiosa ayuda, he contado con ustedes en todo momento, lograron hacer más ligera la carga y forman parte de lo que soy. Por eso quiero compartir la alegría de este logro, porque sin ustedes no habría sido posible.

A todos mis amigos que han estado a lo largo de mi carrera y ahora son parte importante de mi vida, quienes siempre han estado cuando los he necesitado, gracias por hacerme reír y acompañarme durante los momentos difíciles, porque de todos he aprendido cosas maravillosas y han marcado mi vida trascendentalmente, no sería posible nombrarlos a todos pero los tengo presentes en mi mente y corazón

A mi tutor Gruber quien se ha convertido en mi amigo, gracias por su enorme colaboración y orientación para canalizar las ideas, también por toda su paciencia, disponibilidad y dedicación para que este trabajo se realizara con el mayor de los éxitos.

A mi amigo Ángel, quien con sus valiosos conocimientos en programación apporto de gran manera en este proyecto.

DEDICATORIA

Este logro va dedicado especialmente a mi madre Haydee Morillo, mi gran apoyo, quien me da su amor incondicional, quien fue mi gran motor, para seguir adelante y hoy poder estar más cerca de ser ingeniero.

A mi hija Valeria Valentina Pérez, mi princesa la cual ha llenado de alegría mis días, y se ha convertido en una motivación para ser un gran ingeniero y superarme cada día más.

A mis abuelos por sus grandes consejos y sabiduría los han significado mucho en mi camino.

Luis Pérez

AGRADECIMIENTOS

Aunque este es un gran logro para mí, yo solo nunca lo hubiera podido conseguir, por eso que mi principal agradecimiento es para mis padres, Zulma Ramírez y Efrain Mejía, las dos personas con las que siempre he contado y les agradeceré todo lo que haga en esta vida, a mi hermana Mariana, con quien estoy seguro siempre poder contar y a toda familia, a mis abuelas Inés y Rosa, a mi abuelo Efrain, a mis tíos y demás familiares, unos que todavía están aquí para verme convertido en ingeniero y otros que aunque en ausencia física, sus recuerdos me ayudaron y motivaron para conseguir esta meta y seguir adelante, en general a toda mi familia, que está a punto de recibir un nuevo integrante, y el que ahora será la persona más importante para mí, Elí David Mejía Brijaldo, quien mientras escribo esto aún no ha salido a enfrentarse al mundo pero que en pocos días verá la luz del día y será la primera persona que voltee a ver cuando termine mi defensa de tesis. A la persona que más me ha apoyado en estos últimos días, mi novia Eliana Brijaldo, que en pocos días se convertirá en la madre de mi hijo Elí David y de quien he aprendido mucho, me ha vuelto mejor persona en todos los sentidos y a la que agradeceré por estar donde estoy cada día,

A Roger Cutrone, más que un amigo es un hermano para mí y en las buenas y malas siempre dado su ayuda. A las amistades que hice durante este largo y que en poco tiempo estoy seguro de que los veré convertidos en Ingenieros también, entre ellas un agradecimiento especial a mi compañero Luis Pérez, gracias a él y a su trabajo y dedicación están leyendo el fruto de nuestro esfuerzo.

A nuestro tutor y profesor, Gruber Caraballo, gracias por el tiempo y dedicación invertido en este proyecto y en todas las horas de clase que además de formar ingenieros forman personas. Y a Ángel, que gracias a este proyecto lo pude conocer y que sin duda sus conocimientos fueron pilar fundamental en llevar a cabo todo esto.

Por ultimo gracias a todas aquellas personas que olvide y que de alguna forma pusieron un granito de arena para que pudiera haber logrado esto

Efrain D. Mejía R.

ÍNDICE

| CONTENIDO | Pp |
|---|------------|
| LISTA DE TABLAS..... | xii |
| LISTA DE FIGURAS..... | xii |
| RESUMEN..... | xiv |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| | |
| CAPÍTULO | |
| I EL PROBLEMA | |
| 1.1 Planteamiento del Problema..... | 2 |
| 1.2 Formulación del Problema..... | 3 |
| 1.3 Objetivos..... | 4 |
| 1.3.1 Objetivo General..... | 4 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos..... | 4 |
| 1.4 Justificación..... | 4 |
| 1.5 Limitaciones..... | 5 |
| 1.6 Alcance..... | 5 |
| | |
| II MARCO TEÓRICO | |
| 2.1 Antecedentes..... | 6 |
| 2.2 Bases Teóricas..... | 7 |
| 2.2.1 Bombas de presión dinámica..... | 7 |
| 2.2.1.1 Bombas centrífugas..... | 8 |
| 2.2.1.2 Análisis del movimiento del fluido a través de una bomba centrífuga..... | 9 |
| 2.2.1.3 Ecuación fundamental de las turbomáquinas (ecuación de Euler)..... | 11 |
| 2.2.1.4 Cavitación..... | 13 |
| 2.2.2 Principio de funcionamiento de las bombas de presión dinámica..... | 16 |
| 2.2.3 Curvas características..... | 16 |
| 2.2.4 Pérdida, potencias y rendimientos..... | 19 |
| 2.2.4.1 Pérdidas..... | 19 |
| 2.2.4.2 Potencias y rendimientos..... | 21 |
| 2.2.5 Arreglos de bombas..... | 23 |
| 2.2.5.1 Arreglos de bombas en paralelo..... | 23 |
| 2.2.5.2 Arreglo de bombas en serie..... | 25 |
| 2.2.5.3 Campo de aplicación..... | 26 |
| 2.2.6 Disponibilidad y pérdidas en tuberías..... | 28 |
| 2.2.6.1 Principio de Bernoulli..... | 28 |
| 2.2.6.2 Pérdidas por fricción en tuberías y accesorios..... | 29 |

| | |
|--|----|
| 2.2.7 Bancos de ensayos serie-paralelo para bombas centrifugas..... | 30 |
| 2.2.7.1 Conceptualización y función de los bancos de prueba..... | 30 |
| 2.2.7.2 Bancos de pruebas existentes en el la actualidad..... | 31 |
| 2.2.7.3 Componentes de un banco de prueba..... | 35 |
| 2.2.8 Tipos de lenguajes de programación..... | 35 |
| 2.2.8.1 Lenguajes de programación declarativos..... | 35 |
| 2.2.8.2 Lenguajes de programación imperativos..... | 35 |
| 2.2.8.3 Lenguajes de programación orientados a objetos..... | 36 |
| 2.2.9 Algoritmos de cálculo..... | 37 |
| 2.3 Definición de Términos Básicos..... | 38 |
| | |
| III MARCO METODOLÓGICO | |
| 3.1 Enfoque de la Investigación..... | 41 |
| 3.2 Tipo de Investigación..... | 41 |
| 3.3 Nivel de la investigación..... | 42 |
| 3.4 Diseño de la Investigación..... | 42 |
| 3.5 Fases de la Investigación..... | 42 |
| | |
| IV RESULTADOS | |
| 4.1 Estudiar los bancos de ensayos para arreglos serie-paralelo de bombas centrífugas..... | 45 |
| 4.1.1 Información recopilada para la elaboración de un banco de ensayo..... | 46 |
| 4.1.2 Descripción de Bancos de ensayo en la actualidad..... | 47 |
| 4.2 Diseñar un sistema práctico para su uso como banco didáctico computacional..... | 47 |
| 4.2.1 Parámetros del sistema..... | 47 |
| 4.2.2 Parámetros de funcionamiento del sistema..... | 49 |
| 4.2.3 Análisis Teórico del sistema diseñado..... | 50 |
| 4.2.4 Disponibilidad en la succión de las bombas..... | 50 |
| 4.2.5 Disponibilidad en la descarga de las bombas..... | 52 |
| 4.2.6 Disponibilidad del sistema..... | 54 |
| 4.3 Elaborar el algoritmo para el cálculo de las variables y condiciones de operación del sistema seleccionado..... | 55 |
| 4.4 Desarrollar el programa computacional y la interfaz de usuario..... | 60 |
| 4.4.1 Menú Principal..... | 60 |
| 4.4.2. Ventana Principal..... | 61 |
| 4.4.3 Sección de configuración sistema..... | 62 |
| 4.4.4 Sección de Graficas..... | 63 |

| | |
|---|-----|
| 4.4.5 Sección de visualización del sistema y sistema..... | 63 |
| 4.4.6 Sección de resultados..... | 64 |
| 4.4.7 Validación de software. | 67 |
| 4.4.7.1. Comparación de Resultados..... | 67 |
| 4.4.7.2. Encuesta de experiencias. | 68 |
| 4.5 Hacer una guía práctica y un manual de uso del simulador... | 69 |
| 4.5.1 Guía práctica..... | 69 |
| 4.5.2 Manual de usuario..... | 74 |
| | |
| V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | |
| 5.1 Conclusiones. | 82 |
| 5.2 Recomendaciones..... | 83 |
| | |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | |
| Impresas..... | 84 |
| | |
| ANEXOS | |
| Anexo A: Bombas utilizadas en SIMULEB..... | 86 |
| Anexo B: Simbología de diagramas de flujo..... | 90 |
| Anexo C: Encuesta de validación..... | 92 |
| Anexo D: Atributos que debe tener un software según la norma ISO 9126..... | 94 |
| | |
| APÉNDICES | |
| Apéndice A: Coeficiente de resistencia (K) de válvulas y accesorios..... | 97 |
| Apéndice B: Factor de rugosidad de la tubería..... | 100 |
| Apéndice C: Coeficiente de HAZEN-WILLIANS..... | 102 |

LISTA DE TABLAS

CONTENIDO

| TABLAS | | p.p. |
|--------|---|------|
| 1 | Tabla 1. Caudal máximo para cada diámetro de tubería en (m^3/h) | 51 |
| 2 | Tabla 2: Datos de experiencia para comprobación..... | 67 |
| 3 | Tabla 3: comparación de resultados..... | 67 |

LISTA DE FIGURAS

CONTENIDO

| FIGURA | | p.p. |
|--------|---|------|
| 1 | Elementos de una bomba centrífuga..... | 9 |
| 2 | Cortes meridional y transversal del rodete..... | 10 |
| 3 | Triángulos de velocidades en una bomba centrífuga..... | 11 |
| 4 | Altura mínima con la que debe trabajar una bomba..... | 15 |
| 5 | Funcionamiento de una bomba centrífuga..... | 17 |
| 6 | Curvas características de una bomba centrífuga típica..... | 18 |
| 7 | Arreglo de bombas idénticas en paralelo..... | 24 |
| 8 | Arreglo de bombas con características distintas y un punto común..... | 24 |
| 9 | Arreglo de bombas con características distintas sin puntos comunes..... | 25 |
| 10 | Arreglo de bombas en serie..... | 27 |

| | | |
|----|--|----|
| 11 | Banco de prueba de la universidad de Cantabria..... | 31 |
| 12 | Banco de prueba serie paralelo EDIBON PBSPB..... | 32 |
| 13 | Banco de prueba serie paralelo EDIBON PBSPC..... | 33 |
| 14 | Banco de prueba serie paralelo por ATSIngenieria..... | 34 |
| 15 | Plano del banco de pruebas a simular..... | 48 |
| 16 | Planos del banco trabajando con una bomba individual (a), con bombas en serie (b) y con bombas en paralelo (c) | 48 |
| 17 | Algoritmo de cálculo..... | 56 |
| 18 | Menú principal de SIMULEB | 61 |
| 19 | Ventana principal de SIMULEB (mitad derecha)..... | 64 |
| 20 | Ventana principal de SIMULEB (mitad izquierda)..... | 63 |
| 21 | Arreglo del sistema..... | 66 |
| 22 | Selección de bombas..... | 66 |
| 23 | Grafica de resultados de encuesta. | 68 |



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE MECÁNICA**

SIMULADOR PARA ARREGLOS DE BOMBAS DE PRESION DINAMICA

Autores: Efraín Mejía, Luis Pérez

Tutor: Ing. Gruber Caraballo

Fecha: Noviembre, 2015

RESUMEN

El Trabajo de grado de grado presentado por los autores a beneficio de la prestigiosa Universidad José Antonio Páez tiene como objetivo general, realizar el diseño de un software que permita simular un banco de prueba de bombas centrífugas en sus arreglos de serie-paralelo lo más parecido a los bancos reales en la actualidad, con la finalidad de facilitar el aprendizaje de los alumnos de la cátedra de turbomáquinas, logrando analizar y demostrar detalladamente el comportamiento, con la mayor exactitud de las bombas en los distintos casos que se puedan presentar, cabe destacar que el diseño del banco computarizado será realizado con el mayor grado didáctico, para así lograr que los usuarios se familiaricen fácilmente con el software. La metodología a la cual responde este texto es la de una investigación documental y experimental, y de nivel descriptivo, en este orden de ideas, la investigación se basa en investigar el comportamiento de bancos de pruebas reales, conociendo su funcionamiento se pueden obtener los algoritmos, los cuales serán codificados través del lenguaje de programación Java. Para cumplir con los objetivos propuestos de una manera ordenada el proyecto se estructura en (5) fases específicas las cuales son: Estudiar los bancos de ensayos para arreglos serie-paralelo de bombas centrífugas, diseñar un sistema práctico para su uso como banco didáctico computacional, elaborar el algoritmo para el cálculo de las variables y condiciones de operación del sistema seleccionado, desarrollar el programa computacional y la interface de usuario, y por último, Hacer una guía práctica y un manual de uso del simulador.

Descriptores: Software, Simulador, Bombas de presión dinámica.

INTRODUCCIÓN

En la formación del Ingeniero Mecánico, además de las matemáticas y la física, las cuales son instrumentos imprescindibles en su educación, se hace presente la turbomáquinas. Esta catedra estudia el funcionamiento de las máquinas que son conocidas con el mismo nombre de la catedra, como lo son las bombas de presión dinámica.

Las bombas centrífugas son máquinas en las que se basó el proyecto, estas bombas son las más utilizadas en el ámbito industrial, ya que se caracterizan por su simplicidad en su diseño, una alta eficiencia, un amplio rango de capacidad y de un mantenimiento relativamente sencillo. Dependiendo la exigencia que se requiere en el campo, estas puede usarse en arreglos en serie cuando se necesita que tenga una mayor disponibilidad, por ejemplos transportar agua a grandes distancias, su otro tipo de arreglo es en paralelo, este permite que se mantenga la misma disponibilidad pero aumenta el caudal, por ejemplo cuando se quiere llenar un tanque de grandes dimensiones en un corto periodo.

En la actualidad existen bancos de pruebas para las bombas centrífugas, los cuales permiten conocer el rendimiento de estas máquinas, y considerando que la actualidad la tecnología está muy avanzada, es importante reconocer que las computadoras más que un instrumento de trabajo han pasado a ser un medio de aprendizaje y entretenimiento, entonces no es extraño que su uso cada día se aplique también para simulaciones de diferentes fenómenos y procesos.

Para la Universidad José Antonio Páez es imprescindible la excelente formación de sus estudiantes. Lo que se pretende lograr con este proyecto es que el alumnado de la escuela de ingeniería mecánica pueda estudiar los diferentes procesos y exigencias, que se pueden presentar en las bombas centrífugas, a través de un simulador didáctico, es decir, lograr un fácil entendimiento con un banco computarizado.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema.

El manejo de fluidos es una actividad, la cual, los seres humanos realizan o se ven beneficiados de esta en su día a día para satisfacer sus necesidades y mejorar su calidad de vida, bien sea a pequeña escala como lo es el uso doméstico y personal hasta manejar grandes cantidades como es en empresas, en el abastecimiento de ciudades y el transporte de algún fluido a lo largo de grandes distancias. Uno de los elementos básicos para llevar a cabo el manejo de fluidos son las turbomáquinas generadoras, que pueden ser ventiladores o bombas de presión dinámica. Las bombas de presión dinámica son las que se utilizan cuando el fluido que se desea controlar es líquido.

La aplicación de una bomba centrífuga es de suma importancia en la vida del ser humano, ya que estas permiten trasladar fluidos de distintas viscosidades a través de largas distancias, el uso puede ir desde el traslado de agua en represas a distintas zonas en una ciudad, también puede aplicarse en el campo industrial como el conducto de salsa de tomate, o en el caso más simple la bomba que se usa en los hogares para satisfacer todos los puntos de agua de la casa.

Sin embargo dependerá de ciertas variables como lo son la disponibilidad, caudal, etc. para la selección de dicha máquina en virtud de que esta trabaje bajo condiciones adecuadas para lograr un máximo rendimiento, garantizar la vida útil de la bomba y que logre su objetivo de la manera deseada.

Para que esto suceda se debe tener en cuenta algunos factores como son la velocidad a la que va a girar el eje de la bomba, la potencia que requiere, las dimensiones que deberá tener, el fluido con el que va a trabajar, realizar una correcta instalación, verificar que no exista cavitación y muchas otras variables. El proceso matemático para calcular y verificar los factores antes mencionados es complejo pero

necesario y requiere dedicación para evitar errores que comprometan el funcionamiento de la máquina.

El tiempo invertido en estos cálculos siempre representara un problema ya en algunos casos el método a utilizar es el de prueba y error. Hablando desde el punto de vista académico y el tiempo que posee el estudiante y las instituciones esto se puede traducir en que no se cubra por completo o de la mejor manera el material de las asignaturas relacionadas con este tema como lo son mecánica de fluidos y turbomáquinas.

Actualmente la prestigiosa Universidad José Antonio Páez, en su escuela de Ingeniería Mecánica ubicado en, Urb. Yuma II, San Diego, posee un laboratorio de fluidos que no cuenta con muchas herramientas para alcanza a cubrir los elementos importantes de las materias en este ramo, lo cual le resta didáctica y práctica a las asignaturas y conocer el comportamiento de las bombas centrífugas es un poco complejo y de suma importancia para preparar un Ingeniero Mecánico de calidad.

Una posible solución sería diseñar un software en el que se pueda simular el comportamiento de una bomba de presión dinámica en sus diferentes arreglos y poder mostrar al estudiante de forma rápida y precisa como va a trabajar la máquina bajo diferentes circunstancias, lo que permitirá disminuir el tiempo que toma demostrar como funcionara la bomba en condiciones específicas y por lo tanto aumentar la cantidad de ejemplos que se podrán mostrar al estudiante de bombas de presión dinámica en distintas condiciones de operación.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo se puede ayudar a los estudiantes de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Josu Antonio Páez a comprender el comportamiento de una bomba centrifuga?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General.

Diseñar un simulador computacional para evaluar las condiciones de operación en arreglos de bombas de presión dinámica.

1.3.2 Objetivos Específicos.

1. Estudiar los bancos de ensayos para arreglos serie-paralelo de bombas centrífugas.
2. Diseñar un sistema práctico para su uso como banco didáctico computacional.
3. Elaborar el algoritmo para el cálculo de las variables y condiciones de operación del sistema seleccionado.
4. Desarrollar el programa computacional y la interface de usuario.
5. Hacer una guía práctica y un manual de uso del simulador.

1.4 Justificación.

Este proyecto tiene como objetivo realizar una simulación del funcionamiento de una bomba centrífuga en diferentes condiciones de operación y en sus diferentes arreglos lo que permitirá acelerar en gran medida el proceso de cálculo de variables y las condiciones de operación de la máquina. Esta herramienta le permitirá al estudiante facilitar y reducir el trabajo, así como también ayudara en el proceso de aprendizaje, conocimiento y entendimiento del funcionamiento de una bomba de presión dinámica, material que será de suma importancia para el desarrollo de un Ingeniero Mecánico en su campo laboral.

Un simulador de este tipo no solo beneficiaría al estudiante sino también a la Universidad ya que reemplaza la necesidad de elaborar un banco de prueba que ameritaría de una gran inversión de tiempo, económica y de personal por parte de la institución. Además de que puede fomentar y sustentar otras investigaciones bien sea en el mejoramiento de esta o en el desarrollo de otras herramientas computacionales que permitan optimizar los parámetros de trabajo

1.5 Limitaciones.

Conocimientos necesarios para realizar simulaciones de alto nivel.

El simulador de banco de prueba será programada en lenguaje de Java, solo para bombas centrífugas y sus arreglos.

1.6 Alcance

Con la propuesta de este diseño se pretende beneficiar a las materias de mecánica de fluidos I, mecánica de fluidos II y turbomáquinas, logrando así que los estudiantes puedan tener un sistema computarizado que los oriente a entender el comportamiento de las bombas centrífugas. Dentro del marco táctico del desarrollo del proyecto es primordial establecer demarcaciones que garanticen el cumplimiento de los objetivos del mismo, así como también definir el enfoque de los esfuerzos realizados en miras de alcanzar las metas propuestas a lo largo de la investigación, por ello cabe destacar que para el presente los estudios se harán solo en la simulación del tipo de bombas centrífugas y en arreglo serie-paralelo. El plan a diseñar consiste en estudiar los bancos de ensayo, elaborar el algoritmo para el cálculo de las variables y condiciones de operación en el sistema selección, con lo cual se va a diseñar un sistema practico para su uso como banco didáctico computacional, y por último hacer una guía práctica y un manual de uso del simulador. Además de esto, el proyecto estará basado en la metodología de investigación correspondiente y servirá como punto de apoyo para cualquier tesis de grado, finalmente, la meta principal es el desarrollo completo de la tesis de grado, requisito indispensable para lograr el título de Ingeniero Mecánico.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se requiere de la recopilación en función del tema tratado de otras investigaciones, permitiendo de esta manera obtener conocimientos al respecto y determinar la relación o pertinencia que dichos trabajos guardan con la investigación desarrollada. El objetivo principal de los antecedentes de una investigación es dar a conocer que el problema seleccionado posee un carácter científico.

A continuación se presentan autores que efectuaron un análisis o proyectos relacionados.

Hernán, A y Jesús, S (2010) estudiantes de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia. Realizaron un trabajo de grado titulado **“Diseño, construcción y puesta a prueba de un banco de bombas centrífugas en serie, paralelo y mixto”** donde el banco permite tomar datos para diferentes prácticas, también se verifico el punto de funcionamiento de las bombas y se comprobó que las bombas trabajan por fuera de la curva del sistema (full-open). Se logró comprobar la teoría de las bombas trabajando en serie y paralelo. Comprobando de manera práctica lo que antes ha sido explicado teóricamente se logra un mejor entendimiento por parte del estudiante.

Barreto, G y Leo, A (2009) estudiantes de la Universidad de Carabobo, Venezuela. Realizaron un trabajo de grado titulado **“Desarrollo de un laboratorio virtual para la cátedra de mecánica de fluidos”** el cual se desarrolló basándose en bancos reales, y su principal objetivo es preparar y familiarizar al estudiante de una manera remota a las respectivas experiencias que tiene que realizar en físico, permitiendo una comprensión a los distintos fenómenos que se pueden presentar. La

realización de la codificación de los algoritmos fue en lenguaje Java, cabe destacar que también cuenta con un manual de usuario, en el cual se indican el propósito de la práctica y el paso a paso de cómo lograr una simulación exitosa. Esta simulación de fenómenos físicos facilita y mejora el proceso de aprendizaje de dicho fenómeno.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Bombas de presión dinámica

Una bomba es una máquina que absorbe energía mecánica (de un motor) y la restituye al líquido que la atraviesa en forma de energía hidráulica. Las bombas que pertenecen a este grupo son solo las que son consideradas a su vez como turbomáquinas. Las bombas de presión dinámica transmiten la energía al fluido mediante un elemento móvil llamado rodete, el cual se mueve siempre con movimiento rotativo para cambiar la velocidad en algunos casos la dirección del fluido

Las bombas de presión dinámica pueden clasificarse según:

- La dirección de flujo:
 - De flujo radial
 - De flujo axial
 - De flujo radioaxial
- La posición de eje:
 - De eje horizontal
 - De eje vertical
 - De eje inclinado
- El número de fluidos en la bomba:
 - De simple aspiración
 - De un flujo y doble aspiración
 - De dos fluidos
- El número de rodetes:
 - De una etapa

- Multietapa

2.2.1.1 Bombas centrífugas

Las bombas centrífugas son un tipo de bombas de presión dinámica, específicamente comprende a las bombas de flujo radial y mixto (radioaxial) y por lo tanto emplean el mismo funcionamiento, mueven un cierto volumen de líquido entre dos niveles; transformando un trabajo mecánico en otro de tipo hidráulico.

