



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE QUÍMICA**

**DESARROLLO DE LA INGENIERÍA BÁSICA PARA UN  
SISTEMA PROPUESTO DE DINÁMICA Y CONTROL PARA  
EL LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA IV**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO QUIMICO**

**PRESENTA:**

**RAMÍREZ SALINAS VÍCTOR**

**ASESOR: DR. JOSÉ BARRAGAN AROCHE**

**Cd. de Mx. 2018**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO**

**PRESIDENTE: JOSE FERNANDO BARRAGAN AROCHE**

**VOCAL: CARLOS ALVAREZ MACIEL**

**SECRETARIO: OSCAR HERNANDEZ MELENDEZ**

**1ER SUPLENTE: JOSE MANUEL GARCIA ANAYA**

**2DO SUPLENTE: MARIA RAFAELA GUTIERREZ LARA**

**SITIO DONDE SE DESARROLLO: Universidad Nacional Autónoma de México**

**Facultad de Química, Ciudad Universitaria, Laboratorio de Ingeniería  
Química**

**Asesor del tema:**

**Dr. José Fernando Barragán Aroche**

---

**Supervisor Técnico:**

**Mtra. María Rafaela Gutiérrez Lara**

---

**Sustentante:**

**Víctor Ramírez Salinas**

---

## Agradecimientos

Al proyecto PAPIME101717 “Modulo Experimental para el estudio de la Dinámica y Control de un Sistema de primer orden, para el Laboratorio de Ingeniería Química IV” por el apoyo y otorgamiento de beca para el desarrollo de tesis de licenciatura.

## INDICE

Agradecimientos .....	2
Numeración de figuras.....	6
Numeración de tablas .....	7
Resumen .....	8
Introducción.....	8
Marco teórico.....	9
Ingeniería básica .....	9
Objetivos:.....	9
Objetivo general .....	9
Objetivos particulares .....	9
DFP .....	10
DTI .....	10
Plano Isométrico .....	10
Filosofía de operación y control.....	10
Balance de materia. ....	10
Carga del sistema. ....	10
Capitulo1. Ingeniería Básica.....	11
1.1 Diagrama de Flujo de proceso.....	11
1.2 Diagrama de tuberías e instrumentación.....	12
1.3 Plano isométrico y lista de material .....	13
1.4 Hojas de datos de los equipos.....	15
1.5 Balance de materia .....	15
1.5.1 Balance de materia global (Edo. estacionario).....	16
Divisor.....	16
Balance de materia para el tanque T-100.....	16
Balance de materia para el tanque T-200.....	16
1.5. 2 Balance de materia a régimen dinámico .....	16
Balance de materia para el tanque T-200 .....	17
1.6 Cálculo de la bomba .....	19
Régimen de flujo y repercusión en sistemas de nivel de líquido .....	19
Número de Reynolds .....	21
Ley de Torricelli.....	22

<b>Método Hazen-Williams .....</b>	<b>22</b>
<b>Método de Veronesse-Datei .....</b>	<b>23</b>
<b>Factor de fricción .....</b>	<b>23</b>
<b>Longitud equivalente .....</b>	<b>23</b>
<b>1.6.1 Descarga libre .....</b>	<b>24</b>
<b>Factor de fricción.....</b>	<b>31</b>
<b>Pérdidas por fricción por los accesorios. ....</b>	<b>32</b>
<b>1.6.2 Descarga con accesorios .....</b>	<b>34</b>
<b>1.7Filosofía de control y operación .....</b>	<b>38</b>
<b>1.7.1 Filosofía de operación.....</b>	<b>38</b>
<b>1.7.2 Filosofía de control.....</b>	<b>39</b>
<b>Capítulo 2. Construcción del banco experimental.....</b>	<b>41</b>
<b>Capítulo 3 Diseño experimental y resultados .....</b>	<b>43</b>
<b>Experimentación .....</b>	<b>45</b>
<b>Combinación 1 .....</b>	<b>45</b>
<b>Algoritmo de cálculo: .....</b>	<b>46</b>
<b>Combinación 2 .....</b>	<b>48</b>
<b>Combinación 3 .....</b>	<b>48</b>
<b>Combinación 4 .....</b>	<b>50</b>
<b>Combinación 5 .....</b>	<b>51</b>
<b>Combinación 6 .....</b>	<b>51</b>
<b>Combinación 7 .....</b>	<b>53</b>
<b>Combinación 8 .....</b>	<b>54</b>
<b>Combinación 9 .....</b>	<b>55</b>
<b>Combinación 10 .....</b>	<b>56</b>
<b>Combinación 11 .....</b>	<b>57</b>
<b>Combinación 12 .....</b>	<b>58</b>
<b>Análisis de resultados .....</b>	<b>59</b>
<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>62</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>63</b>
<b>Anexo A .....</b>	<b>63</b>
<b>Hojas de datos de los equipos.....</b>	<b>63</b>

Hoja de datos (Tanque T-100).....	63
Hoja de datos (Tanque T-200).....	64
Hoja de datos (bomba P-100).....	65
Anexo B .....	66
Diagramas de líneas .....	66
Línea uno.....	66
Línea dos .....	67
Línea tres.....	68
Línea cuatro .....	69
Bibliografía.....	70

### Numeración de figuras

<b>No</b>	<b>Nombre</b>	<b>No de página</b>
Figura 1	Diagrama de Flujo de Proceso	13
Figura 2	Diagrama de Tubería e Instrumentación	14
Figura 3	Plano Isométrico	15
Figura 4	Esquema de tanque T-200	18
Figura 5	Flujo tipo laminar	21
Figura 6	Flujo tipo turbulento	21
Figura 7	Vaciado de tanque descarga libre	27
Figura 8	Comparación entre Descarga libre y con accesorios	35
Figura 9	Esquema de proceso e instrumentación	39
Figura 10	Diagrama de bloques banco experimental	40
Figura 11	Foto de carro	41
Figura 12	Esquema de válvulas	43
Figura 13	Diagrama de Flujo de experimentación	45
Figura 14	Resultados de la combinación 1	46
Figura 15	Resultados de la combinación 2	48
Figura 16	Resultados de la combinación 3	49
Figura 17	Resultados de la combinación 4	50
Figura 18	Resultados de la combinación 5	51
Figura 19	Resultados de la combinación 6	52
Figura 20	Resultados de la combinación 7	53
Figura 21	Resultados de la combinación 8	54
Figura 22	Resultados de la combinación 9	55
Figura 23	Resultados de la combinación 10	56
Figura 24	Resultados de la combinación 11	57
Figura 25	Resultados de la combinación 12	58
Figura 26	Grafica de comparativa de resultados	59



Numeración de tablas

<b>No</b>	<b>Nombre</b>	<b>No página.</b>
Tabla 1	Material de construcción	15
Tabla 2	Hojas de Datos	16
Tabla 3	Resultados sugeridos por Polymath	27
Tabla 4	Datos para el cálculo de bomba sin accesorios	29
Tabla 5	Cálculo de carga tramos rectos	29
Tabla 6	Fricción por accesorios, altura del sistema, carga sin accesorios	31
Tabla 7	Longitud equivalente	33
Tabla 8	Resultado vaciado de tanque con accesorios	34
Tabla 9	Promedio de vaciado de tanque con accesorios	34
Tabla 10	Datos técnicos de cálculo de caudal	36
Tabla 11	Flujo y velocidad datos experimentales	36
Tabla 12	Cálculo carga de bomba tramos rectos	37
Tabla 13	Cálculo de la bomba carga total	37
Tabla 14	Datos generales del carro	41
Tabla 15	Longitud de tramos de tubería	42
Tabla 16	Nombre de válvulas	43
Tabla 17	Combinaciones	44
Tabla 18	Resultados de combinación 1	45
Tabla 19	Resultados de combinación 2	48
Tabla 20	Resultados de combinación 3	49
Tabla 21	Resultados de combinación 4	50
Tabla 22	Resultados de combinación 5	51
Tabla 23	Resultados de combinación 6	52
Tabla 24	Resultados de combinación 7	53
Tabla 25	Resultados de combinación 8	54
Tabla 26	Resultados de combinación 9	55
Tabla 27	Resultados de combinación 10	56
Tabla 28	Resultados de combinación 11	57
Tabla 29	Resultados de combinación 12	58
Tabla 30	Combinación flujo alto	60
Tabla 31	Combinación flujo medio	60
Tabla 32	Combinación flujo bajo	61

## Resumen

En el presente trabajo se muestran los documentos de la ingeniería Básica generados para un módulo experimental para la enseñanza de la Dinámica y Control de Procesos. Dichos documentos serán la herramienta de un manual de prácticas para el sistema de control propuesto. Los documentos que se complementan este trabajo son: Diagrama de Flujo de Proceso (DFP), Filosofía de Operación y Filosofía de Control, Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI), Plano Isométrico, Hojas de Datos, así como el cálculo de algunos equipos del proceso.

El equipo está dirigido para tener un enfoque más detallado acerca de los fenómenos dinámicos y de control. Una de las contribuciones importantes en este trabajo al laboratorio consiste en el apoyo asistido por una computadora además de otros aparatos electrónicos que permitirá que los alumnos comparen los resultados obtenidos con un modelo relativamente sencillo y poder seguir la secuencia de los fenómenos o de los problemas. Al estudiante de Ingeniería Química le permitirá percatarse, de manera inmediata, de la calidad de los resultados y poder llevar diversos caminos para llegar a la solución de los problemas establecidos lo que facilita una mayor reflexión y asimilación de los aspectos teóricos. Además de que servirá de apoyo a la asignatura de Dinámica y Control de Procesos (1819) que se cursa en la carrera de Ingeniería Química.

## Introducción

Como ingenieros químicos tenemos una gran capacidad para desenvolvemos en diferentes áreas. Estas áreas por ejemplo podrían ser: El diseño o adaptación de procesos y equipos, la selección de los mismos, las conexiones entre los diferentes componentes y sus dimensiones, trabajo de investigación, agente de ventas, etc.

Los ingenieros, entre otras actividades profesionales, se ocupan de la operación de estos procesos, lo que implica considerar factores que no aparecen en el análisis de estado estacionario, como la estabilidad de los puntos de trabajo, de funcionamiento como son el arranque, el paro, la transición de un estado operativo, entre otros.

El estudio de la dinámica y control de procesos para el Ingeniero Químico, está dirigido principalmente: Al análisis, diseño e implementación de sistemas de control que permitan facilitar el cumplimiento de los objetivos en los procesos de seguridad, datos de producción, así como calidad de los productos, entre otras utilidades.

En la Facultad de Química de la UNAM, la asignatura de dinámica y control de procesos (1819) se cursa en el octavo semestre de la carrera. Esta asignatura es teórica donde se aprende a desarrollar modelos matemáticos, así como resolver las ecuaciones diferenciales y obtener diferentes modelos de aplicación. En muchas ocasiones es muy complicado para los alumnos comprender ciertos conceptos que se revisan durante el curso y es por ello por lo que se pensó en la necesidad de elaborar actividades experimentales. Para ello se propuso la construcción de un

módulo experimental que fuera capaz de realizar distintas prácticas de aplicación de la dinámica y el control de procesos. Esto con la finalidad de que el alumno pueda apropiarse de los conceptos que se aprendieron en clase, así como familiarizarse con ciertos equipos con los que probablemente tendrá que operar en un futuro en su etapa laboral.

## **Marco teórico**

### **Ingeniería básica**

La ingeniería básica es el desarrollo de la información técnica relativa a una tecnología, que normalmente es proporcionada por un licenciador. Para el diseño de una instalación; representa el punto de partida para la elaboración de las siguientes etapas de ingeniería (Ingeniería básica extendida e ingeniería de detalle) precedentes a las actividades de construcción.<sup>1</sup>

Entre los documentos típicos de la ingeniería básica se encuentran los siguientes:

- Diagrama de Flujo de Procesos (DFP)
- Balance de materia y energía
- Diagrama de tuberías e instrumentación (DTI)
- Lista de equipos
- Filosofía de operación, control y seguridad.
- Estudio de riesgo preliminar
- Hojas de datos de equipos.

## **Objetivos:**

### **Objetivo general**

Generar los documentos de ingeniería básica para el sistema de Dinámica y Control para el Laboratorio de Ingeniería Química IV.

### **Objetivos particulares**

- Elaborar Diagrama de Flujo de Proceso.
- Elaborar Diagrama de Tubería e Instrumentación para el sistema en estudio.
- Elaborar Plano Isométrico con base en los diagramas de proceso e instrumentación elaborados.
- Elaboración de hojas de datos de los equipos utilizados en el sistema de estudio.
- Desarrollo del modelo no lineal del estado dinámico del balance de materia.
- Filosofía de operación y control del sistema en estudio propuesto.
- Realizar pruebas de flujo con el banco experimental armado

---

<sup>1</sup> Petróleos Mexicanos, 2013.

## **Metodología**

El trabajo que a continuación se presenta, consta de cuatro actividades principales.

- Planos y documentos de ingeniería (DFP, DTI, Isométrico, filosofía de operación y control).
- Balance de materia (Edo. estacionario y Régimen dinámico).
- Cálculo de carga de la bomba.
- Experimentación para calcular Flujo.

### **DFP**

Para realizar los planos fue necesario conocer el proceso, enumerar corrientes y pensar en los equipos necesarios para el funcionamiento del banco experimental.

### **DTI**

Se definieron qué elementos son necesarios para poder controlar el nivel del tanque.

### **Plano Isométrico**

Se midieron las posiciones de los componentes del sistema, tuberías, tanques, etc. con respecto de un punto de referencia. Se realizó una lista de material para posteriormente implementarla en el plano.

### **Filosofía de operación y control.**

Para la elaboración de ambas filosofías fue necesario conocer las bases de diseño.

### **Balance de materia.**

Para realizar el balance de materia fue necesario tener elaborado el DFP, ya con este diagrama se facilitaron los cálculos de dicho balance.

### **Carga del sistema.**

Para el cálculo de la carga del sistema se realizaron diversos experimentos (con y sin accesorios en la descarga).

Para la descarga sin accesorios se consideraron datos obtenidos de forma teórica.

Para la parte de descarga con accesorios, los datos fueron tomados de la siguiente forma:

Se utilizó el Plano Isométrico para estimar distancias, accesorios y posteriormente se construyó el sistema y se realizaron pruebas en el banco.

El experimento consistió en lo siguiente:

- Armar el equipo
- Medir el tiempo de llenado
- Registrar datos.
- Repetir el experimento por triplicado.

# Capítulo 1. Ingeniería Básica

## 1.1 Diagrama de Flujo de proceso

En términos generales, los diagramas de flujo de proceso son el mejor medio de transmisión de datos de ingeniería, en forma completa y precisa, debido a que son una representación gráfica de todo el sistema en el que se indica la secuencia del proceso, se proporcionan los datos de entradas, salidas de materia y energía, y se da información de los equipos que lo constituyen. Para lograr lo anterior los diagramas deberán ser lo más claro posibles, evitando el cruce excesivo de líneas y aglomeración de equipo en una zona del diagrama.<sup>2</sup>

El sistema está conformado por dos tanques y cinco válvulas, como puede verse en la Figura 1. Dos de estas válvulas son de control (CLV-100) y (CLV-200). Del tanque (T-100) sale una corriente la cual se nombrará “corriente uno”.

Esta corriente uno, fluye hasta un divisor de corrientes y de éste surgen las corrientes dos y tres. La corriente tres servirá de by-pass, lo que permite que el fluido regrese el fluido al tanque de alimentación (T-100).

La corriente dos lleva fluido al tanque donde se realiza la experimentación. A lo largo de esta línea se tienen dos accesorios: una válvula de control y un medidor de flujo. Estos accesorios ayudarán a controlar y medir el flujo.

El tanque T-200 tiene un medidor de nivel, el cual enviará una señal a las válvulas de control del tanque, para mantener el nivel de agua constante dentro del tanque.

La bomba (P-100) se instalará en el interior del tanque de alimentación (T-100). Esta bomba es de una carga de ocho metros.

---

<sup>2</sup> Anaya Durand, A, Barragán Acevedo, R., & Vergara 2015. Manual de temas selectos de ingeniería de proyectos.

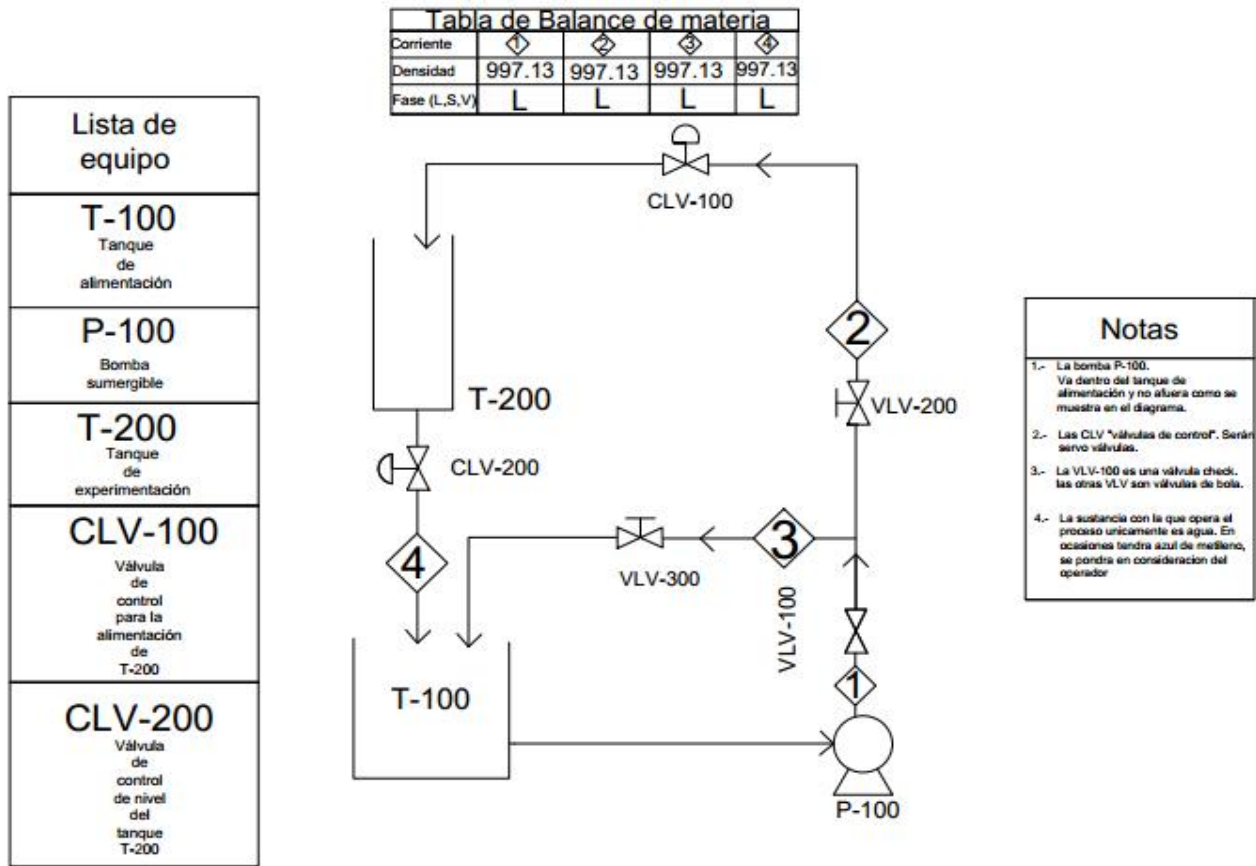


Figura 1. Diagrama de flujo de proceso.

