

Desarrollo de un Material Educativo Computarizado (MEC) para la simulación de los fenómenos de transferencia de energía en una bomba centrífuga a escala laboratorio

Anderson Fabián Riaño Fierro y Sandra Milena Sierra Caballero

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Químico

Modalidad práctica en docencia

Director

Humberto Escalante Hernández

PhD. Ingeniería Química

Codirector

Crisóstomo Barajas Ferreira

M. Sc. Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

### **Agradecimientos**

Le agradezco principalmente a mi madre Nubia Isabel Fierro Mateus, su vida y lucha me inspiró cada día a ser mejor hijo, estudiante, profesional, hombre, ciudadano y ser humano. Sin su apoyo nada de esto hubiera sido posible.

Le agradezco a mi pareja, María Fernanda Carrillo Infante, quien no sólo me brindo apoyo emocional durante mi formación académica, con sus brillantes conocimiento sobre el uso de herramientas de diseño me orientó en momentos donde no sabía que rumbo seguir.

Le agradezco a mi compañera Sandra Milena Sierra Caballero, ya que siempre tuvo buena disposición de trabajar y a pesar de las complicaciones que tiene la zona donde reside, nunca faltó a sus compromisos.

Le agradezco al profesor Crisóstomo Barajas Ferreira, por su confianza en nosotros para el desarrollo de este proyecto y su constante acompañamiento y apoyo. Me llena de orgullo poder decir que fui formado profesionalmente por una de las mentes más brillantes de la escuela de ingeniería química.

Le agradezco al profesor Humberto Escalante Hernández por ser nuestro director, su atención al detalle y profesionalismo permitió presentar un trabajo muy completo que cumpliera con los objetivos planteados. También le agradezco por sus años de dedicación con los estudiantes, esforzándose más allá de cumplir su trabajo como docente, demostró un afecto casi paternal por mí, mis compañeros y podría asegurar que por las generaciones pasadas y futuras.

**Anderson Riaño Fierro**

Le doy gracias primeramente a Dios porque siempre ha sido una luz en el camino, por brindarme fortaleza, sabiduría y paciencia para alcanzar cada uno de mis objetivos.

A mi mamá Nora Alba Caballero y a mi papá Esteban Sierra por su apoyo, dedicación, amor, compañía, paciencia y el arduo trabajo que han hecho para poder darme educación de calidad durante el transcurso de mi vida.

A mi hermana Natalia quien siempre ha estado conmigo en cada momento apoyándome, queriendo lo mejor para mí y siendo un ejemplo a seguir.

A mi abuela Herminda, por siempre esperarme en su casa con una sonrisa y un abrazo, aunque ya no este conmigo sé que me bendice y acompaña desde el cielo.

A mi compañero y amigo Anderson Riaño quien desde primer semestre ha sido un fuerte apoyo durante el transcurso de mi carrera y especialmente en el desarrollo de nuestro trabajo de grado, su paciencia y esfuerzo lo llevaran lejos.

Al profesor Crisóstomo Barajas Ferreira por depositar su confianza en nosotros para la realización de este proyecto, por la dedicación para resolver cada inquietud no solo como codirector sino como docente en nuestra formación en semestres anteriores.

Al profesor Humberto Escalante por apoyo en estos dos semestres como nuestro director, además de todos los conocimientos que nos impartió siendo nuestro docente.

Finalmente quiero agradecer a todos mis amigos, por las sonrisas y los excelentes momentos que vivimos juntos, a los que aún están y lo que ya no, gracias por formar parte de mi vida en determinado momento, los llevo en el corazón.

**Sandra Sierra Caballero**

<b>Tabla de Contenido</b>		<b>Pág.</b>
<b>Introducción .....</b>		<b>13</b>
<b>1. Objetivos .....</b>		<b>15</b>
<b>1.1 Objetivo general .....</b>		<b>15</b>
<b>1.2 Objetivos específicos .....</b>		<b>15</b>
<b>2. Marco teórico .....</b>		<b>16</b>
<b>2.1 Tecnologías de información y comunicación (TIC) .....</b>		<b>16</b>
<b>2.2 Material Educativo Computarizado (MEC) .....</b>		<b>16</b>
<b>2.3 Bomba Centrífuga.....</b>		<b>18</b>
<b>3. Cuerpo del trabajo.....</b>		<b>27</b>
<b>3.1 Estado del arte.....</b>		<b>27</b>
<b>3.2 Metodología .....</b>		<b>29</b>
<b>3.2.1 Análisis de la necesidad .....</b>		<b>31</b>
<b>3.2.2 Selección del software.....</b>		<b>32</b>

<b>3.2.3 Estructura del contenido del MEC.....</b>	<b>34</b>
<b>3.2.4 Diseño del contenido multimedia para la elaboración del MEC .....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.5 Prueba y ajustes del MEC .....</b>	<b>38</b>
<b>4. Resultados.....</b>	<b>39</b>
<b>Elaboración del MEC.....</b>	<b>47</b>
<b>5. Conclusiones .....</b>	<b>52</b>
<b>Recomendaciones.....</b>	<b>53</b>
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>54</b>
<b>Apéndices.....</b>	<b>57</b>

### **Lista de tablas**

<b>Tabla 1. ....</b>	<b>32</b>
----------------------	-----------

**Lista de Figuras**

<b>Figura 1.....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 2.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 3.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 4.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 5.....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 6.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 7.....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 8.....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 9.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 10.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 11.....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 12.....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 13.....</b>	<b>42</b>

<b>Figura 14.....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 15.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 16.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 17.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 18.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 19.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 20.....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 21.....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 22.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 23.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 24.....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 25.....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 26.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 27.....</b>	<b>70</b>

<b>Figura 28.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 29.....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 30.....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 31.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 32.....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 33.....</b>	<b>83</b>

## Resumen

**Título:** Desarrollo de un Material Educativo Computarizado (MEC) para la simulación de los fenómenos de transferencia de energía en una bomba centrífuga a escala laboratorio\*

**Autor:** Anderson Fabián Riaño Fierro, Sandra Milena Sierra Caballero †

**Palabras Clave:** Material educativo computarizado, bomba centrífuga, TICs.

**Descripción:** Tras más de un año de desarrollo de actividades en la modalidad de presencialidad remota debido a la pandemia causada por la propagación a nivel mundial del virus Sars-covid-19, se ha hecho más evidente la necesidad del desarrollo de herramientas informáticas para suplir la formación académica de los estudiantes, ya que, debido al confinamiento, las limitaciones de los estudiantes al acceso no solo a las aulas sino también a material didáctico han aumentado. Uno de los mayores desafíos ha sido el desarrollo de asignaturas prácticas y teórico-prácticas, esto a causa de la imposibilidad de acceso a los laboratorios de manera presencial, actividad que facilita y complementa la comprensión de fenómenos descritos por expresiones matemáticas. Situación que inquieta no solo a los directivos y personal docente sino también a los estudiantes que ven como su formación profesional es irremediamente truncada, siendo el funcionamiento de equipos y accesorios dentro del laboratorio como lo son las bombas centrífugas para la transferencia de energía dentro de un sinfín de procesos industriales, una parte fundamental de las capacidades de un Ingeniero Químico.

Por tanto, con el propósito de solventar la situación actual frente a la realización de los laboratorios dentro de la Escuela de Ingeniería Química y dejar un precedente para la formación

---

\*Trabajo de Grado

†Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Humberto Escalante Hernández PhD. Ingeniería Química Codirector: Crisóstomo Barajas Ferreira M.Sc. Ingeniería Química

complementaria de las asignaturas teórico-prácticas, se realiza la propuesta de crear un MEC el cual asista al estudiante de pregrado de Ingeniería Química en el aprendizaje de temas correspondientes al funcionamiento de las bombas, principalmente centrifugas, para que de esta manera, a la medida que refuerza los conocimientos teóricos y se capacita para operar de manera independiente los equipos industriales en una escala laboratorio, también se realice un constante ejercicio de autoevaluación que permita mostrar al estudiante si su avance ha sido suficiente para aspirar al título de profesional

### Abstract

**Title:** Development of a Computerized Educational Material (MEC) for the simulation of energy transfer phenomena in a laboratory-scale centrifugal pump\*

**Author:** Anderson Fabián Riaño Fierro, Sandra Milena Sierra Caballero †

**Key words:** Computerized educational material, centrifugal pump, ICTs.

**Description:** After a whole year of developing activities in the form of remote attendance due to the pandemic caused by the worldwide spread of the Sars-covid-19 virus, the need to develop computer tools to supply the academic training of the students, since, due to the confinement, the limitations of the students to access not only to the classrooms but also to didactic material have increased. One of the biggest challenges has been the development of practical and theoretical-practical subjects, due to the impossibility of access to laboratories in person, an activity that facilitates and complements the understanding of phenomena described by mathematical expressions. A situation that worries not only managers and teaching staff but also students who see how their professional training is irremediably truncated, being the operation of equipment and accessories within the laboratory such as centrifugal pumps for the transfer of energy within a countless industrial processes, a fundamental part of the capabilities of a Chemical Engineer.

Therefore, with the purpose of solving the current situation regarding the realization of the laboratories within the Chemical Engineering's school and leaving a precedent for the complementary training of the theoretical-practical subjects, the proposal is made to create an MEC which assist the undergraduate student of Chemical Engineering in learning

\*Degree work

†Faculty of phisicochemistry. School of Chemical Engineering. Director: Humberto Escalante Hernández PhD. Chemical Engineer Codirector: Crisóstomo Barajas Ferreira M.Sc. Chemical Engineer

Topics related to the operation of pumps, mainly centrifugal, so that in this way, as he reinforces theoretical knowledge and is trained to independently operate industrial equipment in a laboratory scale, a constant self-assessment exercise is also carried out that allows the student to be shown if their progress has been sufficient to aspire to the Chemical Engineer's degree.

## Introducción

Debido a la pandemia por el CoVid-19 en los últimos dos años se vio la necesidad a nivel mundial de hacer uso de las herramientas virtuales para el desarrollo de asignaturas académicas en la educación. Esta situación mostró la importancia de transmitir los conocimientos a los estudiantes de una manera más interactiva y computarizada garantizando la calidad de aprendizaje fuera de las aulas.

Por lo anterior, la Escuela de Ingeniería Química de la UIS desea implementar Material Educativo Computarizado (MEC) en conjunto con las nuevas Tecnologías de Información y Computación (TICs) para la asignatura teórico-práctica de Laboratorio de Procesos I (LaProI), específicamente para la práctica en la unidad de transferencia de energía mecánica, mediante el uso de bomba centrífuga. Un MEC permiten al estudiante reforzar los conocimientos previamente adquiridos, en las asignaturas teóricas, a la vez que conoce e identifica el equipo, sus componentes y funcionamiento y realiza prácticas para el análisis de las variables de proceso involucradas.

La iniciativa de desarrollar un MEC para la unidad de bombeo del LaProI, surge de la necesidad de fomentar el proceso de aprendizaje independiente por parte del estudiante, permitiendo así que sea él quien tome el control de las dinámicas de estudio.

El MEC para la Unidad de Bomba Centrífuga (MEC-UBC) se estructuró mediante un sistema de capítulos diseñados para aportar un aprendizaje progresivo al estudiante. Para su operación y funcionamiento requiere de un equipo de cómputo con acceso a internet, dado que fue desarrollado en la plataforma de diseño y ejecución virtual, Genially. El MEC-UBC consta de un entorno virtual web y un entorno virtual 3D de ejecución local, ambos totalmente interactivos.

El entregable es esta memoria escrita y el MEC de la bomba centrífuga. La memoria escrita se entregará a biblioteca, mientras que el MEC será entregado a la dirección de escuela y quedará a su total disposición.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Desarrollar un material educativo computadorizado (MEC) que permita la simulación de la transferencia de energía mecánica en una unidad de bomba centrífuga a escala laboratorio

### **1.2 Objetivos específicos**

Compilar el material teórico necesario para la comprensión del funcionamiento operación y caracterización de una bomba centrífuga.

Desarrollar un software (modelado 3D interactivo) que permita la simulación y operación de la unidad de bomba centrífuga utilizada en el Laboratorio de Procesos I (LaProI) de la escuela de ingeniería química.

Proveer un entorno que permita un primer acercamiento al estudiante a la práctica presencial desde la virtualidad, que refuerce los conocimientos teóricos necesarios para el entendimiento de los conceptos básicos de los fenómenos ocurridos en la unidad e instruya en la operación de la unidad de bombeo para el desarrollo correcto de la práctica.

## **2. Marco teórico**

### **2.1 Tecnologías de información y comunicación (TIC)**

Las TIC son “el conjunto de disciplinas científicas, tecnológicas, de ingeniería y técnicas de gestión utilizadas en el manejo y procesamiento de la información, sus aplicaciones, los computadores y su interacción con hombres, las máquinas y los contenidos asociados de carácter social, económico y cultural” (Agnelli Faggioli, 2020). Por tanto, las TICs son un pilar importante en el marco de la educación ya que, por su entorno innovador, facilitan la comprensión de diversos campos académicos, y el desarrollo de tareas de diversos contenidos.

### **2.2 Material Educativo Computarizado (MEC)**

Un MEC se define como “las diferentes aplicaciones informáticas cuyo objetivo terminal es apoyar el aprendizaje. Un MEC se caracteriza porque es el estudiante quien controla el ritmo de aprendizaje, la cantidad de ejercicios a realizar y decide cuando abandonar, reiniciar, o interactuar reiteradas veces” (Álvaro Galvis Panqueva, 1996). Por consiguiente, el estudiante es su guía de estudio durante su proceso de aprendizaje, ya que es él mejor que nadie, quien entiende sus motivaciones, alcance, capacidades e intereses apoyándose en la información entregada por el MEC en diversos procesos indagatorios e interactivos.