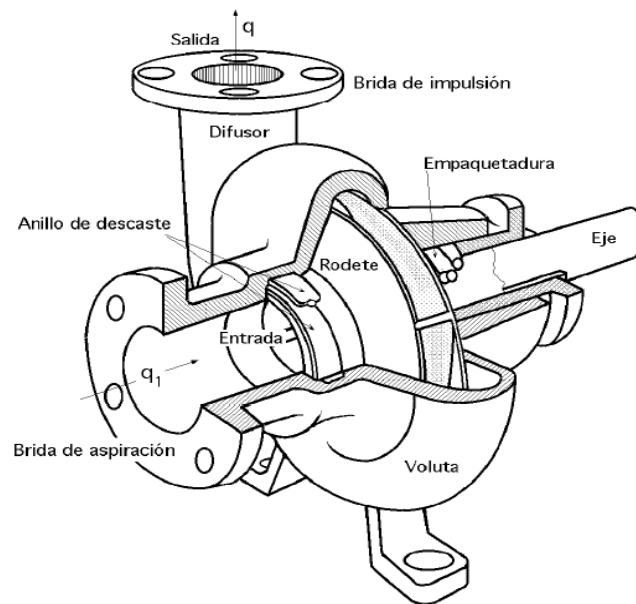
Los elementos de que consta una instalación son:

1. Una tubería de aspiración, que concluye prácticamente en la brida de aspiración.
2. El impulsor o rodete, formado por un conjunto de álabes que pueden adoptar diversas formas, según la misión a que vaya a ser destinada la bomba, los cuales giran dentro de una carcasa circular. El rodete es accionado por un motor y va unido al eje de este, siendo la parte móvil de la bomba. El líquido penetra axialmente por la tubería de aspiración hasta la entrada del rodete, experimentando un cambio de dirección más o menos brusco, pasando a radial, acelerándose y absorbiendo un trabajo. Los álabes del rodete someten a las partículas de líquido a un movimiento de rotación muy rápido, siendo proyectadas hacia el exterior por la fuerza centrífuga, creando una altura dinámica de forma que abandonan el rodete hacia la voluta a gran velocidad, aumentando también su presión en el impulsor según la distancia al eje. La elevación del líquido se produce por la reacción entre éste y el rodete sometido al movimiento de rotación.
3. La voluta, es un órgano fijo que está dispuesta en forma de caracol alrededor del rodete, a su salida, de tal manera que la separación entre ella y el rodete es mínima en la parte superior, y va aumentando hasta que las partículas líquidas se encuentran frente a la abertura de impulsión. Su misión es la de recoger el líquido que abandona el rodete a gran velocidad, cambiar la dirección de su movimiento y encaminarle hacia la brida de impulsión de la bomba. La voluta

es también un transformador de energía, ya que frena la velocidad del líquido, transformando parte de la energía dinámica creada en el rodete en energía de presión, que crece a medida que el espacio entre el rodete y la carcasa aumenta, presión que se suma a la alcanzada por el líquido en el rodete. En algunas bombas existe, a la salida del rodete, una corona directriz de álabes que guía el líquido antes de introducirlo en la voluta.

4. Una tubería de impulsión, instalada a la salida de la voluta, por la que el líquido es evacuado a la presión y velocidad creadas en la bomba. (Ver figura 1)

Figura 1: Elementos de una bomba centrífuga



Fuente: Bombas centrífugas y volumétricas. Pedro Fernández Diez

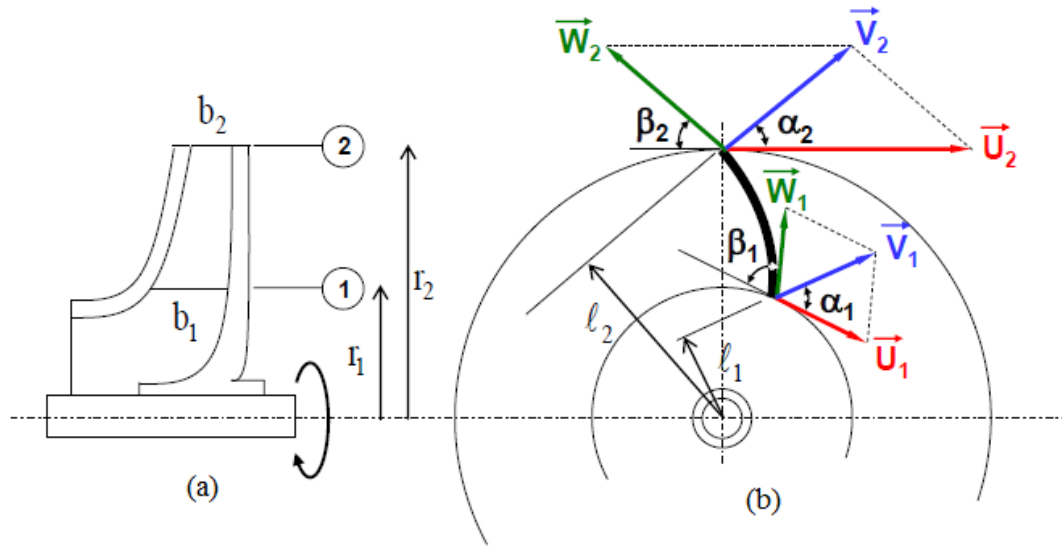
Estos son, en general, los componentes de una bomba centrífuga aunque existen distintos tipos y variantes.

2.2.1.2 Análisis del movimiento del fluido a través de una bomba centrífuga

Para derivar las ecuaciones que rigen el comportamiento del flujo a través de una turbomáquina es imprescindible escoger un adecuado sistema de referencia para simplificar las ecuaciones de movimiento. Ya que el rodete es el órgano principal de

esta turbomáquina, es este quien interactúa con el fluido, en donde se realiza el análisis y en donde se representaran los planos.

Figura 2: Cortes meridional (a) y transversal (b) del rodete



Fuente: Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Claudio Mataix. (1986).

En la figura 2 se representa el corte meridional y el corte transversal del rodete de una bomba centrífuga. En el corte meridional se observan las aristas de entrada y salida de los alabes, los cuales imparten energía al fluido, se aprecian también los anchos del rodete a la entrada y a la salida (b_1 y b_2) y los radios de entrada y salida r_1 y r_2 . En el corte transversal, que es un plano perpendicular al eje de la máquina se observa la forma del alabe.

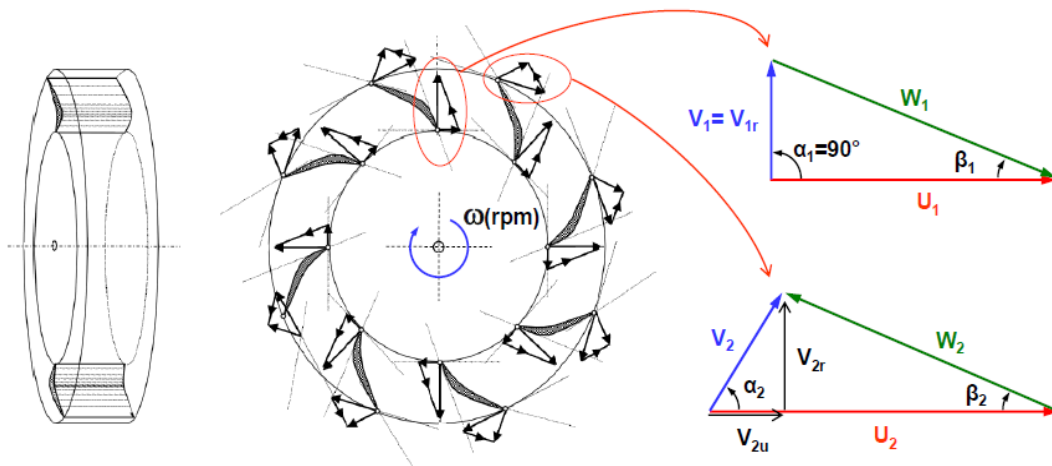
El líquido queda sometido a una velocidad relativa (con respecto a los alabes) \vec{W} a su paso por el espacio entre alabes entre la entrada y la salida, y una velocidad de arrastre (velocidad de los alabes) \vec{U} debida a la rotación del rodete alrededor de eje; la suma vectorial de estas velocidades proporciona la velocidad absoluta del fluido \vec{V} .

Si llamamos \vec{W}_1 a la velocidad relativa del líquido a la entrada en la cámara delimitada por un par de alabes, \vec{U}_1 a la velocidad tangencial, y \vec{V}_1 a la velocidad absoluta, se obtiene el triángulo de velocidades a la entrada, formándose un ángulo α_1 por \vec{U}_1 y \vec{V}_1 y un ángulo β_1 entre \vec{W}_1 y \vec{U}_1 .

A la salida se obtiene otro triángulo de velocidad de igual forma que a la entrada pero con las velocidades $\overline{W1}$, $\overline{U1}$, $\overline{V1}$ y los ángulos α_1 y β_1 .

En una bomba centrífuga es habitual que el fluido entre a la máquina en la dirección axial, es decir, la velocidad de líquido no tiene componente tangencial ($V_{1u}=0$) y los triángulos de velocidades tanto de la entrada como a la salida serán como los mostrados en la figura 3

Figura 3: Triángulos de velocidades en una bomba centrífuga



Fuente: Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Claudio Mataix. (1986).

2.2.1.3 Ecuación fundamental de las turbomáquinas (Ecuación de Euler)

Cuando el fluido de trabajo pasa a través de la turbomáquinas la naturaleza del intercambio de energía es muy compleja debido a la cantidad de procesos termodinámicos irreversibles que ocurren, además de la naturaleza complicada y muchas veces caótica del movimiento del fluido en el seno del rotor. Para obtener una primera consideración de este intercambio energético se deben hacer consideraciones teóricas sobre la naturaleza del fluido y su comportamiento a través del rotor, esto con la finalidad de simplificar el modelado matemático del fluido en su paso por el rotor.

Es importante destacar algunas observaciones en relación a la ecuación Euler y son las siguientes:

1. El fluido que pasa por el rotor es un fluido potencial.

2. Todas las líneas de corriente tienen la misma forma que cada uno de los álabes o paletas del rotor, esto sería equivalente a decir que el rotor tiene un "infinito" número de álabes.
3. Las características del régimen de flujo no varían en el tiempo, es decir, el flujo se encuentra completamente desarrollado, o en otras palabras, nos encontramos en régimen permanente.
4. En primer lugar así como la ecuación de Bernoulli es la ecuación fundamental de la hidrodinámica, la ecuación de Euler resulta ser la ecuación elemental para el estudio de las turbomáquinas.
5. Esta ecuación fue desarrollada por el matemático Leonardo Euler (1754), razón por la cual es denominada ecuación de Euler.
6. La ecuación permite calcular la carga teórica en condiciones ideales es decir, sin pérdidas y bajo la hipótesis de la teoría unidimensional o número infinito de álabes que implica una perfecta conducción del fluido a través de los mismos.
7. En el estudio de las turbomáquinas la altura o carga definida por la ecuación de Euler se denomina $H_{T\infty}$ (carga teórica para un número infinito de álabes) y a la altura o carga intercambiada en un rodete con un número finito de álabes se le denomina H_T (carga teórica para un número finito de álabes).

En el caso de máquinas generadoras (bombas), la ecuación de Euler se expresa en la forma:

$$H_{T\infty} = \frac{(U_2 V_{u2} - U_1 V_{u1})}{g} \quad (1)$$

La ecuación de Euler es una expresión sencilla que cuantifica la cantidad de energía transferida entre el rotor provisto de álabes y el fluido, sin embargo no especifica la naturaleza que se transmite. Pero esta ecuación puede ser modificada de tal forma que sea función de las componentes energéticas involucradas. Partiendo de

que la ecuación de Euler para bombas de acuerdo con la ecuación anterior se expresa como:

$$H_{T\infty} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + \frac{W_1^2 - W_2^2}{2g} \quad (2)$$

Donde $\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$ representa la variación de la carga dinámica y $\frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + \frac{W_1^2 - W_2^2}{2g}$

la variación de carga estática.

2.2.1.4 Cavitación

La cavitación es un fenómeno que se produce siempre que la presión en algún punto de la corriente de un líquido desciende por debajo de un cierto valor mínimo admisible. Este fenómeno que se puede presentar en las turbomáquinas cuando no se realiza una correcta instalación, trayendo consigo un mal funcionamiento y daños graves a la máquina.

La cavitación en bombas centrífugas puede ser de dos tipos:

1. Cavitación de succión: la cavitación de succión ocurre si la succión de la bomba centrífuga se encuentra en condiciones de baja presión y consecuente alto vacío por lo que el líquido se transforma en vapor a la entrada del impulsor.
2. Cavitación de descarga: la cavitación de descarga ocurre a causa de que la descarga de la bomba centrífuga se encuentra muy elevada.

Las bombas centrífugas funcionan con normalidad si la presión absoluta a la entrada del rodete no está por debajo de un determinado valor; cuando el líquido a bombear se mueve en una región donde la presión es menor que su presión de vapor, vaporiza en forma de burbujas en su seno, las cuales son arrastradas junto con el líquido hasta una región donde se alcanza una presión más elevada y allí desaparecen; esto es lo que se conoce como cavitación.

Si a la entrada del rodete la presión es inferior a la presión parcial del vapor P_v , se forman las burbujas de vapor que:

- Disminuyen el espacio utilizable para el paso del líquido.

- Perturban la continuidad del flujo debido al desprendimiento de gases y vapores disueltos.

Disminuyendo el caudal, la altura manométrica, el rendimiento de la bomba, etc; en su recorrido dañan los conductos de paso del líquido en el tubo de aspiración y llegan a una zona en el rodete, de presión superior a la presión de vapor, en la que, instantáneamente, toda la fase de vapor pasa a líquido, de forma que el volumen de las burbujas pasa a ser ocupado por el líquido, en forma violenta, que se acompaña de ruidos y vibraciones, lo cual se traduce en un golpeteo sobre los álabes, que se transmite al eje, cojinetes, cierres mecánicos, etc. y si la bomba funciona en estas condiciones durante cierto tiempo se puede dañar.

Para que a la entrada del rodete se presente la cavitación es necesario que la presión en este punto sea igual o menor que la presión parcial de vapor del líquido P_v a la temperatura correspondiente. Para cada caudal, en el tubo de aspiración existe una presión mínima por encima de la presión de vapor P_v ; por debajo de este valor de P_v la bomba cavitará; ésta presión se puede expresar en metros de columna de líquido (altura neta de entrada en la bomba) y se denomina carga neta positiva de succión NPSH (Net Positive Suction Head) que, teóricamente, para una bomba dada y un caudal dado, es constante.

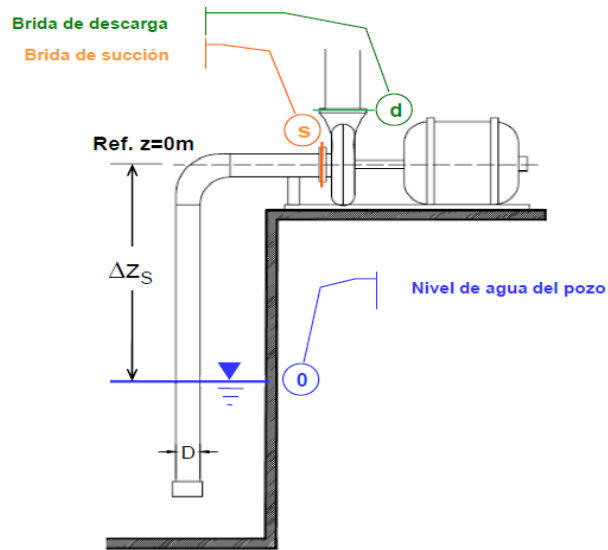
CARGA NETA POSITIVA DE SUCCION DISPONIBLE, $NPSH_D$.- Afecta al tubo de aspiración y para su cálculo se parte de la energía bruta disponible que tiene el flujo a la entrada de la bomba, que se obtiene aplicándola ecuación de Bernoulli entre la entrada del tubo de aspiración, punto O (nivel inferior del líquido), y el final del mismo (que se toma como referencia $Z=0m$) y se obtiene la ecuación. (Ver figura 4)

$$NPSH_D = \frac{P_0 - P_{v@Ts}}{\gamma} \pm \Delta Z_s - h_{f0s} \quad (3)$$

ALTURA NETA DE ENTRADA REQUERIDA, $NPSH_R$.- La bomba necesita que el líquido disponga en la posición de $Z=0m$ (brida de aspiración), de un mínimo de energía que le permita hacer el recorrido desde el $Z=0m$ hasta S sin que aparezca cavitación; esta presión mínima, cuyo límite es P_v , es la que se tiene a la entrada del

rodete, en el momento en que éste comienza a comunicar al líquido la presión a la entrada del rodete. Ya que varía para cada bomba en particular según su tipo, modelo, capacidad y velocidad, no puede calcularse mediante procedimientos analíticos, sino estimarse por medio de ensayos en bancos de prueba y viene reflejado por el fabricante en la curva característica de la máquina.

Figura 4: Altura mínima con la que debe trabajar una bomba



Fuente: Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Claudio Mataix. (1986).

Para que la bomba tenga una operación sin problemas debe cumplirse la relación:

$$NPSH_D > NPSH_R$$

Sin embargo para garantizar la operatividad y seguridad de la máquina la condición que se toma es:

$$NPSH_D \geq 1.1NPSH_R$$

Con respecto a la instalación de la bomba, es decir, para determinar la altura de la cota del eje desde la superficie del líquido del que se está haciendo la succión, utilizando el $NPSH_R$, se tiene la colocación crítica (altura mínima necesaria):

$$\Delta Z_s = NPSH_R - \frac{P_0 - P_{v@Ts}}{\gamma} + h_{f0s} \quad (4)$$

2.2.2 Principio de funcionamiento de las bombas de presión dinámica

Una bomba centrífuga funciona mediante la transferencia de energía cinética al líquido y su transformación en energía potencial, ya sea en una posición o, más a menudo, la presión en la boquilla de descarga de la bomba. Esta acción se lleva a cabo utilizando los conceptos de principio de Bernoulli.

Mecánicamente accionado por un eje rotatorio, el impulsor de la bomba mediante un movimiento de rotación transfiere energía al fluido por las palas del rotor. El fluido presente en el ojo de succión entra en el rotor - una cavidad de diámetro más pequeño, de interior - desde donde fluye hacia el diámetro exterior de los canales formados entre las paletas del rotor. El fluido sale del rotor con sustancial porción de velocidad absoluta de la energía cinética - que se va a convertir en energía de presión potencial. Esto se logra en las partes no giratorias.

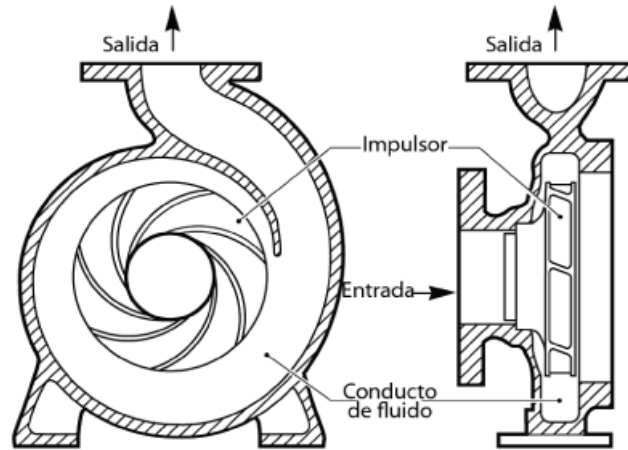
La forma más común de recuperación de energía en las partes no giratorias es una carcasa con forma de espiral, conocido como la voluta, que termina en una boquilla de descarga. La energía transferida al fluido por la bomba centrífuga es una función del diámetro del rotor, la velocidad y la conducción diseño del rotor.

En resumen el flujo entra a la bomba a través del centro u ojo del rodete y el fluido gana energía a medida que las paletas del rodete lo transportan hacia fuera en dirección radial. Esta aceleración produce un apreciable aumento de energía de presión y cinética, lo cual es debido a la forma de caracol de la voluta para generar un incremento gradual en el área de flujo de tal manera que la energía cinética a la salida del rodete se convierte en cabeza de presión a la salida. (Ver figura 5)

2.2.3 Curvas características

A causa de las características variables de la bomba centrífuga, es importante tener una visión gráfica de las relaciones entre la carga, el caudal, la eficiencia, la potencia necesaria, etc., de la bomba de que se trate a una velocidad determinada. Estas curvas o gráficos generalmente se preparan por el fabricante.

Figura 5: Funcionamiento de una bomba centrífuga



Fuente: Shonek, J. Editores Online. Buenos Aires, Argentina. Schneider Electric Argentina.

<http://www.editores-srl.com.ar>

Se llaman curvas características de una turbomáquinas a las gráficas correspondientes a las funciones siguientes:

$$H = f(Q), P = f(Q), N = f(Q), D = f(Q)$$

De estas variables las principales en orden de importancia son la carga y el caudal por lo que la curva característica correspondiente a la relación carga – caudal es sin duda la más representativa, sin embargo las tres curvas más importantes para el caso de bombas son las siguientes:

- a) Curva carga – caudal

$$H_m = \frac{U^2}{2g} - K_r Q^2 - K_c (Q^* - Q)^2 \quad (5)$$

Donde:

U: Velocidad tangencial del rodete.

K_r: Perdida por rozamiento.

K_c: Perdida por choque.

Q*: Caudal nominal

Esta ecuación puede simplificarse, quedando así:

$$H_m = a + bQ + cQ^2 \quad (6)$$

b) Curva potencia – caudal

$$Pot_H = \gamma Q H \quad (7)$$

c) Curva rendimiento – caudal

$$\eta = Pot_H / Pot_E \quad (8)$$

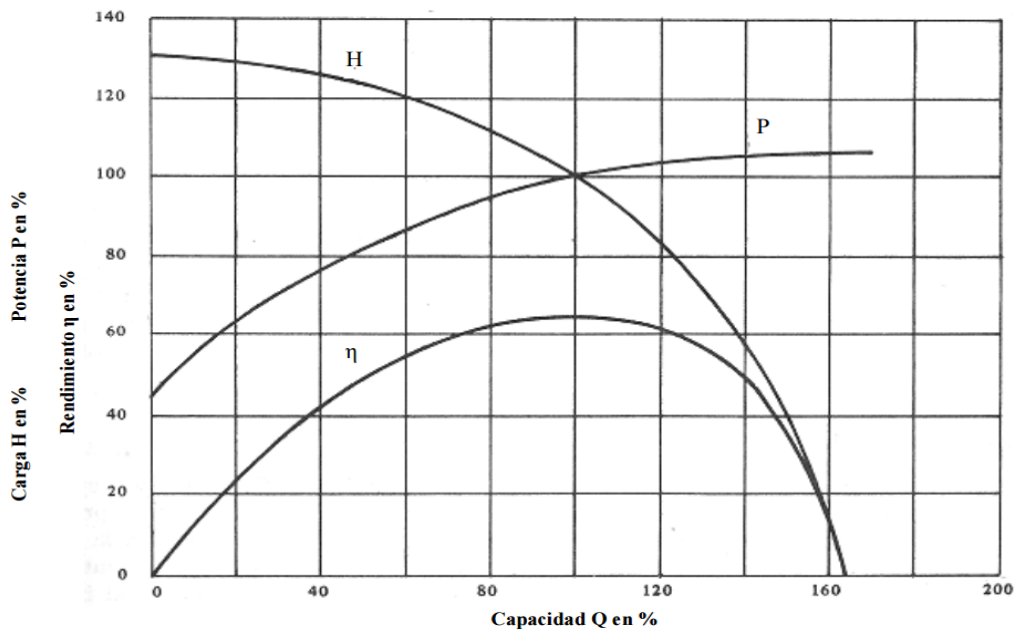
Donde:

Pote: Potencia eléctrica y es calculada por la siguiente ecuación.

$$Pot_E = V I \quad (9)$$

Por lo general el caudal se toma como variable independiente por tratarse de un parámetro fundamental en la operación de una turbomáquinas y que además es fácil de cuantificar.

Figura 6: Curvas características de una bomba centrífuga típica



Fuente: Torio (2014)

La figura 6 muestra un ejemplo de curvas características de una bomba centrífuga típica; estas curvas indican la variación de la carga, la potencia y la eficiencia con respecto al caudal. Las curvas características pueden ser teóricas si resultan de expresiones analíticas aunque generalmente son obtenidas por el fabricante con velocidad constante, un diámetro del impulsor específico y un tamaño determinado de

carcasa, realizando la representación gráfica de la carga hidráulica, potencia absorbida y eficiencia adiabática contra la capacidad de cada bomba en particular. Además de estas tres curvas de desempeño de carga-capacidad, potencia y rendimiento, generalmente el fabricante también proporciona la curva del NPSH.

2.2.4 Pérdida, potencias y rendimientos.

2.2.4.1 Pérdidas

Todas las pérdidas en la bomba se pueden clasificar en pérdidas hidráulicas, pérdidas volumétricas, pérdidas mecánicas.

- **Pérdidas hidráulicas.**

Las pérdidas hidráulicas disminuyen la energía específica útil que la bomba comunica al fluido y consiguientemente la altura útil. Son de dos clases: pérdidas de superficie y pérdidas de forma, las pérdidas de superficie se producen por el rozamiento del fluido con las paredes de la bomba o de las partículas entre sí, las pérdidas de forma por el desprendimiento de la capa límite en los cambios de dirección y en toda forma difícil al flujo, en particular a la entrada del rodete si la tangente del alabe no coincide con la dirección de la velocidad relativa a la entrada, o a la salida del rodete si la tangente del alabe de la corona directriz no coincide exactamente con la velocidad absoluta a la salida. Las pérdidas hidráulicas se originan principalmente:

- En el rodete.
- En la corona directriz, si existe.
- En la caja espiral.
- Desde la salida de la caja espiral hasta la salida de la bomba.

- **Pérdidas volumétricas.**

Estas pérdidas, que se denominan también pérdidas intersticiales, son pérdidas de caudal y se dividen en dos: pérdidas exteriores q_e y pérdidas interiores q_i .

- Las pérdidas volumétricas exteriores q_e constituyen una salpicadura de fluido al exterior, que se escapa por el juego entre la carcasa y el eje de

la bomba, que la atraviesa. Para reducirlas se utiliza la caja de empaquetadura, que se llena de estopa o material de cierre, provista de su correspondiente tapa o prensaestopas contra el eje de la máquina para mejorar el cierre. Esta presión sin embargo no puede ser excesiva para no aumentar las pérdidas mecánicas.

- Las pérdidas volumétricas interiores q_i , son las más importantes y reducen mucho el rendimiento volumétrico de algunas bombas: aunque q_e se haya reducido prácticamente a 0 por un prensaestopas de alta calidad. La explicación de estas pérdidas es la siguiente: a la salida del rodete de una bomba hay más presión que a la entrada. Luego parte del fluido en vez de seguir a la caja espiral retrocederá, por el conducto que forma el juego del rodete de la carcasa, a la entrada del rodete, para volver a ser impulsado por la bomba.