## 1.2 Diagrama de tuberías e instrumentación

Los diagramas de tubería e instrumentación, comúnmente llamados DTI's, se emplean en el diseño y construcción de plantas de proceso. El diagrama de tubería e instrumentación es muy importante; puesto que es la forma principal de comunicación entre las personas que diseñan y las personas que van a operar, por lo que debe ser completamente claro para todos. Un DTI típico debe contar con la siguiente información. Especificación de tubería, especificaciones del aislamiento, especificaciones de trampas de vapor y filtros temporales, señales, controladores, etc.<sup>3</sup>

Sin aparatos automáticos para medir y controlar, muchos de estos procesos no podrían simplemente existir, ya que los instrumentos pueden detectar condiciones para tomar decisiones de control más rápido y precisas que el operador humano.

<sup>3</sup> Anaya Durand, A, Barragán Acevedo, R., & Vergara 2015. Manual de temas selectos de ingeniería de proyectos.

En el sistema se cuenta con cinco válvulas, dos de estas válvulas son de control y las otras tres son de bola. Se tienen dos medidores de flujo y un indicador de nivel, ver Figura 2.

El lazo de control de la figura 2, muestra el proceso de dos tanques en el cual el nivel del tanque "T-200" es la variable controlada. Esta variable es medida por un indicador de nivel (LI), el cual envía una señal proporcional al controlador de nivel (LC). El nivel es ajustado al valor deseado (set-point). La válvula de control CLV-100 se ajusta para obtener el valor deseado (Set-point). En este caso se pueden emplear las dos válvulas de control dependiendo del experimento que se esté realizando. Otro tipo de información que se puede obtener de este diagrama es el diámetro de la tubería, así como el material de la misma.

Para el sistema propuesto se tiene un diámetro de tubería de  $\frac{1}{2}$ " pulgada y el material de la tubería es PVC, esta información también está disponible en el DTI.

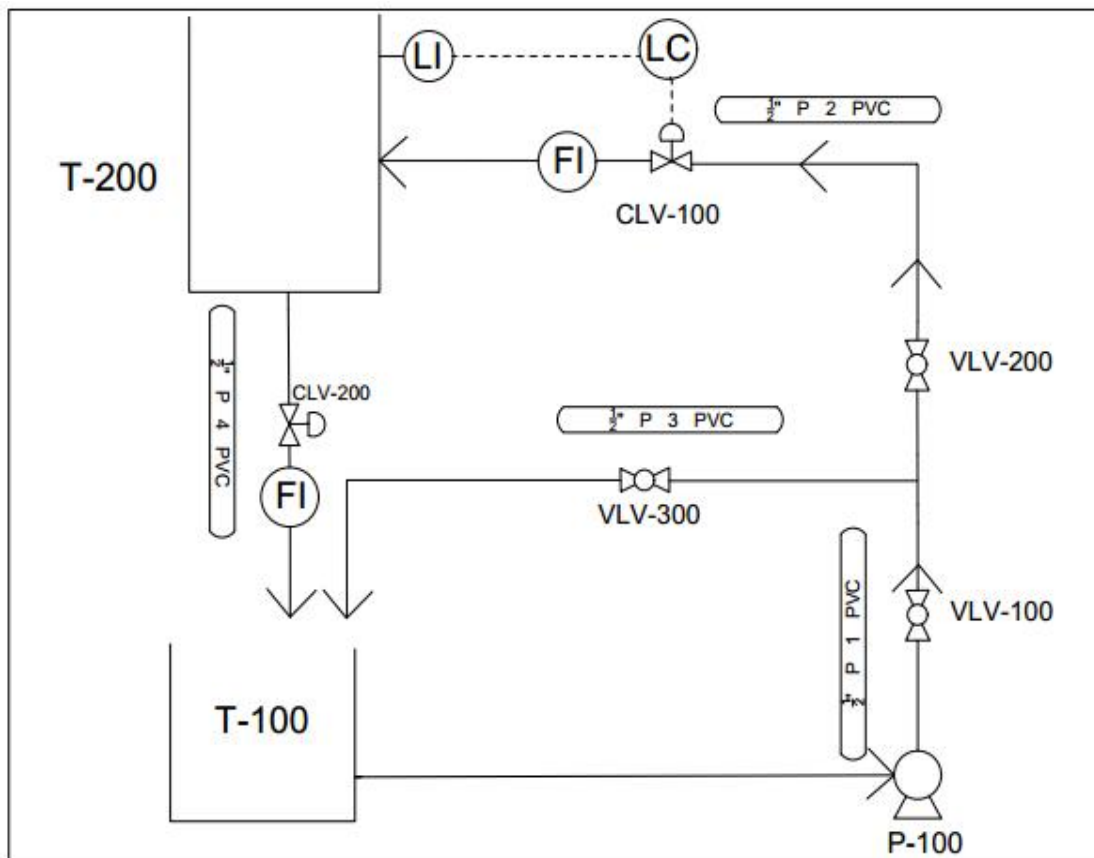


Figura 2. Diagrama de tubería e instrumentación para el sistema de dinámica y control de LIQ IV.

### 1.3 Plano isométrico y lista de material

Este tipo de diagrama ayuda a tener una mejor perspectiva y visualización de un elemento de proceso. Consiste en levantar  $30^\circ$  con respecto a una línea horizontal

denominada línea de referencia y para obtener alturas se realizan a 90° con respecto a esa inclinación. Una de las grandes ventajas del dibujo isométrico es que se puede realizar el dibujo de cualquier modelo sin utilizar ninguna escala especial<sup>4</sup>. En ingeniería este tipo de planos suelen utilizarse para conocer el tipo de materiales de las tuberías, las características de las válvulas, la distancia que existe entre un equipo y otro, así como la altura que tiene el sistema. Además de darnos una mejor perspectiva que los planos como el DFP o el DTI.

En la actualidad se desarrollan planos isométricos en 3D, estos representan realmente la ubicación de las líneas en planta. En este tipo de diagramas no se conserva sólo una vista, sino que se puede visualizar la planta a 30° desde 5 posiciones (superior, frente, fondo lateral derecho e izquierdo). Los isométricos son planos o diagramas de computación que deben estar acompañados de hojas de especificación de accesorios<sup>5</sup>

Este plano fue de utilidad para el armado del equipo, ya que permitió dimensionar el tamaño de la tubería y el arreglo de los componentes. También es importante contar con la lista de material, ya que con ésta se conoce que piezas se deben utilizar y cuantas son necesarias para tener el equipo armado completamente. En la Figura 3 se presenta dicho diagrama.

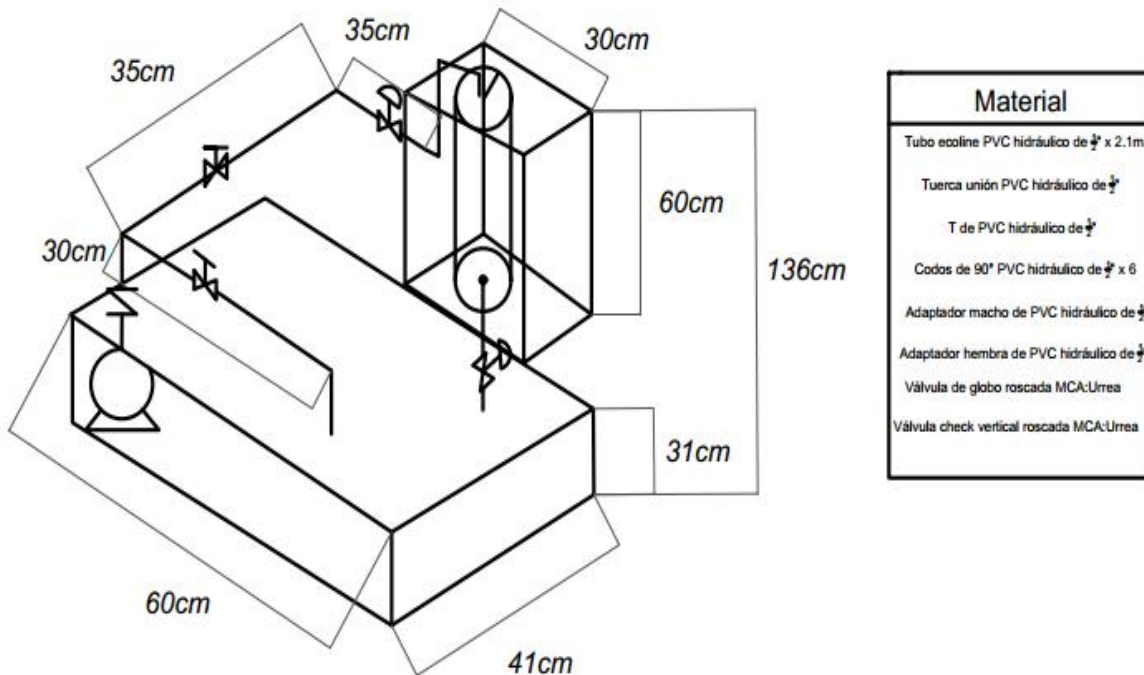


Figura 3. Plano isométrico y lista de material.

<sup>4</sup> Es.slideshare.net. Nevárez Jesús

<sup>5</sup> es.slideshare.net. Porras López Margarita



Para la construcción del sistema propuesto se utilizaron los materiales listados en la tabla 1.

*Tabla 1. Material de construcción del banco experimental.*

<b>Material</b>
<b>Tubo Ecoline PVC hidráulico SDR de 1/2" x 2.1m</b>
<b>Tuerca unión PVC hidráulico de 1/2"</b>
<b>Codo de 90° PVC hidráulico de 1/2"</b>
<b>Adaptador macho de PVC hidráulico de 1/2"</b>
<b>Adaptador hembra PVC hidráulico de 1/2"</b>
<b>Válvula de globo roscada MCA: Urea</b>
<b>Válvula check vertical roscada MCA: Urea</b>

#### **1.4 Hojas de datos de los equipos**

Las Hojas de Datos son documentos en los que se registran las especificaciones de los diferentes equipos del proceso, tales como: tanques de almacenamiento, bombas, cambiadores de calor, columnas de destilación, etc. Donde se muestran datos mecánicos, datos de proceso y características técnicas. Estas hojas también incluyen un apartado donde se indican observaciones relevantes y un diagrama esquemático del equipo.<sup>6</sup>

En general, las hojas de datos se trataron de hacer de una forma muy ilustrativa de lo que en realidad son. Debido a que nuestro proceso no es tan complicado y no opera con distintos compuestos. En la tabla 2 se enumeran las hojas de datos para este trabajo.

*Tabla 2. Hoja de datos.*

<b>Hoja</b>	<b>Equipo</b>
<b>1</b>	Tanque T-100
<b>2</b>	Tanque T-200
<b>3</b>	Bomba P-100

En el Anexo A se presentan las hojas de datos de los equipos del banco experimental.

#### **1.5 Balance de materia**

Lavoiser y muchos de los científicos que siguieron en esta trayectoria estudiaron los cambios químicos desde un punto de vista cuantitativo. Invariablemente encontraron que la suma de los pesos y las sustancias que entran en una reacción es igual a la suma de los pesos de los productos de reacción. Ese hecho

<sup>6</sup> Formic Company, Diseño de plantas productivas llave en mano.

fundamental ha sido extendido y condensado en la ley de la conservación de la materia. El concepto que fundamenta la Ley generalizada de la conservación de la materia es muy simple. La siguiente relación describe en palabras el principio de los balances de materia que pueden aplicarse a los procesos en que se realice o no una reacción química<sup>7</sup>:

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{Acumulación} \\ \text{dentro} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{Entradas} \\ \text{por los} \\ \text{límites} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{Salidas} \\ \text{por los} \\ \text{límites} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{Generación} \\ \text{dentro} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{Consumo} \\ \text{dentro} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\}$$

En el sistema cabe señalar que no cuenta con entradas ni salidas como tal, ya que a partir del tanque de alimentación (T-100), se suministrará el agua y regresa al mismo tanque. Para fines didácticos se supone que la corriente uno es la entrada, las corrientes tres y cuatro son las corrientes de salida (ver figura1). Con lo anterior se planteó el balance de materia global para cada uno de los componentes.

### 1.5.1 Balance de materia global (Edo. estacionario)

$$F_1 = F_3 + F_4 \quad (1)$$

**Divisor**

$$F_1 = F_2 + F_3 \quad (2)$$

**Balance de materia para el tanque T-100**

$$F_3 + F_4 = F_1 + \text{Acumulación} \quad (3)$$

**Balance de materia para el tanque T-200**

$$F_2 = F_4 + \text{Acumulación} \quad (4)$$

Esto es lo correspondiente al balance de materia con respecto al estado estacionario, a continuación, se plantea el balance de materia a régimen dinámico.

### 1.5. 2 Balance de materia a régimen dinámico

El balance de materia a régimen dinámico, se plantea para el tanque (T-200) en este tanque es donde se realiza la parte experimental. El tanque (T-100) solo funcionará para almacenamiento.

---

<sup>7</sup> Himmelblau. Principios y cálculos básicos de la ingeniería química

## Balance de materia para el tanque T-200

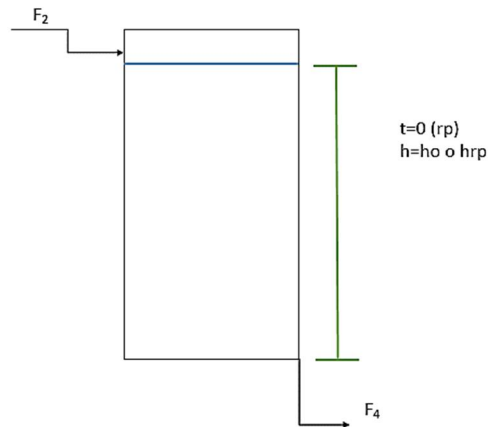


Figura 4. Esquema de tanque T-(200)

$$F_2 = F_4 + \text{Acumulación} \quad (5)$$

$$F_2 = F_4 + \frac{dv}{dt} \quad (6)$$

$$\text{Si: } V = Ah$$

$$F_2 = F_4 + \frac{dAh}{dt} \quad (7)$$

$$F_2 = F_4 + A \frac{dh}{dt} \quad (8)$$

$$A \frac{dh}{dt} = F_2 - F_4 \quad (9)$$

Para el flujo de entrada, suponemos comportamiento lineal de la forma

$$F_2 = C_v f(x) \sqrt{\Delta P} \approx \alpha(x) \quad (10)$$

Donde:

$F_2$  = Flujo (L/min)

$C_v$  = coeficiente de la válvula  $\left( \frac{\text{L}}{\text{psig min}} \right)$

$\Delta P$  = Caída de presión (psig)

$f$  = Función de apertura

Para el flujo de salida aplicamos el modelo de la ley de Torricelli

$$F_4 = Ka\sqrt{2gh} \approx C_{vs}f(x_s)\sqrt{h} \quad (11)$$

Donde:

$$C_{vs} = Ka\sqrt{2g} \quad (12)$$

$F_2$ = Flujo (L/min)

$$C_{vs} = \left( \frac{L}{\text{psig min}} \right)$$

$f$ =Función de apertura

Sustituyendo los flujos tenemos la siguiente expresión no lineal

$$A \frac{dh}{dt} = C_{ve}f_e(x_e) - C_{vs}f_e(x)\sqrt{h} \quad (13)$$

Linealizando  $\sqrt{h}$  por series de Taylor

$$f(\bar{x}) = f(\bar{x}_0) + \frac{\delta f}{\delta x}(x - x_0) + \frac{\delta f}{\delta y}(y - y_0) + \dots \quad (14)$$

Linealizando  $\sqrt{h}$

$$\sqrt{h} = \sqrt{h_0} + \frac{(h-h_0)}{2\sqrt{h_0}} \quad (15)$$

Sustituyendo

$$A \frac{dh}{dt} = \alpha(x) - C_{vs} \left[ \sqrt{h_0} + \frac{(h-h_0)}{2\sqrt{h_0}} \right] \quad (16)$$

Simplificando

$$A \frac{dh}{dt} = \alpha(x) - C_{vs} \sqrt{h_0} - C_{vs} \frac{(h-h_0)}{2\sqrt{h_0}} \quad (17)$$

$$A \frac{dh}{dt} = \alpha(x) - C_{vs} \sqrt{h_0} - C_{vs} \frac{h}{2\sqrt{h_0}} + C_{vs} \frac{h_0}{2\sqrt{h_0}} \quad (18)$$

$$A \frac{dh}{dt} + C_{vs} \frac{h}{2\sqrt{h_0}} = \alpha(x) + C_{vs} \left[ \frac{h_0}{2\sqrt{h_0}} - \sqrt{h_0} \right] \quad (19)$$

En régimen permanente, queda expresada con la ecuación 20

$$A \frac{dho}{dt} + C_{vs} \frac{ho}{2\sqrt{h_0}} = \alpha(x_0) + C_{vs} \left[ \frac{ho}{2\sqrt{h_0}} - \sqrt{h_0} \right] \quad (20)$$

Restando (19) – (20)

$$A \frac{d(h-h_0)}{dt} + \frac{C_{vs}(h-h_0)}{2\sqrt{h_0}} = \alpha(x - x_0) \quad (21)$$

Se definen las variables de desviación de la siguiente forma:

$$h' = h - h_0$$

$$x' = x - x_0$$

$$A \frac{dh'}{dt} + \frac{C_{vs} h'}{2\sqrt{h_0}} = \alpha x' \quad (22)$$

Se agrupan las constantes de la siguiente forma.

$$\beta = \frac{C_{vs}}{2\sqrt{h_0}} \quad (23)$$

$$A \frac{dh'}{dt} + \beta h' = \alpha x' \quad (24)$$

$$\frac{A}{\beta} \frac{dh'}{dt} + h' = \frac{\alpha x'}{\beta} \quad (25)$$

Se define  $\tau$  como:

$$\tau = \frac{A}{\beta} = \frac{2\sqrt{h_0} A}{C_{vs}} \quad (26)$$

Se define  $Kp$  como:

$$Kp = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{2\sqrt{h_0} \alpha}{C_{vs}} \quad (27)$$

Quedando el balance de la siguiente forma.

$$\tau \frac{dh'}{dt} + h' = Kp x' \quad (28)$$

## 1.6 Cálculo de la bomba

### Régimen de flujo y repercusión en sistemas de nivel de líquido

Al analizar sistemas que implican flujo de líquidos, resulta necesario dividir los regímenes de flujo en laminar y turbulento de acuerdo con su número de Reynolds. En el caso laminar, tiene lugar un flujo estable y ordenado en las corrientes, sin turbulencia. Los sistemas que contienen un flujo laminar se pueden representar mediante ecuaciones diferenciales lineales. Los sistemas que contienen un flujo turbulento se representan a menudo mediante ecuaciones diferenciales no lineales. Sin embargo, si la región de operación está limitada por intervalos relativamente cortos, las ecuaciones diferenciales no lineales, se pueden linealizar.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> Ogata Katsuhiko. "Ingeniería de control moderna" Tercera edición Prentice Hall Hispanoamericana. México 1998.