Según Angarita Iveth (2021) el MEC debe cumplir con ciertas características pedagógicas que permiten el correcto desarrollo del MEC. Estas son:

- El computador siendo el soporte principal del proceso
- Garantizar un entorno participativo y estimulante
- Independencia, de esta manera se promueve el rol del estudiante en su proceso de aprendizaje
- Objetivos claros y específicos
- Accesible y de fácil navegación

Por otra parte, presenta una estructura definida para los MEC para así asegurar un funcionamiento óptimo, esta estructura es:

- Interfaz: Permite la comunicación máquina-usuario garantizando la interactividad
- Base de datos: Contiene y brinda las bases teóricas y el material multimedia.
- Motor: Responde ante las respuestas e interacciones del usuario, coordinando con la interfaz.

Al ser la educación y pedagogía tan diversa, es común que también lo sean sus herramientas. Para el caso del MEC, Dwyer (1974) la clasificación principal es según su enfoque educativo, se diferencian entre algorítmico y heurístico.

Algorítmico: Su propósito es transmitir el conocimiento mediante tareas secuenciales permitiendo al estudiante la asimilación de la teoría mostrada.

Heurístico: Se denominan así los que permiten al estudiante aprender a partir de la toma de decisiones y experiencia.

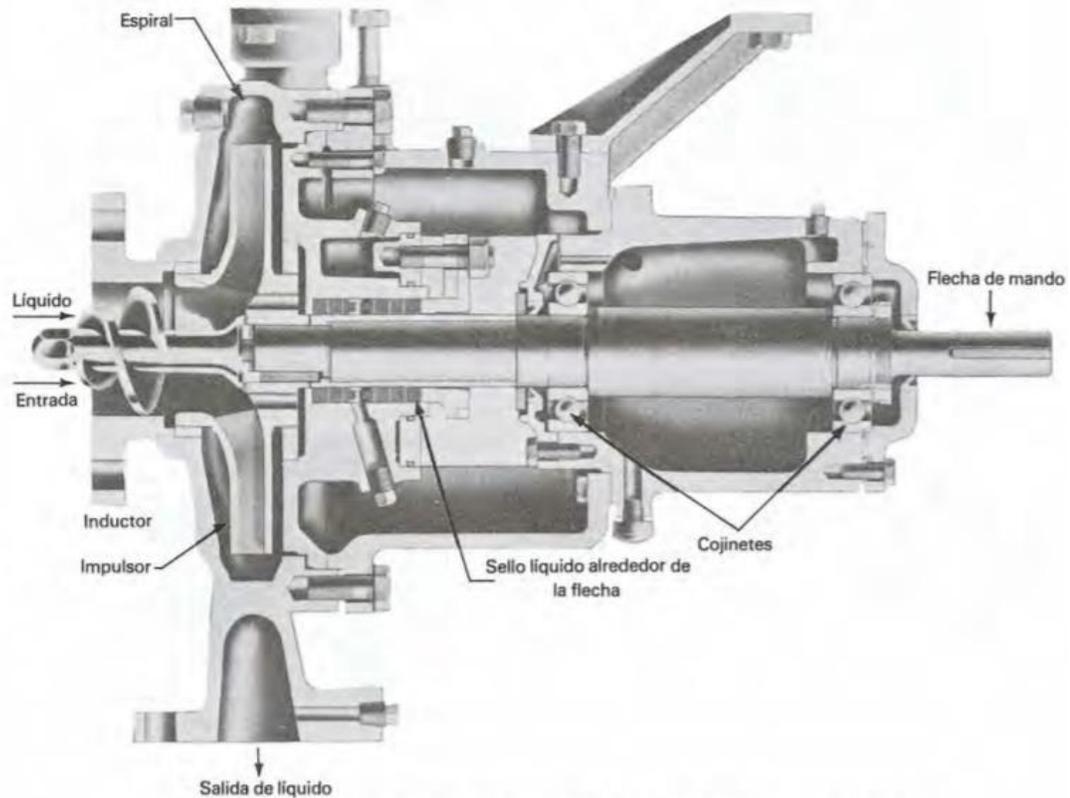
No obstante, existen también clasificaciones dependiendo de las funciones educativas del MEC. Como lo son: tutoriales, simuladores y juegos educativos.

### **2.3 Bomba Centrífuga**

“La acción del bombeo es la adición de energías cinética y potencial a un líquido con el fin de moverlo de un punto a otro. Esta energía hará que el líquido efectúe trabajo, tal como circular por una tubería o subir a una mayor altura.” (Kenneth J. et al, 1982)

La bomba, en el argot industrial, se le conoce al medio mecánico cuya función es la conducción o transferencia de líquidos de un valor de presión o de energía estática a otro, a su vez que el crecimiento y perfeccionamiento de los procesos químicos en la industria están ligados con las mejoras en el equipo de bombeo y con un mejor conocimiento de la funcionalidad y aplicación de las bombas. (Kenneth J. et al, 1982)

El tipo de bomba más popular en la industria es la bomba centrífuga, al menos el 80% de la producción mundial de bombas constituyen a las de tipo centrífuga ya que es la más indicada para manejar la mayor cantidad de líquido en comparación de la bomba de desplazamiento positivo. La bomba centrífuga, transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio en la energía cinética y potencial requeridas. A pesar de que la velocidad en la punta de los álabes o en la periferia del impulsor, así como la densidad del líquido determinar la fuerza centrífuga producida, la cantidad de energía aplicada por libra de líquido es independiente de la densidad de este. (Kenneth J. et al, 1982)

**Figura 1.***Diagrama bomba centrífuga.**Nota.* Adaptado de Foust, A. 2006*Ecuación de balance de energía mecánica*

La Ecuación de energía es un enunciado del principio de conservación de la misma. En la mecánica de fluidos es conveniente separar la energía mecánica de la térmica y considerar la transformación de la primera en térmica, resultado de los efectos de fricción, como pérdida de energía mecánica. Entonces la ecuación de la energía se convierte en el balance de la energía mecánica.

$$Q_{ent\ neta} + W_{ent\ neta} = \frac{dE_{sist}}{dt} \quad (\text{Ec. 1})$$

Para los sistemas compresibles simples, la energía total consiste en la energía interna, la cinética y la potencial.

$$E = u + E_k + E_p = u + \frac{v^2}{2} + gz \quad (\text{Ec. 2})$$

Entendiendo que para un sistema abierto a la masa como una bomba donde no hay acumulación, el término de energía interna se reemplaza por la entalpía

Para los flujos estacionarios, la razón de cambio respecto al tiempo de energía del volumen de control es cero y la ecuación queda de la siguiente manera:

$$Q_{ent\ neta} + W_{flecha,ent\ neta} = \sum_{sal} m \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum_{ent} m \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (\text{Ec. 3})$$

El gasto de masa permanece constante en los dispositivos de una sola corriente reduciendo la ecuación a :

$$Q_{ent\ neta} + W_{flecha,ent\ neta} = m \left( h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right) \quad (\text{Ec. 4})$$

Al dividir la ecuación entre el gasto de masa se obtiene

$$q_{ent\ neta} + w_{flecha,ent\ neta} = h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad (\text{Ec. 5})$$

Usando la definición de entalpía

$$h = u + Pv = u + P/\rho \quad (\text{Ec. 6})$$

se obtiene

$$w_{flecha,ent\ neta} + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 + (u_2 - u_1 - q_{ent\ neta}) \quad (\text{Ec.7})$$

Si el flujo es ideal, sin irreversibilidades como la fricción, debe conservarse la energía mecánica total y el término entre paréntesis debe ser igual a cero, en donde

$$e_{mec,perdida} = u_2 - u_1 - q_{ent\ neta} \quad (\text{Ec. 8})$$

Al reemplazar se obtiene

$$w_{flecha,ent\ neta} + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 = \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 + e_{mec,perdida} \quad (\text{Ec. } 9)$$

Definiendo la expresión

$$w_{flecha,ent\ neta} = w_{bomba} - w_{turbina} \quad (\text{Ec. } 10)$$

Al tratarse de un sistema con solo un equipo de bombeo, ecuación se ve reducida

El balance se puede expresar como

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 + w_{bomba} = \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 + e_{mec,perdida} \quad (\text{Ec. } 11)$$

Posteriormente se expresan las pérdidas con la ecuación

$$h_{bomba} = \frac{w_{bomba}}{g} \quad (\text{Ec. } 12)$$

$$h_{tubería} = \frac{e_{mec,perdida}}{g} \quad (\text{Ec. } 13)$$

Dando como resultado la expresión

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 + h_{bomba} = \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 + h_{tubería} \quad (\text{Ec. } 14)$$

Finalmente, como Gaspard Coriolis demostró que la energía cinética de una corriente de fluido obtenida por la ecuación cinética planteada no es la misma que la energía cinética real ya que el cuadrado de una suma no es lo mismo que la suma de los cuadrados de los componentes, Se planteó corregir este error con la incorporación de un factor adimensional representado por la letra griega Alpha. Dando así como resultado la ecuación definitiva para el balance de energía mecánica:

$$\frac{P_1}{g\rho} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_{bomba} = \frac{P_2}{g\rho} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_L \quad (\text{Ec. } 15)$$

Dónde:

V: Velocidad promedio del líquido [m<sup>2</sup>/s]

Z: Elevación [m]

P: Presión del líquido [atm]

g: Aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

$\rho$ : Densidad del líquido [kg/m<sup>3</sup>]

$h_{bomba}$ : Carga útil de la bomba entregada al fluido [m]

$h_L$ : Pérdida de carga total entre el punto 1 y 2 [m]

$\alpha$ : Factor de corrección de energía cinética cuyo valor está cerca de 1 para la mayoría de los fluidos (turbulento)

A menudo este factor se ignora haciéndolo igual a 1 ya que la mayoría de los flujos que se encuentran en la práctica son turbulentos y con frecuencia estos valores son pequeños en relación con otros términos de la ecuación. Sin embargo, si se trata de un flujo turbulento totalmente desarrollado, a la entrada o la salida, se recomienda usar un valor de Alpha de aproximadamente 1.05 como una estimación razonable.

La curva característica de una bomba centrífuga es la caracterización gráfica donde se representa la relación Carga – Caudal (H vs Q) que garantiza el equipo de bombeo a determinada velocidad de giro de su mismo impulsor. Dicha relación es única para cada bomba. Adicionalmente, existen una serie de curvas que relacionan los demás factores importantes de un equipo de bombeo. Entre ellos:

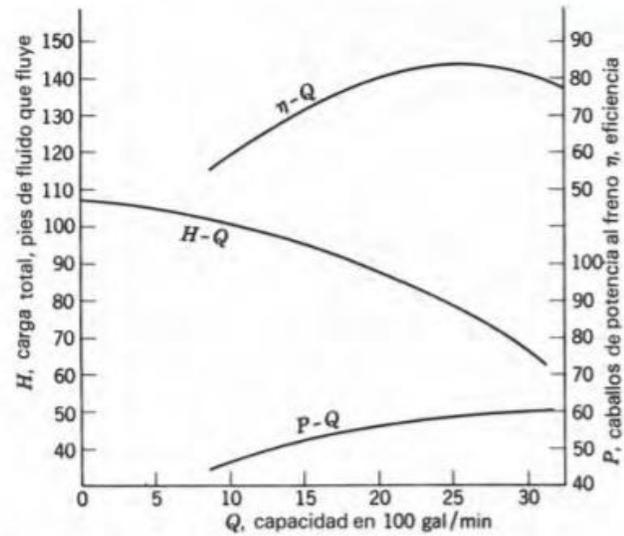
Potencia vs Caudal (P vs Q)

Altura neta positiva de aspiración requerida (NPSHreq vs Q)

Eficiencia vs Q ( $\eta$  vs Q)

**Figura 2.**

*Curvas características de una bomba centrífuga.*



*Nota.* Adaptado de Foust, A. 2006

Carga vs Caudal (H vs Q)

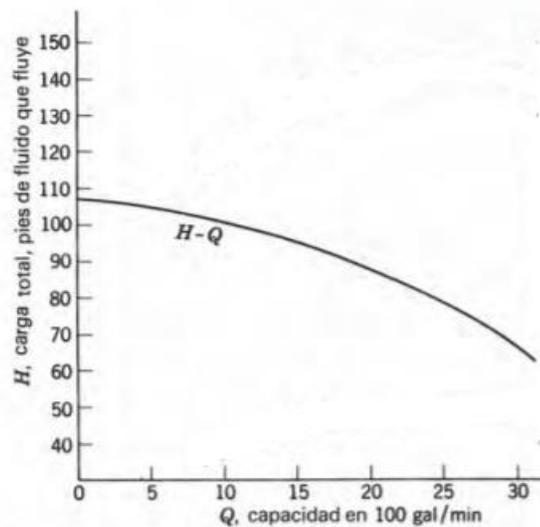
Esta curva representa la relación entre la carga total y la capacidad de la bomba. Por lo general, el incremento de presión en una bomba centrífuga es expresado en términos de longitud (usualmente pies del líquido fluyendo). Por otra parte, cuando la cabeza de descarga se reporta en término de pies del fluido fluyendo esta es independiente de la densidad del fluido.

La carga disponible suele aumentar continuamente a medida que la capacidad disminuye; a este tipo de curva se le conoce como “Curva característica ascendente”.