- **Pérdidas mecánicas.**

Las pérdidas mecánicas incluyen las pérdidas por:

- Rozamiento del prensaestopas con el eje de la máquina.
- Rozamiento del eje con los cojinetes.
- Accionamiento de auxiliares (bomba de engranaje para lubricación, cuentarrevoluciones, entre otros.).
- Rozamiento de disco, se llama así el rozamiento de la pared exterior del rodete con la atmosfera de fluido que le rodea. Es un disco o una caja en cuyo interior circula un fluido, pero en el exterior, o sea en el juego entre el rodete y la carcasa, inevitablemente penetra también el fluido: el disco no gira, pues, en el vacío, sino en una atmosfera viscosa donde se produce un rozamiento que incluimos en las pérdidas mecánicas y se denomina perdida por rozamiento de disco.

2.2.4.2 Potencias y rendimientos.

Cuando un líquido fluye a través de una bomba, sólo parte de la energía comunicada por el eje impulsor es transferida al fluido. Ya que existen pérdidas como las ya antes mencionadas, y no todo el líquido que atraviesa la bomba recibe de forma efectiva la acción del impulsor.

En las turbomáquinas el concepto de rendimiento es de suma importancia. El rendimiento o eficiencia, puede verse como la razón existente entre los beneficios que pueden obtenerse idealmente de una máquina y aquellos que son obtenidos en la realidad. En otras palabras el rendimiento total de una turbomáquinas se define como la razón entre la potencia restituida y la potencia absorbida,

El rendimiento de una turbomáquinas depende de muchos factores como son: tipo, construcciones, dimensiones, fluido manipulado, régimen de trabajo, etc., por esto existen varios tipos de rendimientos, que son:

- **Rendimiento hidráulico**

El rendimiento hidráulico es un parámetro que pondera el intercambio de energía entre el fluido y la máquina, expresándose en la siguiente forma

$$\eta_h = \frac{H}{H_t} \quad (10)$$

- **Rendimiento volumétrico**

En las turbomáquinas generadoras, las fugas internas del fluido constituyen una fuente de pérdidas, ya que el rodete tiene que proporcionar energía a todo el fluido que lo cruza, pero se pierde la energía transferida al gasto de recirculación. Se define entonces el rendimiento volumétrico:

$$\eta_v = \frac{Q}{Q+q}, \quad (11)$$

Donde:

Q= caudal útil; Q+q= caudal teórico

- **Rendimiento mecánico**

El rendimiento mecánico refleja las pérdidas externas de energía útil. Incluye las pérdidas ocasionadas por el rozamiento en cojinetes, empaques y prensaestopas. El rozamiento del fluido en los espacios entre la cubierta del rodete y la carcasa de la máquina, es llamado rozamiento de disco, que generalmente está considerado como una pérdida externa aunque ocurre dentro del envolvente, el rendimiento mecánico será entonces:

$$\eta_m = \frac{P_i}{P_a} \quad (12)$$

Donde P_i y P_a son la potencia interna (potencia suministrada al rodete) y la potencia de accionamiento (potencia en el eje de la bomba) respectivamente, y se calculan como:

$$P_i = P_a + P_{mr} \quad (13)$$

Siendo P_{mr} la potencia debida al rozamiento mecánico.

$$P_a = \frac{2\pi}{60} NM \quad (14)$$

Siendo N la velocidad en rpm y M el torque

- **Rendimiento total**

Es la relación entre la potencia en la flecha de la máquina y la potencia cedida al fluido:

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{P_a} \quad (15)$$

De esta forma se calculan el rendimiento para una bomba, para las calcular rendimiento de arreglos serie o paralelo se hace con las siguientes expresiones:

$$\eta_s = \frac{\sum Pot_H}{\sum Pot_E \times \eta_e} \quad (16); \quad \eta_P = \frac{\sum Pot_H}{\sum Pot_E \times \eta_e} \quad (17)$$

El rendimiento global también puede expresarse en función de los rendimientos involucrados:

$$\eta = \eta_h \eta_v \eta_m \quad (18)$$

2.2.5 Arreglos de bombas

2.2.5.1 Arreglos de bombas en paralelo

Dos o más bombas están en paralelo, cuando sus entradas y salidas estén unidas entre sí, verificándose que:

$$H = H_1 = H_2 = H_3 = \dots = H_n$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n$$

Diferenciándose de los rodets múltiples en que las bombas en paralelo pueden ser iguales o diferentes, funcionando al mismo número de revoluciones o no.

Para obtener el punto de funcionamiento, se parte de las curvas características de las bombas, que permitirán determinar la del conjunto en paralelo, y cuya intersección con la curva característica de la tubería, darán dicho punto. Para construir la curva característica del conjunto en paralelo, se traza para cualquier altura manométrica, la horizontal correspondiente sobre la que se llevaran los caudales Q_1, Q_2 , etc., cuya suma dará un punto que pertenecerá a la curva característica conjunta, y así sucesivamente.

- **Arreglo en paralelo de dos bombas idénticas**

Observando la figura 7, la curva I es la característica común a cada una de las bombas. La característica del conjunto, curva II, se obtiene multiplicando por dos para cada altura manométrica, las abscisas correspondientes a la primera curva.

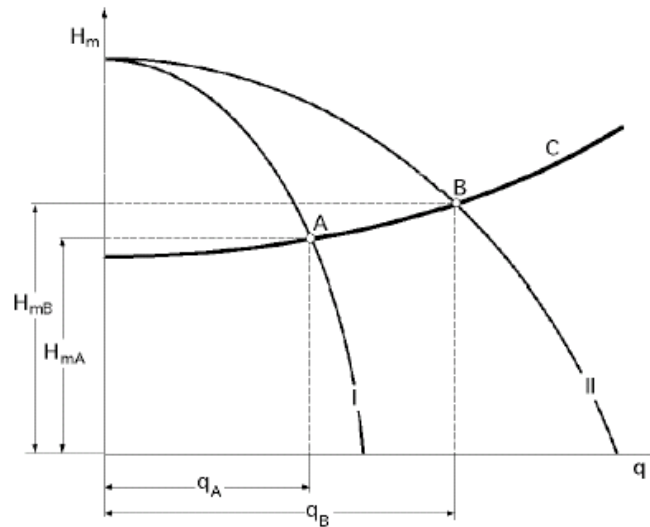
La curva C es la característica de la tubería, cuya intersección con la curva característica conjunta II, da el nuevo punto de funcionamiento B de la instalación.

Cada bomba funcionara con un caudal $\frac{Q_B}{2}$ y una misma altura manométrica H_{mB} .

En el caso de una sola bomba, en el punto de funcionamiento estaría en A y el caudal bombeado seria $Q_A > \frac{Q_2}{2}$, por cuanto $H_B > H_A$

Para N bombas iguales acopladas en paralelo la construcción sería idéntica.

Figura 7: Arreglo de bombas idénticas en paralelo

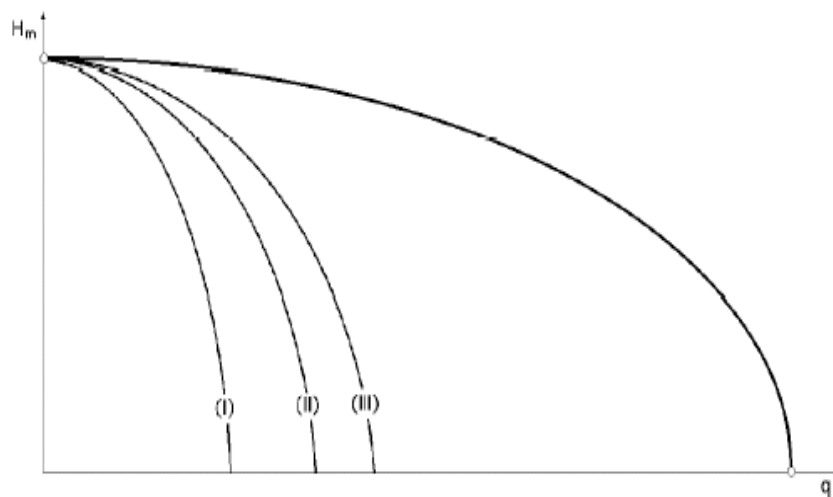


Fuente: Bombas centrífugas y Volumétricas. Pedro Fernández Díez

- **Arreglo de bombas en paralelo con características distintas, con un punto común para, $q = 0$**

El problema es exactamente igual al anterior, por cuanto las abscisas de la curva conjunto, la suma de las correspondientes a las curvas I, II, etc. (Ver figura 8)

Figura 8: Arreglo de bombas con características distintas y un punto común, $q = 0$



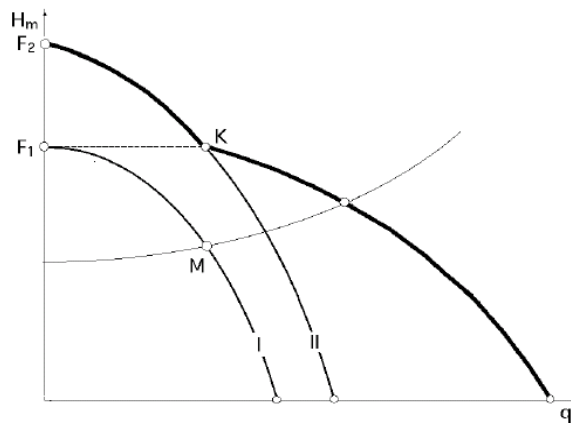
Fuente: Bombas centrífugas y Volumétricas. Pedro Fernández Díez

- **Arreglo de bombas en paralelo con características distintas, sin puntos comunes**

El problema es semejante, con la diferencia que la curva conjunto tiene una parte común con la curva II, hasta el punto de encuentro K, en la horizontal trazada por F_1 , con la curva II, Figura 9

Además, parte de la curva F_2K no se puede utilizar por la bomba I, por cuanto esta zona, la bomba I no puede suministrar alturas manométricas superiores a las correspondientes al punto F_1 , por lo que en la practicas hay que tratar preferiblemente solo las bombas con características iguales. Para que una bomba se pueda poner en marcha y acoplarse en paralelo a otra que esté funcionando, es preciso que el punto F_2 correspondiente a caudal nulo de la característica de la bomba II que se trata en funcionamiento M de la bomba en servicio I

Figura 9: Arreglo de bombas con características distintas sin puntos comunes



Fuente: Bombas centrífugas y Volumétricas. Pedro Fernández Díez

2.2.5.2 Arreglo de bombas en serie

Dos o más bombas están acopladas en serie, cuando el tubo de impulsión de una de ellas, está unido al de aspiración de la siguiente, y así sucesivamente. Las diferentes bombas impulsan el mismo caudal, mientras que la altura manométrica resultante sería la suma de las alturas manométricas correspondientes a cada bomba, es decir:

$$Q_A = Q_B = \dots = Q_n$$

$$H = H_A + H_B + \dots + H_n$$

Para determinar el punto de funcionamiento conjunto, hay que hallar la curva característica conjunta de las bombas en serie, para lo que se dibujan las curvas características de las bombas individuales, como se observa en la Figura 10, a continuación se traza para un caudal cualquiera Q_A la vertical correspondiente que corta a las características individuales en los puntos A y N, cuyas alturas manométricas se suman, obteniéndose el punto C, que será la altura correspondiente al caudal Q_A de las dos bombas en serie, $H_C = H_A + H_B$, y así sucesivamente para los demás caudales, obteniéndose la curva característica conjunta.

Si se pretende obtener un aumento de la altura manométrica, manteniéndose sensiblemente el caudal constante, el acoplamiento en serie permite obtener, con un rendimiento del orden del de una sola bomba, que la característica de la tubería de impulsión vuelva a cortar a la característica conjunta de las bombas en serie, no lejos de la vertical que pasa por el caudal bombeado por una sola bomba Q_A . Hay que tener presente también que, así como el acoplamiento en paralelo no se presentan dificultades, en el acoplamiento en serie es preciso tener en cuenta que la presión de aspiración de una bomba cualquiera, se corresponde con la presión de impulsión de la bomba precedente. (Ver figura 10)

2.2.5.3 Campo de aplicación

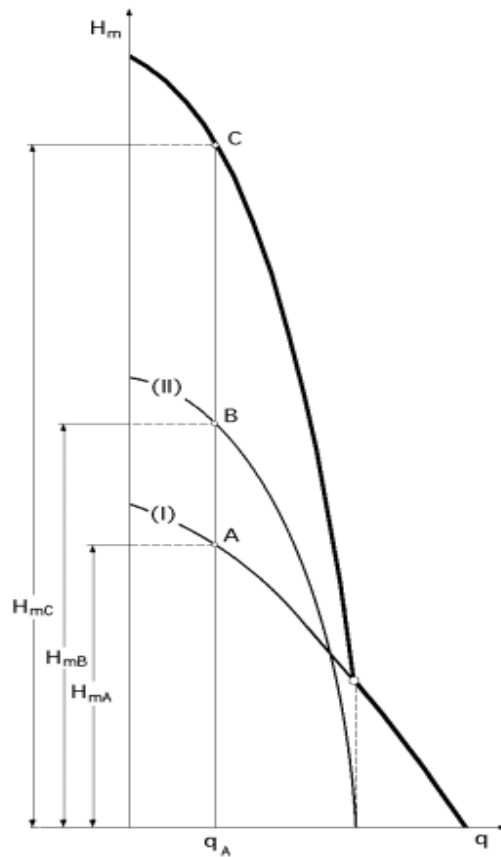
Cuando se tenga que bombear a grandes alturas con pequeños caudales, la velocidad específica para un solo rodete puede ser muy baja, la velocidad específica para un solo rodete puede ser muy baja, lo que implica rendimientos inaccesibles; para evitar esto se puede subdividir la altura total entre varios impulsores acoplados en serie así acercarse a velocidades específicas de mejores rendimientos.

Otra circunstancia que induce al empleo de bomba multietapa es la limitación en el diámetro de los impulsores, como sucede en las bombas verticales empleadas en

pozos y perforaciones, ya que al ser la altura desarrollada proporcional al cuadrado de la velocidad tangencial del impulsor y este de poco diámetro, la altura será relativamente pequeña con relación a otras velocidades más usuales. Por lo tanto la altura se puede subdividir entre varios impulsores para así conseguir un menor $NPSH_R$. En impulsores de igual n_q , el $NPSH_R$ varía aproximadamente en proporción directa con la altura, siendo la constante de la proporcionalidad el coeficiente de cavitación de Thoma:

$$NPSH_{R(\max)} = \sigma H_{m(\max)}$$

Figura 10: Arreglo de bombas en serie



Fuente: Bombas centrífugas y Volumétricas. Pedro Fernández Díez

El empleo de varias etapas en serie va asociado, normalmente, a la obtención de altas presiones, por lo que se pueden originar una serie de problemas, como:

- a) Pérdidas ocasionadas en los sucesivos procesos de difusión
- b) Aumento de la longitud del eje
- c) Elevado empuje axial
- d) Alta presión en la empaquetadura de impulsión

2.2.6 Disponibilidad y pérdidas en tuberías.

2.2.6.1 Principio de Bernoulli.

El principio de Bernoulli, también denominado ecuación de Bernoulli o trinomio de Bernoulli, describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una corriente de agua. Fue expuesto por Daniel Bernoulli en su obra Hidrodinámica (1738) y expresa que en un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido.

La energía de un fluido en cualquier momento consta de tres componentes:

- Cinética: es la energía debida a la velocidad que posea el fluido
- Potencial: es la energía debido a la altitud que un fluido posea.
- Energía de presión: es la energía que un fluido contiene debido a la presión que posee.

La siguiente ecuación conocida como "ecuación de Bernoulli" (trinomio de Bernoulli) consta de estos mismos términos.

$$H = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z \quad (19)$$

Donde:

- V: Velocidad del fluido.
- P: Presión.
- γ : Pesos específico del fluido.
- g: Aceleración gravitatoria.
- Z: Altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.

Para aplicar la ecuación se deben realizar las siguientes consideraciones:

- Viscosidad (fricción interna) = 0 Es decir, se considera que la línea de corriente sobre la cual se aplica se encuentra en una zona 'no viscosa' del fluido.
- Caudal constante
- Flujo incompresible, donde ρ es constante.

2.2.6.2 Pérdidas por fricción en tuberías y accesorios.

Las tuberías usadas para transportar fluidos tienen rugosidad en su interior que hacen que disminuya la energía con la que va el fluido, está es llamada perdida por fricción, en cambio la disminución de energía que es causada por accesorios en la tubería es llamada perdida por accesorios, estos pueden ser válvulas, codos, entre otros.

➤ **Pérdidas por fricción en tuberías.**

$$h_{fL} = 10,674 L \left(\frac{Q^{1,852}}{C_{HW}^{1,852} \phi^{4,781}} \right) \quad (20)$$

Donde:

h_f : Su unidad es metros (m).

L: longitud de la tubería. Su unidad es metros (m).

ϕ : Diámetro interno de la tubería. Su unidad es metros (m).

Q: Caudal en la tubería. Su unidad es metros cúbicos sobre segundos (m^3/s).

C_{HW} : Coeficiente de Hazen-Willians

➤ **Pérdidas por accesorios.**

$$h_{f \text{ accesorio}} = \frac{8 K Q^2}{\pi^2 g \phi^4} \quad (21)$$

Donde:

ϕ : Diámetro interno de la tubería.

Q: Caudal en la tubería.

K: es un coeficiente de perdida parametrizado para cada tipo de accesorio que esta multiplicado por un factor de fricción.

➤ **Factor de fricción.**

Ecuación de Swamee-Jain ($Re > 2100$)

$$f_T = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (22)$$

$$Re = \frac{DV}{\nu} \quad (23)$$

Donde:

ε : Rugosidad del material.

Re: Reynolds

➤ **Balance de energía.**

El balance de energía de un fluido que fluye en un ducto desde un punto 1 a un punto 2 está dado por la ecuación de BERNOUILLI

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_f \quad (24)$$

Donde se observa que la disponibilidad en el punto 1 o en el punto inicial del fluido es igual a las disponibilidad en el punto 2 o punto de llegada más la energía que consume el fluido en hacer ese recorrido, es decir, las pérdidas que experimenta desde un punto hasta el otro

2.2.7 Bancos de ensayos serie-paralelo para bombas centrífugas

2.2.7.1 Conceptualización y función de los bancos de prueba

El banco de prueba consiste en el análisis de bombas centrífugas a partir de una instalación hidráulica básica en circuitos cerrados que cuenta con los elementos necesarios para cumplir con los propósitos planteados.

Los ensayos de las bombas y la obtención de sus curvas características en los laboratorios de hidráulica se llevan a cabo en bancos de pruebas, los cuales brindan acceso directo al proceso y permiten reproducir de manera controlada las condiciones en las que estarán operando tanto las máquinas como las tuberías y accesorios en condiciones reales.

2.2.7.2 Bancos de pruebas existentes en la actualidad

✓ Banco universidad de Cantabria

En tal banco se puede realizar el ensayo, obteniendo la curva característica, de una bomba centrífuga, para lo cual se puede variar el caudal suministrado por ella con el accionamiento de una válvula de compuerta que incrementa las pérdidas de carga de la tubería; las bombas instaladas presentan tres velocidades de giro diferente, lo que permite hacer el ensayo en tres velocidades diferentes. (Ver figura 11)

Manipulando convenientemente las válvulas de cierre, se puede realizar el ensayo de dos bombas en serie; además al tener la posibilidad de variar la velocidad de las bombas, se puede realizar el acoplamiento de dos bombas diferentes. También se puede realizar el funcionamiento de bombas en paralelo, y ensayar el acoplamiento de las mismas, siendo estas diferentes.

Figura 11: Banco de prueba de la universidad de Cantabria



Fuente: Universidad de Cantabria. 2009

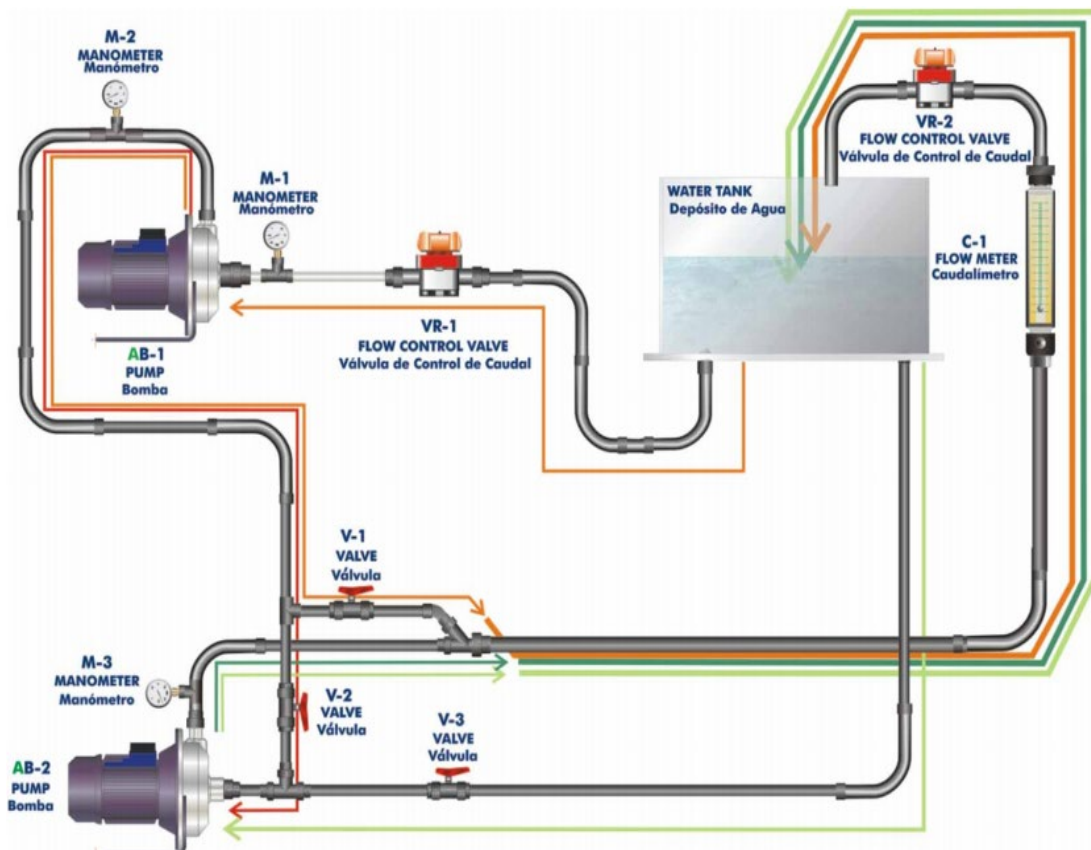
✓ Bancos diseñados por Edibon

• Banco de Bombas Serie/Paralelo. (PBSPB)

Equipo diseñado para demostrar las ventajas operativas del funcionamiento en serie o en paralelo, según el rendimiento requerido. Este equipo consta de dos bombas centrífugas, un depósito de suministro de agua, tuberías de circulación, válvulas de regulación, tres medidores de presión y un medidor de caudal.

Las bombas centrífugas pueden funcionar: aisladamente, acopladas en serie o acopladas en paralelo. Una bomba está accionada a través de un motor trifásico con posibilidad de regulación y medición de la velocidad de giro así como de medición del par mecánico transmitido, y la otra bomba esta accionada a través de un motor monofásico. Las bombas van instaladas en un sistema de tuberías que, por ser un circuito cerrado, evita el gasto permanente de agua durante su funcionamiento. Mediante el posicionamiento adecuado de las válvulas es posible conectar las bombas por separado, en serie o en paralelo, según sea el ensayo que pretendamos realizar. (Ver figura 12)

Figura 12: Banco de prueba serie paralelo EDIBON PBSPB



Fuente: Edibon. (2004)

- **Banco de Bombas Serie/Paralelo Controlado desde Computador (PC), con SCADA. (PBSPC)**

Equipo diseñado para demostrar las ventajas operativas del funcionamiento en serie o en paralelo, según el rendimiento requerido. Este equipo consta de dos bombas centrífugas, un depósito de agua y tuberías de circulación con válvulas a la entrada y salida de las bombas, tres sensores de presión y un sensor de caudal. Este equipo suministra con el Sistema EDIBON de Control desde Computador (SCADA), que incluye: Caja-interface de Control + Tarjeta de Adquisición de Datos + Software de control y Adquisición de Datos, para el control del proceso y de los diferentes parámetros. (Ver figura 13)

Las bombas centrífugas pueden funcionar: aisladamente, acopladas en serie y acopladas en paralelo. Una bomba esta accionada a través de un motor trifásico con posibilidad de regulación y medición de la velocidad de giro así como de medición del par mecánico transmitido.

Las bombas van instaladas en un sistema de tuberías que por ser un circuito cerrado evita el gasto permanente de agua durante su funcionamiento. Mediante el posicionamiento adecuado de las válvulas es posible conectar las bombas por separado, en serie o en paralelo, según sea el ensayo que pretendamos realizar.

Figura 13: Banco de prueba serie paralelo EDIBON PBSPC



Fuente: Edibon. (2004)

Consola electrónica

✓ **Banco diseñado por ATSIngenieria**

Equipo diseñado para demostrar las ventajas operativas del funcionamiento en serie o en paralelo, según el rendimiento requerido. (Ver figura 14)

Este equipo consta de dos bombas centrífugas, un depósito de suministro de agua, tuberías de circulación, válvulas de regulación, un transmisor de presión y un medidor de caudal.

Las bombas centrífugas pueden funcionar: aisladamente, acopladas en serie o acopladas en paralelo. Una bomba está accionada a través de un motor bifásico con posibilidad de regulación y medición de la velocidad de giro por medio de variador de velocidad, y la otra bomba es controlada por medio de arranque directo (contactor + relé térmico).