Si se considera un flujo a través de un tubo corto que conecta dos tanques, la resistencia  $R$  para el flujo de líquido en tal tubo se define como el cambio en la diferencia de nivel. La ecuación (29) representa la resistencia

$$R = \frac{\text{cambio en la diferencia de nivel (m)}}{\text{cambio en la velocidad de flujo} \left(\frac{m^3}{s}\right)} \quad (29)$$

Para el flujo laminar, la resistencia  $R$  se obtiene como:

$$R = \frac{dH}{dF} \approx \frac{\Delta h}{\Delta F} \quad (30)$$

Se puede establecer que el comportamiento del flujo laminar es constante y análoga a la resistencia eléctrica:

$$R = \frac{V}{I} \quad (31)$$

Para el régimen turbulento se puede utilizar el modelo de la ley de Torricelli:<sup>9</sup>

$$V_{\text{salida del tanque}} = \sqrt{2gh} \quad (32)$$

Como el flujo al salir del tanque se contrae debido a un cambio súbito de presión:

$$F_{\text{Salida}} = Ka\sqrt{2gh} \quad (33)$$

Donde:

$F_{\text{Salida}}$  = caudal de salida del tanque  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

$gc$  = constante de aceleración de la gravedad =  $9.81 \left(\frac{m}{s^2}\right)$

$h$  = nivel del líquido

$k$  = constante de la contracción = 0.6

El flujo laminar es aquél en el que el movimiento de las partículas las tiene solamente el sentido y la dirección del movimiento principal del fluido. El flujo turbulento es aquél en el que las partículas del fluido tienen desplazamiento en sentidos diferentes al del movimiento principal del fluido.<sup>10</sup>

Se pueden presentar en el mismo tipo de conductos referidos al régimen laminar. En este tipo de flujo al desplazarse las partículas con movimiento errático tiene como consecuencia el que se presenten colisiones entre ellas, lo que genera cambios en la cantidad de movimiento debido a que los choques son inelásticos,

<sup>9</sup> Ogata Katsuhiko. "Ingeniería de control moderna" Tercera edición Prentice Hall Hispanoamericana. México 1998.

<sup>10</sup> <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/2496/Capitulo3.pdf>

que se manifiestan como una pérdida de energía. En las figuras 5 y 6 se representan los diferentes tipos de flujo descritos.



Figura 5. Flujo tipo laminar.

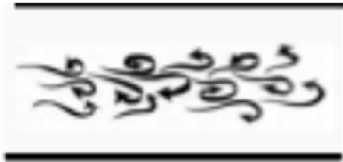


Figura 6. Flujo tipo turbulento.

## Número de Reynolds

El trabajo de Osborne Reynolds mostró que el tipo de flujo en la tubería depende del diámetro de la misma, así como de la velocidad, densidad y viscosidad del fluido. El valor numérico de la combinación de estas cuatro variables se conoce como número de Reynolds y se considera que es la relación de las fuerzas dinámicas del flujo al esfuerzo cortante debido a la viscosidad<sup>11</sup>.

La expresión del número de Reynolds esta descrita en la ecuación.

$$Re = \frac{D v \rho}{\mu} \quad (34)$$

Donde:

Re= Número de Reynolds.

D= Diámetro del ducto [L].

V= Velocidad promedio del líquido  $\left[\frac{L}{T}\right]$ .

$\rho$ = Densidad del fluido  $\left[\frac{M}{L^3}\right]$ .

$\mu$  = Viscosidad del fluido  $\left[\frac{M}{L T}\right]$ .

Generalmente, cuando el número de Reynolds se encuentra por debajo de 2100 se dice que el flujo es laminar; el intervalo entre 2100 y 4000 se considera flujo de

---

<sup>11</sup> Valiente, A. Problemas de Flujo de Fluidos, 2da.Ed., México, Limusa 1998.

transición, y para valores mayores a 4000 se considera flujo turbulento. Este número adimensional es uno de los parámetros más utilizados en diversos campos de la ingeniería química en los que se presentan fluidos en movimiento.

### Ley de Torricelli

La velocidad del chorro que sale por un único agujero en un recipiente es directamente proporcional a la raíz cuadrada de dos veces el valor de la aceleración de la gravedad multiplicada por la altura a la que se encuentra el nivel del fluido a partir del agujero <sup>12</sup>. La expresión de esta ley es la siguiente:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (35)$$

Donde:

V= Velocidad de descarga  $\left(\frac{m}{s}\right)$

gc = constante de aceleración de la gravedad= 9.81  $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

h = Nivel del líquido (m)

Un ejemplo de la ley de Torricelli es el vaciado de tanque.

### Método Hazen-Williams

El método de Hazen-Williams es un método corto utilizado para el cálculo de carga de una bomba (cabeza) que es válido solamente para el agua que fluye en las temperaturas ordinarias (5 °C - 25 °C). La fórmula es sencilla y su cálculo es simple debido a que el coeficiente de rugosidad "C" no es función de la velocidad ni del diámetro de la tubería. Es útil en el cálculo de pérdidas de carga en tuberías para redes de distribución de diversos materiales, especialmente de fundición y acero <sup>13</sup>. Este método se basa en la siguiente expresión:

$$h = 10674 * \frac{Q^{1.852}}{(C^{1.852} * D^{4.871})} * L \quad (36)$$

h= pérdida de carga o de energía (m).

Q= caudal (m<sup>3</sup>/s).

C= coeficiente de rugosidad (adimensional).

D= diámetro interno de la tubería (m).

L= longitud (m).

---

<sup>12</sup> [prezi.com/teorema-de-Torricelli/](http://prezi.com/teorema-de-Torricelli/) Severino Ángeles Miguel Ángel

<sup>13</sup> Catedra de Ingeniería Rural, Escuela Universitaria de Ingeniería técnica agrícola. [www.Ingenieria\\_rural.com](http://www.Ingenieria_rural.com)



Para este caso se aplica un coeficiente  $C=145$  siendo este el valor para las tuberías de PVC que corresponden a los materiales que se utilizaron para la construcción del modelo experimental.

### **Método de Veronesse-Datei**

El método de Veronesse-Datei se emplea utilizado para el cálculo de carga de una bomba (cabeza) para tuberías de PVC y para regímenes de flujo acotados por el siguiente intervalo <sup>14</sup>:

$$4 \times 10^4 < Re < 10^6$$

La ecuación de Veronesse –Datei es la siguiente

$$h = 92 \times 10^{-4} x \left( \frac{Q^{18}}{D^{48}} \right) x L \quad (37)$$

Donde:

$h$ = pérdida de carga o energía (m).

$Q$ = caudal ( $m^3/s$ ).

$D$ = diámetro interno de tubería (m).

$L$ = longitud de la tubería (m).

### **Factor de fricción**

Se utilizó el factor de fricción de la ecuación de Altschul-Anaya<sup>15</sup>, ya que ésta se puede utilizar en cualquier régimen de flujo (laminar, transitorio, turbulento).

$$f = 0.11 * \left( \frac{0.00015}{\phi_{int}} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25} \quad (38)$$

Donde:

$f$ = Factor de fricción

$\phi_{int}$ = Diámetro interno de tubería (m)

$Re$ = Número de Reynolds

### **Longitud equivalente**

Cuando la dirección del flujo se altera o distorsiona, como ocurre en serpentines, codos o a través de reducciones y válvulas, se producen pérdidas de fricción que

---

<sup>14</sup> Catedra de Ingeniería Rural, Escuela Universitaria de Ingeniería técnica agrícola. Ww. Ingeniería rural.com

<sup>15</sup> Evaluación de factor de fricción explícito para tuberías UNAM. Marzo 2014.

no se recuperan. Esta energía se disipa en turbulencias adicionales y se pierde finalmente en forma de calor. Una forma de obtener estas pérdidas por fricción es mediante la siguiente relación <sup>16</sup>:

$$h = \frac{f * v^2 * (Leq)}{2 * gc * \phi_{int}} \quad (39)$$

Donde:

$h$ = pérdida de carga o energía (m).

$f$ = factor de fricción de Altschul Anaya.

$\phi_{int}$  = diámetro interno de tubería (m).

$Le$ = longitud equivalente de la tubería (m).

$gc$ = constante de corrección gravitacional (m<sup>2</sup>/s).

$V$  = velocidad del fluido en tubería (m/s).

### 1.6.1 Descarga libre

Para el cálculo de la carga de la bomba a utilizar en el sistema se realizaron las siguientes consideraciones:

- El agua se transporta por las tuberías
- Garantizar que el tanque es llenado en caso de ser requerido.
- Se pueda derramar del tanque para futuras pruebas.

Para poder realizar el cálculo de la bomba, es necesario conocer algunos datos del proceso tales como: La longitud de la tubería, el diámetro de la tubería, el número de accesorios que estarán presentes, así como la altura de nuestro sistema.

Primero se considera que tiene una descarga libre. Esto quiere decir que, a la salida del tanque no se tiene nada para evitar que salga el fluido para ello se determina el tiempo de vaciado del tanque utilizando la ecuación de continuidad.

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 \quad (40)$$

Como no existe algo que pueda afectar considerablemente la densidad a la entrada o a la salida del sistema se considera que la densidad es constante, por lo que el término  $\rho$  se elimina de la ecuación de continuidad.

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (41)$$

Por definición sabemos que:

---

<sup>16</sup> Valiente, A. Problemas de Flujo de Fluidos, 2da.Ed., México, Limusa 1998

$$v_1 = \frac{dh}{dt} \quad (42)$$

$$\frac{dh}{dt} A_1 = v_2 A_2 \quad (43)$$

Ecuación de Bernoulli

$$h_1 \frac{g}{gc} + \frac{v_1^2}{2gc} + \frac{P_1}{\rho} = h_2 \frac{g}{gc} + \frac{v_2^2}{2gc} + \frac{P_2}{\rho} + \sum H f_s \quad (44)$$

Para el sistema en estudio la presión es la atmosférica por lo que se asume que:

$$P_1 = P_2 \quad (45)$$

Por esta razón se pueden cancelar de la ecuación de Bernoulli y al no existir energía potencial en la posición  $h_2$  el valor es cero por lo que se elimina el término

$$h_2 \frac{g}{gc} \quad (46)$$

El valor de la velocidad uno ( $V_1$ ) es cero debido a que la energía potencial es máxima en el punto  $h_1$ . La ecuación de Bernoulli de nuestro sistema se reduce a la siguiente expresión:

$$h_1 \frac{g}{gc} = \frac{v_2^2}{2gc} \quad (47)$$

Considerando que  $\sum H f_s = 0$

De la ecuación de balance de energía despejamos a  $V_2$

$$v_2^2 = \frac{h_1 2ggc}{gc} \quad (48)$$

$$v_2 = \sqrt{2gh} \quad (49)$$

Sustituimos la ecuación de velocidad en la ecuación de continuidad

$$A_1 \frac{dh}{dt} = \sqrt{2gh} A_2 \quad (50)$$

Área del tubo

$$A_{tubo} = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (51)$$

Como ambas áreas se calculan con la misma ecuación, estamos hablando del área de dos cilindros, se puede tomar la siguiente analogía.

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{D_2}{D_1} \quad (52)$$

$$-\frac{dh}{dt} = \sqrt{2g} \frac{D_2}{D_1} \sqrt{h} \quad (53)$$

Los términos agrupados son constantes y se pueden agrupar dentro de una misma constante. La ecuación obtenida es una ecuación diferencial de variables separables, por lo que su integración resulta ser:

$$-\int_{h_{max}}^{h_{min}} \frac{dh}{\sqrt{h}} = k \int_0^t dt$$

Resolviendo la ecuación

$$t = \frac{2}{K} (\sqrt{h_{min}} - \sqrt{h_{max}}) \quad (54)$$

Se procede a calcular la constante K

$$K = \sqrt{2g} \frac{D_2}{D_1} \quad (55)$$

Donde:

$D_1$  = Diámetro del tanque

$D_2$  = Diámetro del orificio de descarga

$g$  = Constante de aceleración de la gravedad

$$K = \frac{0.945^2}{181^2} \sqrt{2 * 981} = 0.1 \quad (56)$$

Con ayuda de estas ecuaciones, se generaron datos a partir del programa Polymath, los resultados de estos datos fueron los presentados en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados sugeridos por Polymath

tiempo (s)	h (cm)
0	60.0000
4.5	46.1280
9	37.2040
13.5	29.2414
18	22.2402
22.5	16.1891
27	11.0968
31.5	6.9671
36	3.7921
40.5	1.5814
45	0.3162

En la figura 7 se muestra la relación de los datos de la tabla 5

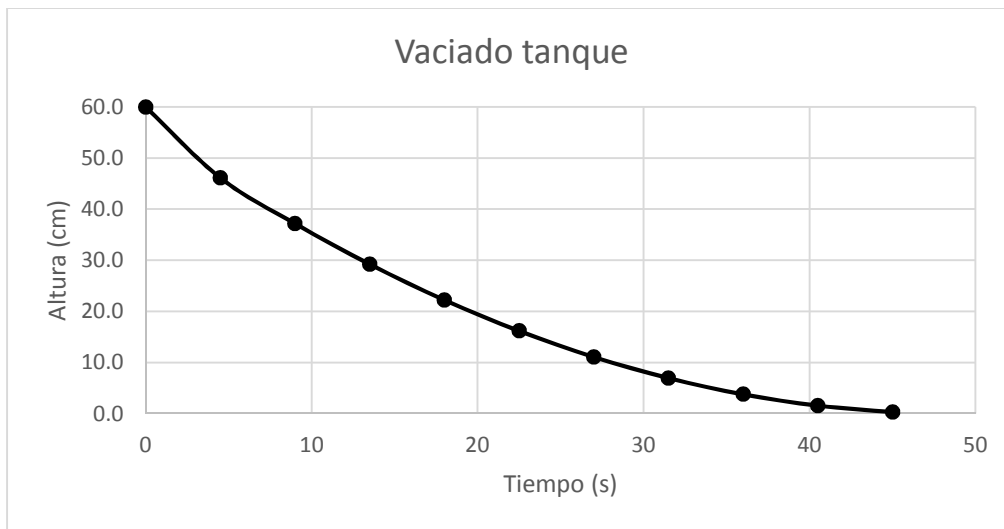


Figura 7. Vaciado de tanque sin accesorios. (descarga libre).

Con la gráfica se observa que el tiempo de vaciado se estimó un valor aproximado de 45 segundos.

A continuación, se demostrará cómo se realizó el cálculo para la altura de 60 cm, este mismo algoritmo se utilizó para todas las demás alturas.

Velocidad de descarga

$$v = \sqrt{2gh} \quad (57)$$

Donde:

gc: Constante de aceleración de la gravedad =  $981 \frac{cm}{s^2}$

h: Altura del tanque (cm).

Sustituyendo

$$v = \sqrt{2 \times 981 \times 60}$$

$$v = 3431 \frac{cm}{s}$$

Para el cálculo del flujo se utilizó la siguiente expresión.

$$Q = \frac{\pi}{4} r^2 * v \quad (58)$$

Donde:

Q: Flujo volumétrico  $\frac{cm^3}{s}$

r<sup>2</sup>: Radio de la descarga cm<sup>2</sup>

v: Velocidad de descarga  $\frac{cm}{s}$

$$Q = \frac{\pi}{4} 127^2 * 3431$$

$$Q = 43463 \frac{cm^3}{s}$$

Para poder trabajar los datos se cambiaron las unidades del flujo, de  $\frac{cm^3}{s}$  a  $\frac{L}{min}$ .

$$Q = 43463 \frac{cm^3}{s} \times \left(\frac{1L}{1000cm^3}\right) \times \left(\frac{60s}{1min}\right) = 2608$$

En la tabla 4 se puede observar el resultado del cálculo de velocidad de descarga y el del flujo volumétrico.