Se le denomina curva característica H-Q estable a la que solo puede obtenerse un valor de capacidad para cualquier valor de carga. La selección de la bomba requiere que cuente con características de operación estables. (Foust Alan, 2006)

### Figura 3.

*Curva de Carga vs Caudal.*



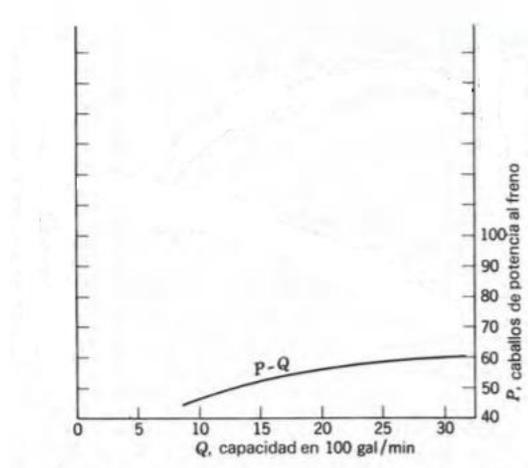
*Nota.* Adaptado de Foust, A. 2006

Potencia vs Caudal (P vs Q)

Para esta curva se muestra la relación entre la entrada de la potencia hidráulica y la capacidad de la bomba. (Foust Alan, 2006)

La potencia hidráulica teórica (potencia proporcionada al fluido) se calcula mediante la expresión (White Frank, 2008):

$$P = \rho Q H g \quad (\text{Ec. 16})$$

**Figura 4.***Curva de Potencia vs Caudal**Nota.* Adaptado de Foust, A. 2006Eficiencia vs Caudal ( $\eta$  vs Q)

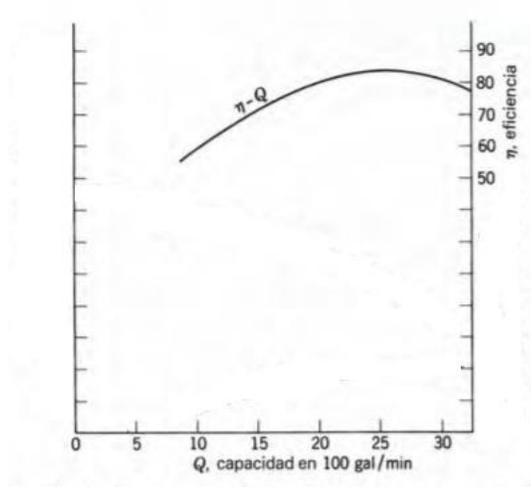
Esta curva relaciona la eficiencia de la bomba, calculada a partir de la relación de potencia útil y suministrada con la capacidad.

$$\eta = \frac{\text{Potencia útil}}{\text{Potencia suministrada}} * 100 \quad (\text{Ec. 17})$$

Las ecuaciones correspondientes a potencia útil y potencia suministrada se encuentran enunciadas en el apartado de Anexos.

**Figura 5.**

*Curva de Eficiencia vs Caudal*



*Nota.* Adaptado de Foust, A. 2006

### 3. Cuerpo del trabajo

#### 3.1 Estado del arte

La educación ha avanzado en los últimos años con el avance de la tecnología y la sociedad misma, es por esto por lo que cada vez es más común encontrar herramientas que apoyen el aprendizaje de temas de interés, el uso del computador como herramienta para el aprendizaje se viene implementando en el mundo educativo gracias a la independencia que le otorga al estudiante, esto se logra a partir del estímulo visual y cognitivo que generan el conjunto de elementos multimedia y elementos interactivos. Estos proyectos se empezaron a desarrollar bajo el seudónimo de Material Educativo Computarizado o por sus siglas MEC, estableciendo así las bases sólidas de la nueva era de los materiales educativos. Con características como una interfaz de manejo simple para el usuario y un software para su uso de acceso libre, el MEC es una herramienta llamativa en centros de aprendizaje alrededor del mundo. (Anaya y Hernández, 2010).

A finales de los años setenta, con el auge de los micro-computadores, las TICs se empezaron a desarrollar en el territorio colombiano, pero no fue hasta 20 años más tarde que la relación entre las TICs y la educación tomó fuerza gracias a diversas reformas en educación y el tardío avance tecnológico. (Parra Carlos, 2012). En la actualidad, donde se afronta una pandemia la cual ha obligado a llevar a la virtualidad gran cantidad de actividades para evitar las aglomeraciones, las TICs se han expandido a gran velocidad para poder incrementar los flujos de comunicación ya sea de forma académica o laboral con el propósito de mejorar la calidad de vida brindando acceso equitativo a todos los servicios que pueden ofrecer (Ávila Díaz. William Darío, 2013).

En Colombia, la incorporación de material educativo computarizado (MEC) en los diferentes centros de enseñanza (colegios, Universidades, corporaciones, etc) es un logro bastante significativo cuyos efectos se ven reflejados notoriamente hoy en día, cada vez son más los docentes que imparten sus clases por medio de estos materiales apoyándose de las diversas teorías pedagógicas (Leguizamón Gonzáles Myriam Cecilia, 2006).

Tanto así que, la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander desde hace más de 20 años ha elaborado e implementado varios MEC, los cuales han promovido el uso de las TIC para complementar el aprendizaje adquirido en las aulas, brindando un entorno dinámico e interactivo entre el estudiante y la información. En 2015, Diaz Darwin y Aguilera Laura presentaron el desarrollo de un MEC para el aprendizaje de la operación de humidificación el cual presentaba de manera organizada, ilustrativa e interactiva el contenido necesario para la comprensión del fenómeno de humidificación. Chacón Álvaro en 2014, creó un MEC para el acompañamiento educativo durante el desarrollo de la asignatura de microbiología industrial cuyo propósito fue brindar los conocimientos teóricos necesarios para reforzar las horas de trabajo independiente del estudiante mientras asimila y complementa los temas vistos en clase, así como apoyar al docente en el desarrollo complementario de los temas abordados en la asignatura.

Adicionalmente, Almeida Dana, Pérez July (2021) y Angarita Iveth (2021) enfocaron sus proyectos en el apoyo de presaberes necesarios para el completo entendimiento de los conocimientos requeridos en el desarrollo de prácticas de laboratorio de procesos del programa de ingeniería química UIS, así como el diseño de unidades de operación de procesos, tema de vital

importancia para la formación profesional de un ingeniero químico y competencia fundamental en el ámbito laboral.

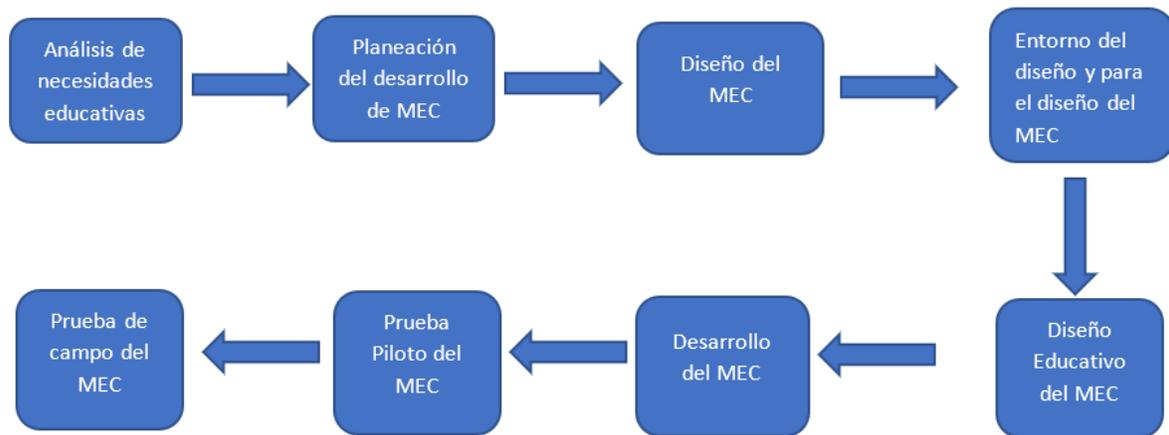
### **3.2 Metodología**

Es necesario que el MEC cuente con un diseño lógico en su estructura, para que cada paso de aprendizaje del estudiante esté completamente abarcado de manera gradual y de esta manera garantizar tanto el cumplimiento del desarrollo completo de la práctica, como la accesibilidad a toda la información necesaria desde el entorno virtual. De esta manera, al ser el pedagogo Álvaro Galvis Panqueva quien describe de manera más detallada las etapas para llevar a cabo el desarrollo de un MEC, se propone seguir su metodología llamada “Metodología para el desarrollo de materiales educativos computarizados.” (Leguizamón Gonzáles Myriam Cecilia, 2006).

Para el desarrollo del MEC el primer paso fue realizar un análisis del mecanismo para el cual se desarrolla el MEC, identificando las necesidades educativas del usuario y qué se espera de este al finalizar. Luego, se realizó el diseño tanto del entorno que garantiza su correcto funcionamiento contemplando: a) los requisitos de software y hardware, b) material teórico, c) contenido multimedia y d) diversas actividades que pongan a prueba el cumplimiento de los temas. Finalmente, se realizaron pruebas y correcciones a la herramienta con el fin de entregar al usuario un soporte en pleno funcionamiento. En la figura 1 se presenta la secuencia de etapas metodológicas requeridas en el diseño del MEC.

**Figura 6.**

*Etapas para el diseño del MEC.*



Según Leguizamón (2006) todo empieza en la etapa de análisis, en esta se detecta una situación problemática que podría ser solucionada con el computador. Se debe terminar el perfil del usuario, escenario educativo, el hardware con el que cuenta el usuario o la institución educativa, definir los conocimientos y habilidades previas del usuario, indagar sobre la existencia de otras soluciones computarizadas y la importancia de incorporarlas al modelo de enseñanza.

En la etapa de diseño, estructura de contenidos, selección de temas, esquematización de la pedagogía y definición de requisitos, su objetivo es definir de manera clara los temas, objetivos, estrategias y actividades del MEC y plasmar las ideas obtenidas en la etapa anterior.

Posterior a esto, se inicia la etapa de diseño de la interfaz, contenidos, navegación mediante hipervínculos, diseño funcional, educativo, de comunicación y computacional, elaboración y diseño a detalle del prototipo y establecer las zonas de comunicación distribuyendo el espacio en la pantalla, los colores, el formato en el cual se presenta la teoría, contenido multimedia y los botones de navegación e índice.

Durante la etapa de desarrollo, se busca llevar las ideas planteadas a un lenguaje de programación, elaborando las bases de datos, animaciones, videos y demás elementos gráficos, dando como resultado el material educativo computarizado.

Finalmente se realizan las pruebas para la corrección del programa, estas se realizan por los autores del MEC. De ser posible, algunos autores sugieren realizar una prueba con los usuarios del MEC sin embargo, una vez perfeccionado el contenido teórico, la navegación y la funcionalidad del material, estas pruebas pueden realizarse por el docente a cargo de la asignatura y generar reportes de retroalimentación.

### **3.2.1 Análisis de la necesidad**

Para que un aspirante a ingeniero químico obtenga el título, debe cumplir con la totalidad de asignaturas contempladas en el plan de estudios, dentro de este plan se encuentra la materia teórico-práctica conocida como Laboratorio de Procesos I, en la cual el estudiante refuerza los conocimientos teóricos adquiridos en las materias de ciclos anteriores, termodinámica, manejo de fluidos y sólidos y fenómenos de transporte, siendo estas 2 últimas requisitos de la asignatura de laboratorio, se parte de la premisa que el estudiante domina los temas abordados en dichas materias. Sin embargo, debido a las limitaciones de tiempo que tiene cada semestre, estos temas no llegan a abordarse a profundidad para todos los equipos. Por esta razón se crea este material enfocado en el equipo de la bomba centrífuga, el cual recopila conocimientos necesarios para el entendimiento de este, el funcionamiento, reconocimiento de sus componentes y fenómenos llevados a cabo en el equipo, de una manera didáctica, clara y concisa.

### 3.2.2 Selección del software

El primer paso para desarrollar el MEC fue la búsqueda de diferentes softwares que permitiesen la creación de material educativo de manera didáctica, interactiva y de navegación sencilla.