Las bombas van instaladas en un sistema de tuberías que, por ser un circuito cerrado, evita el gasto permanente de agua durante su funcionamiento.

Mediante el posicionamiento adecuado de las válvulas es posible conectar las bombas por separado, en serie o en paralelo, según sea el ensayo que se pretenda realizar.

Figura 14: Banco de pruebas serie paralelo por ATSIngenieria



Fuente: ATSIngenieria. (2006)

2.2.7.3 Componentes de un banco de prueba

- Sistema de bombas

- Tanque: almacena el agua o líquido con el cual se va a trabajar en el banco de prueba, estos pueden almacenar desde 10lts hasta 2000lts.
- Accesorios: válvulas de bola, válvulas de compuerta, vacuómetros, manómetros, tes, codos, cruceta, caudalímetro, entre otros.

2.2.8 Tipos de lenguajes de programación

2.2.8.1 Lenguajes de programación declarativos

Se les conoce como lenguajes declarativos en ciencias computacionales a aquellos lenguajes de programación en los cuales se le indica a la computadora qué es lo que se desea obtener o qué es lo que se está buscando. Eso se puede lograr con un lenguaje declarativo.

La programación declarativa es una forma de programación que implica la descripción de un problema dado en lugar de proveer una solución para dicho problema, dejando la interpretación de los pasos específicos para llegar a dicha solución a un intérprete no especificado. La programación declarativa adopta, por lo tanto, un enfoque diferente al de la programación imperativa tradicional.

En otras palabras, la programación declarativa provee el "qué", pero deja el "cómo" liberado a la implementación particular del intérprete. Por lo tanto se puede ver que la programación declarativa tiene dos fases bien diferenciadas, la declaración y la interpretación.

Algunos lenguajes declarativos que se pueden mencionar son:

- PROLOG
- SQL
- HTML
- WSDL (Web Services Description Language)
- XML Stylesheet Language for Transformation

2.2.8.2 Lenguajes de programación imperativos

En ciencias de la computación se llama lenguajes imperativos a aquellos en los cuales se le ordena a la computadora cómo realizar una tarea siguiendo una serie de pasos o instrucciones

Dentro de la programación imperativa, se tiene un conjunto de instrucciones que le indican al computador cómo realizar una tarea. Los lenguajes imperativos se basan en comandos u órdenes que se le dan a la computadora para que haga algo, con el fin de organizar o cambiar valores en ciertas partes de la memoria.

La ejecución de estos comandos se realiza, en la mayor parte de ellos, secuencialmente, es decir, hasta que un comando no ha sido ejecutado no se lee el siguiente. Según el dominio, o mejor dicho con el propósito que se utiliza el programa, se puede hablar de lenguajes de dominio específico y de dominio general.

Algunos lenguajes de programación imperativos que se pueden mencionar son:

- BASIC
- C
- C++
- Java
- C#
- PHP
- Perl

2.2.8.3 Lenguajes de programación orientados a objetos

En la Programación Orientada a Objetos se definen los programas en términos de "clases de objetos", objetos que son entidades que combinan estado comportamiento e identidad. La programación orientada a objetos expresa un programa como un conjunto de estos objetos, que colaboran entre ellos para realizar tareas. Esto permite hacer los programas módulos más fáciles de escribir, mantener y reutilizar.

De esta forma, un objeto contiene toda la información, (los denominados atributos) que permite definirlo e identificarlo frente a otros objetos pertenecientes a otras clases. A su vez, dispone de mecanismos de interacción que favorecen la comunicación entre objetos, y en consecuencia, el cambio de estado en los propios objetos. Esta característica lleva a tratarlos como unidades indivisibles, en las que no se separan información y procesamiento.

Dada esta propiedad de conjunto de una clase de objetos, que al contar con una serie de atributos definitorios, requiere de unos métodos para poder, el programador debe pensar indistintamente en ambos términos, ya que no debe nunca separar o dar mayor importancia a los atributos a favor de los métodos, ni viceversa. Hacerlo puede llevar al programador a seguir el hábito erróneo de crear clases contenedoras de información por un lado y clases con métodos que manejen esa información por otro.

Un objeto se puede definir como un grupo de procedimientos que comparten un estado. Se define al conjunto de datos como "estado", y "métodos" como el conjunto de procedimientos que pueden alterar ese estado. Un programa orientado a objetos es un método de implementación en el que los programas están organizados como colecciones de objetos, donde cada uno es una instancia de alguna clase, y donde todas las clases son miembros de una jerarquía de clases conectadas por relaciones de herencia. Este tipo de lenguajes son muy recientes en comparación a los primeros lenguajes de programación que aparecieron.

2.2.9 Algoritmos de cálculo

Un algoritmo es un conjunto finito de instrucciones o pasos que sirven para ejecutar una tarea y/o resolver un problema. De un modo más formal, un algoritmo es una secuencia finita de operaciones realizables, no ambiguas, cuya ejecución da una solución de un problema en un tiempo finito. El término algoritmo no está exclusivamente relacionado con la matemática, ciencias de la computación o informática. En realidad, en la vida cotidiana empleamos algoritmos en multitud de ocasiones para resolver diversos problemas. Existen ejemplos de índole matemática, como el algoritmo de la división para calcular el cociente de dos números, el algoritmo de Euclides para calcular el máximo común divisor de dos enteros positivos, o incluso el método de Gauss para resolver Sistema lineal de ecuaciones.

La definición de algoritmo aún no cuenta con la formalidad científica que podría ser ideal para la matemática y las ciencias de la computación (donde los algoritmos son esenciales pero a falta de formalidad no pueden incluirse fácilmente en las demostraciones formales de estas ciencias). Sin embargo, si existe un concepto intuitivo de algoritmo. Un algoritmo es un sistema por el cual se llega a una solución, teniendo en cuenta que debe ser definido, finito y preciso. Por preciso entendemos que cada paso a seguir tiene un orden; finito implica que tiene un determinado número de pasos, o sea, que tiene un fin; y definido, que si se sigue el mismo proceso más de una vez llegaremos al mismo resultado.

2.3. Definición de términos básicos

- **Álabes:** Es la paleta curva de una turbomáquinas o máquina de fluido roto dinámica. Forma parte del rodete y, en su caso, también del difusor o del distribuidor. Los álabes desvían el flujo de corriente, bien para la transformación entre energía cinética y energía de presión por el principio de Bernoulli, o bien para intercambiar cantidad del fluido con un momento de fuerza en el eje.

- **Altura Geométrica:** Desnivel existente entre el nivel mínimo de aspiración y el punto más alto de impulsión expresado en metros. (Hg)
- **Altura Manométrica:** Es el incremento de energía adquirido por 1 kg de líquido entre la sección de entrada y de salida de la bomba misma; generalmente se indica con H y se mide en J/kg o en m de líquido transportado (m C. L.).
- **Caudal:** Volumen de agua que circula por el cauce de un río, tubería en un tiempo determinado.
- **Caudalímetro:** Es un instrumento de medida para la medición de caudal o gasto volumétrico de un fluido o para la medición del gasto másico. Estos aparatos suelen colocarse en línea con la tubería que transporta el fluido. También suelen llamarse medidores de caudal, medidores de flujo o flujómetro.
- **Hidráulica:** Es la ciencia que estudia el comportamiento de los fluidos en función de sus propiedades específicas. Es decir, estudia las propiedades mecánicas de los líquidos dependiendo de las fuerzas a que pueden ser sometidos.
- **Manómetro:** Es un instrumento de medición para la presión de fluidos contenidos en recipientes cerrados. Se distinguen dos tipos de manómetros, según se empleen para medir la presión de líquidos o de gases.
- **Peso específico:** la relación entre el peso de una sustancia y su volumen.
- **Presión atmosférica:** Es la fuerza ejercida por la atmosfera por unidad de superficie. El valor de la presión atmosférica en condiciones normales al nivel del mar es: 1 atmosfera = 1,033 Kg/cm = 10,33 metros columna de agua.
- **Presión absoluta:** Es la suma de la presión relativa y la presión atmosférica.
Presión absoluta = Presión manométrica + Presión atmosférica.
- **Presión relativa:** Es la presión medida en relación con la presión atmosférica (los manómetros o vacuómetros normales miden presiones relativas).

- **Rodete:** es un tipo de rotor situado dentro de una tubería o un conducto y encargado de impulsar un fluido.
- **Tubería:** Es un conducto que cumple la función de transportar fluidos, gases y otros materiales. Se suele elaborar con materiales muy diversos. Cuando el líquido transportado es petróleo, se utiliza el término oleoducto. Cuando el fluido transportado es gas, se utiliza el término gasoducto.
- **Vacuómetro:** Es un instrumento que permite realizar la medición de la presión cuando esta resulta menor a la presión de la atmosfera.
- **Válvula:** Dispositivo que abre o cierra el paso de un fluido por un conducto en una máquina, aparato o instrumento, gracias a un mecanismo, a diferencias de presión, entre otros.
- **Viscosidad:** Es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales, es debida a las fuerzas de cohesión moleculares.
- **Simulación:** Simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos períodos.
- **Programación:** Es el proceso de diseñar, codificar, depurar y mantener el código fuente de programas computacionales. El código fuente es escrito en un lenguaje de programación. El propósito de la programación es crear programas que exhiban un comportamiento deseado

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Enfoque de la Investigación

El enfoque de la investigación es de tipo cuantitativo, el cual es definido por Hernández S. (2004) como aquel que “usa la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico para establecer patrones de comportamiento”. El mismo autor expone que este tipo de estudio está asociado con los experimentos, las encuestas con preguntas cerradas o los que emplean instrumentos de medición estandarizados. Todo esto pone a disposición de otros investigadores todos los métodos y procedimientos.

Se considera este enfoque ya que la investigación está planteada de una forma más específica, y el objetivo es tener respuesta concreta sobre el análisis que se va a estudiar. En el siguiente trabajo nos valemos de números, datos y ecuaciones para obtener los resultados deseados.

3.2 Tipo de Investigación

La investigación es de tipo documental, según Alfonso (1995), la investigación documental es un procedimiento científico, un proceso sistemático de indagación, recolección, organización, análisis e interpretación de información o datos en torno a un determinado tema. Al igual que otros tipos de investigación, éste es conducente a la construcción de conocimientos.

A su vez se desarrollara como una investigación factible, según la UPEL (1998) el diseño de proyecto factible es un estudio "que consiste en la investigación, elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo viable para solucionar problemas, requerimientos o necesidades de organizaciones o grupos sociales". Ya que se plantea satisfacer una necesidad de una institución universitaria.

3.3 Nivel de la Investigación

El nivel de la investigación puede describirse como descriptiva, según Arias (2012), la investigación descriptiva consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Los resultados de este tipo de investigación se ubican en un nivel intermedio en cuanto a la profundidad de los conocimientos se refiere. Dado que se estudia el comportamiento de las bombas centrífugas en arreglos de serie y paralelo de forma teórica y estos son representados virtualmente mediante simulación computarizada a fin de visualizar dicho comportamiento teórico y comparar dichos resultados.

3.4. Diseño de la Investigación

En concordancia con los objetivos propuestos, los datos necesarios para esta evaluación, serán recolectados de forma directa de los bancos de pruebas existentes por lo que enmarca un diseño de campo.

Según Palella y Martins (2010), define: La Investigación de campo consiste en la recolección de datos directamente de la realidad donde ocurren los hechos, sin manipular o controlar las variables. Estudia los fenómenos sociales en su ambiente natural. El investigador no manipula variables debido a que esto hace perder el ambiente de naturalidad en el cual se manifiesta.

3.5 Fases de la Investigación

El desarrollo de la presente investigación está comprendido por una serie de fases que permitirán dar respuesta a los objetivos planteados en un determinado orden, brindando a los investigadores una herramienta para la planificación y mejor aprovechamiento del tiempo dedicado al proyecto.

- **Fase I: Estudiar los bancos de ensayos para arreglos serie-paralelo de bombas centrífugas.**

En la primera fase se pretende recopilar toda la información pertinente a través de las técnicas e instrumentos de recolección de datos mencionados anteriormente, es fundamental en este punto realizar un estudio detallado de los bancos de pruebas de las bombas centrífugas con arreglos de serie-paralelo. Se debe conocer extensamente la

descripción, funcionamiento y requerimientos de los mismos, a fin de discernir de las experiencias realizables con mayores aportes didácticos y poder representarlas virtualmente con la mayor similitud posible, para ello es preciso:

- Investigar los diferentes bancos de pruebas de serie-paralelo existentes en la actualidad, con el objeto de obtener sus respectivos manuales.
- Revisión y estudio de dichos manuales.

Para la realización de esta primera fase se estipula un tiempo de veinte (25) horas con un máximo plazo máximo de una (1) semana.

- **Fase II: Diseñar un sistema práctico para su uso como banco didáctico computacional.**

La realización de este trabajo está destinado a facilitar el entendimiento de la asignatura de turbomaquinas, y aún más del compartimiento de las bombas centrífugas y los distintos componentes que hacen parte en los bancos de prueba, para ello se va a hacer una investigación de experiencias realizables con el software, tomando en cuenta los aportes didácticos que brindan al estudiante, según lo extraído de la revisión de su anterior uso en este campo.

El banco computacional debe tener un aspecto lo más parecido posible a los bancos reales, lo cual es fundamental para la familiarización del usuario.

- **Fase III: Elaborar el algoritmo para el cálculo de las variables y condiciones de operación del sistema seleccionado.**

Se realiza el desarrollo de los distintos algoritmos, a partir de los modelos teóricos y valores investigados en la fase I. Los algoritmos se harán con base a cumplir con objetivos de programación los cuales están directamente relacionados con los requerimientos planteados para alcanzar las metas ya impuestas.

- **Fase IV: Desarrollar el programa computacional y la interface de usuario.**

Luego de saber en qué consisten los bancos de prueba de bombas centrífugas en arreglos de serie-paralelo, saber cuál es modelo de banco y que características debe

tener el banco computacional junto con el desarrollo de los algoritmos. Se procede al desarrollo del programa computación el cual va a hacer programado en Java.

Consiste en codificar los algoritmos desarrollados según el lenguaje Java, permitiéndole asignar la función respectiva a cada uno de los elementos que conforman la interfaz gráfica y con ello lograr las simulaciones.

La interface del usuario, es la parte física del programa, para su diseño es importante tener en cuenta que se trata de un programa diseñado para el aprendizaje, en el cual su presentación de formas y colores juegan un importante rol.

Para lograr que el que el banco computacional cuente con una interfaz agradable a la vista, ilustrativa y simple a la vez se toman en cuenta algunos aspectos, los cuales son:

- El objetivo de la experiencia comprobable.
- Las formas y colores asociados universalmente a respectivas acciones o elementos, lo cual ayuda al aprendizaje.
- **Fase V: Hacer una guía práctica y un manual de uso del simulador.**

La realización de la guía práctica se hace con el fin de que el estudiante pueda comprobar sus conocimientos y aplicar un uso detallado y completo del simulador.

Para el uso del banco computacional es necesario realizar un manual, el cual servirá como guía y haga mucho más fácil su utilización, este manual será realizado a partir de los manuales de los bancos reales investigados anteriormente y agregándole la metodología computacional.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En los capítulos anteriores se establecieron los parámetros técnicos, teóricos y metodológicos que dan sustento a la realización del proyecto, no obstante en las siguientes páginas se presentan los resultados obtenidos durante la ejecución de las fases enunciadas anteriormente y a través de las cuales se desarrolló SIMULEB (Simulador Educativo para Bombas Centrífugas).

4.1 Estudiar los bancos de ensayos para arreglos serie-paralelo de bombas centrífugas.

4.1.1 Información recopilada para la elaboración de un banco de ensayo.

En esta fase se recopiló toda la información relacionada con las características y condiciones que debe tener un banco de ensayos para arreglos de bombas en serie-paralelo y además de una bomba individual, estudiando las ecuaciones elementales de las bombas las cuales fueron desarrolladas por Euler, las ecuaciones que representa como oposición del sistema a la bomba a implementar en el banco las cuales son generadas por pérdidas de fricción de tubería y por la colocación de accesorios los cuales son necesarios para adaptar, ordenar y controlar una parte del banco de ensayo, es importante destacar que cada material de tubería contiene una rugosidad y genera una pérdida distinta, como así también lo son los accesorios, la pérdida generada por un codo no es la misma que por una válvula de globo o una T, estas pérdidas son consideradas en la ecuación de Bernoulli y la suma de ellas genera la disponibilidad del sistema la cual representa las condiciones mínimas para que el fluido pueda llegar a un destino, este punto tiene como sus coordenadas verticales en $H(m)$ y su coordenadas horizontales en Q , la cual puede ser representada en varias unidades, esta curva de disponibilidad de sistema tiene un comportamiento convexo, y sin dejar de

mencionar el diámetro de la tubería la cual condiciona en gran importancia la exigencia del sistema.

Las curvas de bombas en serie y en paralelo cambian considerablemente con la de una bomba individual, generando así que para un sistema en serie se doble la altura manométrica desarrollada por las bombas, las cuales son planteadas teóricamente y demostrada en los bancos de ensayo.

Las bombas pueden variar su capacidad o curva de máquina característica según sus especificaciones, la primera es el diámetro del rodete, según sea la magnitud del diámetro se verá refleja por la capacidad que tenga la bomba centrífuga en levantar la altura del fluido, pero el diámetro del rodete trabaja en conjunto con las revoluciones que da por minuto el rodete, esta combinación son la velocidad tangencial del rodete y la altura máxima de la bomba, ahora se tiene que considerar que como todo sistema en la realidad conlleva algunas imperfecciones y se generan pérdidas, las cuales son por fricción de rodete y por choque, la ecuación desarrollada queda en función del caudal y tiene un forma cóncava. Esta ecuación es:

$$H_m = \frac{U^2}{2g} - K_r Q^2 - K_c (Q^* - Q)^2 \quad (5)$$

Los bancos de ensayo deben generar una serie de resultados los cuales son obtenidos para una serie de condiciones específicas, en estos resultados, se debe obtener la altura manométrica, el caudal, la potencia hidráulica, la potencia eléctrica, el voltaje con que se trabajó y la eficiencia total del sistema, estos son los parámetros mínimos que debe llevar una tabla de resultados, ya que la función de estos bancos es probar las bombas y medir sus características para así desarrollar un catálogo de fabricante, realizar un practica en una universidad o simplemente comprobar si una bomba será capaz de cumplir con las condiciones que son requeridas para un determinado trabajo.

4.1.2 Descripción de Bancos de ensayo en la actualidad.

EDIBON PBSPB BANCO DE BOMBAS SERIE/PARALELO: El equipo

PBSPC está diseñado para demostrar las ventajas operativas del funcionamiento serie paralelo, según el rendimiento requerido. Este equipo consta de dos bombas centrífugas, un depósito de suministrado de agua, tuberías de circulación, válvulas de regulación tres sensores de presión y un sensor de caudal. (Ver figura 12, página 32).

EDIBON PBSPC BANCO DE BOMBAS SERIE/PARALELO CONTROLADO DESDE COMPUTADOR (PC), CON SCADA: El equipo PBSPC está diseñado para demostrar las ventajas operativas del funcionamiento serie paralelo, según el rendimiento requerido. Este equipo consta de dos bombas centrífugas, un depósito de suministrado de agua, tuberías de circulación, válvulas de regulación tres sensores de presión y un sensor de caudal.

Este equipo está controlado desde un computador, se suministra con el Sistema de Control desde Computador (SCADA) de EDIBON, e incluye: el propio equipo + una Caja-Interface de Control + una Tarjeta de Adquisición de Datos + Paquetes de Software de Control y Adquisición de Datos, para el control del proceso y de todos los parámetros que intervienen en el proceso. (Ver figura 13, página 33).

4.2 Diseñar un sistema práctico para su uso como banco didáctico computacional

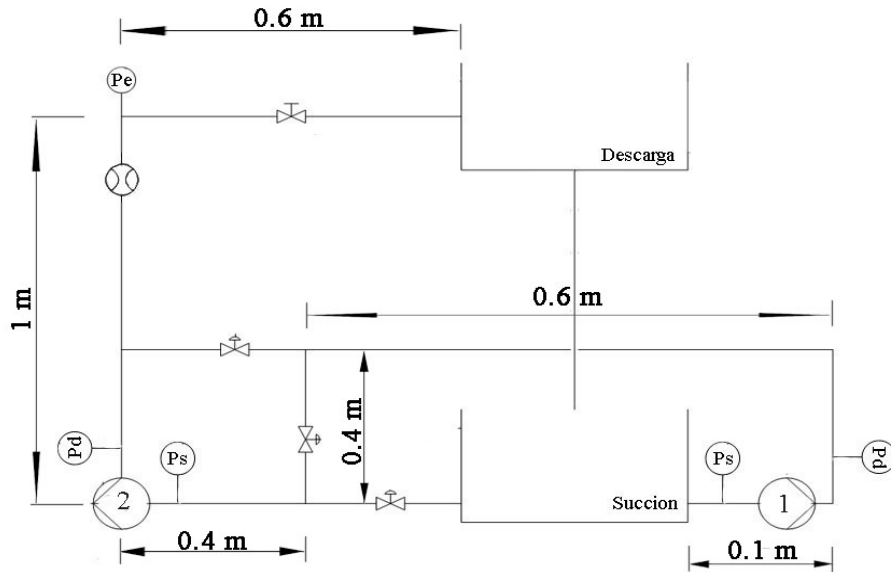
Para diseñar el sistema que se utilizaría para ser simulado, se escogió un banco de pruebas vertical como se muestra en la figura 15 y sus tres sub-sistemas posibles dependiendo de la disposición de las válvulas, que permitirán al banco trabajar con una bomba individual o con arreglos de serie o paralelo. (Ver figura 16)

4.2.1 Parámetros del sistema

- **Tuberías:** Este sistema seleccionado podrá trabajar con cédulas de tubería de 40S y 80S ya que son los más comúnmente usados, además de tener medidas de diámetro acordes con el tamaño y propósito del banco, con diámetros desde $\frac{1}{2}$ pulgada hasta 4 pulgadas.
- **Bombas:** El banco puede trabajar únicamente con un máximo de dos bomba centrífugas que presenten las mismas características, y para estas se

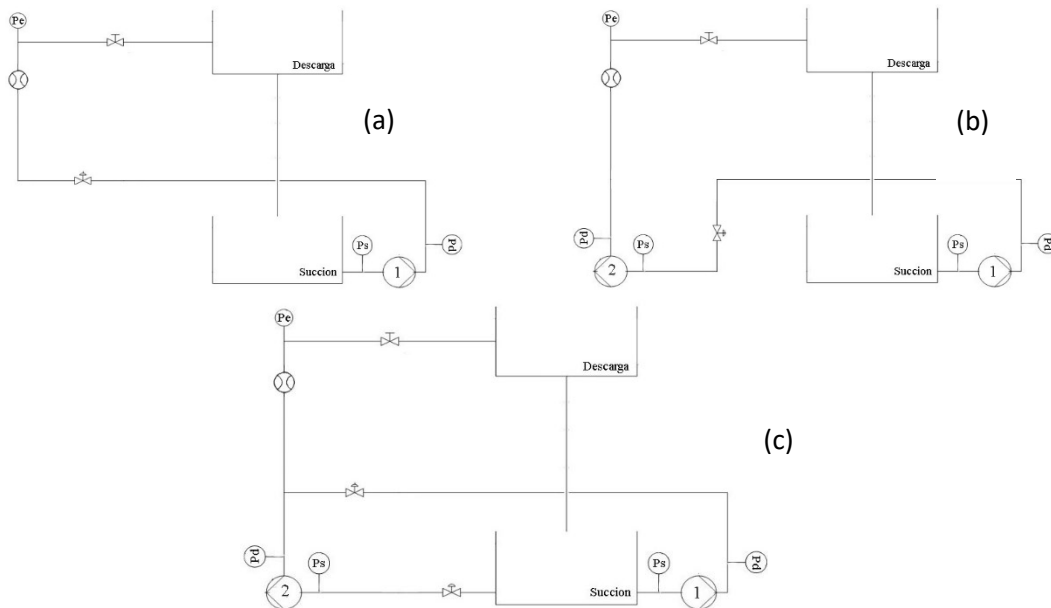
disponen de motores eléctricos que trabajan con 220V y con potencias que van desde 1/4 hp hasta 3 hp, para cada valor de potencia se disponen de motores con velocidades de 850 rpm, 1150 rpm, 1750 rpm y 3600 rpm

Figura 15: Plano del banco de pruebas a simular



Fuente: Mejía, Efrain y Pérez, Luis (2015)

Figura 16: Arreglos de una bomba individual (a), en serie (b) y en paralelo (c)



Fuente: Mejía, Efrain y Pérez, Luis (2015)

- **Tanques:** Los tanques de succión y descarga son iguales y tienen dimensiones de 0,4 metros de ancho, 0,4 metros de alto, las cuales serán las mismas para todos los casos de operación y una profundidad que varía dependiendo del diámetro de la tubería y que permita mantener un nivel óptimo de fluido en los tanques cuando el banco esté en funcionamiento

- **Accesorios:**

- Válvula: tres válvulas que según su configuración determinaran el arreglo de bombas con el que esté trabajando el banco y una válvula de estrangulamiento antes del tanque de descarga que permitirá regular el caudal, todos son valvular de globo
- Codo: dos codos estándar de 90°
- Conexiones en T: tres conexiones en T estándar
- Manómetro: dos ubicados en la descarga de las bombas y uno ubicado en el tramo final antes del tanque de descarga
- Vacuómetro: dos ubicados en la succión de las bombas
- Caudalímetro: un caudalímetro de tipo rotámetro
- Entrada y salida de tubería: ambas con resalte hacia el interior

4.2.2 Parámetros de funcionamiento del sistema

- **Fluido:** El sistema podrá trabajar únicamente con agua y con temperaturas de esta de 0 °C a 101 °C

- **Caudal:** El caudal puede variar según la cédula y el diámetro de la tubería con el que se esté trabajando pero este tendrá un valor máximo para cada caso y será con una velocidad de 2,5 m/s.

$$Q_{max} = 2,5 A \quad (25)$$

$$A = \frac{\pi \Phi^2}{4} \quad (26)$$

Donde Φ es el diámetro interno de la tubería

Tabla 1: caudal máximo para cada diámetro de tubería en $\left(\frac{m^3}{h}\right)$

| Diámetro (pulgadas) | Cédula 40S | Cédula 80S |
|---------------------|------------|------------|
| ½ | 1,7646053 | 1,34614418 |
| ¾ | 3,1172526 | 2,52497461 |
| 1 | 5,00145862 | 4,17393761 |
| 1 ¼ | 8,70858589 | 7,46620875 |
| 1 ½ | 11,8244248 | 10,2608504 |
| 2 | 19,4828288 | 17,1105359 |
| 2 ½ | 27,7887165 | 24,6057966 |
| 3 | 42,8951629 | 38,3944439 |
| 3 1/2 | 57,3829655 | 51,5524308 |
| 4 | 73,9749489 | 66,7830018 |

Fuente: Mejía, Efraín y Pérez, Luis (2015)

4.2.3 Análisis Teórico del sistema diseñado

Se aplicaron las bases teóricas relacionadas con mecánica de fluidos y turbomáquinas que se describen en el capítulo 2 y se obtuvieron los siguientes resultados para los tres casos posibles de operación del banco de pruebas diseñado:

4.2.4 Disponibilidad en la succión de las bombas

- Bomba individual: se utilizó la ecuación (24, página 30) para obtener la disponibilidad en dicho punto

$$H_{s1l} = H_{TS} - h_{fl\ TS-s} - h_{f\ accesorio\ TS-s}$$

Y las ecuaciones (20, página 29) y (21, página 29) para obtener las pérdidas por tubería y accesorios respectivamente

Perdías por Tubería:

$$h_{fl\ TS-s1} = 10,674 L \left(\frac{Q^{1,852}}{C_{HW}^{1,82} D^{4,781}} \right); L = 0.1m$$

$$h_{fl\ TS-s1} = 1,0674 \left(\frac{Q^{1,852}}{C_{HW}^{1,82} D^{4,781}} \right)$$

Perdidas por Accesorio:

$$h_{f\ accesorio\ TS-s1} = h_{f\ entrada} = \frac{8 K Q^2}{\pi^2 g D^4}; \text{ Del apéndice A, } K=0,78$$

$$h_{f\ entrada} = \frac{8 \cdot 0,78 Q^2}{\pi^2 g D^4}$$

Disponibilidad en el punto inicial (tanque de succión), utilizando ecuación (17):

$$H_{TS} = \frac{P_{TS}}{\gamma} + \frac{V^2}{2 \times g} + Z_{TS}; \text{ Con altura del tanque } 0,4 \text{ m lleno hasta un } 80\%, \text{ presión atmosférica y } V = 0 \frac{m^2}{s}$$

$$H_{TS} = 0,32m$$

$$H_{s1I} = 0,32 - 1,0674 \left(\frac{Q^{1,852}}{C_{HW}^{1,82} D^{4,781}} \right) - \frac{6,24 Q^2}{\pi^2 g D^4}$$

Siguiendo este mismo procedimiento se obtuvieron las ecuaciones para los arreglos de serie y paralelo.