Tabla 4. Datos para el cálculo de la carga de la bomba sin accesorios

Velocidad de descarga (cm/s)	Q (cm <sup>3</sup> /s)	Q (L/min)
343.10	434.63	26.08
300.84	381.09	22.87
270.17	342.25	20.53
239.52	303.42	18.21
208.89	264.62	15.88
178.22	225.77	13.55
147.55	186.92	11.21
116.92	148.11	8.89
86.26	109.27	6.56
55.70	70.56	4.23
24.91	31.55	1.89

Si se desea operar el sistema sin ningún accesorio en la salida, es necesario tener una bomba que proporcione como mínimo un flujo de 26.08 L/min. Se realizó el

cálculo de la carga total del sistema, esto para poder especificar la bomba requerida con accesorios.

Tabla 5. Cálculo de carga (tramos rectos) sin accesorios.

	Hazen Williams	Veronese Datei	Tramo recto promedio
Velocidad descarga (cm/s)	Q(cm <sup>3</sup> /s)	h(m)	h(m)
343.10	434.63	2.714	2.65
300.84	381.09	2.127	2.08
270.17	342.25	1.743	1.71
239.52	303.42	1.395	1.37
208.89	264.62	1.083	1.07
178.22	225.77	0.807	0.80
147.55	186.92	0.569	0.57
116.92	148.11	0.370	0.37
86.26	109.27	0.210	0.21
55.70	70.56	0.094	0.10
24.91	31.55	0.021	0.02

El algoritmo de cálculo que se siguió para calcular la carga del sistema sin accesorios en la salida se muestra a continuación. El algoritmo de cálculo solo se realizará para el primer renglón.

Se comenzará a partir de Hazen-Williams.

$$h = 10674 * \frac{Q^{1852}}{(C^{1852} * D^{4871})} * L \quad (59)$$

Donde:

h= pérdida de carga o de energía (m)

Q= caudal (m<sup>3</sup>/s)

C= coeficiente de rugosidad (adimensional)

D= diámetro interno de la tubería (m)

L= longitud (m)

Sustituyendo:

Para nuestro caso se aplica un coeficiente  $C=145$  siendo éste el valor para la tubería de PVC.

$$h = 10674 * \frac{00004346^{1852}}{(145^{1852} * 00127^{4871})} * 25 \quad (60)$$

$$h = 2714m$$

Método de Veronesse-Datei

$$h = 92 \times 10^{-4} \times \left( \frac{Q^{18}}{D^{48}} \right) \times L$$

Donde:

$h$  = pérdida de carga o energía (m)

$Q$  = caudal ( $m^3/s$ )

$D$  = diámetro interno de tubería (m)

$L$  = longitud de la tubería (m)

Sustituyendo:

$$h = 92 \times 10^{-4} \times \left( \frac{00004346^{18}}{00127^{48}} \right) \times 25$$

$$h = 258m$$

Los resultados obtenidos con estos dos métodos (Hazen-Williams y Veronesse-Datei) se promediaron y ese valor es el que se utilizará para hacer la suma de la carga.

$$h_{tramo\ recto} = \frac{h_{V-D} + h_{H-W}}{2} \quad (61)$$

$$h_{tramo\ recto} = \frac{258m + 2714m}{2}$$

$$h_{tramo\ recto} = 265m$$



Tabla 6. Fricción por accesorios, altura del sistema y cabeza total sin accesorios.

<b>Numero Reynolds</b>	<b>Factor de fricción Anaya</b>	<b>Accesorios h(m)</b>	<b>Altura h(m)</b>	<b>carga total h(m)</b>
48959.71	0.0373	31.707	1.24	<b>35.60</b>
42928.49	0.0374	24.466	1.24	<b>27.79</b>
38552.99	0.0375	19.799	1.24	<b>22.75</b>
34179.23	0.0377	15.625	1.24	<b>18.24</b>
29808.00	0.0379	11.947	1.24	<b>14.26</b>
25431.68	0.0382	8.756	1.24	<b>10.80</b>
21055.31	0.0385	6.059	1.24	<b>7.87</b>
16683.61	0.0391	3.856	1.24	<b>5.47</b>
12308.37	0.0399	2.145	1.24	<b>3.60</b>
7948.47	0.0416	0.931	1.24	<b>2.27</b>
3554.14	0.0461	0.207	1.24	<b>1.47</b>

Número de Reynolds

$$Re = \frac{D v \rho}{\mu} \quad (62)$$

Donde:

Re= Número de Reynolds

D= Diámetro interno del ducto

V= Velocidad promedio del líquido

$\rho$ = Densidad del fluido

$\mu$  = viscosidad del fluido

$$Re = \frac{00127 \times 3431 \times 1000}{00089}$$

$$Re = 4895971$$

Generalmente cuando el número de Reynolds calculado se encuentra por debajo de 2100 se dice que el flujo es laminar. El intervalo entre 2100 y 4000 se considera flujo de transición, y para valores mayores a 4000 se considera flujo turbulento.

### Factor de fricción

Se utilizó el factor de fricción la ecuación de Altschul-Anaya, ya que ésta se puede utilizar en cualquier régimen de flujo (laminar, transitorio, turbulento).

$$f = 0.11 * \left( \frac{0.00015}{\phi_{int}} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25} \quad (63)$$

$$f = 0.11 * \left( \frac{0.00015}{0.127} + \frac{68}{4895971} \right)^{0.25}$$

$$f = 0.0373$$

### **Pérdidas por fricción por los accesorios.**

Para las pérdidas por fricción por los accesorios se utilizó la ecuación de Darcy para el sistema internacional.

$$h = \frac{f * v^2 * (Leq)}{2 * gc * \phi_{int}} \quad (64)$$

Donde:

h= Pérdida de carga o energía (m)

f= Factor de fricción de Altschul Anaya

D= Diámetro interno de tubería (m)

Le= Longitud equivalente de la tubería (m)

gc= Constante de aceleración de la gravedad (m<sup>2</sup>/s)

V = Velocidad del fluido en tubería (m/s)

Los accesorios que se tomaron en cuenta para el cálculo de caída de presión fueron tres válvulas de bola, una válvula check, un medidor de flujo y 5 codos.

Para calcular la longitud equivalente se tomó como base los reportados en la literatura. Estos datos pueden ser empleados para cualquier material de que se requiera, ya que el valor de la longitud no está en función del material, si no está en función del diámetro; en la tabla 7 se puede observar los valores reportados.

*Tabla 7. Longitudes equivalentes*

<b>Longitud equivalente</b>	
<b>5 Codos</b>	2m
<b>3 Válvulas de bola</b>	10m
<b>1 Válvula check</b>	3m
<b>Medidor de Flujo</b>	3m
<b>Suma</b>	18m

$$h_{\text{accesorios}} = \left( \frac{0.037 \cdot 3 \cdot 3431^2 \cdot 18}{2 \cdot 981 \cdot 0.12 \cdot 7^{48}} \right)$$

$$h_{\text{accesorios}} = 31707m$$

Posteriormente se midió la altura del sistema. Y se le nombró como h:

$$h_{\text{accesorios}} = 124m$$

Para calcular la carga del sistema, se realiza la suma de las cargas.

$$h = h_{\text{recto}} + h_{\text{accesorios}} + h_{\text{altura}} \quad (65)$$

Donde:

h= carga sistema (m)

$h_{\text{recto}}$ = pérdidas por fricción en el tramo recto, el promedio de la carga calculada con la ecuación de Veronesse - Datei y Hazen - Williams. (m)

$h_{\text{accesorios}}$ =pérdida por fricción en los accesorios (m)

$h_{\text{altura}}$ =pérdida por fricción por altura. (m)

$$h = 265m + 31707m + 124m$$

$$h = 3560m$$

La bomba con la que se cuenta es una bomba con una carga de 8m, por lo que operar el sistema con descarga libre no puede ser factible con la bomba que se tiene. En ocasiones se requiere que el tanque esté lleno a un poco más de la mitad, incluso que se desborde. Por eso es necesario contar con accesorios en la salida, para frenar un poco la salida del fluido.

### 1.6.2 Descarga con accesorios

En las tablas 8 y 9, se presentan los resultados del tiempo de vaciado con accesorios a la salida.

Tabla 8. Resultado de vaciado de tanque con accesorios

Experimento 1		Experimento 2		Experimento 2	
t(s)	h(cm)	t(s)	h(cm)	t(s)	h(cm)
0	60	0	60	0	60
10	50	9	50	10	50
20.4	40	20.4	40	20.3	40
32	30	31.7	30	32	30
44	20	45	20	44	20
50.1	10	57	10	58	10
73.4	0	73	0	73	0

De estas tres corridas, se tomó el promedio y con éste fue con el que se trabajó para los cálculos.

Tabla 9. Promedio de vaciado de tanque con accesorios.

Promedio	
h(cm)	t(s)
60	0.0
50	9.7
40	20.4
30	31.9
20	44.3
10	55.0
0	73.1

Con los resultados obtenidos se elaboró una gráfica comparando los datos de la descarga libre y descarga con accesorios, se muestra en la figura 8.

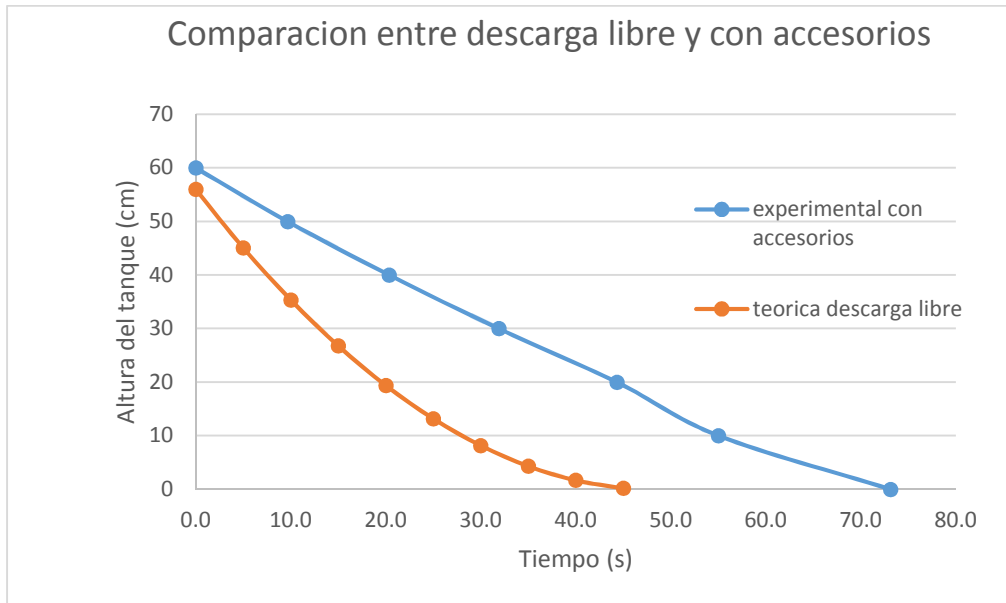


Figura 8. Comparativo entre descarga libre y con accesorios

Lo que se puede concluir de la figura anterior es que el intervalo de tiempo de vaciado que existe entre la descarga libre y la descarga con accesorios es de al menos 25 segundos.

En este intervalo de tiempo se da la recuperación para nuestra bomba y, en este lapso se brindará un apoyo para poder seguir subiendo agua al sistema, y que se genere una acumulación en el sistema. Lo anterior se traduce en una disminución en el flujo requerido y las pérdidas por fricción disminuirán, por lo que en este apartado se hablará de que la bomba seleccionada en un inicio es la adecuada para el sistema.

Para corroborarlo se siguió el algoritmo de cálculo parecido al que se establece en el apartado “descarga libre” sólo que en este caso se tomaron las siguientes consideraciones.

En la descarga se tienen físicamente:

- 1) Una contracción de diámetros (2 a 1.27 cm),
- 2) Una válvula de globo ( $\phi_i$  1.27 cm o 1/2”),
- 3) Un tramo recto de 15 cm ( $\phi_i$  1.27 cm o 1/2”).

Se busca información de L/D o K para cada accesorio y tramo recto; estos datos fueron obtenidos del libro (Crane, 1965). Se puede suponer inicialmente un régimen

de flujo en transición para determinar el factor de fricción. Con la información recabada se construye la tabla 10:

Tabla 10. Datos técnicos para el cálculo del caudal.

contracción 2cm a 1.27cm		Vlv. Globo	Tubo recto	K
k	0.26	13.6	0.47	14.33
L/D	6.5	340	11.85	358.35
Ffrtrans 1.27cm	0.04	0.04	0.04	

A continuación, se determinaron L/D o K totales, y con la altura del tanque especificado ( $h$  máximo de 60 cm) se procede a obtener el caudal en la línea de descarga mediante la siguiente ecuación<sup>17</sup>.

$$Q = 1965xd^2 \sqrt{\frac{h}{K}} \quad (66)$$

Si el tanque se divide en varias secciones o alturas, se pueden estimar los caudales requeridos por la bomba para poder mantener el nivel de líquido deseado dentro del tanque.

Tabla 11. Flujo y velocidad con datos experimentales.

h(cm)	t(s)	Q (L/min)	Q (cm <sup>3</sup> /s)	Vel.desc (cm/s)
60	0.0	9.7	161.15	99.91
50	9.7	8.1	134.29	83.26
40	20.4	6.4	107.43	66.61
30	31.9	4.8	80.58	49.96
20	44.3	3.2	53.72	33.30
10	55.0	1.6	26.86	16.65
0	73.1	0.0	0	0

Como se realizó con anterioridad, se muestra el algoritmo de cálculo del caudal únicamente para la altura de 60.

$$Q = 1965x05^2 \sqrt{\frac{197}{1433}}$$

<sup>17</sup> Ecuación tomada de: Crane "Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías" McGraw Hill México 1965

$$Q = 97 \text{ L/min}$$

Comparando el flujo que se necesita con accesorios en la descarga y con descarga libre. Se puede ver que el flujo requerido en la descarga libre es mayor al flujo requerido con accesorios a la salida.

Al igual que en el apartado de descarga libre, se hizo el mismo algoritmo de cálculo para descarga con accesorios.

En las tablas 12 y 13 se muestran los resultados de dichos cálculos.

En este apartado no se demuestra el algoritmo de cálculo, porque es el mismo que se empleó en el apartado anterior en las páginas 30-34 de este documento

*Tabla 12. Cálculos de carga de la bomba con accesorios.*

<b>Hazen Williams</b>	<b>Veronese Datei</b>	<b>Tramo recto promedio</b>	<b>Numero Reynolds</b>	<b>Factor de fricción Darcy</b>	
<b>Q(cm<sup>3</sup>/s)</b>	<b>h(m)</b>	<b>h(m)</b>	<b>h(m)</b>	<b>h(m)</b>	
161.15	0.43	0.43	0.43	14257.3	0.029
134.29	0.31	0.31	0.31	11881.1	0.030
107.43	0.20	0.21	0.21	9504.9	0.032
80.58	0.12	0.12	0.12	7128.6	0.034
53.72	0.06	0.06	0.06	4752.4	0.038
26.86	0.02	0.02	0.02	2376.2	0.045
0	0	0	0	0	0

*Tabla 13. Cálculos de carga de la bomba con accesorios.*

<b>Factor de fricción</b>	<b>Accesorios</b>	<b>Altura</b>	<b>carga total</b>
<b>Anaya</b>	<b>h(m)</b>	<b>h(m)</b>	<b>h(m)</b>
0.039	3.07	1.24	<b>4.74</b>
0.040	2.16	1.24	<b>3.71</b>
0.041	1.41	1.24	<b>2.86</b>
0.042	0.82	1.24	<b>2.18</b>
0.044	0.38	1.24	<b>1.68</b>
0.049	0.11	1.24	<b>1.36</b>
0	0.00	1.24	<b>1.24</b>

Se aprecia que la bomba elegida tiene una cabeza máxima de 8 metros. Las características del sistema ideado sólo requieren 4.74m, si se desea implementar el escenario en que el tanque se desborda. Dicha bomba de la marca Equipar es suficiente.

Cabe señalar que estos cálculos fueron realizados con ayuda del sistema prototipo, por lo que pueden tener pequeñas variaciones con el sistema final.

Estos cambios no deberán ser significativos, por lo que este es el cálculo válido.

Como conclusión de estos cálculos, se tiene que la bomba cotizada en un inicio es suficiente para poder alimentar el sistema. Además, que se va a poder realizar el escenario en el que se desborde el tanque.

## **1.7 Filosofía de control y operación**

### **1.7.1 Filosofía de operación**

Este proceso se inicia llenando el tanque de alimentación T-100, dicho tanque podrá ser llenado con cubetas de agua proveniente del grifo de agua. En caso de que se quiera conservar el agua para utilizarse en las siguientes experimentaciones, se recomienda agregar unas gotas de azul de metileno, esto con el fin de que no se tenga que estar cambiando el agua en cada arranque del sistema, evitando con ello que se contamine.

Dentro del tanque(T-100) se encuentra una bomba sumergible (P-100), con la cual se suministra el agua al tanque de experimentación (T-200). La bomba se opera de forma manual. El flujo de agua será regulado mediante 3 válvulas, localizadas en la parte superior del sistema.

El sistema cuenta con una corriente de *by-pass* (recirculación). Esta corriente estará regresando su contenido al tanque de alimentación (T-100). El propósito de esta corriente es regular el flujo.

Cabe la posibilidad que el flujo de agua que llega al tanque sea demasiado alto para lo que se requiera, en este caso abrimos la corriente de *by-pass* lo que implica que el flujo que alimenta el tanque T-200 disminuya. También puede presentarse el escenario contrario. Donde se requiere un flujo mayor al que se tiene. En este caso se puede cerrar la corriente de *by-pass* lo que automáticamente, incrementaría el flujo de entrada al tanque T-200.

Por último, tenemos el tanque de interés, este tanque tiene el TAG T-200 (tanque de experimentación). Este tanque es poco común, consta de un tanque cilíndrico de 60cm de altura, fuera de este tanque cilíndrico a 6 cm de distancia se colocó un recubrimiento rectangular también de acrílico. Este recubrimiento funciona como tanque receptor, si en algún momento se desborda el tanque cilíndrico, el agua no generará algún tipo de falla en el sistema de control.