**Tabla 1.**

*Listado de softwares utilizados para el diseño del MEC*

<b>SOFTWARE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>SolidWorks</b>	Permite la creación de modelados 3D, ensamblajes y planos. Este programa fue usado para crear el modelo 3D de la Unidad de Bombeo del MEC, tomando como referente el equipo que existe en el laboratorio de la escuela de Ing. Química. El modelo 3D creado permite que el usuario tenga interacción y reconocimiento de sus componentes.
<b>Canva</b>	Esta plataforma es una página web de diseño que permite la creación de presentaciones interactivas. Con ella se creó la presentación principal del MEC, cuenta con plantillas predeterminadas totalmente modificables y

---

	una amplia biblioteca de recursos visuales; cuenta con botones interactivos y otorga la posibilidad de subir y editar imágenes propias.
<b>Unity 3D</b>	Motor gráfico 3D, el cual permite la creación de videojuegos a partir de modelados 3D. Este programa fue usado para diseñar la interacción del equipo modelado.
<b>GoConqr</b>	Aplicación online utilizada para construir mapas mentales y diversas herramientas gráficas que permiten elaborar clasificaciones personalizadas de diversos contenidos.
<b>Genially</b>	Plataforma de diseño usada para crear los botones interactivos que permiten la navegación en el MEC. Además, esta plataforma facilita el uso de sistema de contraseñas en pestañas independientes, permitiendo la incorporación de preguntas abiertas, lo cual incrementa la dificultad y necesidad de atención para responder las preguntas.
<b>Camtasia 9</b>	Software de captura de pantalla en formato de video y herramienta de edición de archivos

---

---

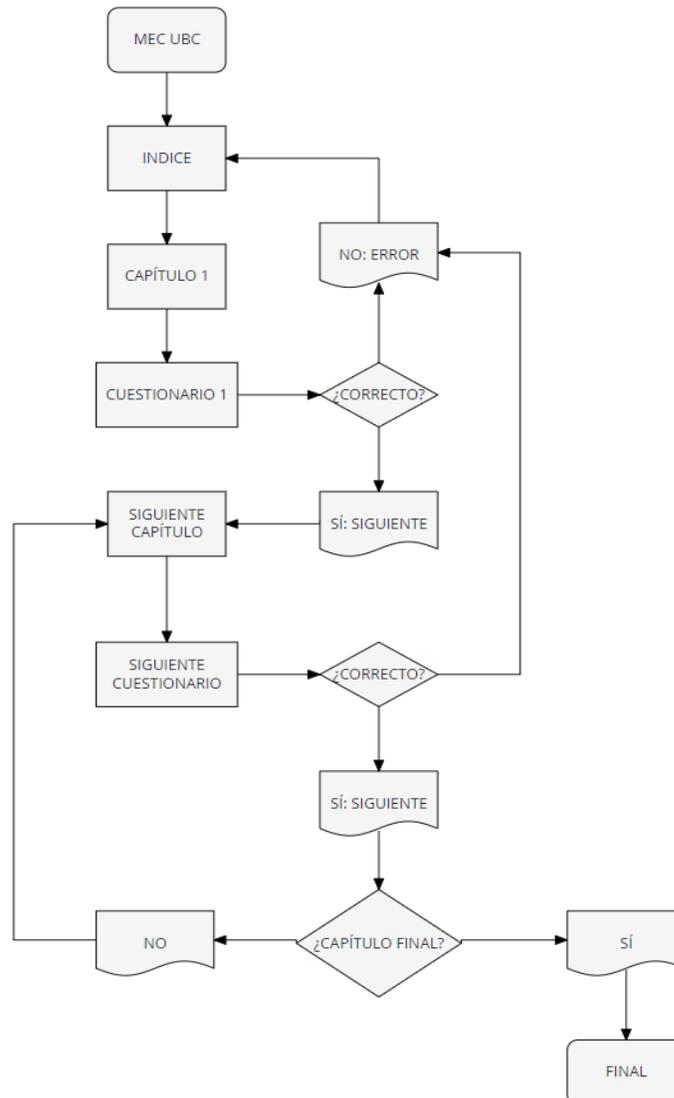
multimedia utilizada para creación de video de presentación del equipo.

---

### 3.2.3 Estructura del contenido del MEC

**Figura 7.**

*Diagrama de flujo contenido del MEC UBC*



MEC UBC  
CAPÍTULOS

- CAPÍTULO 1: EQUIPO
- CAPÍTULO 2: PRESABERES
- CAPÍTULO 3: BOMBA CENTRÍFUGA
- CAPÍTULO 4: ACCESORIOS DE LA UNIDAD
- CAPÍTULO 5: CALIBRACIÓN DEL VENTURI
- CAPÍTULO 6: PRÁCTICA

CAPÍTULO:  
PRESABERES

- Ecuación de balance de energía mecánica
- Transferencia de energía
- Presión de succión y descarga
- Medidor de Caudal en línea “Tipo tubo Venturi”
- Caudal
- Carga altura de elevación
- Eficiencia de una bomba centrífuga
- NPSH

CAPÍTULO:  
BOMBA  
CENTRÍFUGA

- Descripción
- Funcionamiento
- Materiales de construcción
- Condiciones de operación
- Campos de operación
- Tipos de bombas
- Marcas
- Elementos de una bomba centrífuga
- Curvas características de una Bomba centrífuga:
  - Carga Altura de elevación (H) versus caudal
  - $NSPH_{requerido}$  versus caudal
  - Potencia versus caudal
  - Eficiencia versus caudal (rendimiento hidráulico)

CAPÍTULO:  
ACCESORIOS DE LA  
UNIDAD DE OPERACIÓN

- Botón de encendido
- Reóstato
- Dinamómetro
- Motor
- Bomba centrífuga
- Medidores de presión
- Válvula
- Tanque de almacenamiento
- Tubo Venturi

- CAPÍTULO:  
PRÁCTICA
- Inicio
  - Encendido y puesta en marcha del equipo
  - Registro de datos
  - Cálculos matemáticos y análisis de resultados

### **3.2.4 Diseño del contenido multimedia para la elaboración del MEC**

El MEC tiene como objetivo brindar al estudiante una herramienta que permita una mejor comprensión de los conceptos primarios sobre el equipo de laboratorio gracias a su entorno virtual interactivo, fácil de usar y llamativo. Para llevar a cabo esto, se realizó una amplia biblioteca de contenido multimedia los cuales fueron implementados dentro de la plataforma Canva con el fin de organizar la presentación del material. Dichos elementos provienen de dos fuentes, la primera es la galería de recursos de Canva la cual es de uso libre y gratuito para estudiantes, la segunda es una serie de fotos, videos, diagramas, mapas mentales y modelados 3D creados por los autores con programas como solidworks, Goconqr y Camtasia 9. Estos materiales finalmente compilados se llevaron a la plataforma Genially donde se implementó el uso de botones interactivos que permiten una navegación sencilla y secuencial por el material. Adicionalmente, el modelado 3D se llevó a un motor gráfico el cual permitió la creación de un entorno que simula la experiencia de reconocimiento del equipo y permite la interacción con sus partes para conocer los componentes que lo integran.

### **3.2.5 Prueba y ajustes del MEC**

Una vez concluido el montaje del MEC, se inspeccionó el material en búsqueda de posibles errores en su contenido, se corrigieron errores mecanográficos, ortográficos, fallas en la reproducción de video, bugs en la programación del modelado 3D y problemas de renderizado.

## 4. Resultados

### Resultados de contenido

El MEC posee un amplio contenido teórico de fácil comprensión debido a su distribución en subtemas de forma secuencial como se observa en la figura 8 que le permiten al estudiante fortalecer de manera progresiva los conocimientos previos adquiridos en el cumplimiento del plan de estudios.

### Figura 8.

*Índice de inicio del MEC UBC*



En la figura 9 se evidencia el escenario que encontraría el estudiante al completar exitosamente el cuestionario, donde se encuentra un dígito que compone el código que le permite concluir el material tras estudiar los capítulos en el orden establecido.

**Figura 9.**

*Pantalla de finalización del cuestionario de forma correcta*



Tras continuar con el botón siguiente capítulo, el estudiante encontrará el índice actualizado tal como lo muestra la figura 10. Solo al completar correctamente el cuestionario se le activará el ingreso al siguiente tema.

**Figura 10.**

*Índice actualizado al concluir correctamente el capítulo anterior.*



En caso contrario, si el estudiante responde mal una pregunta de un cuestionario, se le enviará a la pantalla de error la cual solo redireccionará a la pantalla de índice desactualizada. Es decir, solo tendrá ingreso al capítulo 1. De esta manera se garantiza que el estudiante preste mucha atención a todo el contenido, ya que de no hacerlo deberá repetir todo el contenido.

**Figura 11.**

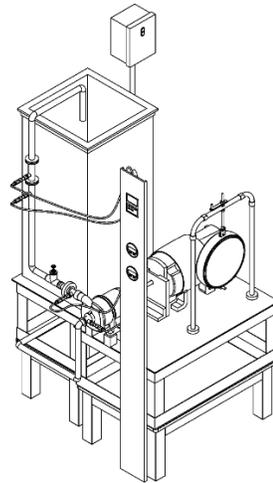
*Pantalla de error.*

**Resultados de diseño**

Con respecto al apartado gráfico del MEC, cuenta con un diseño simple pero llamativo al estudiante, posee ilustraciones y modelados en 3 dimensiones que permiten al estudiante tener una visión más cerca y real al equipo. El modelado 3D es fiel al equipo original, por lo cual el estudiante puede conocer la distribución espacial del equipo en el laboratorio.

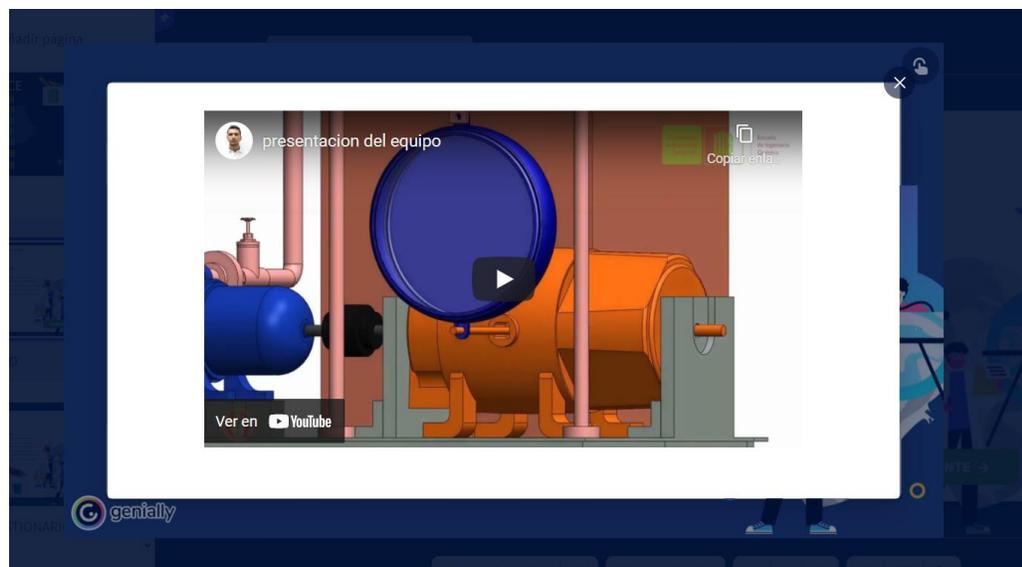
**Figura 12.**

*Planos del modelado 3D de la unidad de bombeo (vista isométrica izquierda)*



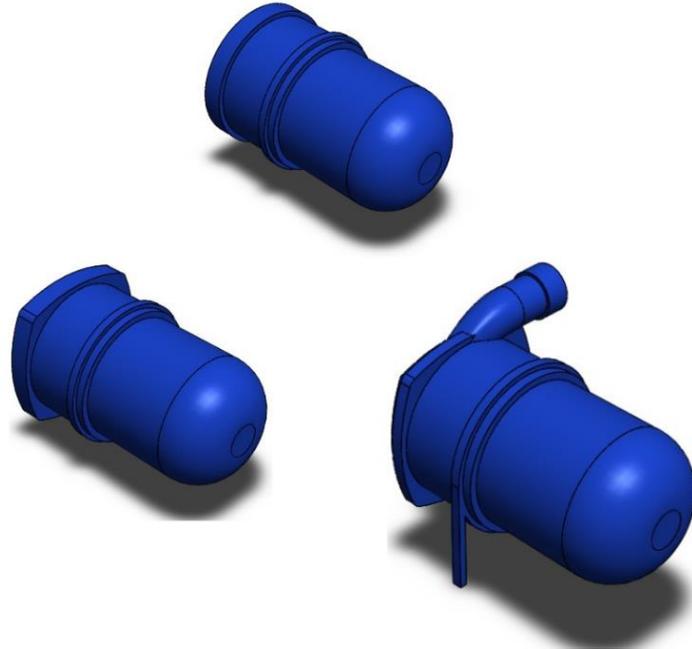
**Figura 13.**

*Video de presentación del equipo.*



**Figura 14.**

*Modelado 3D de una bomba centrífuga a escala laboratorio.*



### Creación de elementos de interacción

Con el fin de crear un entorno interactivo dentro del MEC, se usó el programa Genially el cual cuenta con elementos interactivos que permiten la implementación de una serie de recursos como ventanas emergentes con información adicional, vínculos secuenciales para una continuación ordenada del material, enlaces a los videos explicativos y cuestionarios para evaluar el desempeño del estudiante.