- Arreglo en serie

$$H_{s1I} = H_{s1S}$$

$$H_{s2S} = 0,32 - \frac{20.2806 Q^{1,852}}{C_{HW}^{1,82} D^{4,781}} - \frac{(8)(123) f_t Q^2}{\pi^2 g D^4} - \frac{(8)(0,78) f_t Q^2}{\pi^2 g D^4}$$

- Arreglo en paralelo

$$H_{s1P} = 0,32 - 1,0674 \left(\frac{(Q/2)^{1,852}}{C_{HW}^{1,82} D^{4,781}} \right) - \frac{6,24 (Q/2)^2}{\pi^2 g D^4}$$

$$H_{s2P} = 0,32 - \frac{6,4044 \left(\frac{Q}{2}\right)^{1,852}}{C_{HW}^{1,852} D^{4,781}} - \frac{27f_t \left(\frac{Q}{2}\right)^2}{\pi^2 g D^4} - \frac{80,78 \left(\frac{Q}{2}\right)^2}{\pi^2 g D^4}$$

4.2.5 Disponibilidad en la descarga de las bombas

- Bomba individual: se utilizó la ecuación (22) para obtener la disponibilidad en el punto

$$H_{d1I} = H_{TD} + h_{fl\ d-TD} + h_{f\text{accesorio}\ d-TD}$$

Y las ecuaciones (18) y (19) para obtener las pérdidas por tubería y accesorios respectivamente

Perdías por Tubería:

$$h_{fl\ d1-TD} = 10,674 L \left(\frac{Q^{1,852}}{C_{HW}^{1,82} D^{4,781}} \right); L = 2,4 \text{ m}$$

$$h_{fl\ d1-TD} = 25,6176 \left(\frac{Q^{1,852}}{C_{HW}^{1,82} D^{4,781}} \right)$$

Perdidas por accesorio:

$$h_{f\text{accesorio}\ d-TD} = h_{f\ \text{salida}} + h_{f\ \text{codo}}(3) + h_{f\ \text{válvula}}(2); \text{ Del apéndice A}$$

$$K_{\text{salida}} = 1; K_{\text{codo}} = 30f_T; K_{\text{válvula}} = 3f_T$$

$$h_{f\text{accesorio}\ d-TD} = \frac{(8)(1)Q^2}{\pi^2 g D^4} + \left(\frac{(8)(30)f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} \right) (3) + \left(\frac{(8)(3)f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} \right) (2)$$

Aumentando perdidas por accesorio según porcentaje de apertura de válvula estranguladora

$$h_{f\text{accesorio}\ d1-TD} = \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^4} + \left(\frac{768f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} \right) + \left(1 - \frac{\%A}{100} \right) \left(\frac{768f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} \right)$$

Con la ecuación (19, página 28) se obtiene disponibilidad en el punto de llegada (tanque de descarga):

$$H_{TD} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z_1; \text{ Altura del tanque } 0,4 \text{ m lleno hasta un } 80\%, \text{ presión atmosférica}$$

y $V = 0 \frac{m^2}{s}$

$$H_{TD} = 1,32m$$

$$H_{d1I} = 1,32 + 25,6176 \left(\frac{Q^{1,852}}{C_{HW}^{1,82} D^{4,781}} \right) + \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^4} + \left(\frac{768f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} \right) \left(1 - \frac{\%A}{100} \right) \left(\frac{768f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} \right)$$

Siguiendo este mismo procedimiento se obtuvieron las ecuaciones para los arreglos de serie y paralelo.

- Arreglo en serie:

$$H_{d1S} = 1,32 + 38,4264 \left(\frac{Q^{1,852}}{C_{HW}^{1,82} D^{4,781}} \right) + \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^4} + \left(\frac{768f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} \right) + \left(1 - \frac{\%A}{100} \right) \left(\frac{768f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} \right)$$

$$H_{d2S} = 1,32 + 17,0784 \left(\frac{Q^{1,852}}{C_{HW}^{1,82} D^{4,781}} \right) + \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^4} + \frac{264f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} + \left(1 - \frac{\%A}{100} \right) \left(\frac{264f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} \right)$$

- Arreglo en paralelo

$$H_{d1P} = 1,32 + 10,674 \left(\frac{Q^{1,852} + 1,4 \left(\frac{Q}{2} \right)^{1,852}}{C_{HW}^{1,82} D^{4,781}} \right) + \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^4} + \left(\frac{264f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} \right) + \frac{744f_T \left(\frac{Q}{2} \right)^2}{\pi^2 g D^4} + \left(1 - \frac{\%A}{100} \right) \left(\frac{264f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} \right)$$

$$H_{d2P} = 1,32 + 10,674 \left(\frac{Q^{1,852} + 0,4 \left(\frac{Q}{2} \right)^{1,852}}{C_{HW}^{1,82} D^{4,781}} \right) + \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^4} + \frac{297 f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} \\ + \frac{160 f_T \left(\frac{Q}{2} \right)^2}{\pi^2 g D^4} + \left(1 - \frac{\%A}{100} \right) \left(\frac{297 f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} \right)$$

4.2.6 Disponibilidad del sistema

- Bomba individual

La disponibilidad del sistema para este caso será igual a la diferencia entre H_{d1I}

y H_{s1I}

$$H_{sistI} = H_{d1I} - H_{s1I}$$

$$H_{sistI} = 1,32 + 25,6176 \left(\frac{Q^{1,852}}{C_{HW}^{1,82} D^{4,781}} \right) + \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^4} + \left(\frac{768 f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} \right) - 0,32 \\ + 27,7524 \left(\frac{Q^{1,852}}{C_{HW}^{1,82} D^{4,781}} \right) - \frac{(8)(0,78)Q^2}{\pi^2 g D^4} + \left(1 - \frac{\%A}{100} \right) \\ H_{sistI} = 1 + 26,685 \left(\frac{Q^{1,852}}{C_{HW}^{1,82} D^{4,781}} \right) + \frac{1,76Q^2}{\pi^2 g D^4} + \frac{768 f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} \\ + \left(1 - \frac{\%A}{100} \right) \left(\frac{768 f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} \right)$$

Siguiendo este mismo procedimiento se obtuvieron las ecuaciones para los arreglos de serie y paralelo.

- Arreglo en serie:

$$H_{sistS} = 2 + \frac{2524,48 f_t Q^2}{\pi^2 g D^4} + \frac{76,8492 Q^{1,852}}{C_{HW}^{1,852} D^{4,781}} + \frac{1,76 Q^2}{\pi^2 g D^4} + \left(1 - \frac{\%A}{100} \right) \frac{2524,48 f_t Q^2}{\pi^2 g D^4}$$

- Arreglo en paralelo:

$$H_{sistP} = 0,68 + \frac{f_t \left(35Q^2 + 1174,4 \left(Q/2 \right)^2 \right)}{\pi^2 g D^4} + \frac{\left(18,148Q^2 + 29,887 \left(Q/2 \right)^{1,852} \right)}{C_{HW}^{1,852} D^{4,781}}$$

$$+ \frac{(16)(0,78) \left(Q/2 \right)^2}{\pi^2 g D^4} + \left(1 - \frac{\%A}{100} \right) \frac{18,148 f_t Q^2}{\pi^2 g D^4} + \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^4}$$

4.3 Elaborar el algoritmo para el cálculo de las variables y condiciones de operación del sistema seleccionado.

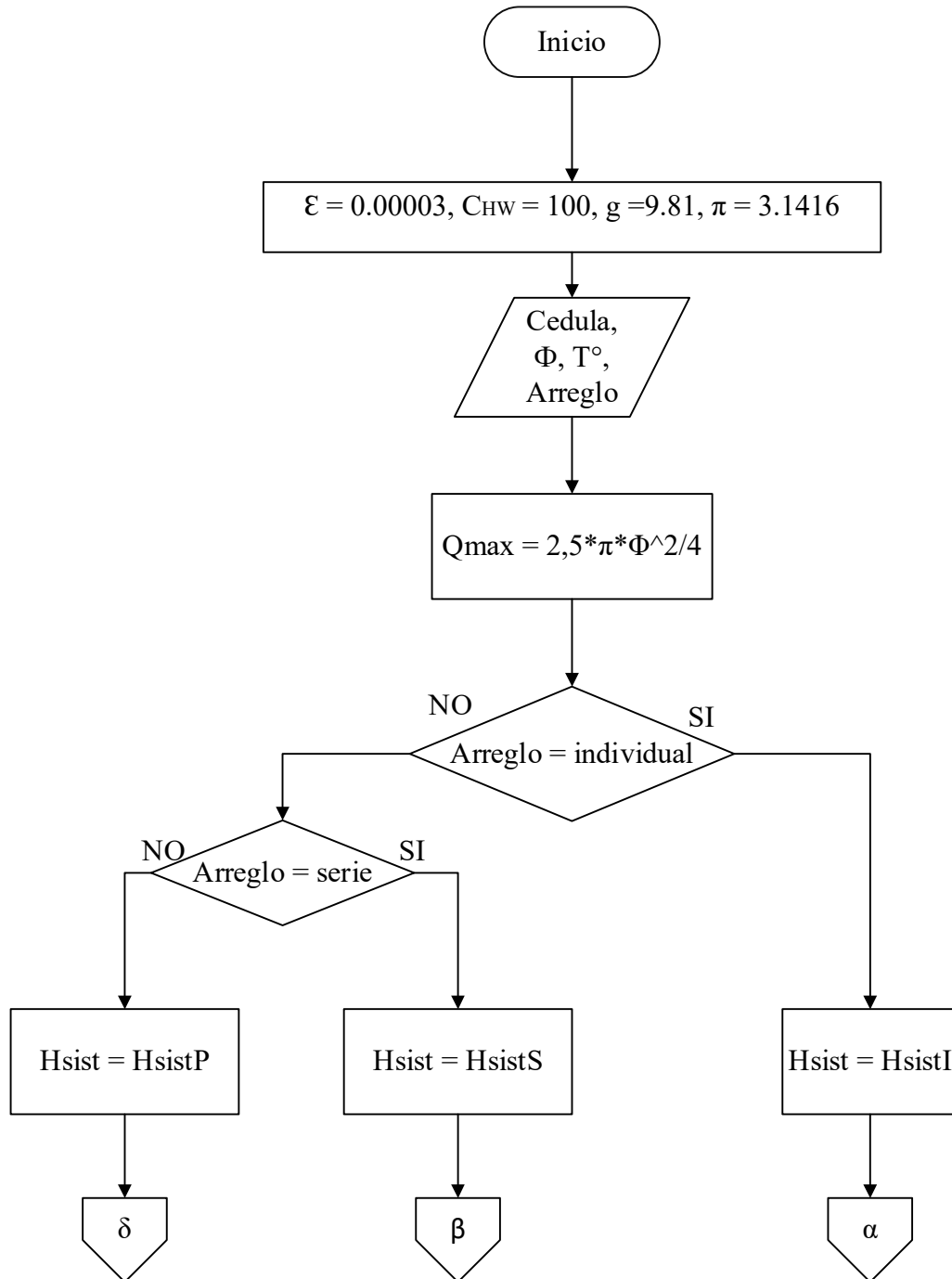
Antes de comenzar con la etapa de programación, es necesario elaborar el algoritmo donde se plantea la secuencia de los cálculos que se van a realizar para llevar a cabo una simulación exitosa, estos se muestran de forma gráfica de acuerdo a la simbología mostrada en el anexo B.

Este programa permite calcular todas las variables presentes en un determinado punto de trabajo para una determinada bomba trabajando bajo unas condiciones escogidas en el sistema que ya se diseñó. El algoritmo realizado para la simulación se observa en la figura 17

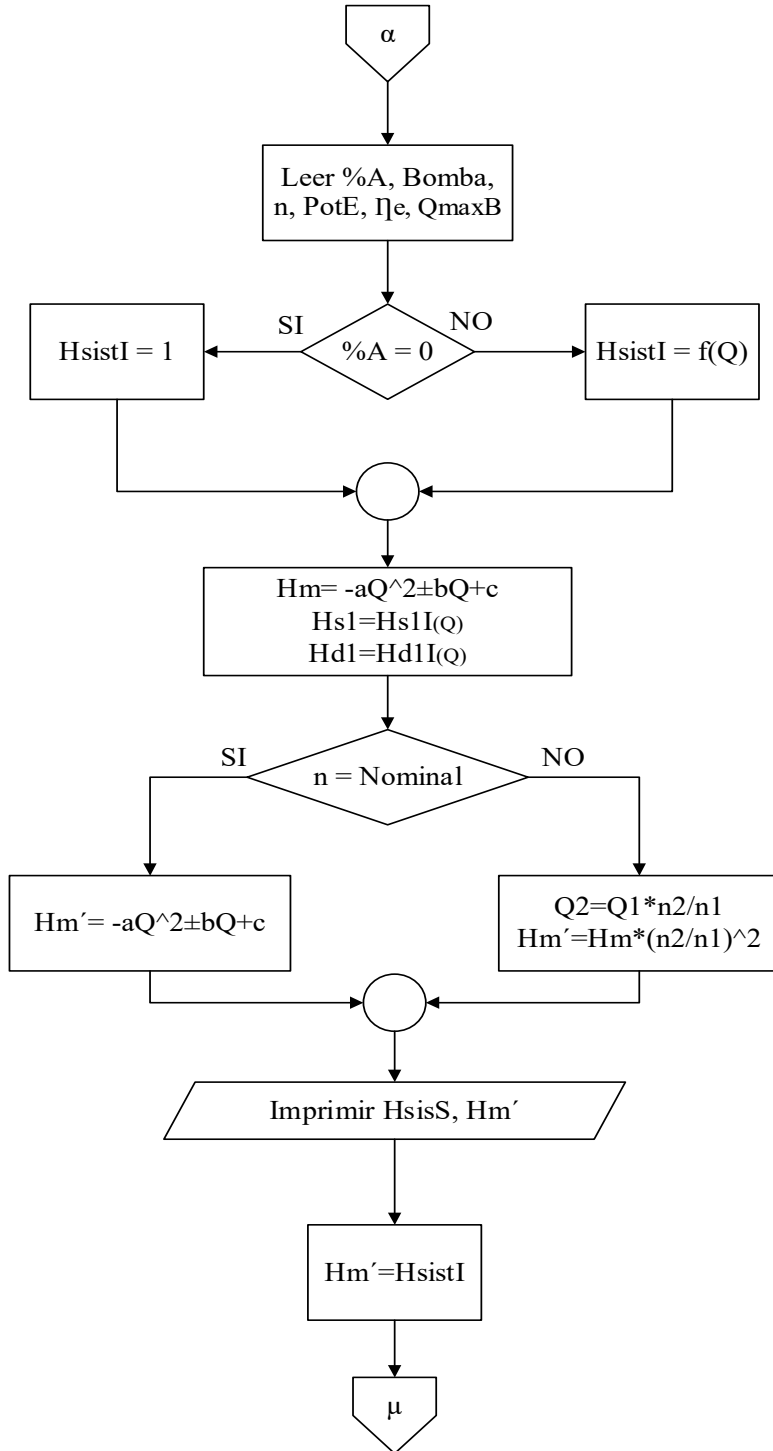
Entrada: Factor de rugosidad del material de la tubería, Coeficiente de HAZEN-WILLIAMS, Cédula de la tubería, diámetro de la tubería, temperatura del agua y arreglo del sistema

Salida: Presiones de succión y descarga de ambas bombas, potencia hidráulica de la(s) bomba(s), caudal de trabajo, altura de trabajo y rendimiento de la(s) bomba(s)

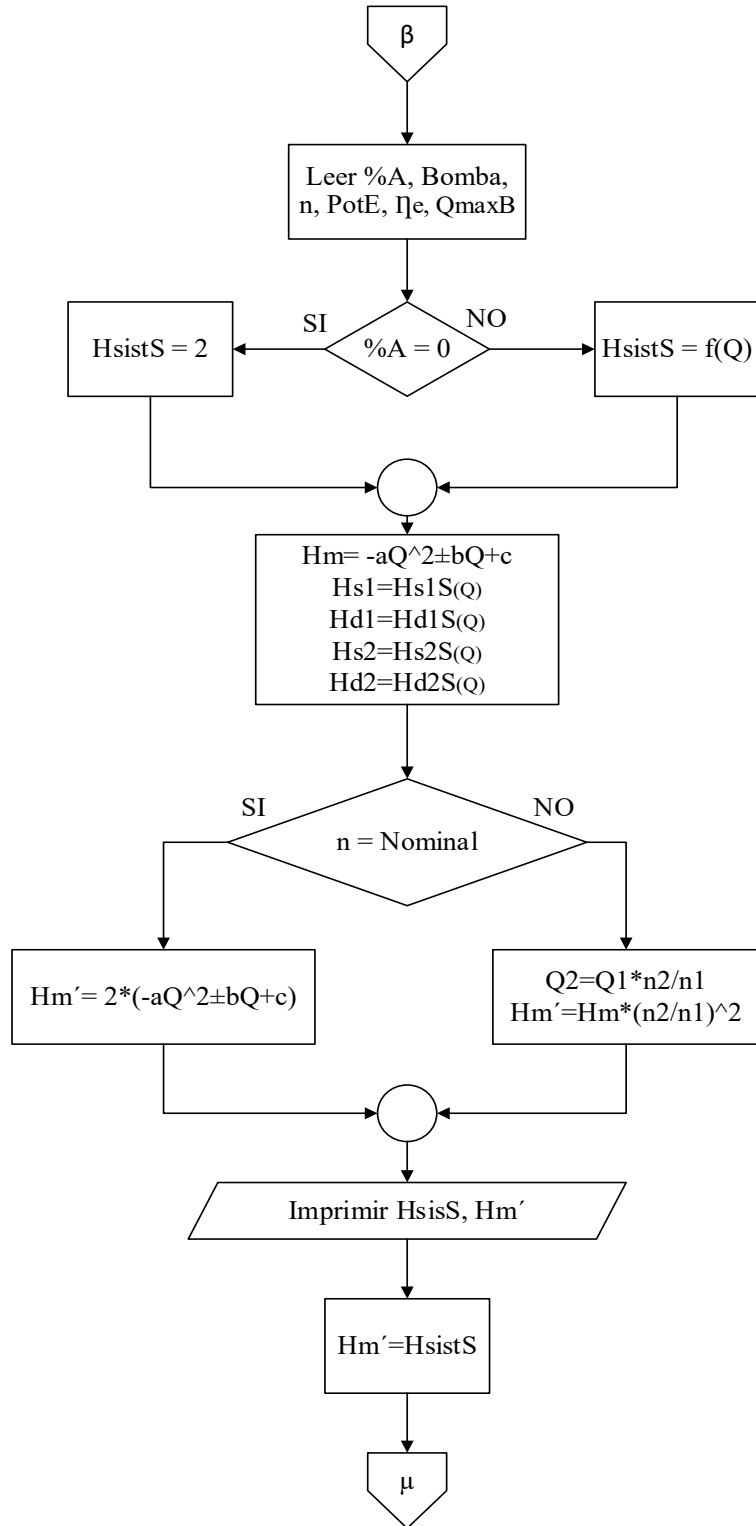
Figura 17: algoritmo de cálculo del programa



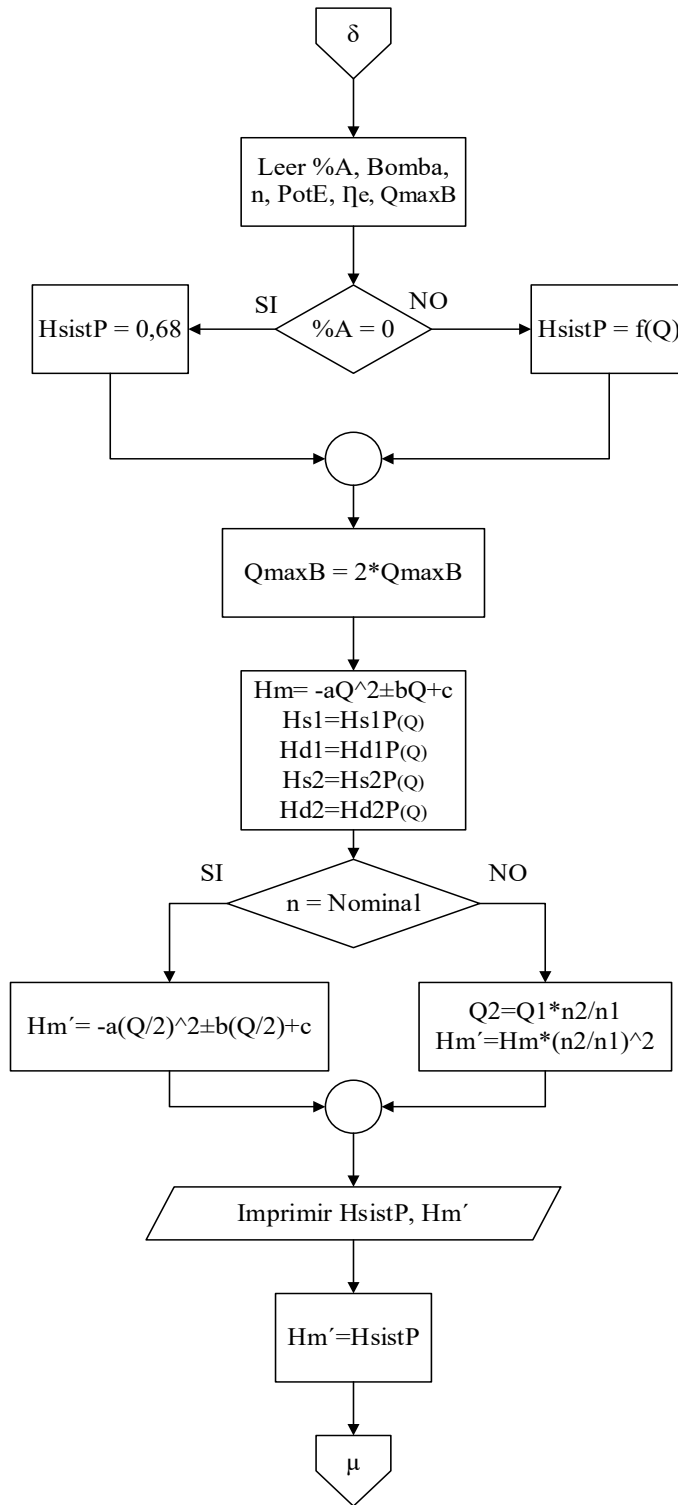
Continuación figura 17



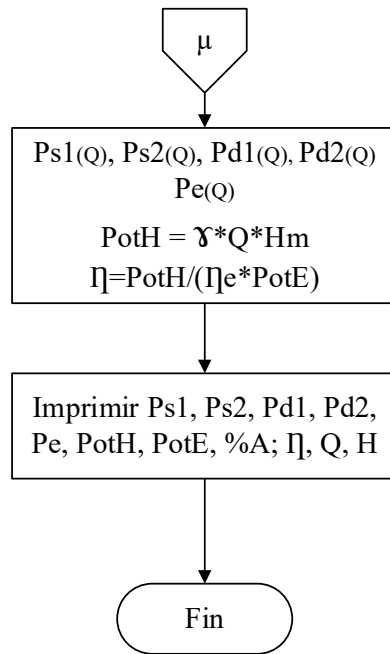
Continuación figura 17



Continuación figura 17



Continuación figura 17



Fuente: Mejía, Efraín y Pérez, Luis (2015)

4.4 Desarrollar el programa computacional y la interfaz de usuario.

El programa se basa en crear un ambiente de trabajo simple y sencillo que permita al usuario manejar y realizar las funciones principales del programa de manera fácil y rápida, haciendo que la experiencia en SIMULEB facilite el aprendizaje y entendimiento del comportamiento de bombas centrífugas bajo diferentes condiciones, las cuales el usuario podrá modificar según su necesidad.