Se recomienda que, en caso de presentarse alguna fuga, se debe observar a qué se debe. Las causas probables y en donde puede llegarse a generar alguna fuga son: las uniones de las válvulas, el medidor de flujo conectado antes del tanque (T-200), la salida del tanque (T-200) y las uniones de tubería.



Para solucionar estos problemas, es recomendable utilizar cinta teflón. Con esto es suficiente para eliminar las fugas presentadas en el sistema. En caso de que no se logre eliminar la fuga. Podría deberse a una mala conexión, a que alguna pieza se encuentra rota o fisurada, en este caso es necesario reemplazar la pieza por una nueva.

Cabe señalar que en el sistema no se genera ningún tipo de residuo, o el agua no se tira al drenaje durante su operación. Toda el agua utilizada durante la experimentación regresa al tanque de alimentación (T-100).

El módulo experimental, opera por lotes. Esto quiere decir que no será utilizado todo el tiempo, que su tiempo de operación durante todo el año es muy corto.

### 1.7.2 Filosofía de control

Se tiene que controlar el nivel del tanque T-200, este nivel del tanque constituye a nuestra variable de salida, para ello fue necesario agregar la instrumentación (VLV-100, Medidor de Flujo).

En la figura 9, se muestra el esquema del proceso y la instrumentación que se empleó para controlar el nivel del tanque.

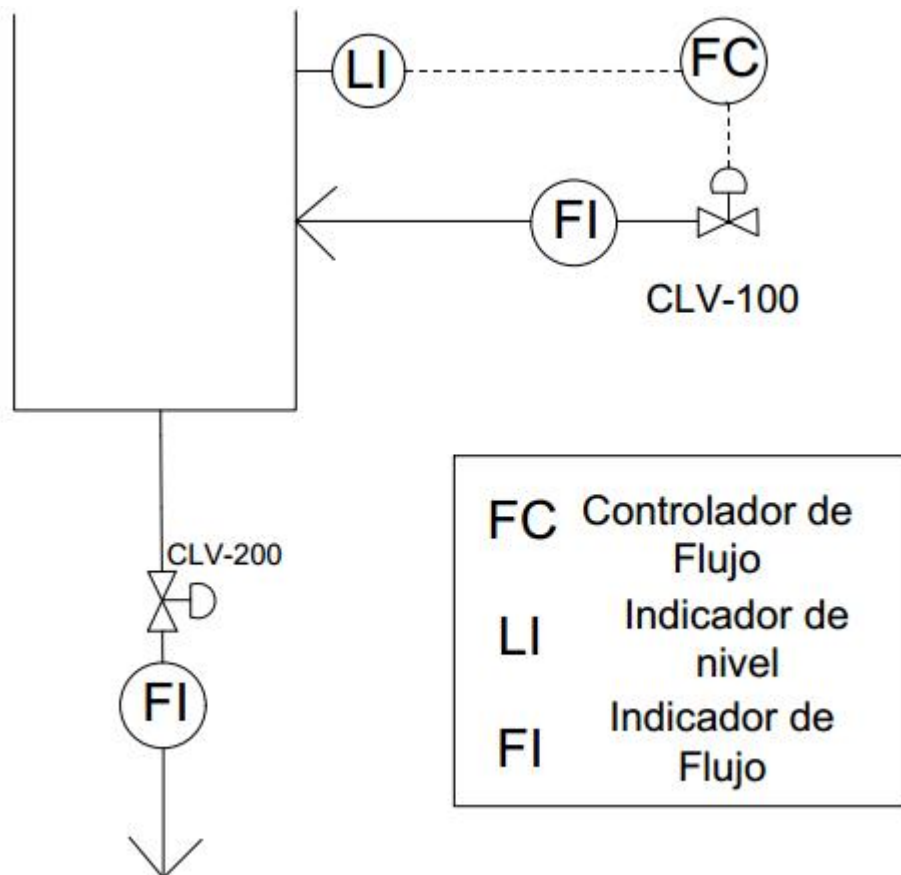
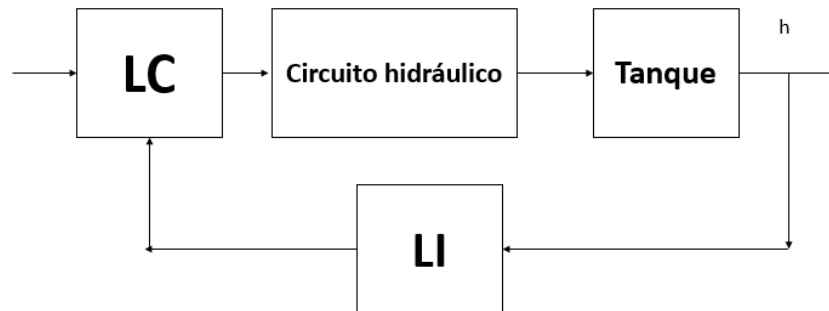


Figura 9. Esquema de proceso e instrumentación, banco experimental Dinámica y control para LIQIV.

En la figura 10, se presentará el diagrama de bloques del sistema.



*Figura 10. Diagrama de bloques, banco experimental Dinámica y control para LIQ IV.*

Se puede observar que es un lazo cerrado, se puede interpretar de la siguiente forma:

El nivel “h”, es detectado por el indicador de nivel (FI), la señal que se genera es enviada al controlador de flujo por sus siglas en inglés (FC). Que este a su vez genera una nueva señal que es enviada a la válvula, la cual va a aumentar o disminuir su apertura dependiendo el nivel deseado. Cerrando así el lazo.

## Capítulo 2. Construcción del banco experimental

El primer paso consistió en la adquisición y ensamblaje del carro donde se soportó el banco de pruebas. El carro es de la marca Rubbermaid las especificaciones de del carro están descritos en la tabla 14 y en la figura 11 se puede ver una imagen del carro.

Tabla 14. Datos generales del carro.

Modelo No.	Dimensiones: Largo x Ancho x Alto	Capacidad de carga	Cantidad de repisas	Peso
H-1044BL	38" x19" x 33"	500 lb	2	33 lb



Figura 11. Imagen del carro.

En el nivel inferior se instaló el tanque de alimentación (T-100), dentro de este tanque como se había mencionado, se tiene la bomba (P-100).

En la parte superior del tanque se dispone la tubería, así como el tanque de experimentación (T-200). En la tabla 4 se presentan datos de las longitudes de tubería para la construcción del sistema.

Los tramos fueron enumerados respecto a su número de corriente en el diagrama de flujo de proceso (Figura 1). En el anexo B, se muestran los diagramas de los de las líneas del proceso. La tabla 3 indica la longitud de los tramos de tubería que se ilustran en el anexo B.

Tabla 15. Longitud de tramos de tubería.

Número de tubería	Longitud (cm)
1	10
1 <sup>1</sup>	8
1 <sup>2</sup>	14
2	13
2 <sup>1</sup>	11
2 <sup>2</sup>	6
2 <sup>3</sup>	18
2 <sup>4</sup>	14
2 <sup>5</sup>	30.5
2 <sup>6</sup>	4
2 <sup>7</sup>	31.5
3	7
3 <sup>1</sup>	8.5
3 <sup>2</sup>	21
4	9.5
4 <sup>1</sup>	4.5

Se cortó y ensamblo la tubería con codos, uniones, válvulas, etc. Posteriormente se montó el tanque (T-200) a la mesa. Con ayuda de un taladro, se realizaron las perforaciones para ensamblar el tanque y el paso de algunas partes de la tubería.

Ya con el tanque (T-200) montado en la mesa, se empezó a armar el sistema conectando la bomba con la tubería y dejando el sistema dispuesto para operar. Para evitar fugas en el sistema se procedió a cementar las piezas que contaban con uniones. Para eliminar las fugas completamente se utilizó cinta teflón en el lugar de las fugas. Así fue como el sistema quedó probado para poder ser operado sin ninguna complicación.

## Capítulo 3 Diseño experimental y resultados

En este Capítulo se presentan los resultados obtenidos en el aparato construido conforme al diseño de ingeniería que se ha descrito en el Capítulo 1.

Para poder calcular los posibles valores de flujo a los cuales podrá operar el sistema, fue necesario contar con el banco de pruebas armado y funcionando sin ningún tipo de fugas. Las pruebas experimentales consistieron en llenar la parte interior del tanque T-200.

La forma en la que se enumeraron las válvulas esta descrita en la tabla 16. Que corresponden al nombre asignado en la figura 1 (DFP).

Tabla 16. Nombre de válvulas.

Válvula	No
Servo válvula (control)	CLV-100
Intermedia entre control y by-pass	VLV-200
By-pass	VLV-300

En la figura 12. Se muestra el diagrama para una mejor ilustración de lo antes citado.

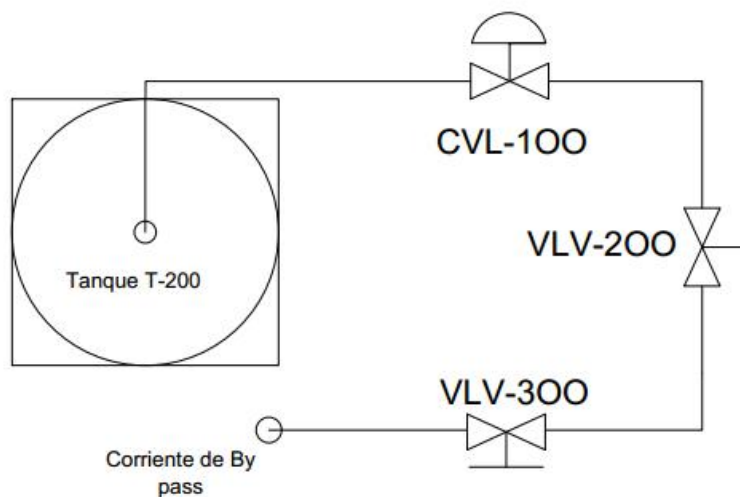


Figura 12. Esquema de válvulas.

Es importante mencionar que la CLV-100, se operó de manera manual utilizando una válvula de bola, idéntica a la que se ocupará para la sustitución de esta válvula por una servo-válvula que estará gobernada por un lazo de control que se encontraba en construcción al momento de la realización de este trabajo. Esto con el fin de que los resultados sean lo más parecido posible a los que se pueden obtener utilizando la servo-válvula.

La apertura para las válvulas en la experimentación se limitó a tres posiciones de la válvula, abierto, cerrado y al 50% de apertura.

Se calcularon las posibles combinaciones con una restricción, siempre que llegara agua al tanque T-200.

Después de la depuración de las posibles combinaciones, quedaron doce combinaciones posibles en las cuales, se cumple con la premisa de llevar agua al tanque T-200

Las combinaciones posibles se presentan en la tabla 17. En la Figura 13 se presenta el diagrama de experimentación que se siguió en este trabajo.

*Tabla 17. Combinaciones*

<b>Combinaciones</b>												
<b>Válvula</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>CLV-100</b>	a	a	a	m	a	m	m	m	a	a	m	m
<b>VLV-200</b>	a	a	a	m	m	a	m	a	m	m	m	a
<b>VLV-300</b>	a	c	m	m	a	a	a	m	c	m	c	c

**Donde: a: Abierto c: Cerrado m: 50% de apertura**

## Experimentación

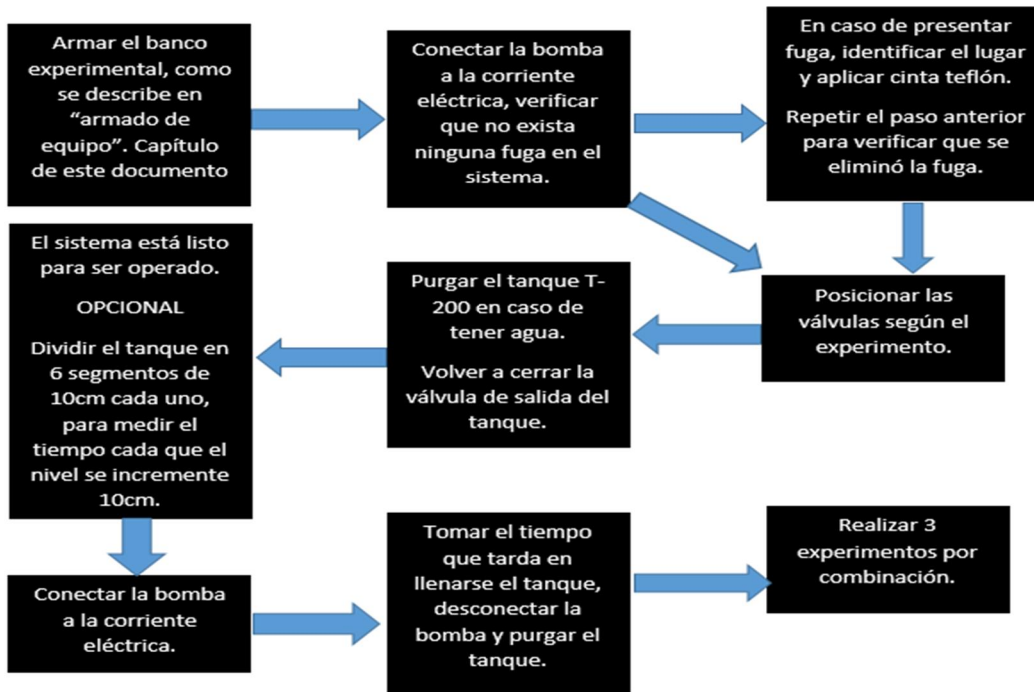


Figura 13. Diagrama de flujo de experimentación.

## Combinación 1

Para esta combinación tenemos que todas las válvulas están abiertas.

A continuación, se muestran los resultados de las tres corridas.

Tabla 118. Resultados de combinación 1.

Combinación 1						
h (cm)	t 1 (s)	t 2 (s)	t 3 (s)	t prom (s)	V (L)	Q (L/min)
10	20	21	21	<b>20.67</b>	2.54	7.39
20	49	48	48	<b>48.33</b>	5.09	6.32
30	76	75	76	<b>75.67</b>	7.63	6.05
40	97	99	99	<b>98.33</b>	10.18	6.21
50	122	123	123	<b>122.67</b>	12.72	6.22
60	153	154	154	<b>153.67</b>	15.27	5.96

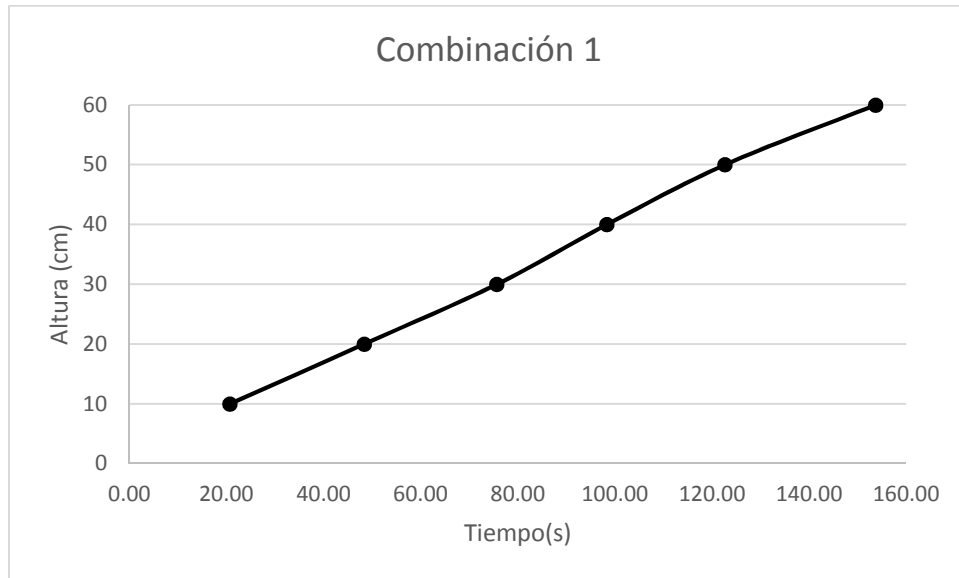


Figura 14. Resultados de combinación 1.

Como podemos observar en la tabla 18 y en la figura 14, con la combinación en la que todas nuestras válvulas se encuentran abiertas, se obtiene un tiempo promedio de 153 segundos, que transformado queda 2 minutos 33 segundos. Conocemos el volumen del tanque cilíndrico interior, que es 15.27 L se divide entre el tiempo y obtenemos el valor del flujo para esta combinación que es igual a  $6.55 \text{ L}/\text{min}$ .

A continuación, se presenta el algoritmo de cálculo utilizado para esta sección.

Algoritmo de cálculo:

Tiempo promedio:

$$t_{prom} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3} \quad (67)$$

$$t_{prom} = \frac{20 + 21 + 21}{3} = 20.67$$

Volumen:

$$\text{Volumen del cilindro} = h * \pi * r^2 \quad (68)$$

$$\text{Volumen del cilindro} = 10\text{cm} * \pi * 9^2\text{cm}^2 = 2544.7\text{cm}^3$$

El volumen debe ser transformado a unidades de del sistema internacional.



$$2547 \text{ cm}^3 = \left( \frac{1 \text{ dm}^3}{10^3 \text{ cm}^3} \right) = 2.547 \text{ dm}^3$$

Recordando que:

$$1 \text{ dm}^3 = 1 \text{ L}$$

Conocemos el valor del volumen, procedemos a calcular el valor del flujo de la siguiente forma:

El valor del flujo esta reportado en L/min, por lo que es necesario hacer la conversión del tiempo que lo tenemos en segundos (s) y cambiarlo a minutos (min).

Para esto tenemos la siguiente relación:

$$\left( \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ segundos}} \right)$$

Sabiendo esto procedemos a hacer la conversión.

$$t = 2067 \text{ s} * \left( \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) = 34.45 \text{ min}$$

Para calcular el valor del Flujo para el segmento:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{L}{\text{min}} \quad (69)$$

$$Q = \frac{2547 \text{ L}}{34.45 \text{ min}} = 739 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

Esto sólo es el algoritmo de cálculo para calcular el incremento de un segmento de 10 cm. Pero se utilizó el mismo para cada uno de los segmentos. Además, el valor del flujo fue promediado de cada uno de los 6 segmentos.