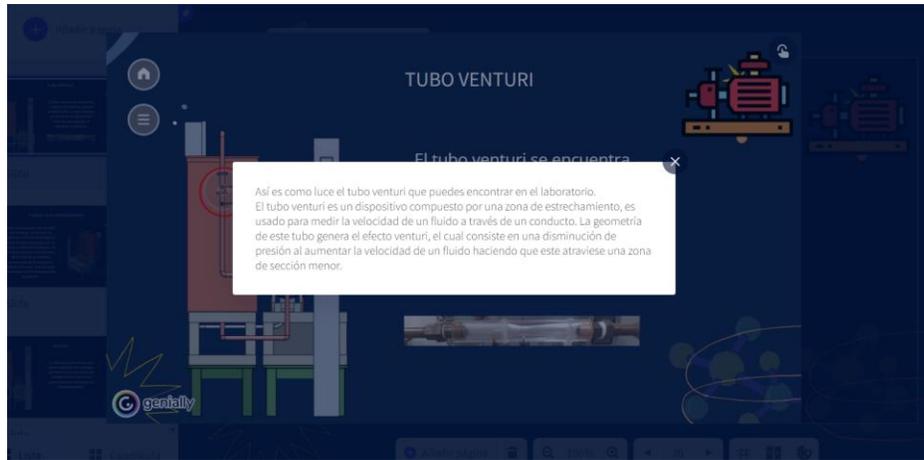
**Figura 15.**

*Indicaciones para resolver los cuestionarios con botones.*

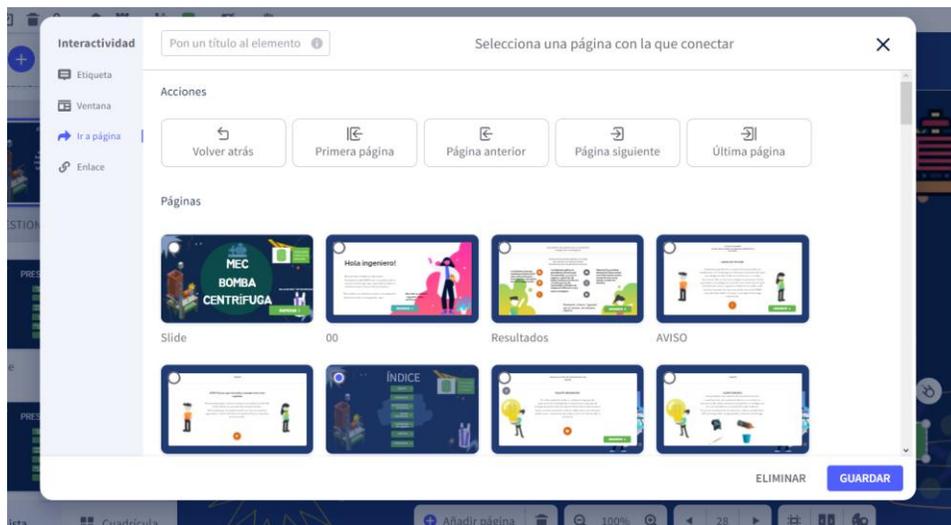


**Figura 16.**

*Descripción emergente.*

**Figura 17.**

*Entrada para la acción de los botones.*



**Figura 18.**

*Sistema de contraseñas.*



## Elaboración del MEC

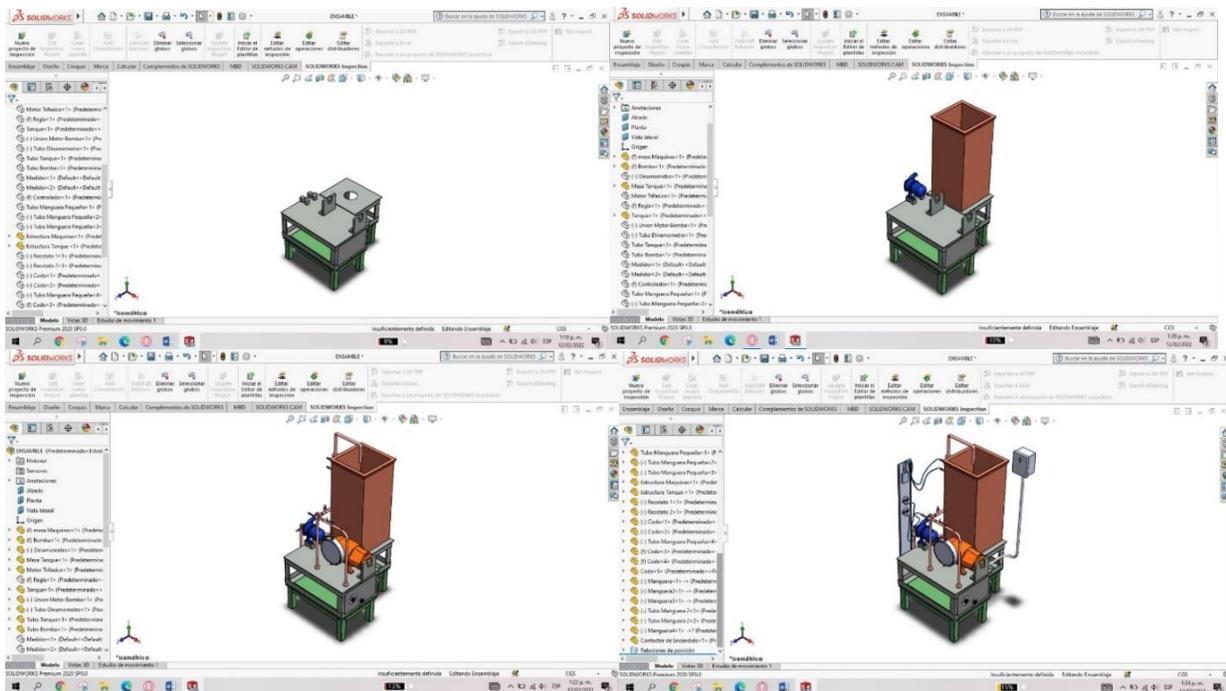
El MEC cuenta con dos pilares importantes para su elaboración, el contenido teórico y el contenido multimedia.

El contenido teórico consiste en una amplia búsqueda de fuentes bibliográficas, estas fuentes deben ser veraces y fiables para brindarle al estudiante bases teóricas adecuadas para su aprendizaje de manera clara pero completa y en un lenguaje técnico propio de un profesional en ingeniería.

El contenido multimedia, fue creado a partir de la implementación de la información del contenido teórico en los elementos visuales creados con los programas de diseño mencionados en capítulos anteriores, con el fin de entregar la información al estudiante de una forma más amigable y concisa.

**Figura 19.**

*Secuencia del modelado 3D del equipo del laboratorio en SolidWorks.*



Adicionalmente, el MEC cuenta con unos cuestionarios con los que se garantiza que el estudiante está haciendo uso adecuado del material y que su proceso de aprendizaje está siendo exitoso, gracias a que, para continuar con el desarrollo del material, se debe responder correctamente cada pregunta que se realice. En caso contrario, de responder mal una pregunta se regresará al inicio del capítulo con el fin de que se repasen los temas donde aún hay falencias.

Finalmente, una vez se tienen los elementos teóricos, multimedia y evaluativos se unificaron mediante un índice que contempla todos los capítulos del MEC y los separa mediante categorías, dentro de esta interfaz se implementaron elementos interactivos para hacer posible la navegación entre categorías.

Esta interfaz se diseñó cuidadosamente con el fin de que el estudiante se encuentre con un entorno intuitivo, simple, agradable y fácil de usar.

### Figura 20.

*Página de inicio del MEC*



En la Figura 20 se presenta el contenido del MEC clasificado por capítulos, compuesto con elementos interactivos los cuales redireccionan al contenido referenciado en los títulos de los botones.

### Figura 21

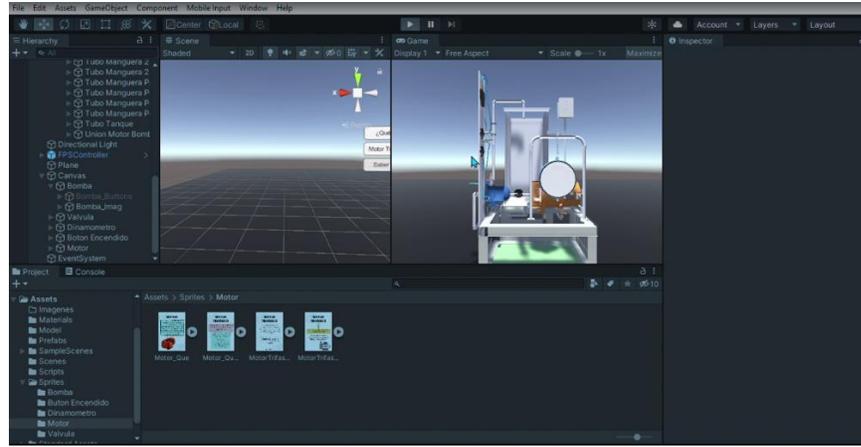
#### *Índice del MEC (Beta)*



En la Figura 21 se evidencian muestras de capítulos que componen el MEC. La figura 22 muestra el proceso llevado a cabo en unity3D para crear los elementos interactivos de los accesorios del equipo, cada parte del equipo es totalmente interactivo, al hacer click sobre las partes que lo componen, el estudiante encontrará información sobre que es, que función cumple en la práctica e información adicional sobre las fuentes a consultar para estudiarlos más a fondo. En la figura 23 se muestra el proceso secuencial a seguir para llevar a cabo la práctica de manera exitosa.

**Figura 22.**

*Creación de los elementos interactivos en el modelado 3D.*

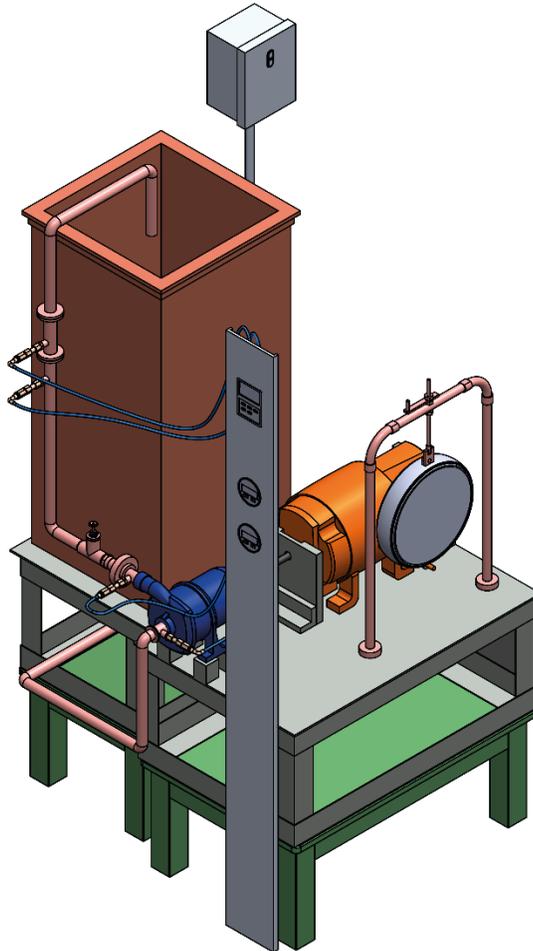
**Figura 23**

*Secuencia para el desarrollo correcto de la práctica.*



**Figura 24.**

*Modelado 3D del montaje del laboratorio de procesos*



Finalmente, la funcionalidad del MEC es óptima ya que es simple y cuenta con componentes intuitivos que permiten orientar su manejo evitando confusión en la navegación de la herramienta.

## 5. Conclusiones

- El material educativo computarizado (MEC) diseñado para la práctica de la bomba centrífuga del Laboratorio de Procesos I, es una herramienta que permite a los estudiantes una mayor comprensión de los equipos y fenómenos de transferencia de energía de forma interactiva de manera previa a la práctica de laboratorio ya que compila el material teórico necesario para la comprensión del uso, funcionamiento e importancia de las bombas centrífugas en la industria.
- Esta herramienta posee un software con un modelado 3D interactivo del montaje de la bomba centrífuga usada en el laboratorio de la escuela de ingeniería química
- El MEC provee un entorno el cual da un primer acercamiento real al estudiante a la práctica presencial desde la virtualidad, reforzando así los conocimientos teóricos necesarios para la comprensión de los fenómenos ocurridos en el equipo y de esta manera capacitar al estudiante en la operación de la unidad de bombeo.

### **Recomendaciones**

Se recomienda a la Escuela de Ingeniería Química -UIS la creación de una plataforma virtual donde se compilen estas herramientas interactivas desarrolladas desde la escuela para otorgarle a los estudiantes material complementario para su formación académica y profesional.

Se sugiere que sea el docente quien le presente y facilite estas herramientas a los estudiantes, con el fin de fomentar el tiempo de trabajo independiente haciendo del cumplimiento de este material un requisito para el desarrollo de la práctica.

Se sugiere que el docente realice las validaciones posteriores al desarrollo de la práctica con el fin de garantizar que el estudiante saque el máximo provecho del material y que los temas abordados sean suficientes para cumplir con los conceptos necesarios en el desarrollo de la práctica y la formación profesional de este.

### Referencias bibliográficas

A. Salmerón Navarro, *La importancia de las TIC en la educación* - Medac, MEDAC - Instituto Oficial de Formación Profesional, 2017. [Online]. Available: <https://medac.es/blogs/sociocultural/las-herramientas-tic-en-la-educacion>

Agnelli Faggioli, A. (2020). *Las Tecnologías de la Información y la Comunicación y su avance en el contexto educativo*. Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas, 3(1), 94-101.

Álvaro Galvis Panqueva (1996) *Marcos Teóricos, Material Educativo Computarizado (MEC)* pág.8

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). *TERMODINÁMICA* / (4a. ed.). MEXICO: McGraw-Hill pág.9

Leguizamón Gonzáles Myriam Cecilia (2006) *Diseño y desarrollo de materiales educativos computarizados (MEC): una posibilidad para integrar la informática con las demás áreas del currículo*. Fundación Universitaria Católica del norte. <https://revistavirtual.ucn.edu.co/index.php/RevistaUCN/article/view/190/0>

Ávila Díaz William Darío. (2013, enero-julio). *Hacia una reflexión histórica de las TIC*. Universidad Santo Tomás. *Revista Hallazgos*, vol. 10 (núm. 19), pp. 213-233. <https://www.redalyc.org/pdf/4138/413835217013.pdf>

H. Casadiegos Agudelo and J.L Alquichire Mizar. *Desarrollo de material educativo computacional (MEC) para la enseñanza de Ósmosis inversa en la escuela de Ingeniería Química*. Universidad Industrial de Santander, 2009.

Angarita Jaimes, Barajas Ferreira, C., Ibarra Mojica, D. M., & Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química. Tesis. (2021). *DISEÑO E IMPLEMENTACION DE MATERIAL EDUCATIVO COMPUTARIZADO (MEC) PARA LA ENSEÑANZA DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL DISEÑO DE CONDENSADORES* [recurso electrónico]. UIS.

Chacon Bustos, Manosalva Cortes, A. L., Barajas Ferreira, C., & Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química. Tesis. (2014). *DESARROLLO DE UN MATERIAL EDUCATIVO COMPUTARIZADO (MEC) COMO RECURSO EN EL APRENDIZAJE DE LA ASIGNATURA MICROBIOLOGIA INDUSTRIAL* [recurso electrónico]. UIS.

Aguilera Santamaria, Diaz Arenas, D., Barajas Ferreira, C., & Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química. Tesis. (2015). *DESARROLLO DE UN MATERIAL EDUCATIVO COMPUTARIZADO (MEC) PARA EL APRENDIZAJE DE LA OPERACION DE HUMIDIFICACION* [recurso electrónico]. UIS.