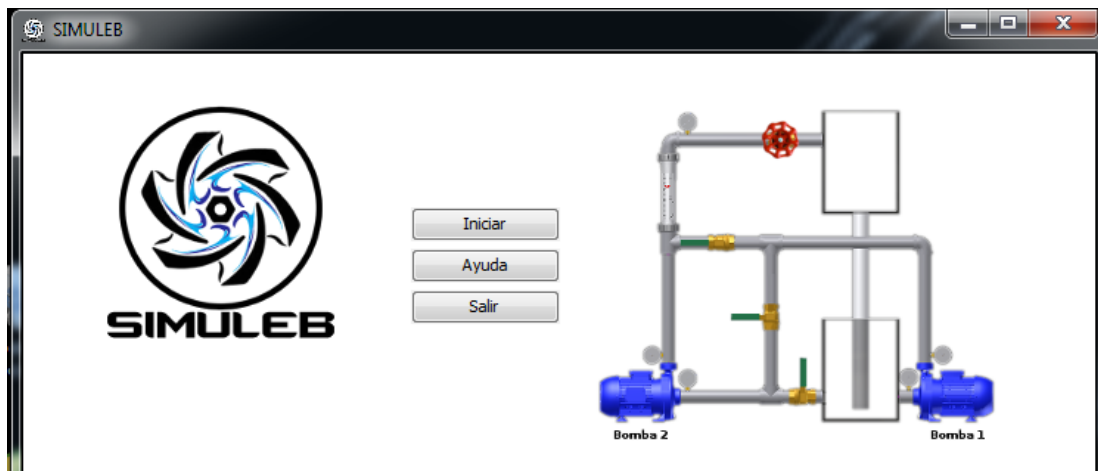
Para desarrollar la interfaz de usuario se tomaron en cuenta ciertos atributos que según la norma ISO 9126 un software debe tener para que la experiencia en este sea agradable, algo que es de suma importancia para uno como este ya que su finalidad es didáctica y educativa.

4.4.1. Menú principal

Se muestra en la figura 18 y es la ventana que se muestra al ejecutar el programa, en esta ventana se observa el banco de pruebas que se está simulando y tres botones que son:

- Iniciar: al hacer clic en este botón abrirá la ventana principal de SIMULEB y donde se realizara la simulación del banco.
- Ayuda: al hacer clic en este botón se mostraran dos opciones, que son: “tutorial”, en la que se abre un documento PDF con un ejemplo como utilizar el programa y “manual”, en la que se abre un documento PDF con el manual del programa.
- Salir: para salir del programa.

Figura 18: Menú principal de SIMULEB



Fuente: Mejía, Efraín y Pérez, Luis (2015)

Codificación de la ventana:

```
private void crearVentana() {
    Ventana ventana = new Ventana();

    this.framePrincipal.setContentPane(ventana.contenedor);
    this.framePrincipal.setJMenuBar(ventana.menuBar);
    this.framePrincipal.pack();
    ventana.framePrincipal = this.framePrincipal;
}
```

4.4.2. Ventana Principal

Esta es la ventana en la que el usuario tendrá todas las herramientas para desarrollar toda la simulación, con una interfaz sencilla y fácil de utilizar. Se muestran

en la figuras 19 y 20 la ventana principal de SIMULEB dividida en dos mitades, en la mitad izquierda de esta ventana se encuentran tres secciones que son:

- Arreglo del sistema y selección de bombas
- Visualización del sistema
- Sistema

En la mitad derecha de la ventana se muestran dos secciones únicamente informativas y en donde el usuario no realizará ninguna acción que afecte la simulación y son:

- Graficas
- Resultados

4.4.3 Sección de configuración sistema

Está dividida en dos pestañas, que son: “Arreglo del sistema” y “Selección de Bomba”. Con las cuales se puede configurar el banco que se desee simular.

- **Arreglo del sistema:** Se observa en la figura 21. Es la pestaña que por defecto esta seleccionada al ejecutar el simulador, y donde el usuario introduce las características el banco de pruebas y son:
 - Selección de arreglo
 - Selección de temperatura del agua
 - Selección de cédula y diámetro de la tubería
 - Regulación del porcentaje de apertura de la válvula de estrangulamiento

Codificación de la sección:

```
comboArreglo.setModel(SistemaBase.getModel());  
comboCedulas.setModel(Cedulas.getModel());  
comboBoxBombas.setModel(Bomba.getModel());
```

- **Selección de bombas:** Se observa en la figura 22. En esta pestaña se realizan dos funciones del programa relacionadas con las bomba que va a utilizar el banco, una es la selección de la bomba con la que se va a trabajar y que se

escoge de una lista ya cargada en el programa o agregar una bomba nueva al programa

Codificación de la sección:

```
ArrayList<Bomba> bombas = new ArrayList<>();  
bombas.addAll(Arrays.asList(Bomba.bombas));  
bombas.add(bomba);
```

4.4.4 Sección de Graficas

Esta sección esta dividía por dos pestañas de “punto de trabajo” que esta seleccionada por defecto en el programa y en donde se mostraran las curvas de la bomba y del sistema en H(m.c.a.) vs Q(m³/h), y la pestaña de “rendimiento” donde se muestra la curva del rendimiento total de la bomba en % vs Q(m³/h)

Codificación de la sección:

```
int cantValoresHs = 1 + (int)(Caudal.VMAX / precisionGrafica);  
double[] hsx = new double[cantValoresHs];  
double[] hsy = new double[cantValoresHs];
```

4.4.5 Sección de visualización del sistema y sistema

Aquí se muestra la imagen del banco en su estado actual dependiendo de como se hayan llenado los campos anteriores, mostrando la disposición de las válvulas y recorrido del flujo por la tubería para cada arreglo y se encuentra también un pequeño panel donde se muestra el nombre de la bomba que se esta utilizando y las RPM de estas, con la opción de seleccionar una velocidad distinta de una lista, y por últimos los botones de “calcular” con el que se llenara la tabla de resultados y “exportar resultdos” con el que se exportaran los resultados que se muestren actualmente en la tabla a Excel.

Codificación de la sección:

```
Grafica grafica = new Grafica(sistema, jpanelGraficaHmHs);  
grafica.renderHmVsHsist(calcular);  
for (Object[] data : dataTablaArr) {  
    for (Object d : data) {  
        body += d.toString().replace(':', ',') + " ";  
    }  
}
```

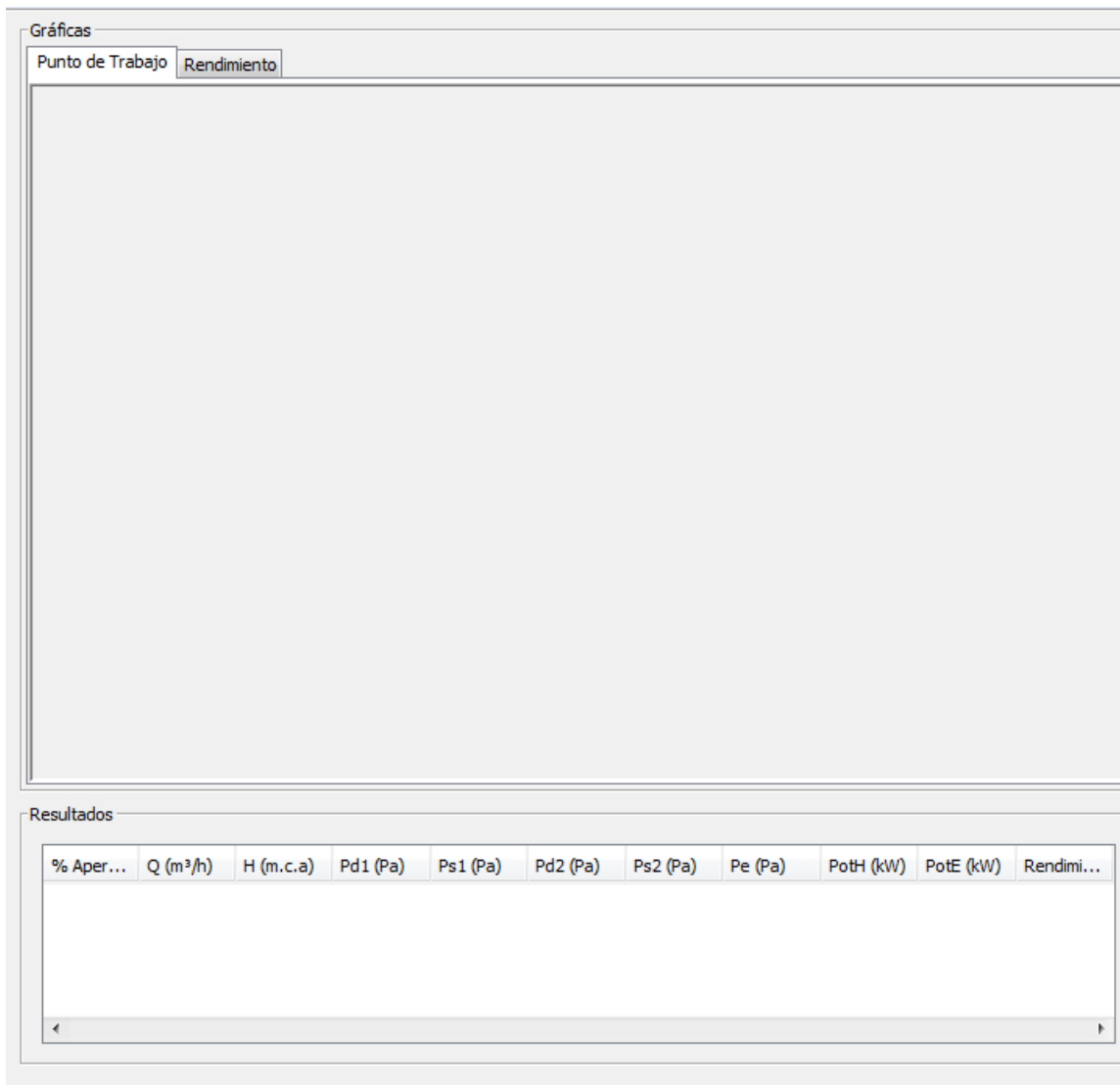
4.4.6 Sección de resultados

En esta sección se muestra una tabla donde el programa arroja los valores de todas las variables que se calculen para un determinado punto que este siendo simulado en el programa.

Codificación de la sección:

```
tableResultados.setModel(new CustomTableModel(dataTablaArr.toArray(new  
Object[dataTablaArr.size()][]));
```

Figura 19: Ventana principal de SIMULEB (mitad derecha)



Fuente: Mejía, Efrain y Pérez, Luis (2015)

Figura 20: Ventana principal de SIMULEB (mitad izquierda)

Arreglo del Sistema Selección de Bombas

⚙️ Arreglo

Bomba Individual

🌡️ Ajuste la Temperatura del Agua (°C)

0 25 50 75 100 25 °C

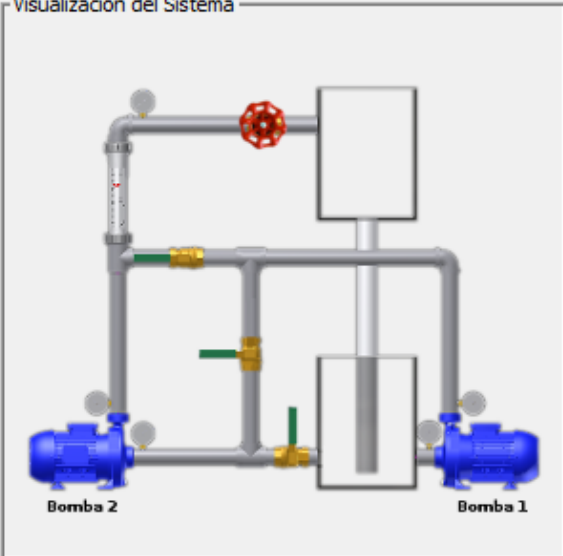
📏 Cédula de la tubería 📏 Diámetro de la tubería

Seleccione la cédula de la tubería

🚪 Porcentaje de apertura de la válvula

0 25 50 75 100 100%

Visualización del Sistema



Sistema

Configuración de la bomba actual

🔴 Bomba

⚙️ Ajustar RPM

Acciones

Fuente: Mejía, Efrain y Pérez, Luis (2015)

Figura 21: Arreglo del sistema

The screenshot shows the 'Arreglo del Sistema' software interface with the 'Selección de Bombas' tab active. The 'Arreglo' section is set to 'Bomba Individual'. The water temperature is set to 25 °C on a slider from 0 to 100. The pipe schedule is set to 'Seleccione la cédula de la tubería' and the pipe diameter is also set to 'Seleccione la cédula de la tubería'. The valve opening percentage is set to 100% on a slider from 0 to 100.

Fuente: Mejía, Efrain y Pérez, Luis (2015)

Figura 22: Selección de bombas

The screenshot shows the 'Selección de Bombas' software interface with the 'Selección de Bombas' tab active. The 'Bomba' section is set to 'Bomba'. The 'Agregar una nueva bomba' section contains the following fields: 'Nombre de la bomba' (text input), 'Potencia Eléctrica (HP)' (dropdown menu), 'Revoluciones por Minuto (RPM)' (dropdown menu), 'Coeficientes (aQ² + bQ + c)' with sub-fields for 'a', 'b', and 'c', and 'Caudal Máximo (m³/h)' (text input). An 'Agregar Bomba' button is located at the bottom of the section.

Fuente: Mejía, Efrain y Pérez, Luis (2015)

4.4.7 Validación de software.

4.4.7.1. Comparación de Resultados.

- Datos de la experiencia.

Tabla 2: Datos de experiencia para comprobación

| Arreglo de bombas | Temperatura del fluido | Cédula de tubería | Diámetro de tubería | Apertura de válvula: | Bomba | RPM |
|--------------------|------------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|------|
| Bomba individual 1 | 27°C | 40S | 1" | 100% | KSB MEGACHEM 32-125.1 | 1700 |

Fuente: Mejía, Efraín y Pérez, Luis (2015)

- Procedimiento de experiencia.

$$H_{sist1} = 1 + 26,685 \left(\frac{Q^{1,852}}{C_{HW}^{1,82} D^{4,781}} \right) + \frac{1,76Q^2}{\pi^2 g D^4} + \frac{768f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} + \left(1 - \frac{\%A}{100} \right) \left(\frac{768f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} \right)$$

$$H_m = -(0,0268)Q^2 + (0,053)Q + 4,2988$$

$$Q = 6,34 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$H = 3,557 \text{ m.c.a.}$$

$$P_{s1} = \left[0,32 - 1,0674 \left(\frac{Q^{1,852}}{C_{HW}^{1,82} D^{4,781}} \right) - \frac{14,24Q^2}{\pi^2 g D^4} \right] \gamma = - 2.587,46\text{Pa}$$

$$P_{d1} = \gamma H_m + P_{s1} = 32.187,7 \text{ Pa}$$

$$P_e = \left[0,32 + 6,404 \left(\frac{Q^{1,852}}{C_{HW}^{1,82} D^{4,781}} \right) + \left(\frac{264f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} \right) + \left(1 - \frac{\%A}{100} \right) \left(\frac{264f_T Q^2}{\pi^2 g D^4} \right) \right] \gamma =$$

$$P_e = 5.327,4\text{Pa}$$

$$POT_H = \gamma QH = 0,065\text{KW}$$

- **Comparación de resultados.**

Tabla e: comparación de resultados

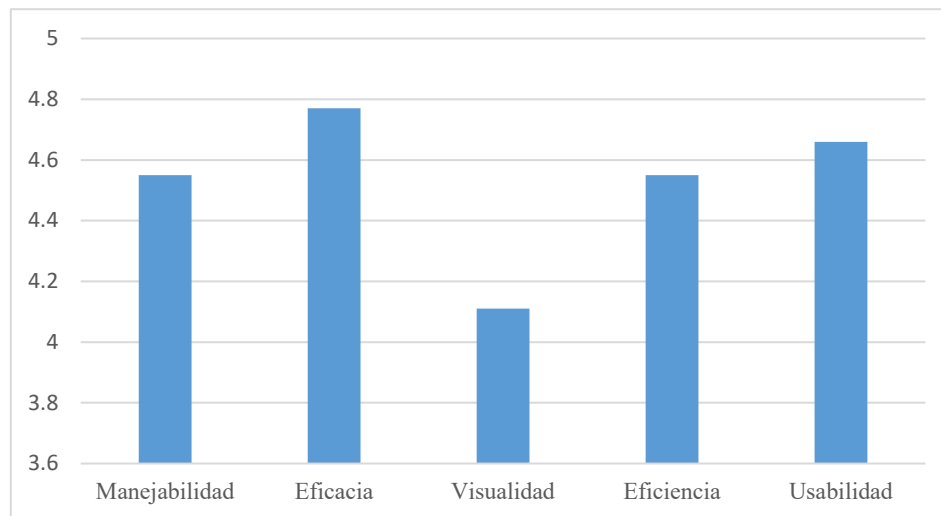
| | Cálculos | Programa | %Er |
|----------------------------|-----------------|-----------------|------------|
| Q(m³/h) | 6,34 | 6,328 | 0,24% |
| H (m.c.a.) | 3,557 | 3,562 | 0,14% |
| P_{s1}(Pa) | - .2587,46 | - .2523,488 | 2,47% |
| P_{d1}(Pa) | 32.187,7 | 32.299,361 | 0,35% |
| P_e(Pa) | 5.327,4 | 5.301,127 | 0,49% |
| POT_H(KW) | 0,065 | 0,061 | 0.00% |

Fuente: Mejía, Efrain y Pérez, Luis (2015)

4.4.7.2. Encuesta de experiencias.

Se realizó una encuesta a nueve estudiantes de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad José Antonio Páez, con conocimientos en la cátedra de turbomaquinas, en la que se le pidió su apreciación en diferentes aspectos de SIMULEB, luego de haber utilizado el software por primera vez, obteniendo los resultados que se observan en la figura 25.

Figura 23: Grafica de resultados de encuesta.



Fuente: Mejía, Efrain y Pérez, Luis (2015)

4.5 Hacer una guía práctica y un manual de uso del simulador.

4.5.1 Guía práctica

Se diseñó una guía práctica en la que se puedan utilizar todas las funciones que SIMULEB puede realizar para los distintos casos, y que además mejore y facilite el aprendizaje del funcionamiento de las bombas de presión dinámica para cualquier persona que quiera que lo desee, especialmente para los alumnos de la cátedra de Turbomáquinas, los cuales podrán observar mediante la realización de esta práctica como varía el punto de trabajo de las bombas según las condiciones escogidas

La práctica consta de tres experimentos en los que se trabaja con los distintos arreglos de las bombas y en los que se muestra al estudiante de una manera más práctica lo que se aprende teóricamente sobre las bombas centrífugas en la cátedra de turbomáquinas, lo que es uno de los propósitos principales del simulador.



UNIVERSIDAD JOSE ANTONIO PAEZ
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
GUIA DE PRÁCTICAS



Profesor: **GRUBER CARABALLO.**
Asignatura: **Turbomáquina**

Realizado por:
Mejía R. Efrain D.
Pérez M. Luis

Objetivos:

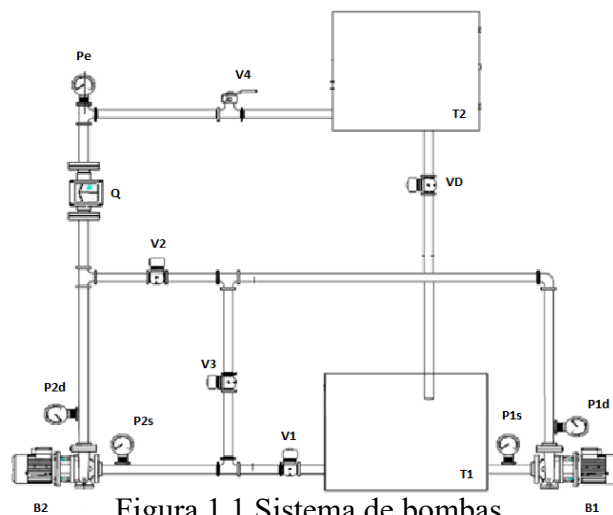
Objetivo Generales:

- Conocer el funcionamiento y características inherentes de una bomba centrífuga

Objetivos Específicos:

- Asegurar que el usuario comprenda las unidades medidas y las variables necesarias a calcularse para el funcionamiento de la bomba centrífuga.
- Reconocer y utilizar los conceptos fundamentales necesarios para determinar experimentalmente los parámetros que convencionalmente se emplean para describir y evaluar el comportamiento de estas máquinas ante la gama de condiciones a que están sometidas normalmente.
- Obtener las curvas disponibilidad-caudal para la bomba centrífuga en distintos rangos de velocidad.
- Predecir las curvas disponibilidad-caudal de la bomba con el uso de las leyes de semejanza a partir de una velocidad conocida.
- Obtener el punto de operación de la bomba a una velocidad determinada
- Analizar los resultados obtenidos por el software.