A continuación, se demuestra cómo se obtuvo el valor del flujo para nuestra primera combinación.

$$Q_{\text{promedio}} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6}{6} \quad (70)$$

$$Q_{\text{promedio}} = \frac{739 + 632 + 605 + 621 + 622 + 596}{6} = 636 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

El algoritmo de cálculo que se acaba de presentar es el mismo que se utilizó para todas las corridas y todas las combinaciones posibles.

## Combinación 2

Esta combinación tenía la siguiente alineación en sus válvulas. Válvulas CLV-100 y VLV-200 abiertas, mientras que la VLV-300 estaba cerrada.

En la tabla 19, se presentan los resultados de su experimentación.

Tabla 19. Resultado de combinación 2.

Combinación 2						
h (cm)	t 1 (s)	t 2 (s)	t 3 (s)	t prom (s)	V (L)	Q (L/min)
10	5	6	6	<b>5.67</b>	2.54	26.94
20	10	11	12	<b>11.00</b>	5.09	27.76
30	17	18	18	<b>17.67</b>	7.63	25.93
40	23	24	24	<b>23.67</b>	10.18	25.81
50	30	30	30	<b>30.00</b>	12.72	25.45
60	35	35	36	<b>35.33</b>	15.27	25.93

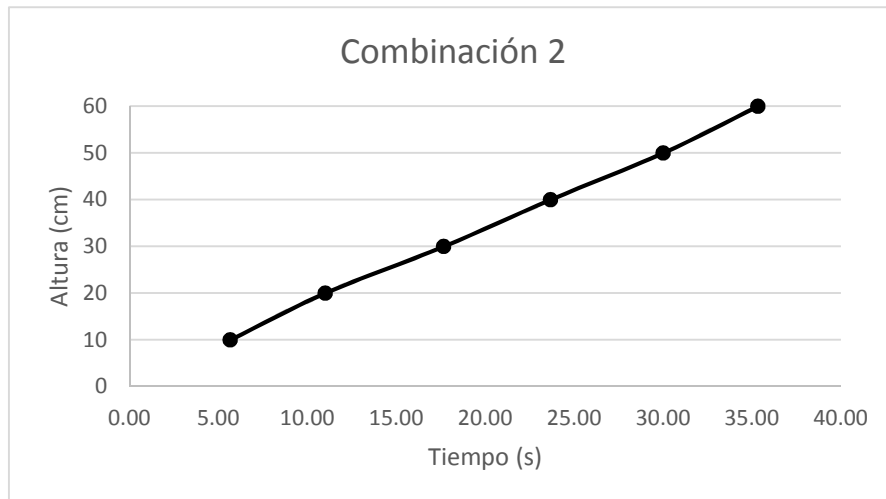


Figura 15. Resultados de combinación 2

Como podemos observar, se tiene un tiempo de 35.33 s y el volumen ya conocido de 15.27 L. En esta corrida se obtuvo un valor de flujo promedio de  $26.3 \text{ L}/\text{min}$ . Es un valor de flujo bastante alto ya que se está hablando de que prácticamente en medio minuto el tanque está lleno.

## Combinación 3

Esta combinación es en la que se cuenta con las válvulas CLV-100 y VLV-200 están abiertas y VLV-300 a la mitad. Se presenta la tabla 20 con los resultados junto con su respectiva gráfica figura 16.

Tabla 20. Resultado de combinación 3.

Combinación 3						
h (cm)	t 1 (s)	t 2 (s)	t 3 (s)	t prom	V (L)	Q (L/min)
10	12.13	11.55	11.9	<b>11.86</b>	2.54	12.87
20	22.56	22.16	22.45	<b>22.39</b>	5.09	13.64
30	33.25	32.54	33.11	<b>32.97</b>	7.63	13.89
40	43.95	43.77	43.93	<b>43.88</b>	10.18	13.92
50	54.96	54.63	64.86	<b>58.15</b>	12.72	13.13
60	65.33	64.81	65.47	<b>65.20</b>	15.27	14.05

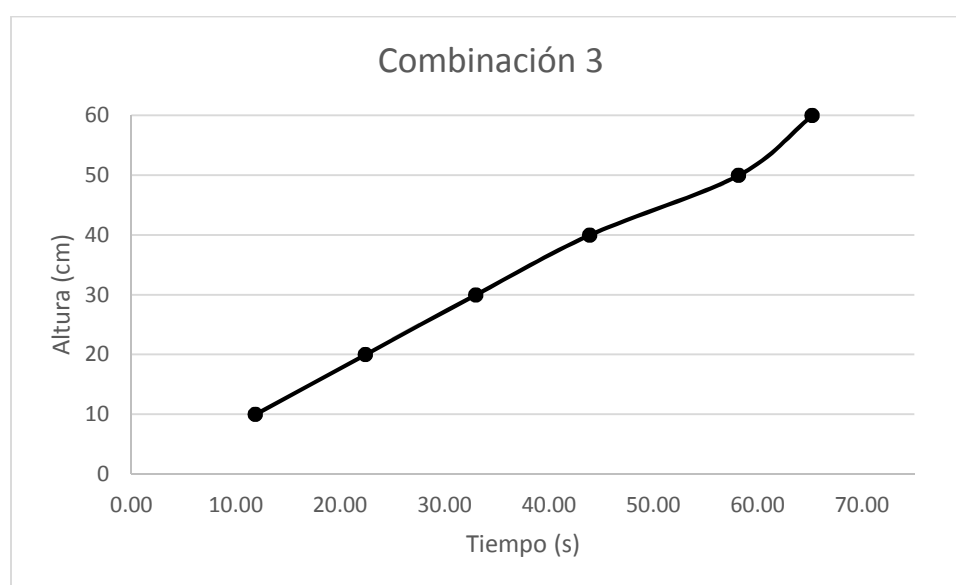


Figura 16. Resultados de combinación 3

Podemos observar, que el tiempo en el cual se llenó el tanque fue de 71 segundos. Esto quiere decir que con esta combinación el tanque estará lleno aproximadamente en 1:11. El valor del flujo que resultó de esta corrida fue de  $13.58 \text{ L}/\text{min}$ . Es un valor de flujo un poco elevado y se tomará en cuenta cuando el tanque tenga que ser llenado de una manera relativamente rápida.

#### Combinación 4

La forma de operar para esta combinación fue la siguiente. Todas las válvulas estaban a la mitad.

En la tabla 21 se muestran los resultados obtenidos de esta corrida.

Tabla 21. Resultado de combinación 4.

Combinación 4						
h (cm)	t 1 (s)	t 2 (s)	t 3 (s)	t prom	V (L)	Q (L/min)
10	17	18	16	17.00	2.54	8.98
20	38	37	38	37.67	5.09	8.11
30	59	60	59	59.33	7.63	7.72
40	79	80	79	79.33	10.18	7.70
50	68	98	98	88.00	12.72	8.68
60	119	120	119	119.33	15.27	7.68



Figura 17. Resultados de combinación 4

Lo primero que podemos observar es que se nota un ligero error de medición en el punto que se encuentra entre 40 y 50 cm de altura. Pero este error no interfiere con lo que interesa obtener como resultado de este análisis.

El tiempo en el que se llenó este tanque fue de 119 segundos casi dos minutos. El valor de flujo fue de  $8.14 \text{ L}/\text{min}$ . Esta combinación es de una velocidad media, no es rápido el llenado como en las que se presentaron anteriormente.

### Combinación 5

Para este experimento las válvulas estarán posicionadas de la siguiente forma.

Válvulas CLV-100 y VLV-300 abiertas mientras que la válvula VLV-200 con la posición de la mitad.

Tabla 22. Resultado de combinación 5

Combinación 5						
h (cm)	t 1 (s)	t 2 (s)	t 3 (s)	t prom	V (L)	Q (L/min)
10	35	36	35	<b>35.33</b>	2.54	4.32
20	75	75	75	<b>75.00</b>	5.09	4.07
30	112	113	109	<b>111.33</b>	7.63	4.11
40	143	147	142	<b>144.00</b>	10.18	4.24
50	178	174	179	<b>177.00</b>	12.72	4.31
60	217	218	217	<b>217.33</b>	15.27	4.22

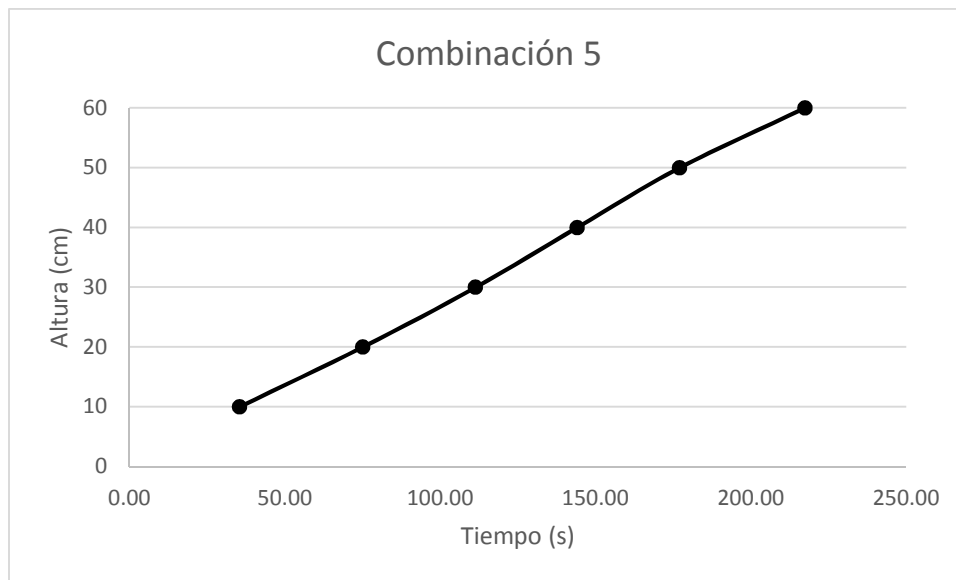


Figura 18. Resultados de combinación 5

Al ver la tabla 22, se puede dar cuenta que el llenado del tanque con esta combinación se llevó mucho tiempo, 217 segundos, le llevó más de tres minutos llenarse. El valor del flujo es de  $4.21 \text{ L}/\text{min}$ . Comparado con las demás, se puede decir que esta combinación no favorece el llenado del tanque de manera rápida.

### Combinación 6

El experimento se llevó a cabo bajo las siguientes condiciones. Válvulas VLV-200 y VLV-300 abiertas, CLV-100 a la mitad.

Tabla 23. Resultado de combinación 6

<b>Combinación 6</b>						
<b>h (cm)</b>	<b>t 1 (s)</b>	<b>t 2 (s)</b>	<b>t 3 (s)</b>	<b>t prom</b>	<b>V (L)</b>	<b>Q (L/min)</b>
10	28	28	27	<b>27.67</b>	2.54	5.52
20	57	57	56	<b>56.67</b>	5.09	5.39
30	87	86	85	<b>86.00</b>	7.63	5.33
40	111	112	111	<b>111.33</b>	10.18	5.49
50	139	141	140	<b>140.00</b>	12.72	5.45
60	166	166	165	<b>165.67</b>	15.27	5.53

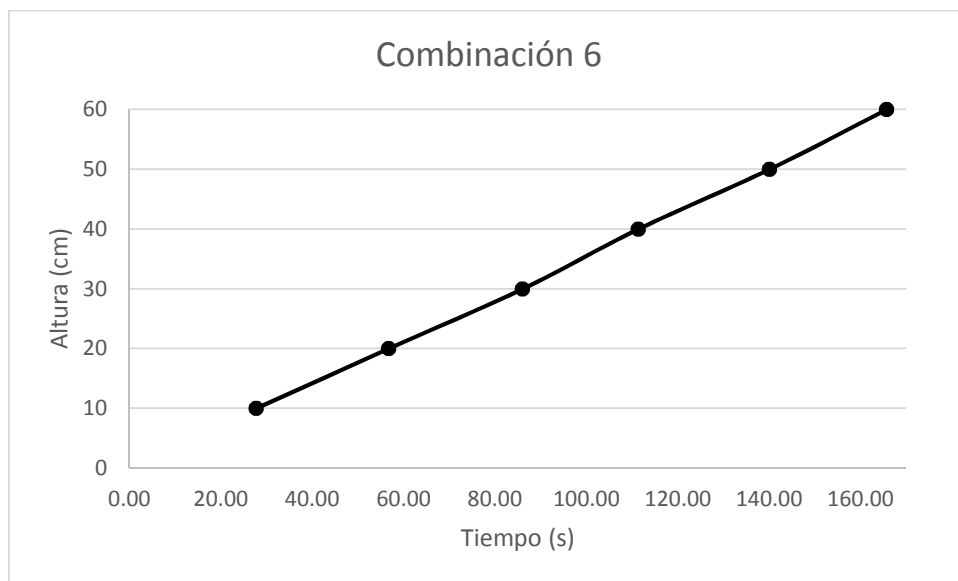


Figura 19. Resultados de combinación 6

Los resultados de esta corrida indican que el tanque tardó en llenarse 162 segundos. El valor de flujo para esta combinación es de  $5.45 \text{ L}/\text{min}$ . Con esta combinación también se obtiene un llenado de tanque lento.

### Combinación 7

La posición de las válvulas para este experimento fue la siguiente.

Las válvulas CLV-100 y VLV-200 a la mitad y la VLV-300 válvula abierta. Por lo que se espera un tiempo de llenado lento.

Tabla 24. Resultado de combinación 7

Combinación 7						
h (cm)	t 1 (s)	t 2 (s)	t 3 (s)	t prom	V (L)	Q (L/min)
10	30.53	32.45	30.48	<b>31.15</b>	2.54	4.90
20	64	63.36	63.88	<b>63.75</b>	5.09	4.79
30	96.31	94.57	96.17	<b>95.68</b>	7.63	4.79
40	125.4	125.5	125.05	<b>125.32</b>	10.18	4.87
50	154.8	157.67	154.69	<b>155.72</b>	12.72	4.90
60	188.04	188.06	187.11	<b>187.74</b>	15.27	4.88



Figura 20. Resultados de combinación 7

El tiempo de llenado para esta serie fue de 187 segundos. Que es un poco más de tres minutos. El valor de flujo fue de  $4.86 \text{ L}/\text{min}$ . se puede decir que esta combinación también hace que el tiempo de llenado del tanque sea lento.

### Combinación 8

Para este experimento las válvulas se posicionaron de la siguiente forma. La CLV-100y la VLV-300 se colocaron a la mitad y la VLV-200 abierta completamente.

Tabla 25. Resultado de combinación 8

Combinación 8						
h (cm)	t 1 (s)	t 2 (s)	t 3 (s)	t prom	V (L)	Q (L/min)
10	12.63	13.17	12.76	<b>12.85</b>	2.54	11.88
20	24.8	24.67	24.85	<b>24.77</b>	5.09	12.33
30	36.17	35.72	36.4	<b>36.10</b>	7.63	12.69
40	47.67	48.17	48.44	<b>48.09</b>	10.18	12.70
50	59.86	60	60.55	<b>60.14</b>	12.72	12.69
60	71.5	71.52	71.44	<b>71.49</b>	15.27	12.81

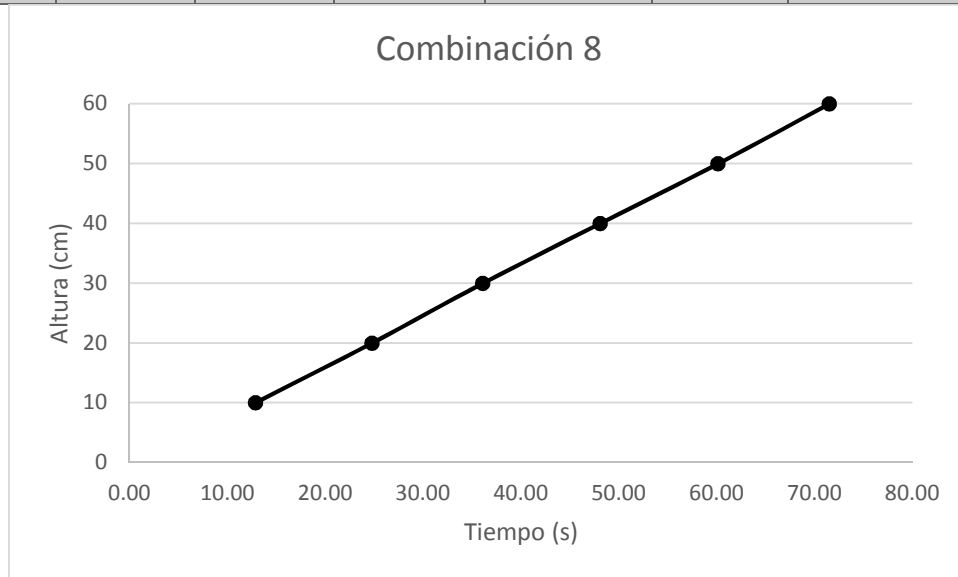


Figura 21. Resultados de combinación 8.

Con esta combinación, podemos ver que el tiempo de llenado es de un minuto aproximadamente. Por lo que podríamos decir que la velocidad de llenado del tanque es media. El valor de flujo registrado para este experimento fue de  $12.52 \text{ L/min}$ .



### Combinación 9

En nuestro noveno experimento tenemos la posición de las válvulas de la siguiente forma. Válvula CLV-100 abierta, válvula VLV-200 a la mitad y la VLV-300 estará cerrada.

Tabla 26. Resultado de combinación 9.