Almeida Rincon, Barajas Ferreira, C., Ibarra Mojica, D. M., Pérez Ríos, J. M., & Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química. Tesis. (2021). *DESARROLLO DE UN MATERIAL EDUCATIVO COMPUTARIZADO (MEC) PARA LA SIMULACION DE LOS FENOMENOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR E HIDRODINAMICA EN UN EVAPORADOR DE TERMOSIFON VERTICAL A ESCALA LABORATORIO*. UIS.

Viejo Zubicaray. (1981). *BOMBAS TEORÍA, DISEÑO Y APLICACIONES* (2 ed.). s.n. Editorial Limusa. Pag. 58-62.

Foust, A. S., Wenzel, L. A., y Clump, C. W. (2006). *Principios de operaciones unitarias*. Continental. 1997. Pag.584-589, 592-595.

FESTO. (2018). *Válvulas de estrangulación*. 11. Retrieved from [https://www.festo.com/cat/en-gb\\_gb/data/doc\\_ES/PDF/ES/GRLO-VFFS\\_ES.PDF%0A%0A](https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_ES/PDF/ES/GRLO-VFFS_ES.PDF%0A%0A)

Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (n.d.). *Mecánica de fluidos*. McGraw-Hill. Pag 185-188.

Kennet, J., & el cuerpo de redactores de Chemical. (2011). *BOMBAS selección, uso y mantenimiento*. Mc Graw Hill, 98. Pag. 71-80

White Frank. (2008). *MECÁNICA DE FLUIDOS* (2ed.. ed.). McGraw-Hill. Pag.356-360

Parra, C. (2012). *Las TIC y la educación en Colombia durante la década del noventa: alianzas y reacomodaciones entre el campo de las políticas educativas, el campo académico y el campo empresarial*. Revista Educación y Pedagogía, 24(62), 173–189.

Dwyer, T. (1974). *Heuristic Strategies for Using Computers to Enrich Education*. Internation Journal of Man-Machine Studies, 6, 137–195.

## Apéndices

### A1. Presentación del equipo

El equipo de la bomba centrífuga se centra en un equipo fundamental el cual le da nombre a la práctica, la bomba centrífuga tanto la práctica como el contenido teórico se basa en su funcionamiento.

El equipo de la bomba centrífuga es un dispositivo que permite simular y recrear la transferencia de energía en una bomba centrífuga a escala laboratorio, El fluido ingresa por la parte de succión de la bomba donde esta le transfiere la energía mecánica que obtiene gracias a la acción del motor eléctrico trifásica conectado a su eje. El líquido de trabajo, en este caso agua, sale por la parte de descarga de la bomba, circulando así por la tubería hacía el tanque de almacenamiento. El líquido sale nuevamente por el fondo del tanque y se dirige en las tuberías nuevamente hacía la parte de succión de la bomba, repitiendo esto en un ciclo constante.

### A2. Presaberes

El objetivo de este capítulo es reforzar los conocimientos necesarios para el entendimiento del equipo. Adicionalmente, se proporcionan diferentes ecuaciones que permiten el entendimiento de los fenómenos presentes dentro del equipo y permiten desarrollar los cálculos solicitados en el informe de laboratorio.

- Balance de energía (Cengel & Ghaja, 2011)

El balance de energía que se presenta en este capítulo del material es el mismo presentado en la sección de marco teórico en el contenido de esta memoria escrita

Factor de fricción ( $f$ )

Es un parámetro adimensional usado en dinámica de fluidos para calcular la pérdida de carga a causa de la fricción en una tubería. Dos parámetros son fundamentales en el cálculo e influencia de este valor. Estos son el Número de Reynolds y la rugosidad relativa, estos a su vez dependen del régimen del fluido. (White Frank, 2008).

Para un régimen laminar, es decir, un valor del número de Reynolds menor a 2300, el factor de fricción se calcula de la siguiente manera:

$$f_{Laminar} = \frac{64}{Re} \quad (\text{Ec. 18})$$

Mientras que, para un régimen turbulento correspondiente a un número de Reynolds mayor a 4000, se calcula mediante la correlación de P.K. Swamee y A.K. Jain:

$$f_{Turbulento} = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3.7(D/k)} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (\text{Ec. 19})$$

Dónde:	$f$ : Factor de fricción de Darcy-Weisbach	[Adimensional]
	D: Diámetro de tubería	[m]
	k: Rugosidad de la tubería	[m]
	$Re$ : Reynolds $Re = \frac{\rho V D}{\mu}$	[Adimensional]
	$\rho$ : Densidad del líquido	[kg/m <sup>3</sup> ]
	V: Velocidad del fluido	[m/s]
	$\mu$ : Viscosidad	[Pa*s]

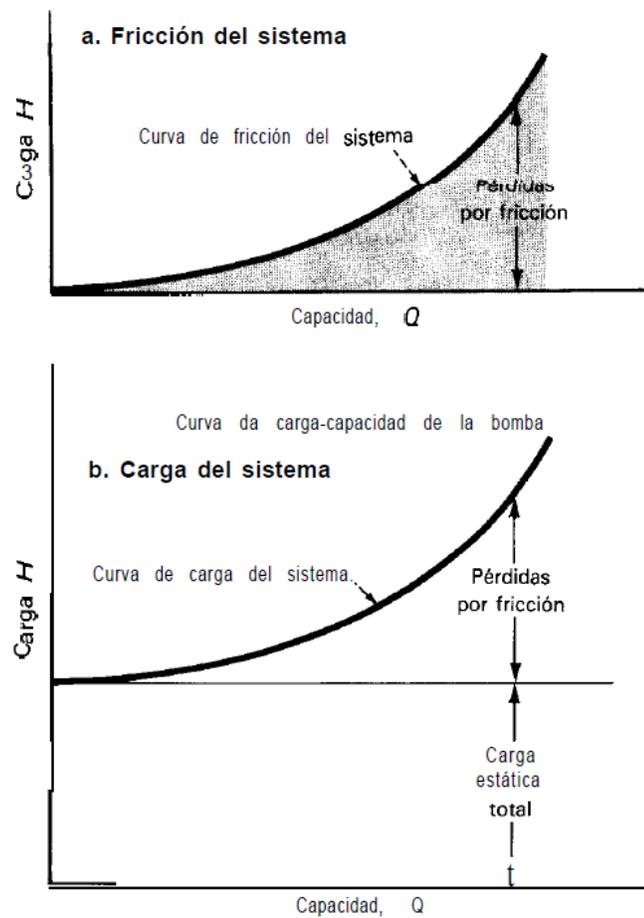
Pérdidas por fricción  $h_L$

Representa la altura adicional que el fluido necesita para elevarse por medio de una bomba con la finalidad de superar las pérdidas por fricción en la tubería.

La pérdida de carga se produce por la velocidad y se relaciona directamente con el esfuerzo de corte de la pared del tubo. (Cengel & Cimbala, 2006)

**Figura 25.**

*Representación gráfica de las pérdidas por fricción.*



*Nota.* Adaptado de Kenneth J, 1984.

Velocidad promedio:

$$V_{Prom} = -\frac{R^2}{8} \left( \frac{dP}{dx} \right) \quad (\text{Ec. } 20)$$

Caída de presión:

Conociendo que la caída de presión a lo largo de una tubería de longitud L es:

$$\left(\frac{dP}{dx}\right) = \frac{P_2 - P_1}{L} \quad (\text{Ec. 21})$$

Reemplazando (6) en (5)

$$P_2 - P_1 = \Delta P = \frac{8\mu LV_{Prom}}{R^2} = \frac{32\mu LV_{Prom}}{D^2}$$

Es necesario aclarar que dicha ecuación está limitada a ser usada para régimen laminar, ya que el  $\Delta P_L$  para todo tipo de flujos totalmente desarrollados es:

$$\Delta P_L = f \frac{L \rho V_{Prom}^2}{2D} \quad (\text{Ec. 22})$$

Dónde:  $\Delta P_L$ : Caída de presión ocasionada por efectos viscosos [atm]

L: Longitud de la tubería [m]

D: Diámetro de la tubería [m]

Es decir que para flujo laminar se tiene:

$$f \frac{L \rho V_{Prom}^2}{2D} = \frac{32\mu LV_{Prom}}{D^2} \Rightarrow f = \frac{64\mu}{\rho g} = \frac{64}{Re} \quad (\text{Ec. 23})$$

Reemplazando  $\Delta P_L$  en esta ecuación se obtiene:

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{LV^2}{2Dg} \quad (\text{Ec. 24})$$

Dónde:  $h_L$ : Perdidas por fricción [m]

f: Factor de fricción de Darcy-Weisbach [Adimensional]

L: Longitud de la tubería	[m]
V: Velocidad	[m/s]
D: Diámetro	[m]
g: Gravedad	[m/s <sup>2</sup> ]

- Carga hidrostática neta (Cengel & Cimbala, 2006)

Se obtiene a partir del balance de energía:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + h_A - h_P - h_L = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (\text{Ec. 25})$$

Al no presentarse pérdidas por remoción en el equipo, este término se elimina de la ecuación y se reorganiza dando como resultado:

$$h_A = H = h_{Bomba} = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + (z_2 - z_1) - h_L \quad (\text{Ec. 26})$$

Dónde: H: Carga total de la bomba	[m]
$\rho$ : Densidad	[kg/m <sup>3</sup> ]
g: Gravedad	[m/s <sup>2</sup> ]
z: Altura de succión (1) y descarga (2)	[m]
P: Presión de succión (1) y descarga (2)	[Pa]
v: Velocidad del fluido en succión (1) y descarga (2)	[m/s]
$h_L$ : Perdidas por fricción	[m]

- Caudal (Foust Alan, 2006)

Teóricamente, la ecuación que relaciona en un sistema de bombeo todas las variables es:

$$Q = C_v A_v \sqrt{\frac{2}{\rho \left(1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2\right)}} \sqrt{\Delta P} \quad (\text{Ec. 27})$$

Dónde:	$Q_t$ : Caudal teórico	[m <sup>3</sup> /s]
	$\Delta P$ : Diferencial de presión	[Pa]
	$C_v$ : Coeficiente de Venturi	[Adimensional]
	$g$ : Gravedad	[m/s]
	$A_v$ : Área del venturímetro	[m <sup>2</sup> ]
	$\rho$ : Densidad del líquido	[kg/m <sup>3</sup> ]
	$A_v$ : Área del venturímetro	[m]
	$A_1$ : Área de la zona amplia del Venturi	[m]
	$A_2$ : Área de la garganta del venturi	[m]

Sin embargo, para el cálculo de caudal durante la práctica, se realiza una relación sencilla entre el volumen de líquido sobre el tiempo que tardó en ocupar este volumen, esta ecuación se usa para calcular el  $C_v$  a partir de datos experimentales.

- Eficiencia de una bomba centrífuga (Viejo Manuel, 2000).

La eficiencia de una bomba centrífuga es el coeficiente entre la potencia realmente absorbida por el impulsor y convertida en carga (potencia útil) y la potencia aplicada a la flecha de la bomba (potencia suministrada):

$$\eta = \frac{\text{Potencia útil}}{\text{Potencia suministrada}} * 100 \quad (\text{Ec. } 28)$$

Se puede expresar la potencia ganada por el fluido por medio de:

$$P_U: Q(P_2 - P_1) \quad (\text{Ec. } 29)$$

Dónde:	$P_1$ : Presión en la succión	[Pa]
	$P_2$ : Presión en la descarga	[Pa]
	Q: Caudal	[m <sup>3</sup> /s]
	$P_U$ : Potencia útil	[W]

Potencia suministrada o potencia de freno:

$$T_W = F \cdot l \text{ eje} \cdot 2\pi \cdot \omega \quad (30)$$

Dónde:	$T_W$ : Potencia de freno	[W]
	F: Fuerza	[N]
	l eje: Longitud de eje	[m]
	$\omega$ : Frecuencia	[s <sup>-1</sup> ]

- Altura neta positiva de aspiración (Foust Alan, 2006).

NPSH es la sigla de la expresión inglesa “Net-Positive-Suction-Head”, también llamada “altura de aspiración neta positiva” o “altura total de presión de retención”. Es la diferencia entre la carga estática en la entrada de succión y la carga correspondiente a la presión de vapor del líquido en la entrada de la bomba.

Permite conocer las condiciones a la que se presenta la cavitación y de esta manera evitarla. Para ello, la presión a lo largo de la línea de succión no debe ser menor a la presión de vapor del líquido.

Este criterio es fácilmente evaluable comparando los valores del NPSHrequerido y el NPSHdisponible con la siguiente desigualdad:

$$NPSH_{disp.} > NPSH_{requer.}$$

### **NPSH disponible:**

Es una medida calculable y depende del arreglo del sistema de bombeo.

$$NPSH = \left( \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \right)_{\text{entrada de la bomba}} - \frac{P_v}{\rho g}$$

Tras el uso de ecuaciones mostradas en capítulos anteriores se propone al estudiante demostrar que se llega a las siguientes ecuaciones:

$$NPSH_d = \frac{P_1 - P_v}{g\rho_{\text{fluido}}} + Z_1 + h_L \quad (\text{Ec. 31})$$

Dónde:  $P_1$ : Presión de succión [Pa]

$P_v$ : Presión de vapor del agua [Pa]

$h_L$ : Pérdidas por fricción [m]

$Z_1$ : Altura de la zona de succión [m]

$\rho_{fluido}$ : Densidad del fluido [kg/ft<sup>3</sup>]

$g$ : Aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

### **NPSH requerido:**

Es característico de cada bomba (según tamaño, condiciones de servicio, etc.) ofrecido por el fabricante. Se puede obtener con la relación:

$$NPSH_r = \frac{P_{atm} - P_v}{g \rho_{fluido}} - H \quad (\text{Ec. } 32)$$

Dónde: H: Cabeza de la bomba [m]

### *Presión de succión y descarga:*

Mediante un sistema de sensores y medidores se toma la lectura de la presión de succión y descarga de la bomba, a la entrada y salida de este equipo correspondientemente.