Práctica: BANCO DE PRUEBA DE BOMBAS EN SERIE O EN PARALELO



Elementos del sistema:

B1: Bomba 1

B2: Bomba 2

P1s: Vacuómetro a la succión de la bomba 1

P1d: manómetro a la descarga de la bomba 1

P2s: Vacuómetro a la succión de la bomba 2

P2d: manómetro a la descarga de la bomba 2

T1: tanque 1

T2: tanque 2

V1: válvula de globo 1

V2: válvula de globo 2

V3: válvula de globo 3

V4: válvula de globo 4

Vd: válvula de globo de descarga al tanque 1

Q: rotámetro

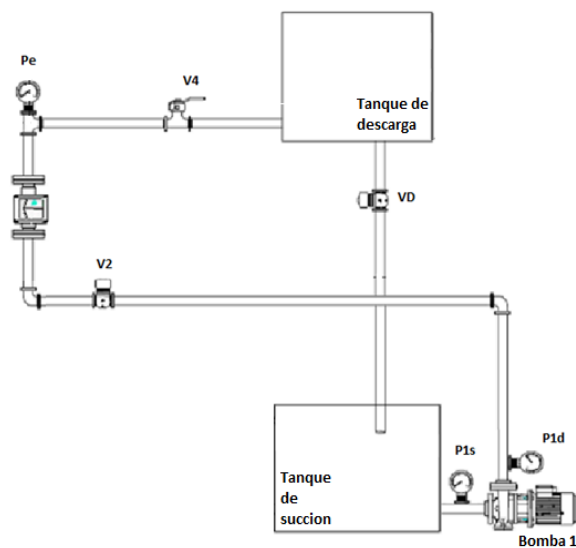


Figura 1.2 Arreglo de una sola bomba

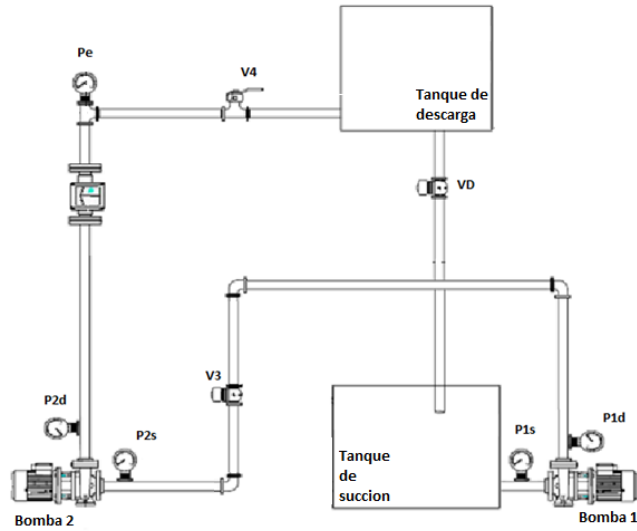


Figura 1.3 Arreglo de bombas en serie

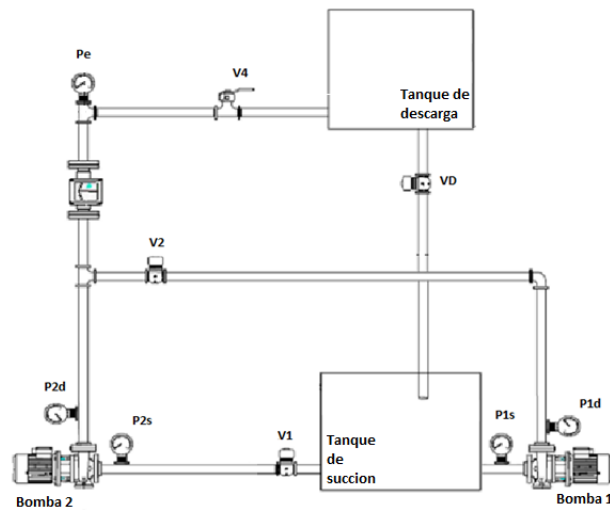


Figura 1.4 Arreglo de bombas en paralelo

Conceptos y ecuaciones aplicables:

1. Potencia eléctrica consumida por cada motor eléctrico (CC)

$$Pot_e = V \times I$$

2. Carga total (diferencia de presión total o energía específica) producida por una bomba o de un sistema de bombas (serie o paralelo).

$$\Delta H_t = \frac{\Delta P_t}{\gamma} = \frac{(P_d - P_s)}{\gamma} + \frac{(V_d^2 - V_s^2)}{2g}$$

3. Potencia hidráulica transferida al fluido

$$Pot_H = \gamma QH$$

4. Eficiencia total de una motobomba o de un sistema de motobombas

$$\eta = \frac{Pot_H}{Pot_E \eta_e}$$

5. Características teóricas de un sistema de bombas en serie

$$\Delta H_{ts} = \Sigma \Delta H_{ti}; \quad Q_s = Q_i; \quad \eta_s = \frac{\Sigma Pot_H}{\Sigma Pot_E \times \eta_e}$$

6. Características teóricas de un sistema de bombas en paralelo

$$\Delta H_{tp} = \Delta H_{ti}; \quad Q_p = \Sigma Q_i; \quad \eta_s = \frac{\Sigma Pot_H}{\Sigma Pot_E \times \eta_e}$$

Procedimiento experimental:

Práctica numero 1: dos bombas en Serie

1. Fijar el banco para trabajar con arreglo de bombas en serie
2. Cerrar válvula 4
3. Seleccionar Bombas
4. Seleccionar RPM a la que se va a trabajar
5. Tomar medidas de los manómetros P1s, P1d, P2s, P2d y Pe
6. Tomar medidas de corriente
7. Tomar medidas de caudal con el caudalímetro
8. Regular caudal con la válvula 4 abriendo en intervalos de 10%
9. Repita el procedimiento desde el paso 6 hasta tener la válvula 4 completamente abierta

Práctica numero 2: 2 bombas en Paralelo

1. Fijar el banco para trabajar con arreglo de bombas en paralelo

2. Cerrar válvula 4
3. Seleccionar Bombas
4. Seleccionar RPM a la que se va a trabajar
5. Tomar medidas de los manómetros P1s, P1d, P2s, P2d y Pe
6. Tomar medidas de corriente
7. Tomar medidas de caudal con el caudalímetro
8. Regular caudal con válvula 4 abriendo en intervalos de 10%
9. Repita el procedimiento desde el paso 6 hasta tener la válvula 4 completamente abierta

Práctica número 3: Bomba con diferentes RPM

1. Fijar el banco para trabajar con una bomba individual
2. Cerrar Válvula 4
3. Seleccionar Bomba
4. Fijar velocidad en 850 RPM
6. Tomar medidas de los manómetros P1s, P1d y Pe
7. Tomar medidas de corriente
8. Tomar medidas de caudal con el caudalímetro
9. Regular caudal con válvula 4 abriendo en intervalos de 10%
10. Repita el procedimiento desde el paso 6 hasta tener la válvula 4 completamente abierta
11. Repita el procedimiento desde el punto número 5 variando las RPM con valores de 1150, 1750 y 3500

Tablas de datos:

Velocidad de Operación: _____ RPM (serie y paralelo)

Cédula:

| | | | | | | | | | | | | |
|------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 20% | | | | | | | | | | | | |
| 30% | | | | | | | | | | | | |
| 40% | | | | | | | | | | | | |
| 50% | | | | | | | | | | | | |
| 60% | | | | | | | | | | | | |
| 70% | | | | | | | | | | | | |
| 80% | | | | | | | | | | | | |
| 90% | | | | | | | | | | | | |
| 100% | | | | | | | | | | | | |

3. Sistema de una sola bomba

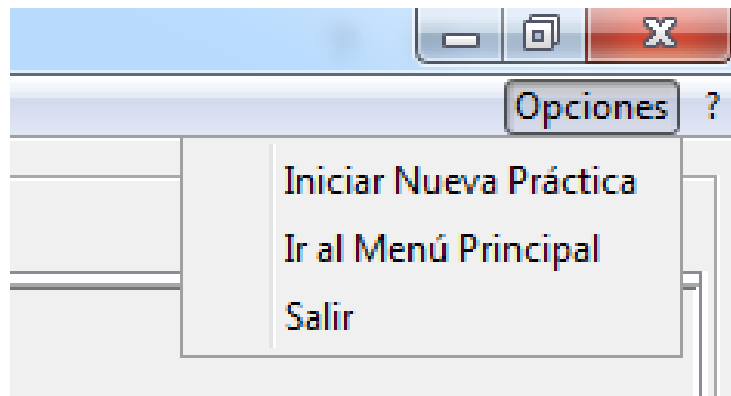
| Apertura de la válvula | P1s (Pa) | P1d (Pa) | Pe (Pa) | Q (m^3/h) | V (volt) | I (amp) | Potencia Eléctrica (Kw) | Potencia Hidráulica (Kw) | Rendimiento (%) |
|------------------------|----------|----------|---------|---------------|----------|---------|-------------------------|--------------------------|-----------------|
| 0% | | | | | | | | | |
| 10% | | | | | | | | | |
| 20% | | | | | | | | | |
| 30% | | | | | | | | | |
| 40% | | | | | | | | | |
| 50% | | | | | | | | | |
| 60% | | | | | | | | | |
| 70% | | | | | | | | | |
| 80% | | | | | | | | | |
| 90% | | | | | | | | | |
| 100% | | | | | | | | | |

Velocidad de Operación: _____RPM

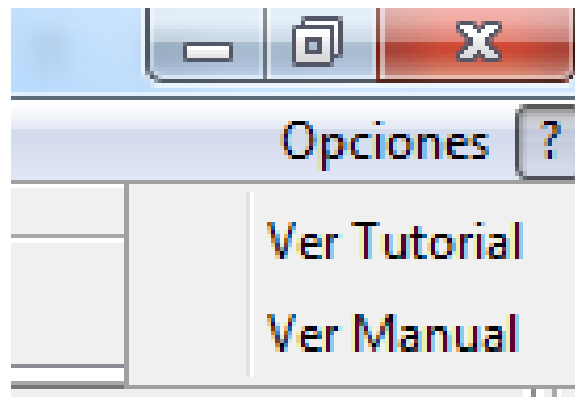
4.5.2 Manual de usuario

Manual de usuario de SIMULEB (Simulador Educativo para Bombas Centrifugas)

- Menús del Programa: ubicados en la barra de menú
 - Opciones: muestra una lista de acciones

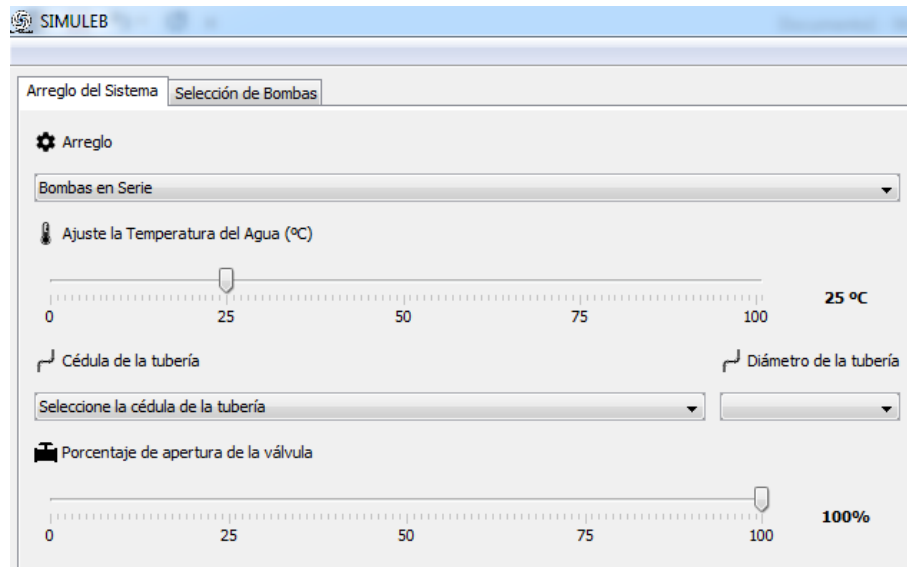


- Iniciar nueva practica, para regresar el simulador a su estado inicial para borrar todos los datos y empezar de nuevo
 - Ir al menu principal, para volver al menu inicial del programa y salir de la practica
 - Salir, para cerrar el programa
- ? (ayuda): muestra las opciones de ayuda para el usuario



- Ver tutorial: Para abrir el tutorial del programa
- Ver Manual: Para abrir el manual del programa

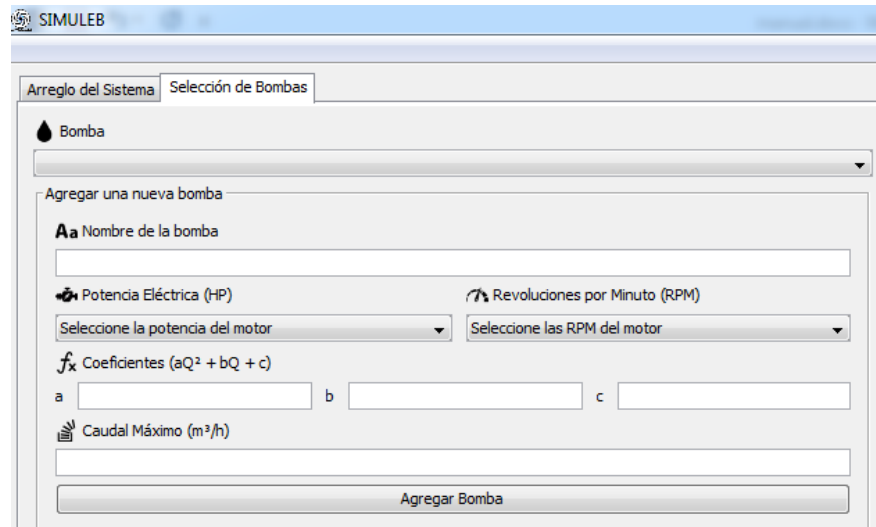
- Arreglo del Sistema



En esta pestaña se establecen las características del banco que son:

- Arreglo: el arreglo de las bombas que se desea simular (bomba individual, bombas en paralelo, bombas en serie)
- Temperatura del agua: donde se escoge la temperatura del agua con la que se va a trabajar en °C
- Cedula de la tubería: Se selecciona la cedula de la tubería entre 40S y 80S
- Diámetro de la tubería: se habilita luego de haber escogido previamente la cedula de la tubería, se cuenta con diámetros desde ½ pulgada hasta 3 pulgadas, y se muestre entre paréntesis el diámetro interior de la tubería.
- Apertura de la válvula: para fijar la apertura de la válvula en valores porcentuales desde 0% a 100%

- Selección de Bombas




En esta pestaña se puede desplegar una lista de bombas cargadas en el programa, o se puede agregar una bomba para incorporarla a la lista de bombas que se pueden simular en el banco.

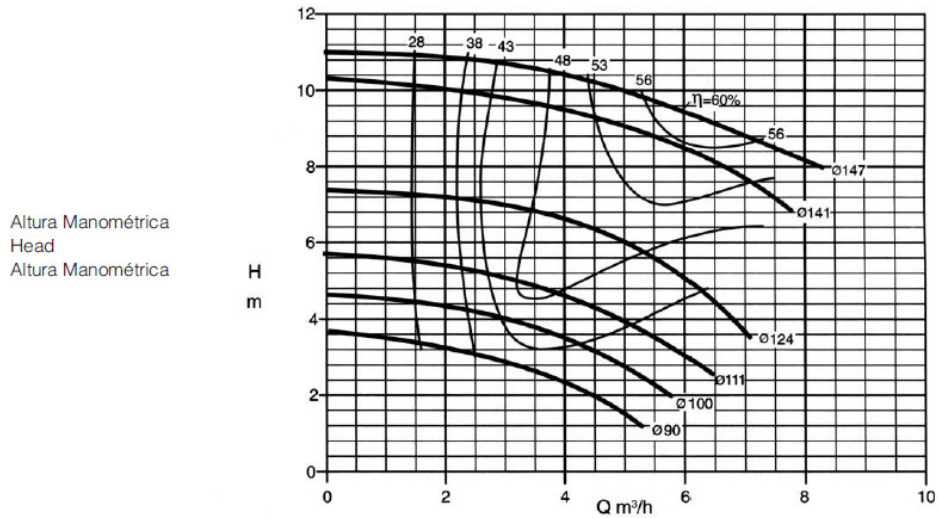
Para agregar una bomba se deben llenar todos los campos de esta sección y que son:

- Nombre de la bomba: se introduce el nombre de la bomba que se va a agregar
- Se indican las especificaciones del motor: potencia y RPM
- Se introducen los coeficientes que dan forma la curva de la bomba
- Se indica el caudal máximo en m^3/h
- Por último se hace clic en agregar bomba para añadirla a la lista de bombas del programa

Para obtener los coeficientes de la ecuación cuadrática $aQ^2 + bQ + c$, a través de los cuales se podrá agregar una nueva bomba a programa, se deben realizar los siguientes pasos:

- Seleccionar la bomba que se va a agregar al programa en un catalogo

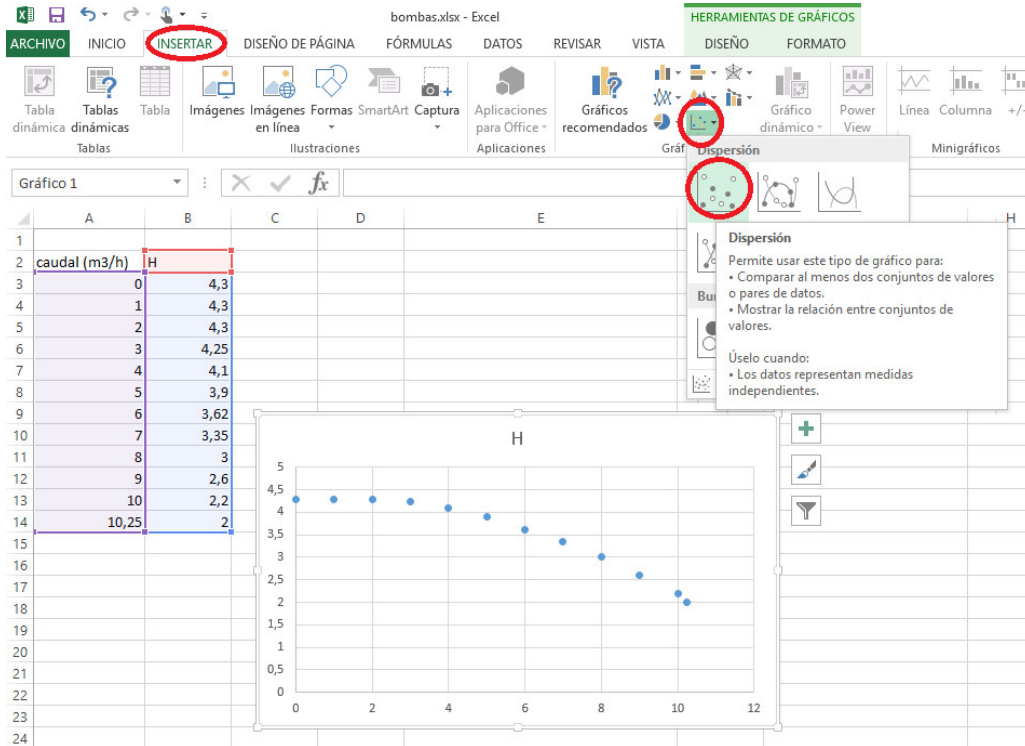
| | | | | |
|---|-----------------------------------|--|-----------------|--|
| Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba | KSB MEGANORM | Tamanho Size Tamaño | 25-150 |  |
| Oferta nº Project - No. Oferta - nº | Item nº Item - No. Pos - nº | Velocidade Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal | 1750 rpm | |



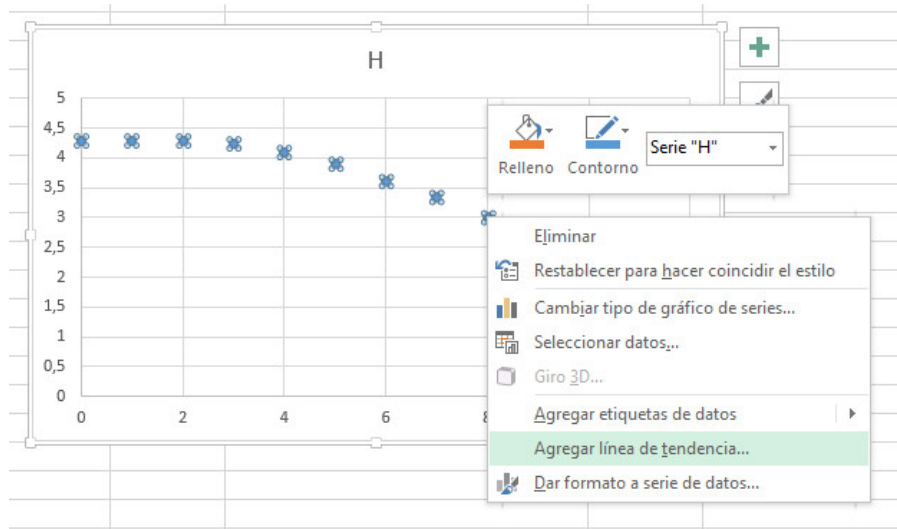
- Tomar la mayor cantidad de puntos posibles de Q vs H de la curva de la bomba seleccionada y con estos llenar una tabla en Microsoft Excel (para este ejemplo se tomó la bomba con diámetro de rodete de 90)

| | A | B |
|----|---------------|-------|
| 1 | caudal (m3/h) | H (m) |
| 2 | 0 | 4,3 |
| 3 | 1 | 4,3 |
| 4 | 2 | 4,3 |
| 5 | 3 | 4,25 |
| 6 | 4 | 4,1 |
| 7 | 5 | 3,9 |
| 8 | 6 | 3,62 |
| 9 | 7 | 3,35 |
| 10 | 8 | 3 |
| 11 | 9 | 2,6 |
| 12 | 10 | 2,2 |
| 13 | 10,25 | 2 |
| 14 | | |

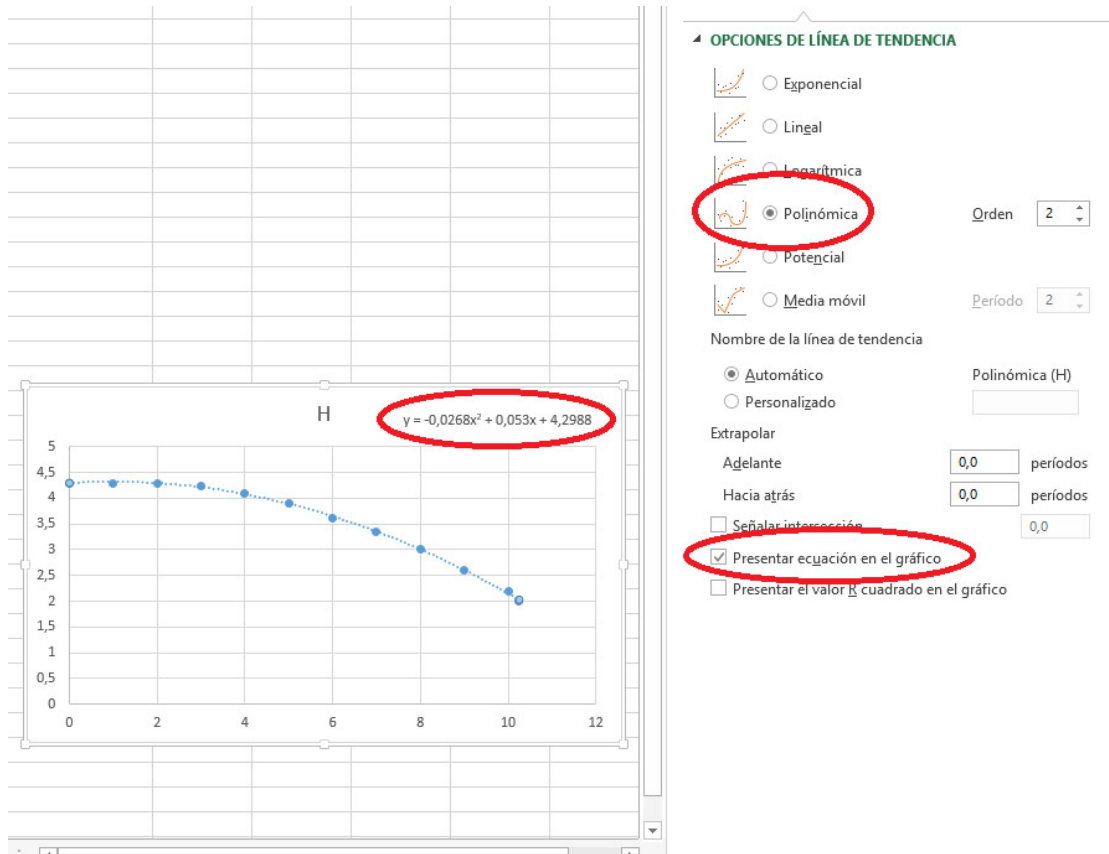
- Seleccionar la tabla con los puntos de la curva y en la pestaña insertar gráficos, escoger la opción de dispersión



- Hacer clic derecho en cualquiera de los puntos mostrados en la gráfica y seleccionar la opción agregar línea de tendencia.

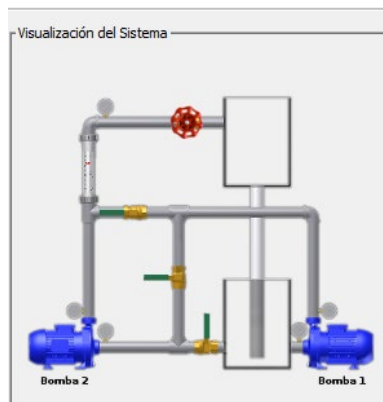


- En el menú que aparece, seleccionar las opciones de "polinómica" y "Presentar ecuación en el gráfico". Los coeficientes de ese polinomio son los que se deben introducir al programa para agregar la bomba.



- Visualización del Sistema

Muestra la imagen del banco según las condiciones dadas

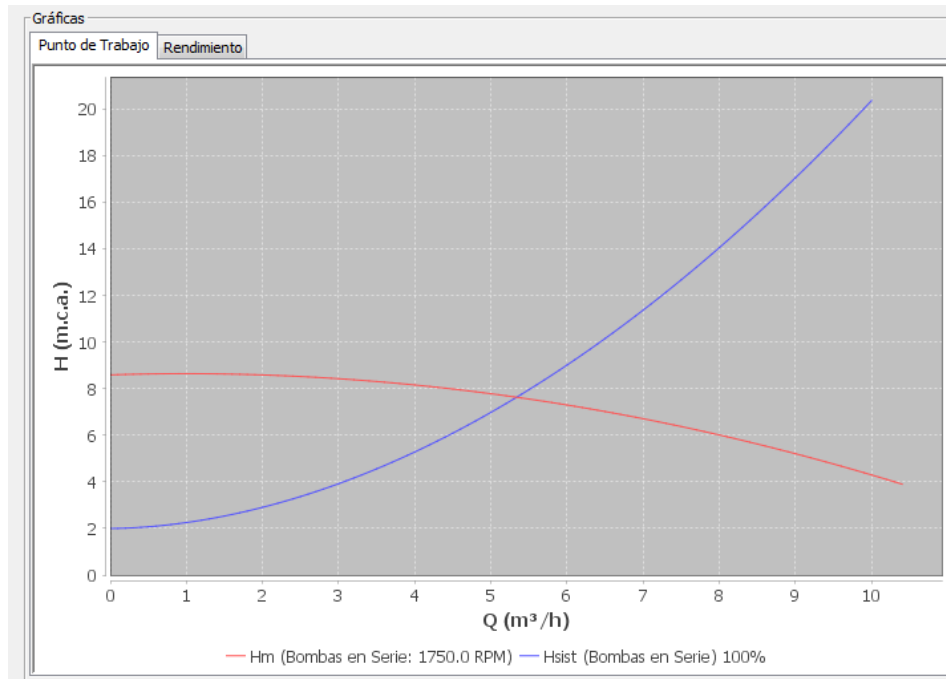


- Graficas

Se muestran dos graficas separadas por pestañas

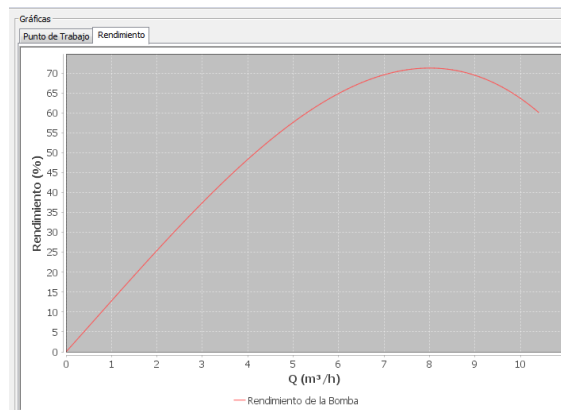
- Punto de Trabajo

Se observan todas las curvas tanto de la bomba como la del sistema que hayan sido calculadas



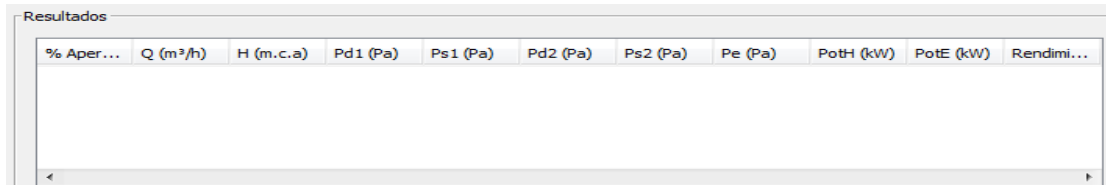
- Rendimiento

Se observa la curva del rendimiento de la bomba actual con las RPM que estén seleccionadas



- Resultados

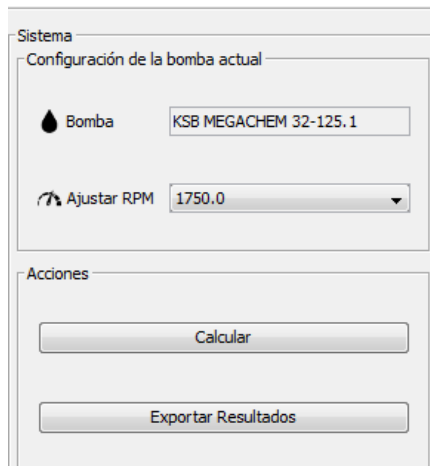
Se muestra la tabla con todas las variables que se pueden medir con el programa



| % Aper... | Q (m³/h) | H (m.c.a) | Pd1 (Pa) | Ps1 (Pa) | Pd2 (Pa) | Ps2 (Pa) | Pe (Pa) | PotH (kW) | PotE (kW) | Rendimi... |
|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|---------|-----------|-----------|------------|
|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|---------|-----------|-----------|------------|

- Sistema y acciones

Se muestra la bomba con la que se esté trabajando actualmente y su velocidad en RPM (la cual puede ser cambiada por el usuario seleccionado otra de una lista de velocidades ya parametrizada). Y se encuentran los botones de “calcular” para llenar la tabla de resultados y “exportar resultados” para llevar la tabla de resultados que se tanga Microsoft Excel



Sistema

Configuración de la bomba actual

Bomba

Ajustar RPM

Acciones

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.