Combinación 9						
h (cm)	t 1 (s)	t 2 (s)	t 3 (s)	t prom	V (L)	Q (L/min)
10	7.32	6.52	6.39	<b>6.74</b>	2.54	22.64
20	14.09	14.09	13.27	<b>13.82</b>	5.09	22.10
30	21.88	22.31	22.17	<b>22.12</b>	7.63	20.71
40	29.68	28.93	29.95	<b>29.52</b>	10.18	20.69
50	36.89	36.27	36.5	<b>36.55</b>	12.72	20.88
60	43.05	43.03	43.57	<b>43.22</b>	15.27	21.20

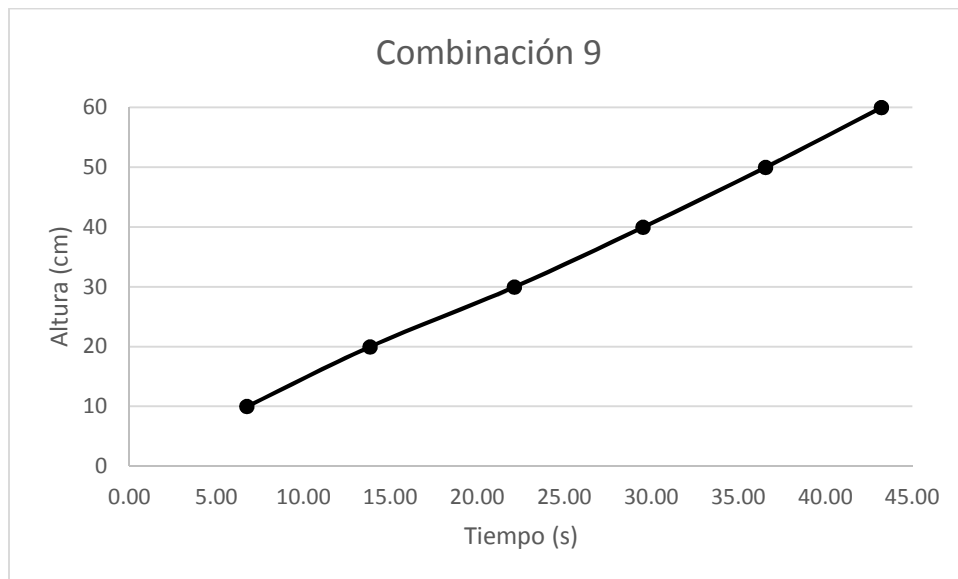


Figura 22. Resultados de combinación 9.

Como podemos observar en la tabla 26 y en el gráfico de este experimento, el tiempo en el cual se llena el tanque es de 43 segundos. El flujo que resultó de esta combinación fue de  $21.37 \text{ L}/\text{min}$ . Se puede afirmar que el flujo que resulta de esta combinación es grande comparado con los de otras combinaciones. Debido a esto el tiempo de llenado es corto.

### Combinación 10

Para esta combinación sabemos que las válvulas estarán posicionadas de la siguiente forma.

Abierto para la válvula CLV-100 y las otras dos válvulas estarán a la mitad.

Tabla 27. Resultado de combinación 10.

Combinación 10						
h (cm)	t 1 (s)	t 2 (s)	t 3 (s)	t prom	V (L)	Q (L/min)
10	15.5	15.9	17.08	<b>16.16</b>	2.54	9.45
20	31.79	31.71	32.55	<b>32.02</b>	5.09	9.54
30	46.9	47.57	48.96	<b>47.81</b>	7.63	9.58
40	62.58	63.44	64.8	<b>63.61</b>	10.18	9.60
50	80.35	79.65	79.71	<b>79.90</b>	12.72	9.55
60	95.33	96.24	97.68	<b>96.42</b>	15.27	9.50

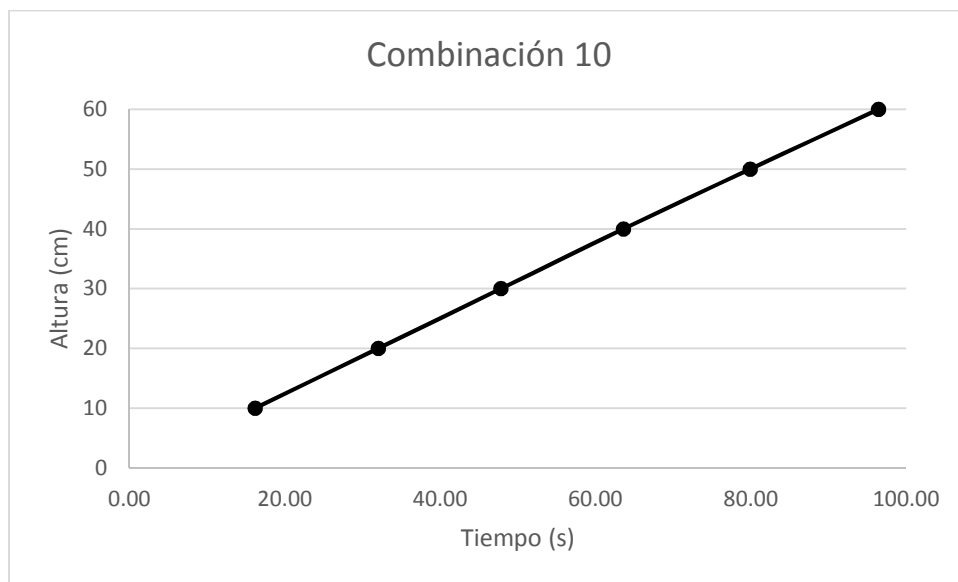


Figura 23. Resultados de combinación 10.

El tiempo de llenado para este experimento, es de 96 segundos. El tanque estará lleno en un minuto treinta segundos aproximadamente. Por lo que podríamos decir que la velocidad de llenado del tanque es media con esta combinación. El flujo que resultó de este experimento fue de  $9.54 \text{ L}/\text{min}$ .

### Combinación 11

Para este experimento la posición de las válvulas fue de la siguiente forma.

Las válvulas CLV-100 y VLV-200 estaban por la mitad y la VLV-300 cerrada.

Tabla 28. Resultado de combinación 11.

Combinación 11						
h (cm)	t 1 (s)	t 2 (s)	t 3 (s)	t prom	V (L)	Q (L/min)
10	7.44	8.74	8.58	<b>8.25</b>	2.54	18.50
20	15.75	16.2	16.62	<b>16.19</b>	5.09	18.86
30	24.44	24.93	25.09	<b>24.82</b>	7.63	18.45
40	32.13	33.3	33.42	<b>32.95</b>	10.18	18.53
50	40.45	40.26	41.49	<b>40.73</b>	12.72	18.74
60	48.14	48.81	48.93	<b>48.63</b>	15.27	18.84

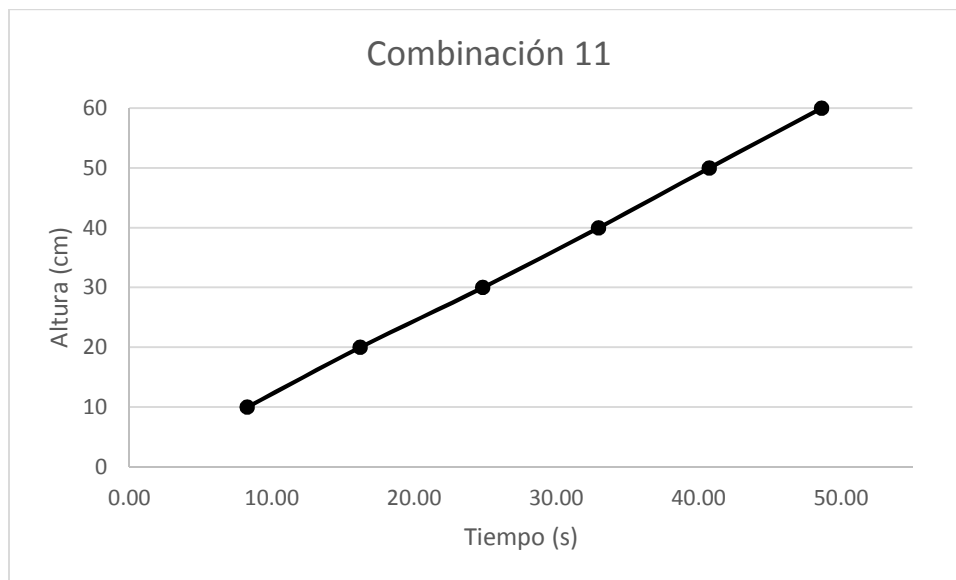


Figura 24. Resultados de combinación 11.

Para esta combinación, tuvimos un tiempo de llenado de 48 segundos. Lo que indica que el flujo es alto, por lo que la velocidad con la que se llenó el taque fue alta. El valor de flujo registrado para esta corrida fue de  $18.66 \text{ L}/\text{min}$ .

## Combinación 12

Para nuestra última combinación posible, las posiciones de las válvulas quedaron de la siguiente forma.

Válvula CLV-100 a la mitad, válvula VLV-200 abierta y la válvula VLV-300 cerradas.

Tabla 29. Resultado de combinación 12.

Combinación 12						
h (cm)	t 1 (s)	t 2 (s)	t 3 (s)	t prom	V (L)	Q (L/min)
10	6.98	7.11	7.26	<b>7.12</b>	2.54	21.45
20	14.14	15	15.09	<b>14.74</b>	5.09	20.71
30	21.97	22.72	23	<b>22.56</b>	7.63	20.30
40	29.76	31.04	30.6	<b>30.47</b>	10.18	20.05
50	37.76	38.75	38.58	<b>38.36</b>	12.72	19.90
60	44.21	45.37	45.13	<b>44.90</b>	15.27	20.40

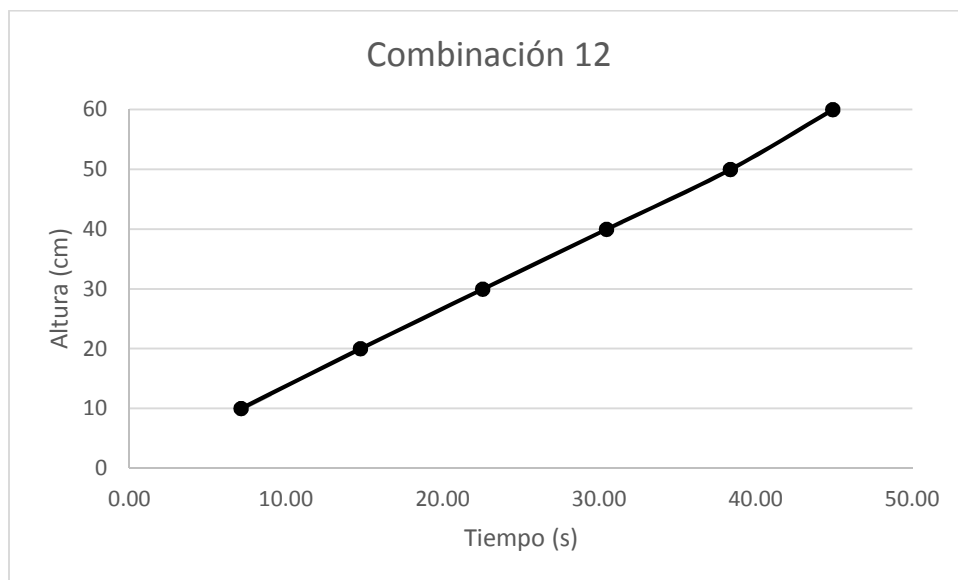


Figura 25. Resultados de combinación 12.

Para esta combinación tenemos un tiempo de llenado de 44 segundos. Por lo que tenemos un tiempo corto, el valor de flujo que resultó de esta combinación fue de  $20.47 \text{ L}/\text{min}$ .

## Análisis de resultados

Comenzaremos esta sección presentando un gráfico en el que se compara el valor de flujo resultante de cada una de nuestras corridas.

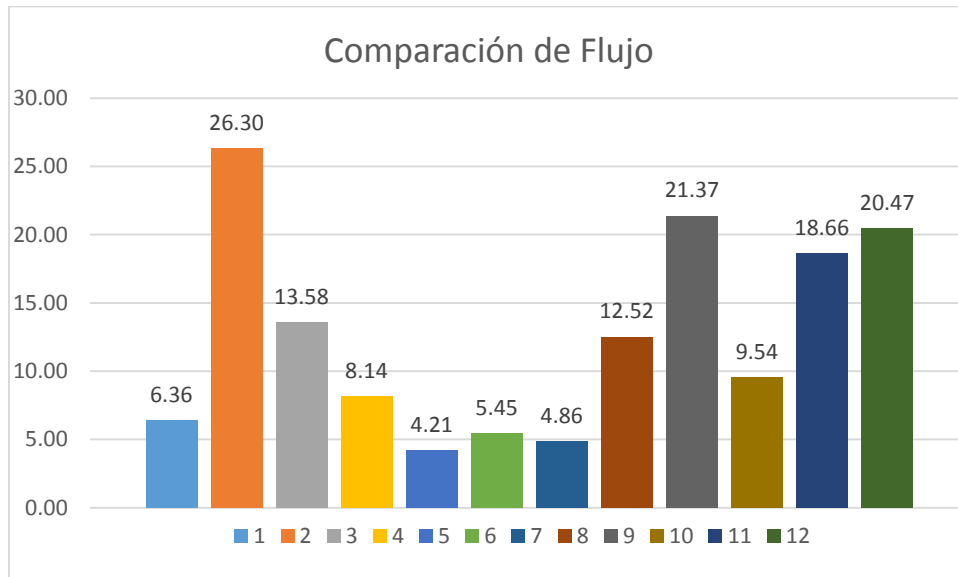


Figura 26. Gráfica comparativa de resultados.

Las combinaciones con un valor de flujo alto son las siguientes: dos, nueve, once y doce. En estas combinaciones se puede esperar que el tanque se llene en menos de un minuto.

Para las combinaciones tres y ocho, se puede esperar que tarde poco más de un minuto en llenarse, por lo que el flujo de estas combinaciones lo pondremos como intermedio.

Para las combinaciones que restan: uno, cuatro, cinco, seis, siete y diez. El flujo es bajo, lo que dice que el tanque se llenará en un tiempo mayor a un minuto.

A continuación, se presenta una tabla con las combinaciones con las que se puede tener un flujo alto.

Tabla 30. Combinaciones con flujo alto.

Combinación	Flujo (L/min)	Posición de válvulas
2	26.3	CLV-100:A VLV-200:A VLV-300:C
9	21.37	CLV-100:A VLV-200:M VLV-300:C
11	18.66	CLV-100:M VLV-200:M VLV-300:C
12	20.47	CLV-100:M VLV-200:A VLV-300:C

Al comparar las combinaciones de una manera más depurada, se puede observar que algo que ayuda a que el flujo sea alto es la posición de la válvula VLV-300: está cerrada. Esto ayuda a tener un flujo alto, debido a la cercanía de esta válvula con la bomba, se puede decir que la mayor parte del flujo suministrado por ésta se conduce por esta línea y que al estar cerrada la válvula tres, el flujo llega más rápido al tanque de experimentación.

Se presenta a continuación la tabla para las combinaciones en las cuales se presentó un valor de flujo medio. Estas combinaciones son las siguientes: tres y ocho.

Tabla 31. Combinaciones con flujo medio.

Combinación	Flujo (L/min)	Posición de válvulas
3	13.58	CLV-100: A VLV-200:A VLV-300:M
8	12.52	CLV-100:M VLV-200:A VLV-300:M

Como lo comentamos en la sección anterior, la posición de la válvula VLV-300, es la que ayuda a regular el valor del flujo. En esta ocasión en ambas combinaciones se encuentra a la mitad.

Por último, se presenta la tabla en la que podemos observar los resultados con las combinaciones cuyo flujo fue bajo.

Las combinaciones uno, cuatro, cinco, seis, siete y diez. Son las que se presentan en esta tabla.

Tabla 32. Combinaciones con flujo bajo.

Combinación	Flujo (L/min)	Posición de válvulas
1	6.36	CLV-100: A VLV-200:A VLV-300:A
4	8.14	CLV-100: M VLV-200:M VLV-300:M
5	4.21	CLV-100: A VLV-200:M VLV-300:A
6	5.45	CLV-100:M VLV-200:A VLV-300:A
7	4.86	CLV-100:M VLV-200:M VLV-300:A
10	9.54	CLV-100:A VLV-200:M VLV-300:C

Al ver esta tabla, notamos que lo que favorece para que el flujo sea bajo es que la válvula VLV-300 esté abierta, por lo que se confirma lo que se presentó en los experimentos anteriores, que la válvula tres presenta una mayor influencia en el flujo.

Si está cerrada la válvula VLV-300, se tiene un valor de flujo mayor que si se encuentra a la mitad o abierta. Las otras dos válvulas también tienen una influencia, pero no es tan notoria como en ésta.

## Conclusiones y recomendaciones

Con base en los cálculos realizados en la etapa de la ingeniería básica, se construyó el banco experimental para la Dinámica y control de procesos para el laboratorio de Ingeniería Química IV. Con base en los resultados experimentales se logró el objetivo de cumplir con la principal tarea de este banco que es la enseñanza, aplicación y modelado. De esta forma se podrá enriquecer la enseñanza de la asignatura de Dinámica y control con aspectos prácticos, lo que genera que muchos de los conceptos se faciliten en la etapa de aprendizaje. El banco experimental será de gran ayuda para poder afianzar bien estos conceptos.

Los objetivos de esta tesis fueron completados satisfactoriamente. Se pone en marcha un banco experimental. Gracias a los planos fue posible desarrollar el módulo experimental, tanto de manera física como de forma electrónica. Tener un buen desarrollo en la ingeniería básica permitió que no se tuvieran retrasos significativos ni cambios en el sistema.

Se identifica que es posible desarrollar algunas mejoras, como son:

- El cementar algunas de las piezas, para evitar que se rompan o se pierdan algunas piezas.
- En las líneas que llevan servo válvula, utilizar una tuerca unión para poder retirarla en caso de que llegue a fallar.
- La bomba puede quedarse dentro del tanque de alimentación, pero es recomendable vaciar el tanque si se va a dejar de ocupar por mucho tiempo, ya que esto puede generar incrustación en el mecanismo de la bomba y generar fallas.
- Se podría hacer un nuevo arreglo de componentes en el que se elimine la VLV-200, considero que es una válvula innecesaria y que solo resta carga al sistema. Con esto podríamos acortar la tubería y generar un flujo de entrada al tanque T-200 mayor.