### *Transferencia de energía*

El fenómeno principal de estudio en la termodinámica es la transferencia de energía, este puede ocurrir en diversas manifestaciones siendo la más popular el calor.

De manera concisa, las bombas son dispositivos que transfieren energía al fluido bombeado desde un estado de baja presión estática a uno de presión elevada. Inicialmente la energía es transmitida en forma de energía mecánica por un eje (proveniente del motor) dicha energía es transferida al fluido y a su vez transformada en energía hidráulica.

Al entrar de manera axial al impulsor, este le suministra energía cinética (velocidad del fluido) a través de los álabes. Finalmente, el fluido entra al compartimiento de la bomba conocido como voluta (la parte que asemeja a una coraza de caracol) donde el fluido se expande transformando la energía cinética en energía potencia estática. (McNaughton Kenneth j, 2011)

Cuando se habla de transferencia de energía, se suele relacionar con el calor.

Pero es muy importante enunciar que el calor es una de las manifestaciones de la energía y su transferencia, la "más aplicativa". Es por esto por lo que, al estudiar la transferencia de energía, los libros suelen centrarse en esta manifestación. Sin Embargo, existen otros medios de transferencia de energía, entre esos los presentes en una bomba centrífuga (los cuales implican una transformación de esta).

Principalmente se debe entender que, en todo sistema debe cumplirse las leyes de la termodinámica. En este apartado solo abordaremos la primera ley desde la cual se parte hacia el balance de energía mecánica, la teoría abordada en este capítulo del material se presentó en la sección de marco teórico de esta memoria escrita.

### **A3. Bomba centrífuga**

En este capítulo se presentan los distintos tipos de bomba centrífuga, principales características, las curvas características, materiales de construcción, condiciones de operación y campos de operación.

Como se mencionó en el apartado anterior, la bomba centrífuga es un transformador de energía, ya que transforma la energía mecánica en energía hidráulica. (Viejo Manuel, 2000)

*Elementos de una bomba centrífuga:*

Las bombas son equipos compuestos por diversos componentes que cumplen una función específica.

*Materiales de construcción*

Al transportar principalmente líquidos, los materiales de construcción de las bombas suelen ser materiales resistentes a la corrosión al interior de la bomba, mientras que la recubierta de la coraza está construida en metales pesados, de esta manera la bomba posee una gran resistencia mecánica sin perder sus propiedades anticorrosivas al contacto con el líquido. (McNaughton Kenneth J, 2011)

Al transportar principalmente líquidos, los materiales de construcción de las bombas suelen ser materiales resistentes a la corrosión al interior de la bomba, mientras que la recubierta de la coraza está construida en metales pesados, de esta manera la bomba posee una gran resistencia mecánica sin perder sus propiedades anticorrosivas al contacto con el líquido. (McNaughton Kenneth J, 2011)

El material más usado es el hierro tanto fundido como en aleación y el acero inoxidable. Una alternativa a los materiales resistentes a la corrosión son los materiales especiales, la alternativa viable en factores económicos son las aleaciones metálicas. El más usado es el hierro al alto silicio. (McNaughton Kenneth J, 2011)

Cuando se tratan de líquidos puntuales como los cloruros, se suele utilizar materiales termoendurecibles y termoplásticos.

Resinas poliméricas con el politetrafluoroetileno y el hexafluoropropileno son altamente solicitados para la construcción de piezas de las bombas gracias a su resistencia a la corrosión. (McNaughton Kenneth J, 2011)

### *Funcionamiento*

El funcionamiento de una bomba centrífuga de flujo es "sencillo". Consiste en la succión de un fluido de trabajo, puntualmente un líquido mediante la fuerza centrífuga creada por el eje, llevándolo de un estado inicial a uno final gracias a la acción de las aspas del impulsor. El motor que acciona la bomba puede ser eléctrico o combustión. Para la práctica del laboratorio se usa un motor eléctrico. (Foust Alan, 2006)

### *Condiciones de operación*

Para que una bomba funcione correctamente el líquido transportado debe ser controlado en las variables de presión y temperatura, de esta manera se evita la formación de vapor dentro de la bomba, lo cual causaría daños en el equipo. (Foust Alan, 2006)

### *Campos de operación*

Las bombas se encuentran de manera frecuente en todas las industrias de procesos químicos. Siempre que se requiera transportar un fluido será necesaria una bomba. Desde las industrias que necesitan transportar agua como un servicio para sus procesos, hasta los procesos de petroquímica donde se transportan derivados líquidos.

Las bombas se encuentran de manera frecuente en todas las industrias de procesos químicos. Siempre que se requiera transportar un fluido será necesaria una bomba. Desde las industrias que necesitan transportar agua como un servicio para sus procesos, hasta los procesos de petroquímica donde se transportan derivados líquidos. También en industrias de tratamiento de aguas residuales, producción de farmacéuticos, y más. (McNaughton Kenneth J, 2011)

*La curva característica* de una bomba centrífuga es la caracterización gráfica donde se representa la relación Carga – Caudal ( $H$  vs  $Q$ ) que garantiza el equipo de bombeo a determinada velocidad de giro de su mismo impulsor.

Dicha relación es única para cada bomba. Adicionalmente, existen una serie de curvas que relacionan los demás factores importantes de un equipo de bombeo. Entre ellos:

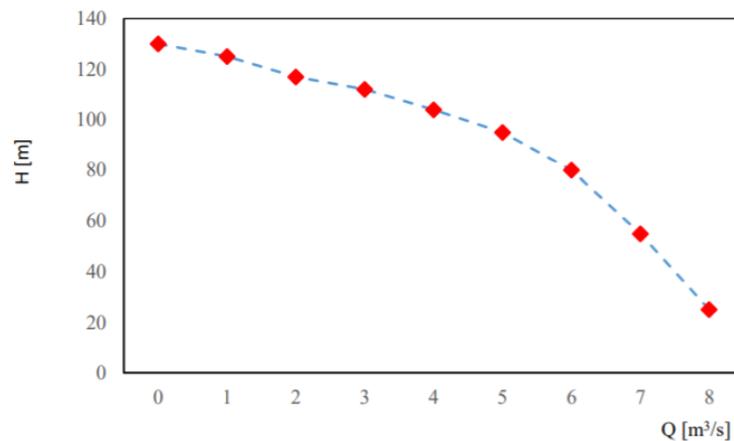
Potencia vs Caudal ( $P$  vs  $Q$ )

Altura neta positiva de aspiración requerida ( $NPSH_{req}$  vs  $Q$ )

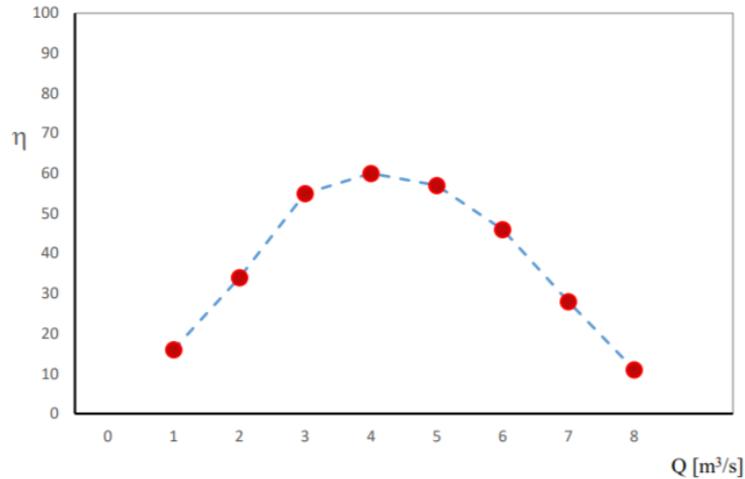
Eficiencia vs  $Q$  ( $\eta$  vs  $Q$ )

### Figura 26

*Curva Carga  $H$  versus Caudal  $Q$*



*Tomado de Escalante, H (2019)*

**Figura 27**Curva de Eficiencia ( $\eta$ ) vs Caudal (Q)

Tomado de Escalante, H (2019)

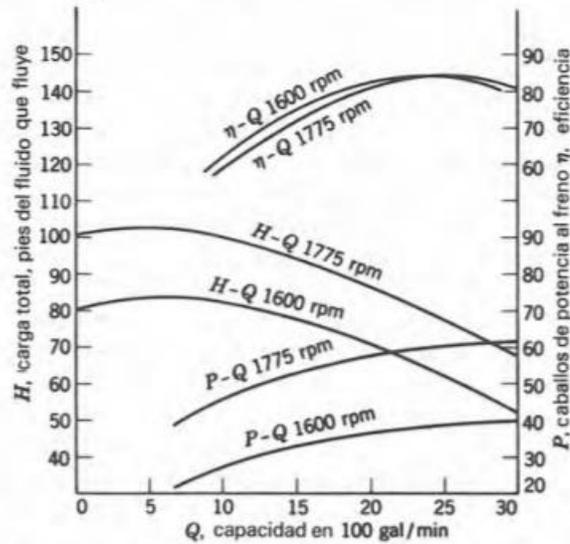
Variación de la velocidad del impelente

Es posible operar las bombas a distintas velocidades si se cuenta con un regulador, para el caso de la unidad de operación de bombeo ubicada en el laboratorio de ingeniería química UIS, esta cuenta con un reóstato; el cual al mover sus manecillas aumenta la resistencia del circuito y partiendo de la ley de ohm esto causa un aumento directamente proporcional del voltaje. Al incrementar el voltaje, el motor aumentará las revoluciones del eje y, por lo tanto, las del impulsor.

Al tener una velocidad de rotación mayor da como resultado una capacidad a la misma presión que requiere más caballos de potencia para suplir el incremento de flujo de líquido. (Foust Alan, 2006)

**Figura 28**

*Efecto de la variación de velocidad en las curvas características.*



*Nota.* Tomado de Foust, A. 2006

*Variación del diámetro del impulsor*

Una carcasa de bomba, por lo general admite diversos diámetros de impulsor. A su vez, estos se pueden modificar reduciendo su diámetro al solicitarlos al fabricante si así el usuario lo requiere.

En una bomba centrífuga convencional, los impulsores tienen a promover el flujo radial, en este caso operan a una velocidad específica más baja (debajo de 4200 rpm). Mientras que los impulsores de flujo axial operan las velocidades específicas más altas (arriba de 9000 rpm). Los impulsores de flujo mezclado (axial y radial) operan en un rango medio (entre 4200 y 9000 rpm) entre el campo de operación de los 2 mencionados anteriormente. (Foust Alan, 2006)

*Variación de la Altura del líquido en el tanque*

Con el fin de contrastar resultados, durante la práctica se usan 2 alturas distintas de agua al interior de tanque contenedor, el docente a cargo dará las indicaciones de las 2 alturas y el objetivo del estudiante será, luego de tomar los datos, calcular las variables solicitadas y analizar el efecto de esta altura del líquido en el comportamiento de las curvas características.

*Variación de la densidad del líquido*

La densidad del líquido toma un valor importante en el comportamiento de las curvas características, los resultados variarán si se utiliza una solución con una densidad diferente a la del agua. El objetivo del estudiante es analizar la influencia de la densidad del líquido en la tendencia de las curvas características y evidenciar la diferencia entre estas y las obtenidas al bombear agua.

#### **A.4 Accesorios del equipo**

Para desarrollar la practica en el equipo bomba centrífuga se requiere del uso de accesorios que permitan tomar las mediciones necesarias para los cálculos reportados en el informe. Estos accesorios son presentados en este capítulo y explicados para que el estudiante pueda tenerlos a disposición en el momento de la práctica y que entienda la función de cada uno.

*Válvula:* Es una válvula simple de estrangulamiento o de paso, muy común en las industrias de procesos (FESTO, 2018).

*Motor:* Es un motor eléctrico trifásico, este tipo de motores son los más usados a nivel industrial ya que sus características eléctricas y funcionales lo hacen ideal para trabajos de funcionamiento prologando y con mayor exigencia energética. (Hoffman Carlos, 2004)

*Dinamómetro:* Equipo que mide la fuerza ejercida por el motor (PCE INSTRUMENTS, 2022). Al no estar anclado el motor vibra durante su funcionamiento, estas vibraciones son medidas en forma de fuerza en el dinamómetro. El dinamómetro usado en la práctica de la bomba centrífuga es análogo y de tracción.

*Tubo Venturi:* El tubo Venturi se encuentra oculto en la tubería, pero es posible verlo en otro montaje presente en el laboratorio. trata de identificarlo al terminar tu práctica. Así es como luce el tubo Venturi que puedes encontrar en el laboratorio.

El tubo Venturi es un dispositivo compuesto por una zona de estrechamiento, es usado para medir la velocidad de un fluido a través de un conducto. La geometría de este tubo genera el efecto Venturi, el cual consiste en una disminución de presión al aumentar

la velocidad de un fluido haciendo que este atravesase una zona de sección menor. (Foust Alan, 2006).

En la industria de procesos es común que se deba calibrar el tubo Venturi, esto se hace mediante el cálculo del coeficiente del Venturi  $C_v$ , esta es una de las competencias de la práctica de la unidad de bombeo, en el capítulo “Práctica” se abordará dicha calibración de manera más detallada.