Con este capítulo se da cierre al texto del cual se puede concluir que:

- El estudio de los bancos de ensayos para arreglos de serie-paralelo de bombas centrifugas, permitió comprender su funcionamiento e identificar cada uno de los elementos que lo componen, entendiendo que los bancos tienen como finalidad evaluar las bombas centrifugas en distintas condiciones para determinar así su rendimiento.
- El sistema diseñado reúne todas las características que debe tener un banco de prueba, el cual permite simular diferentes condiciones de operación de las bombas centrifugas en dicho banco, demostrando así su función, la cual es ayudar a que el usuario pueda observar las diferentes condiciones a las que una bomba puede ser sometida.
- Se realizó el algoritmo de cálculo considerando la mayor similitud posible a los bancos de prueba en la realidad, los cuales tienen múltiples variables y condiciones.
- El programa computacional fue validado mediante una serie de pruebas, con el objetivo de lograr un óptimo funcionamiento del software, la primera de ellas fue una comprobación de resultados de un ejercicio obtenidos teóricamente y el software, los cuales presentan una variación de resultados de () debido a las aproximaciones de decimales. La segunda validación consto de una encuesta realizada a diferentes alumnos de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad José Antonio Páez donde se evaluaron diferentes aspectos del programa, obteniendo resultados positivos según apreciación de SIMULEB.

- La guía práctica está realizada con la fusión de que el estudiante que trabaje con ella pueda realizar y revisar las distintas características que tienen las bombas y sus arreglos, permitiéndole entender el funcionamiento de estas para las distintas condiciones en que puedan trabajar y obtener resultados que pueda comparar y estudiar para mejorar el entendimiento de bombas para las diferentes condiciones dadas.

5.2 Recomendaciones.

Con el fin de dejar la puerta abierta a futuras mejoras y comprendiendo que se puede expandir las condiciones de trabajo del banco de prueba:

- Se pueden añadir nuevas bombas las cuales permitirían al usuario tener una mayor variedad de opciones al momento de querer encontrar un punto de funcionamiento requerido.
- Agregarle la opción de cambiar o elegir el voltaje, ya que el programa esta condicionado a trabajar con voltaje de 220, y como es de conocimiento general la industria y nuestros hogares cuentan con otros voltajes adicionales.
- Proporcionar al usuario la opción de modificar el banco, permitiéndole variar aspectos como longitud de tubería y tipo de válvula.
- Añadir nuevos fluidos de trabajo.
- Agregar la experiencia de poder simular bombas con diferentes características en el mismo arreglo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Deitel, H. y Deitel, P. (Java): How to Programa. Séptima edición. Prentice-Hall.
- Edibon International. (2004). PBSPB. Manual de especificaciones.
- Edibon International. (2004). PBSPC. Manual de especificaciones.
- Fernández, P. Bombas centrifugas y volumétricas. Departamento de ingeniería eléctrica y energética. Universidad de Cantabria.
- Golden, F.M., Batres, V.L. y terrones, M.G., Termofluidos, turbomáquinas y máquinas térmicas, Ed. C.E.C.S.A., México, 1989.
- Karassik, I. J., y Carter R., Bombas Centrifugas, C.E.C.S.A, México, 1987.
- Mataix, C. (1986). Mecánicas de fluidos y maquinas hidráulicas. Segunda edición, Madrid: Ediciones del castillo. S.A.
- Mataix, C. (1986). Turbomáquinas hidráulicas. Tercera edición, Madrid: Ediciones del castillo. S.A.
- McNaughton, K.J., Bombas: Selección uso y mantenimiento, McGraw-Hill, México, 1994.
- Polo, M. (1980). Turbomáquinas Hidráulicas. Segunda edición. México DF: Limusa
- Crane. (1992). Flujo de Fluidos en Válvulas y Tuberías. Mc Graw Hill. Naucalpan de Juárez, México
- KSB. Manual de Curvas características, N° A2740
- Baldor. Pricing Catalog. 2014
- Simens. Lista de Precios Ecuador, Productos eléctricos industriales. 2013

ANEXOS

ANEXO A

(Bombas utilizadas en SIMULEB)

| | |
|--|--|
| Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba | KSB MEGANORM KSB MEGABLOC KSB MEGACHEM KSB MEGACHEM V |
|--|--|

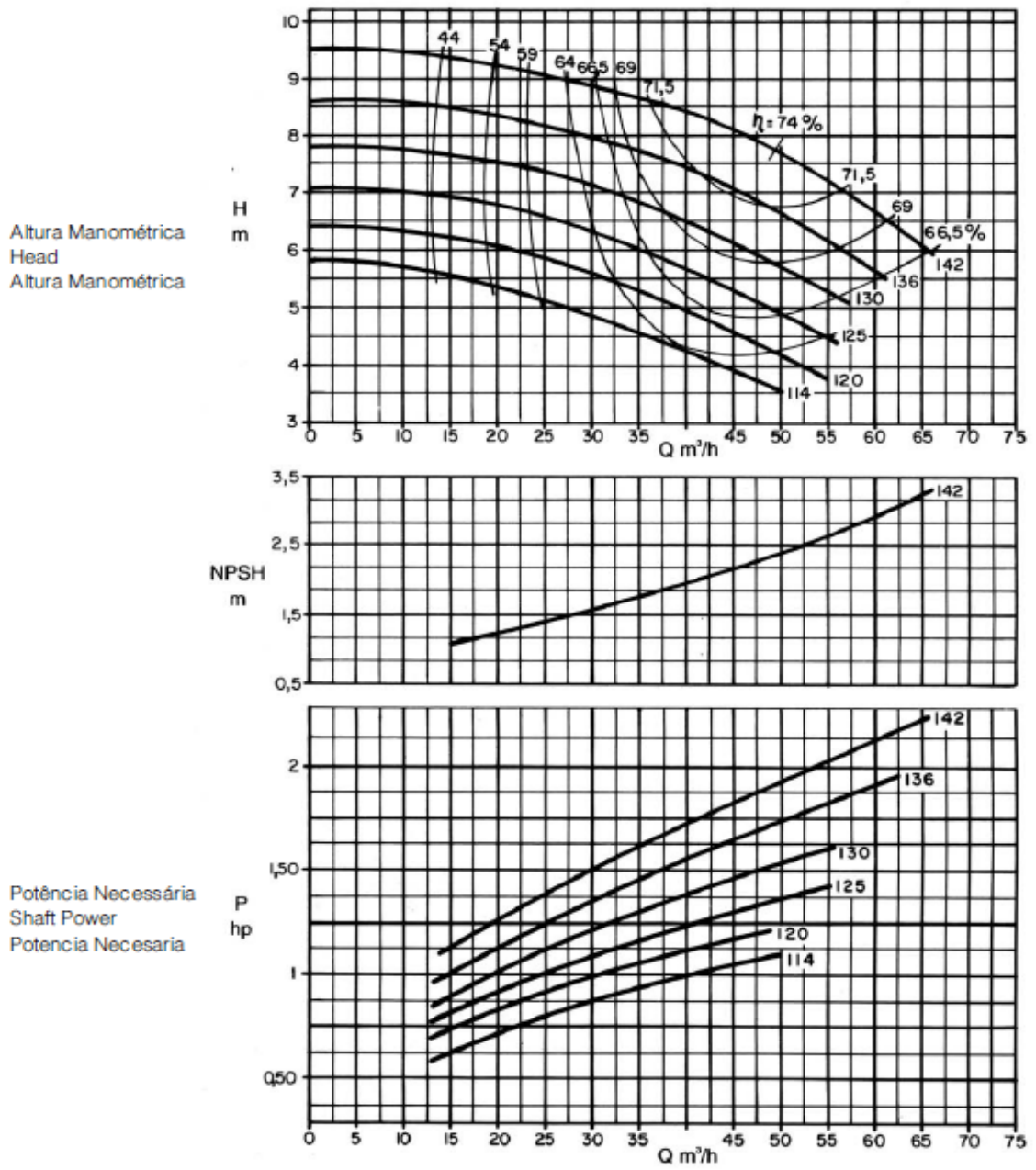
| | |
|---------------------------|---------------|
| Tamanho Size Tamaño | 50-125 |
|---------------------------|---------------|



| | |
|---------------|-------|
| Oferta nº | _____ |
| Project - No. | _____ |
| Oferta - nº | _____ |


| | |
|------------|-------|
| Item nº | _____ |
| Item - No. | _____ |
| Pos - nº | _____ |

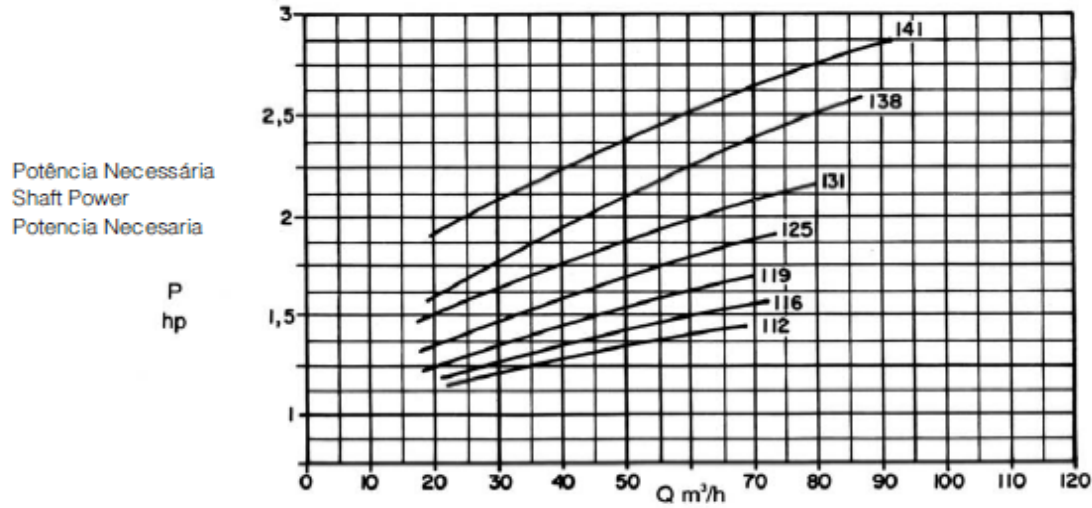
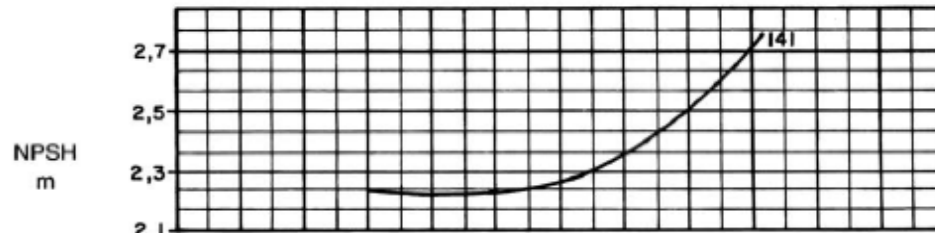
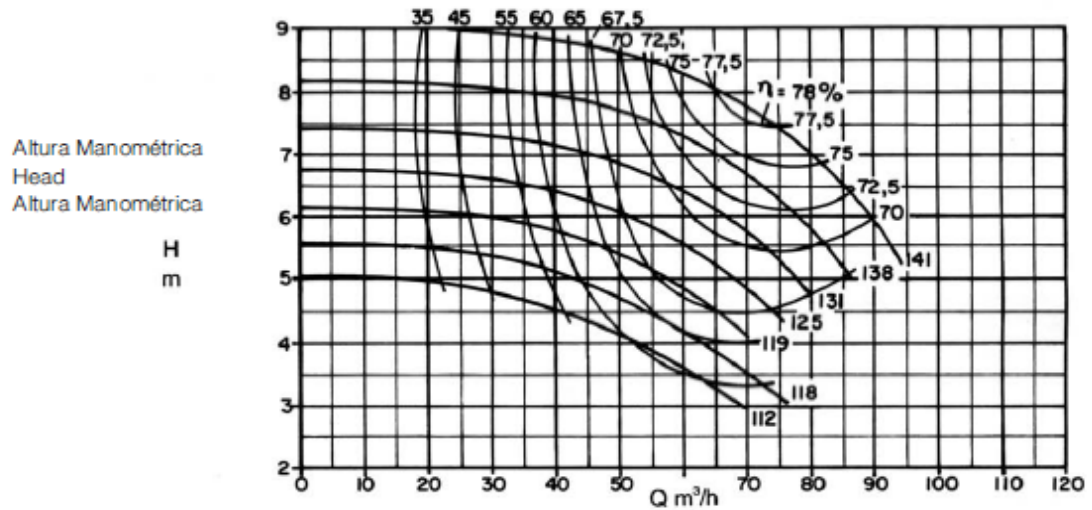
| | |
|--|-----------------|
| Velocidade Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal | 1750 rpm |
|--|-----------------|



Dados válidos para densidade de 1 kg/dm³ e viscosidade cinemática até 20 mm²/s.
 Data applies to a density of 1 kg/dm³ and Kinematic viscosity up to 20 mm²/s.
 Datos válidos para densidad 1 kg/dm³ y viscosidad cinemática hasta 20 mm²/s.

Garantia das características de funcionamento conforme ISO 9906 anexo D.
 Operating data according to ISO 9906 attachment D.
 Garantía de las características de funcionamiento según ISO 9906 suplemento D.

| | | | | |
|---|--|--|-----------------|---|
| Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba | KSB MEGANORM KSB MEGABLOC KSB MEGACHEM KSB MEGACHEM V | Tamanho Size Tamaño | 65-125 |  |
| Oferta nº Project - No. Oferta - nº | Item nº Item - No. Pos - nº | Velocidade Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal | 1750 rpm | |


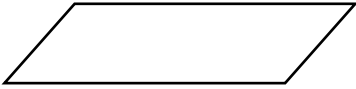

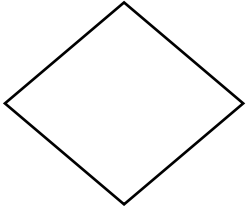

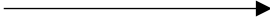

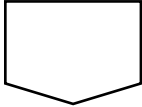


Dados válidos para densidade de 1 kg/dm³ e viscosidade cinemática até 20 mm²/s.
Data applies to a density of 1 kg/dm³ and Kinematical viscosity up to 20 mm²/s.
Datos válidos para densidad 1 kg/dm³ y viscosidad cinemática hasta 20 mm²/s.

Garantia das características de funcionamento conforme ISO 9906 anexo D.
Operating data according to ISO 9906 attachment D.
Garantía de las características de funcionamiento según ISO 9906 suplemento D.

ANEXO B

(Simbología de diagramas de flujo)

| Símbolos principales | Función |
|---|---|
|  | Re-presenta el comienzo (inicio), y el final (fin) de un programa o subprograma. |
|  | Cualquier tipo e introducción de datos en la memoria desde los periféricos (entrada), o registro de la información procesada en un periférico (salida). |
|  | Cualquier tipo de operación que pueda originar cambio de valor, formato o posición de la información almacenada en la memoria, operaciones aritméticas, de transferencia, etc. |
|  | Indica operaciones lógicas o de comparación entre datos (normalmente dos), y en función del resultado de la misma se determina cuál de los distintos caminos alternativos del programa se debe seguir, normalmente tiene dos salidas (respuestas Sí o No), pero puede tener tres o más según los casos. |
|  | Sirve para enlazar dos o más partes cualesquiera de un diagrama a través de un conector en la salida y otro conector en la entrada |
|  | Indica el sentido de ejecución de las operaciones |
|  | Sirve de unión entre dos símbolos. |
|  | Conexión entre dos puntos del diagrama situado en páginas diferentes. |

ANEXO C

(Encuesta de validación)



Encuesta de experiencia en SIMULEB

Encuesta realizada a estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad José Antonio Páez acerca de su experiencia utilizando SIMULEB (Simulador Educativo para bombas Centrifugas)

Nombre:

Semestre:

Edad:

Fecha:

A continuación se le formularan una serie de preguntas sobre el software SIMULEB, las cuales debe ponderar con una calificación del 1 al 5 según su criterio:

1: Muy deficiente

2: Deficiente

3: Regular

4: Bueno

5: Excelente

a) ¿Es SIMULEB una herramienta fácil de manejar por primera vez?

Ponderación:

b) ¿Cumplió SIMULEB con los resultados obtenidos esperados por usted?

Ponderación:

c) Indique la calidad visual software

Ponderación:

d) ¿Presento SIMULEB alguna falla o error durante su experiencia?

Ponderación:

e) ¿En términos generales logro SIMULEB cumplir con sus expectativas?

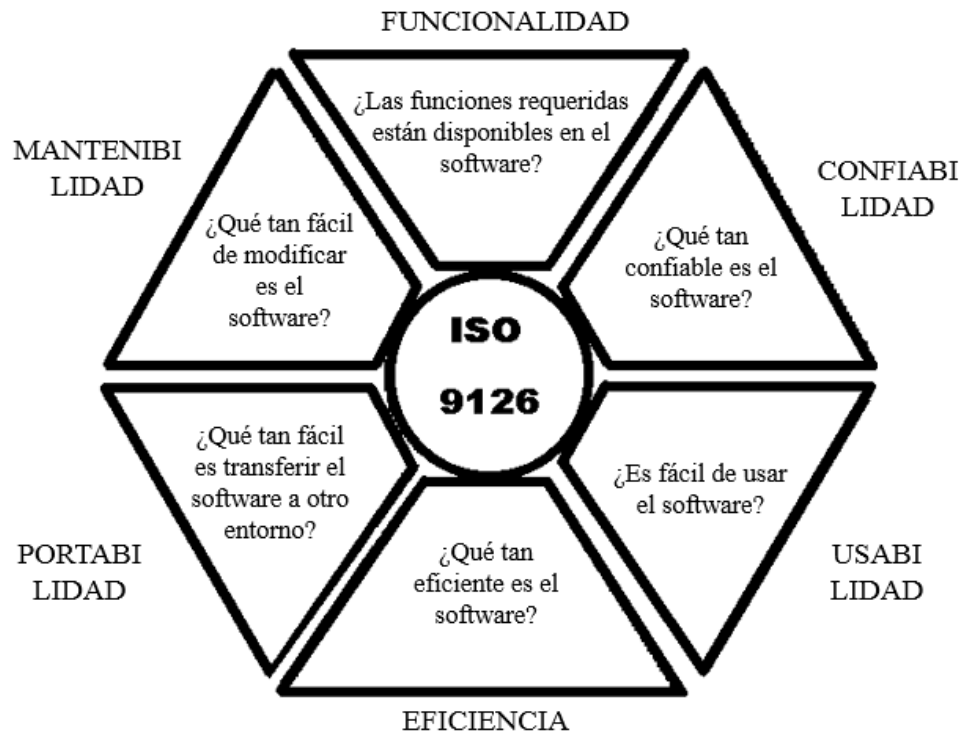
Ponderación:



ANEXO D

(Atributos que debe tener un software según la norma ISO 9126)

ISO 9126



Funcionalidad: conjunto de atributos que soporta la existencia de un conjunto de funciones y sus propiedades específicas. Las funciones son tales que satisfacen las necesidades implícitas o establecidas.

Confiabilidad: El conjunto de atributos que soporta la capacidad del software para mantener su nivel de rendimiento bajo condiciones establecidas por un periodo de tiempo establecido.

Usabilidad: El conjunto de atributos que soporta el esfuerzo necesario para el uso y la evaluación individual de tal uso mediante un conjunto de usuarios establecidos e implícitos.

Eficiencia: el conjunto de atributos que soporta las relaciones entre el nivel de rendimiento del software y el monto de recursos empleados, bajo condiciones establecidas.

Mantenibilidad: El conjunto de atributos que soporta el esfuerzo necesario para realizar modificaciones especificadas.

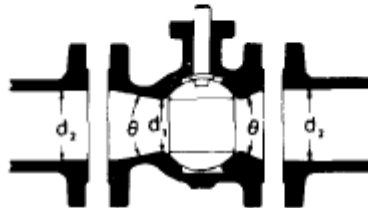
Portabilidad: El conjunto de atributos que soporta la habilidad del software para transferirlo de un entorno a otro.

APÉNDICES

APÉNDICE A

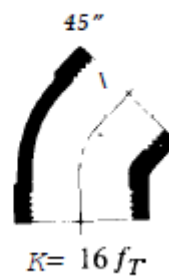
Coeficiente de resistencia (K) de válvulas y accesorios

VÁLVULAS DE GLOBO

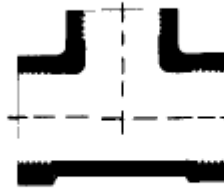


- Si: $\beta = 1, \theta = 0 \dots \dots \dots K_1 = 3 f_T$
 $\beta < 1$ y $\theta < 45^\circ \dots \dots \dots K_2 = \text{Fórmula 5}$
 $\beta < 1$ y $45^\circ < \theta < 180^\circ \dots \dots K_3 = \text{Fórmula 6}$

CODOS ESTÁNDAR



CONEXIONES ESTÁNDAR EN "T"

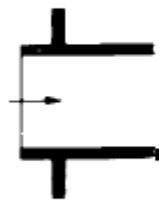


Flujo directo $K = 20 f_T$

Flujo desviado a 90° . . $K = 60 f_T$

ENTRADAS DE TUBERÍA

Con resalte
hacia el interior

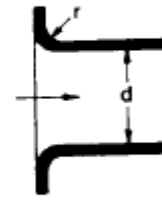


$K = 0.78$

| r/d | K |
|------------|------|
| 0.00* | 0.5 |
| 0.02 | 0.28 |
| 0.04 | 0.24 |
| 0.06 | 0.15 |
| 0.10 | 0.09 |
| 0.15 y más | 0.04 |

*de cantos vivos

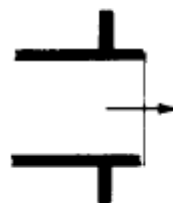
A tope



Véanse los
valores de K
en la tabla

SALIDAS DE TUBERÍA

Con resalte De cantos vivos Redondeada



$K = 1.0$



$K = 1.0$



$K = 1.0$

APÉNDICE B

Factor de rugosidad de la tubería

| Material | ϵ (mm) |
|---------------------------|-----------------------------------|
| PVC | 0.0015 |
| Fundición centrifugada | 0,003 |
| Fundición asfaltada | 0,06-0,18 |
| Fundición | 0,12-0,60 |
| Acero comercial y soldado | 0,03-0,09 |
| Hierro forjado | 0,03-0,09 |
| Hiero galvanizado | 0,06-0,24 |

APÉNDICE C

Coeficiente de HAZEN-WILLIANS

| Tubería | C_{HW} Tubería Nueva | C_{HW} Diseño |
|---|------------------------|-----------------|
| Acero, hierro dúctil o hierro fundido con cemento aplicado centrífugamente o revestimiento bituminoso | 150 | 140 |
| Plástico, cobre, latón, vidrio | 140 | 130 |
| Acero o hierro fundido | 130 | 100 |
| concreto | 120 | 100 |
| Acero corrugado | 60 | 60 |