### **A.5 Calibración del Venturi**

En este capítulo se aborda una de las competencias principales de la práctica de la unidad de bombeo, para realizar la calibración de Venturi es necesario realizar un balance de energía a partir de la ecuación de Bernoulli. Debido a que se requiere que el estudiante con sus conocimientos logre deducir la ecuación final, teniendo en cuenta un balance de energía y masa en el medidor, en este capítulo se darán las condiciones para hacerlo y el estudiante debe medir sus conocimientos para obtener el coeficiente de descarga del Venturi.

- *Teorema de Bernoulli (Cengel & Cimbala, 2006)*

El teorema de Bernoulli dice que, dentro de un flujo horizontal de fluido, los puntos de mayor velocidad del fluido tendrán menor presión que los de menor velocidad.

La ecuación de Bernoulli se refiere a la conservación de la energía cinética, potencial y la energía de flujo de un flujo de fluido y su transformación de una en otra en las regiones del flujo en donde las fuerzas viscosas netas son despreciables y donde se aplican otras condiciones restrictivas.

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 \quad (\text{Ec. 33})$$

Dónde:	V: Velocidad promedio del líquido	[m <sup>2</sup> /s]
	Z: Elevación	[m]
	P: Presión del líquido	[atm]
	g: Aceleración de la gravedad	[m/s <sup>2</sup> ]
	$\rho$ : Densidad del líquido	[kg/m <sup>3</sup> ]

Para calibrar el Venturi es necesario conocer el Coeficiente de Venturi, este se encuentra relacionado con el caudal y se calcula a partir de un balance de energía en el tubo Venturi, partiendo de la ecuación (33)

Multiplicando la ecuación por  $\rho$  y sabiendo que la diferencia de altura en el tubo Venturi es despreciable tenemos la ecuación:

$$P_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} \quad (\text{Ec. 34})$$

Reorganizando la ecuación tenemos y despejando los términos de velocidad

$$V_1^2 - V_2^2 = \frac{2(\Delta P)}{\rho} \quad (\text{Ec. 35})$$

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad (\text{Ec. 36})$$

A partir de la ecuación de continuidad sabemos que:

$$V_2 A_2 = V_1 A_1 \quad (\text{Ec. 37})$$

Despejando el término de velocidad en el punto 2 obtenemos y elevándolo al cuadrado:

$$V_2^2 = V_1^2 \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad (\text{Ec. 38})$$

Reemplazando en (37) obtenemos:

$$V_1^2 - V_1^2 \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 = \frac{2(\Delta P)}{\rho} \quad (\text{Ec. 39})$$

Ahora se deben incluir las pérdidas por fricción

$$V_1^2 - V_1^2 \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 = \frac{2(\Delta P)}{\rho} - \Sigma F \quad (\text{Ec. 40})$$

Despejando  $V_1^2$  tenemos la ecuación

$$V_1^2 \left(1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2\right) = \frac{2(\Delta P)}{\rho} - \Sigma F \quad (\text{Ec. 41})$$

El término  $(\Delta P/\rho)$  representa la diferencia total de presiones entre los puntos 1 y 2, mientras que el término  $\Sigma F$  incluye toda la fricción del fluido entre los mismos dos puntos. La diferencia entre estos términos representa el cambio de energía cinética entre los puntos 1 y 2. En consecuencia, esta diferencia puede expresarse como una fracción de la diferencia total de presiones  $(\Delta P)$ , o (Foust Alan, 2006)

$$\frac{\Delta P}{\rho} - \Sigma F = C_v^2 \left(\frac{\Delta P}{\rho}\right) \quad (\text{Ec. 42})$$

donde  $C_v^2$  es un factor de proporcionalidad que siempre es menor que la unidad.

Reemplazando (42) en (41) despejando  $V_1^2$  Y sacando raíz tenemos:

$$V_1 = C_v \sqrt{\frac{2(\Delta P)}{\rho \left(1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2\right)}} \quad (\text{Ec. 43})$$

Para obtener el caudal es necesario multiplicar por el área de la tubería, la cual es igual aproximadamente igual al área de la sección amplia del tubo Venturi, dando como resultado la ecuación final:

$$Q_{real} = A_2 C_v \sqrt{\frac{2(\Delta P)}{\rho \left(1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2\right)}} \quad (\text{Ec. 44})$$

Al tener esta ecuación, es posible reorganizarla para tenerla de la forma  $y=mx$

$$Q_{real} = A_2 C_v \sqrt{\frac{2}{\rho \left(1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2\right)}} \sqrt{(\Delta P)} \quad (\text{Ec. 45})$$

Donde,  $Y=Q$

$$X = \sqrt{(\Delta P)} ;$$

$$m = A_2 C_v \sqrt{\frac{2}{\rho \left(1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2\right)}} \quad (\text{Ec. 46})$$

Obteniendo experimentalmente los valores de caudal y diferencial de presión es posible crear la gráfica y obtener la pendiente  $m$ , de la cual se despejará el término  $C_v$ . Este término oscila entre 0.98 y 0.99 para el tubo Venturi (Drumond Pedro, 2014). Será necesario que calcule este término, lo compare con valores reales experimentales y haga un análisis de resultados.

## 6.6 Práctica

Finalmente, en este capítulo se da las indicaciones a seguir para llevar a cabo la práctica de manera correcta y segura, se indica paso a paso la operación a seguir para culminar exitosamente la práctica desde la puesta en marcha del equipo hasta el apagado del mismo.

### 6.1 Inicio

### 6.2 Encendido y puesta en marcha del equipo

### 6.3 Registro de datos

### 6.4 Cálculos matemáticos y análisis de resultados

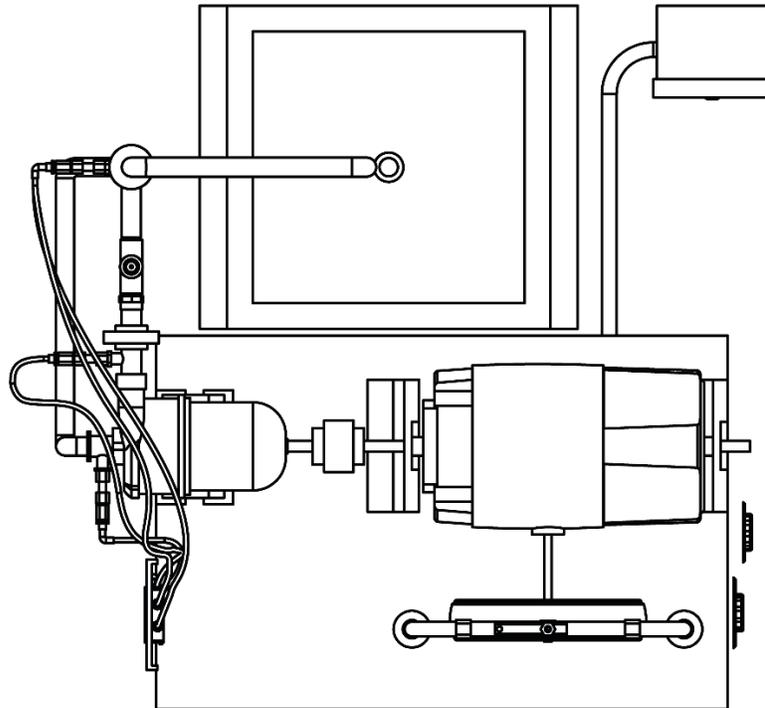
Para el desarrollo de la práctica se debe seguir las indicaciones planteadas en el manual de laboratorio. Estas indicaciones se adicionaron en el contenido del MEC con el fin de que el estudiante conozca el paso a paso de la práctica.

Con el registro de los datos solicitados de caudal y presión de succión y descarga, el estudiante está en la capacidad de elaborar la caracterización de la bomba con sus respectivas curvas características. La interpretación de estas curvas es una competencia principal de esta práctica.

Se realizarán las variaciones anteriormente mencionadas en el anexo A.3 Bomba centrífuga a consideración del docente a cargo de la asignatura.

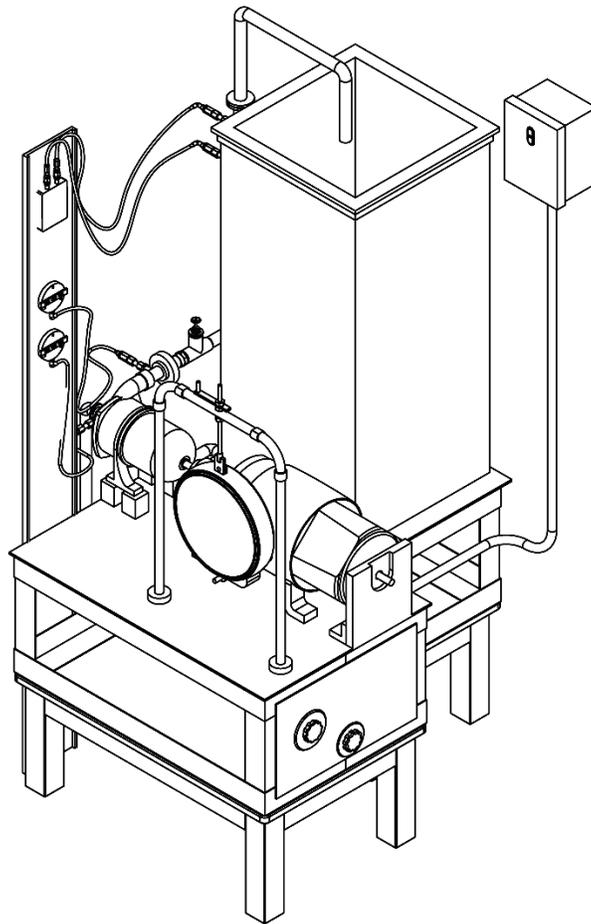
**Figura 29.**

*Planos del modelado 3D de la unidad de bombeo (vista superior)*



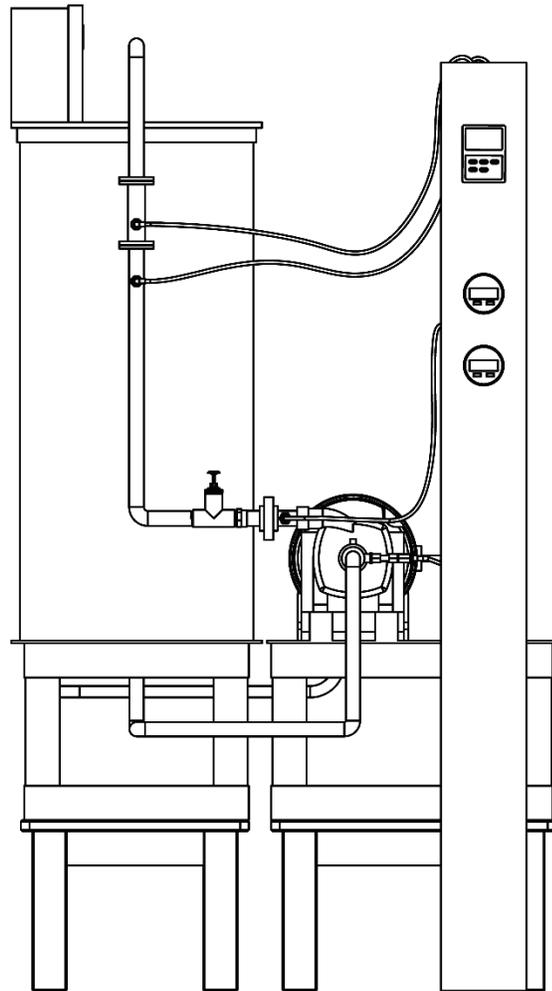
**Figura 30.**

*Planos del modelado 3D de la unidad de bombeo (vista isométrica derecha)*



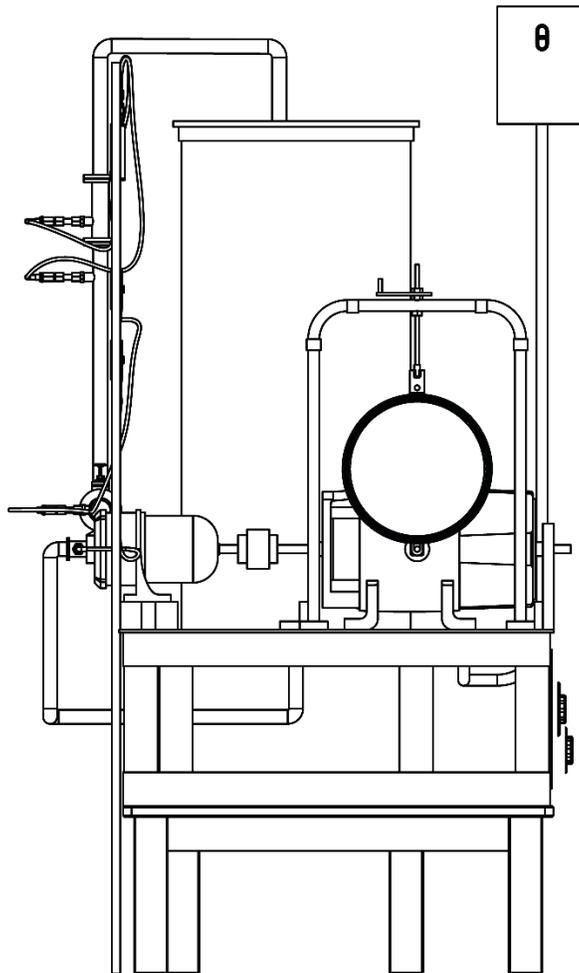
**Figura 31.**

*Planos del modelado 3D de la unidad de bombeo (vista lateral izquierda)*



**Figura 32.**

*Planos del modelado 3D de la unidad de bombeo (vista frontal).*



**Figura 33.**

*Planos del modelado 3D de la unidad de bombeo (vista lateral derecha)*