En general el sistema cumple con su misión, además de ser un sistema que se podría transportar directo al salón de clases para poder llevar a cabo una catedra mucho más didáctica.





## Anexos

### Anexo A



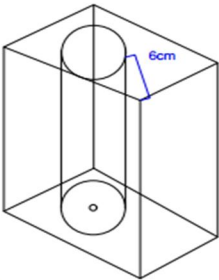
#### Hojas de datos de los equipos.

A continuación, se presentan las hojas de datos de los equipos del banco experimental.



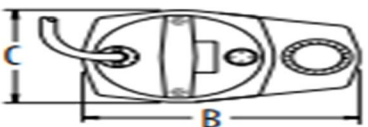
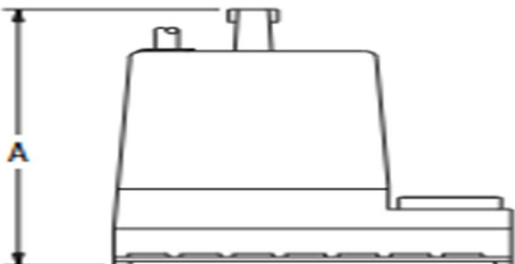
#### Hoja de datos (Tanque T-100)

 <b>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO</b> <b>FACULTAD DE QUIMICA EN COLABORACION CON LA FACULDADE DE INGENIERIA</b> <b>MODULO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DE DINAMICA Y CONTROL PARA LIQ IV</b>						
<b>Hoja de Datos: Tanque T-100</b>		<b>Clave del proyecto</b>	PE101717			
		<b>Nombre del equipo</b>	Tanque de alimentación			
		<b>Elaboró</b>	V.R.S			
1		2				
<b>Datos de operación</b>		<b>Dimensiones</b>				
1	<b>Fluido</b>	Agua	<b>Capacidad</b>	105	L	
2	<b>Temperatura</b>	25	°C	<b>Tipo</b>	Almacenamiento	
3	<b>Presión</b>	0.77	atm	<b>Perímetro</b>	240	cm
4	<b>Sólidos susp.</b>	NA		<b>Altura</b>	40	cm
5	<b>Compuestos corrosivos</b>	NA		<b>Espesor</b>	0.5	cm
6	<b>Densidad líquido</b>	997.13	Kg/m <sup>3</sup>	<b>Aislamiento</b>	NA	
7	<b>Densidad de vapor</b>	NA		<b>Peso vacío</b>	2	Kg
8	<b>Viscosidad del líquido</b>	0.00089	cps	<b>Peso lleno</b>	107	Kg
9	<b>Presión de vapor</b>	3.17	kPa			
10	<b>Punto de inflamabilidad</b>	NA				
<b>Datos constructivos</b>		<b>Accesorios</b>				
11	<b>Presión de prueba</b>	NA		<b>Refrigeración</b>	NA	
12	<b>Fondo</b>	NA		<b>Calentamiento</b>	NA	
13	<b>Sobrepresor por corrosión</b>	NA		<b>Fluido calent/refrig</b>	NA	
14	<b>Tratamiento térmico</b>	NA		<b>Válvula de seguridad</b>	NA	
15	<b>Aislamiento</b>	NA		<b>Venteo</b>	NA	
16	<b>Pintura</b>	NA		<b>Tapa</b>	NA	
17	<b>Material constructivo</b>	Plástico		<b>Purga</b>	NA	
18	<b>Recubrimiento interno</b>	NA		<b>Deflector</b>	NA	
<b>Datos del fabricante</b>						
19	<b>Fabricante</b>	Kis Latch		<b>Instrucciones/mantenimiento /manejo</b>	SE ANEXAN EN NOTAS	
20	<b>Modelo</b>	Caja de almacenamiento		<b>Planos o esquemas</b>	SE ANEXAN EN NOTAS	
21	<b>N° de Serie</b>	NA		<b>Especificación fabricante</b>	NA	
22	<b>Código</b>	NA		<b>Lista de piezas</b>	NA	
<b>Notas e imagen</b>						
		<p>1-El tanque única y exclusivamente servirá para suministrar agua a todo el banco experimental.</p> <p>2-No esta pintado y consiste en un recipiente de plástico, no cuenta con fluido de calentamiento, ya que solamente trabaja con agua.</p> <p>3-El tanque contiene una tapa, la cual no se utiliza. debido a que no es necesario.</p>				

## Hoja de datos (Tanque T-200)

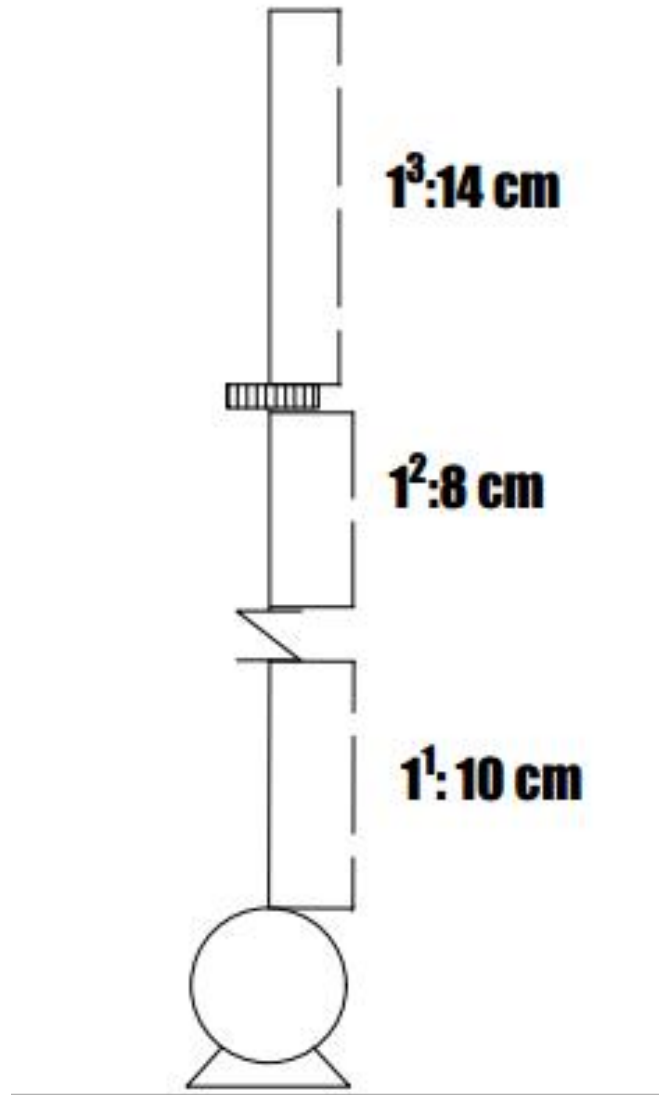
 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO FACULTAD DE QUIMICA EN COLABORACION CON LA FACULTAD DE INGENIERIA MODULO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DE DINAMICA Y CONTROL PARA LIQ IV					
Hoja de Datos: Tanque T-200		Clave del proyecto	PE101717		
		Nombre del equipo	Tanque de experimentación		
		Elaboró	V.R.S		
1		2			
Datos de operación		Dimensiones			
1	Fluido	Agua	Capacidad	15.27	L
2	Temperatura	25 °C	Tipo	Tanque atmosférico	
3	Presión	0.77 atm	Diámetro Ext	18	cm
4	Sólidos susp.	No	Altura	60	cm
5	Compuestos corrosivos	No	Espesor	0.5	cm
6	Densidad líquido	997.13 Kg/m <sup>3</sup>	Aislamiento	NA	
7	Densidad de vapor	NA	Peso vacío	5.3	kg
8	Viscosidad del líquido	0.00089 cps	Peso lleno	20.57	kg
9	Presión de vapor	3.17 kPa			
10	Punto de inflamabilidad	NA			
Datos constructivos		Accesorios			
11	Presión de prueba	NA	Refrigeración	NA	
12	Fondo	NA	Calentamiento	NA	
13	Sobrepresor por corrosión	NA	Fluido calent/refrig	NA	
14	Tratamiento térmico	NA	Válvula de seguridad	Si	
15	Aislamiento	NA	Venteo	NA	
16	Pintura	NA	Tapa	NA	
17	Material constructivo	Acrílico	Purga	NA	
18	Recubrimiento interno	NA	Deflector	NA	
Datos del fabricante					
19	Fabricante	Facultad de química	Instrucciones/mantenimiento /manejo	SE ANEXAN EN NOTAS	
20	Modelo	NA	Planos o esquemas	SE ANEXAN EN NOTAS	
21	Nº de Serie	1	Especificación fabricante	SE ANEXAN EN NOTAS	
22	Código	NA	Lista de piezas	SE ANEXAN EN NOTAS	
NOTAS Y ESQUEMA					
		<p>1-El tanque es un tanque de acrílico transparente, en el cual se manejará como fluido de almacenamiento únicamente agua. No tiene tapa.</p> <p>2- El tanque es de una sola pieza.</p> <p>3-Fue elaborado en la Facultad de Química de la UNAM.</p>			

## Hoja de datos (bomba P-100)

		UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO FACULTAD DE QUIMICA EN COLABORACION CON LA FACULTA DE INGENIERIA MODULO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DE DINAMICA Y CONTROL PARA LIQ IV			
<b>Hoja de Datos: Bomba P-100</b>		Clave del proyecto		PE101717	
		Nombre del equipo		Bomba de alimentación	
		Elaboró		V.R.S	
1		2			
Condiciones de operación					
1	Fluido	Agua		NPSH requerido	6 m
2	Temperatura	25	°C	Rendimiento	0.75 %
3	Densidad	997.13	Kg/m <sup>3</sup>	Altura requerida	1.27 m
4	Presión de vapor	3.17	kPa	NPSH disponible	8 m
5	Viscosidad	0.00089	cps	Peso	4.08 Kg
6	Partículas en suspensión	NA			
7	Caudal (Max)	77.11	L/min	Productos corrosivos	
8	Área clasificada	LIQ IV NA			
Datos de fabricante					
9	Carcasa del motor	Aluminio colado		Motor	
10	Material propulsor	Nylon		Fabricante	LITTLE GIANT
11	Tipo de propulsor	Semiabierto		Modelo	5-MSP
12	Voluta	Nylon		Voltaje	127 volts
13	Eje del moto	Acero inoxidable		Potencia	0.16 Hp
14	Sello del eje	(FKM)		Frecuencia	60 Hz
15	Rodamientos	Casquillo de bronce			
Refrigeración			Lubricación		
16	Fluido	Dieléctrico		Fluido	Aceite
17	Temperatura	NA		Temperatura	NA
18	Presión de vapor	NA		Presión de vapor	NA
Notas y esquema					
<p>1- No se encuentran partículas suspendidas, únicamente se trabaja con agua pura.</p> <p>2- Así como en el punto anterior, no se manejan productos corrosivos ya que el sistema sólo tiene agua.</p> <p>3- Los datos de refrigeración y lubricación se obtuvieron directamente del fabricante, no se da a conocer ni nombre del fluido de refrigeración ni de lubricación.</p> <p>4 - Los datos del fabricante fueron obtenidos de su página de Internet.  <a href="http://littlegiant.com/media/161606/996848_sp_lg_wastewater_catalog.pdf">http://littlegiant.com/media/161606/996848_sp_lg_wastewater_catalog.pdf</a></p>					
					
5-MSP					

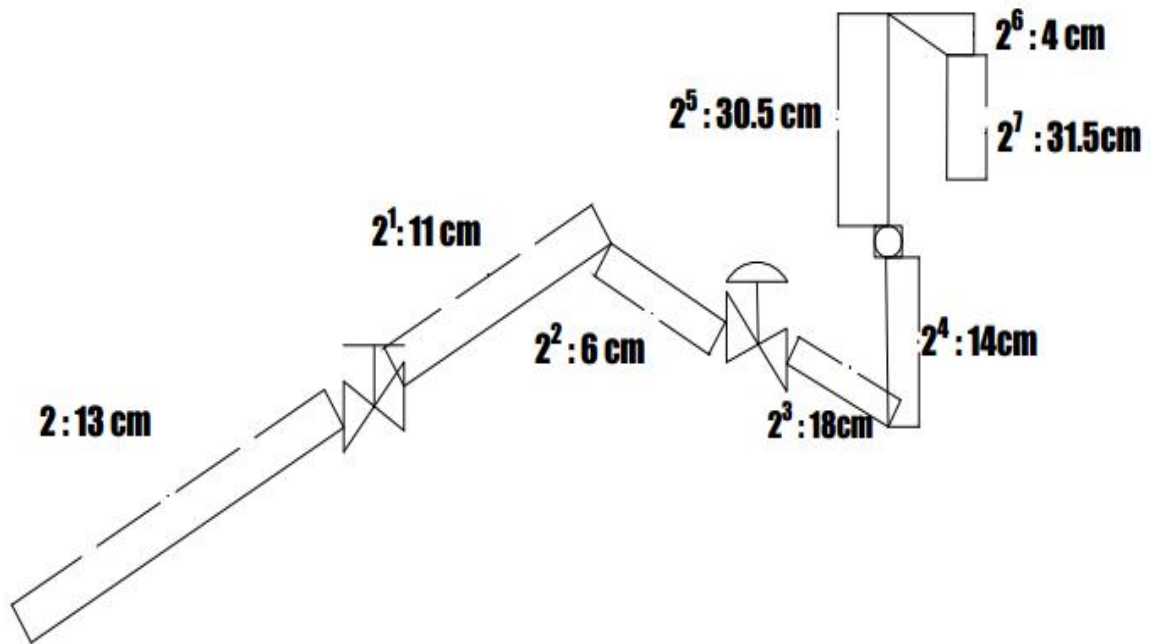
Anexo B  
Diagramas de líneas  
Línea uno

## Línea uno



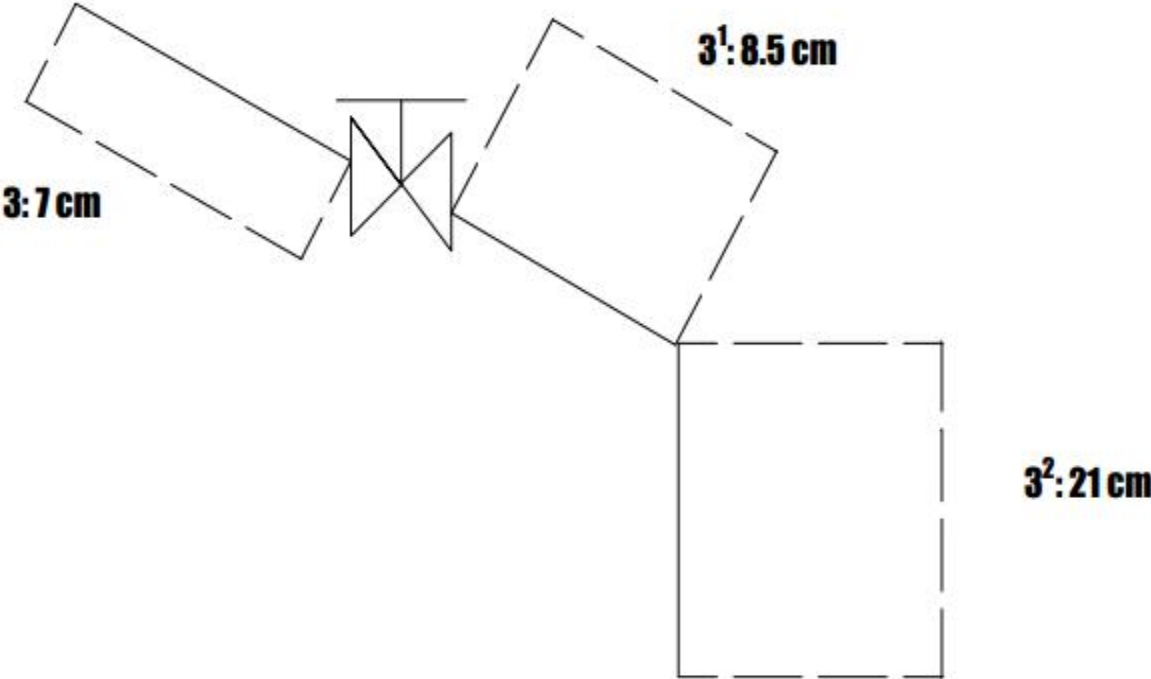
Línea dos

# Línea dos



Línea tres

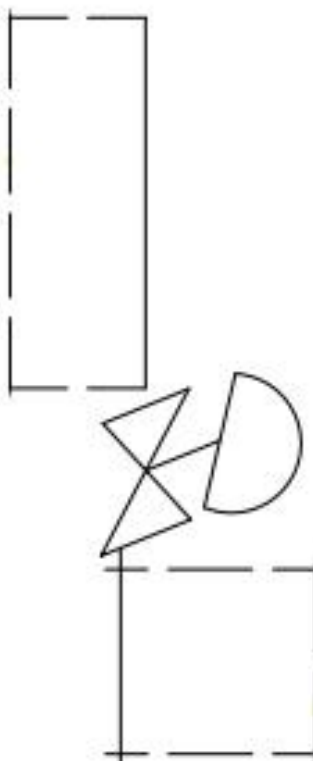
# Línea tres



Línea cuatro

# Línea cuatro

**4: 9.5 cm**



**4<sup>1</sup>: 4.5 cm**

## Bibliografía

1. Ogata Katsuhiko. "Ingeniería de control moderna" Tercera edición Prentice Hall Hispanoamericana. México 1998.
2. Modeling, and control. New York Oxford. Oxford university. Press Inc. USA 1994
3. KuoC.Benjamin. Sistemas de control automático. Séptima edición. Prentice Hall hispanoamericana México 1996.
4. Anaya Durand A. Manual de temas selectos de ingeniería de proyectos, 1era edición, México, UNAM 2015.
5. Crane "Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías" McGraw Hill México 1965
6. <https://www.facet.unt.edu.ar/facetinforma/wp-content/uploads/sites/9/2016/09/SC01-01-0-Alcances-de-Ingenier%C3%ADa.pdf>
7. Valiente, A. Problemas de Flujo de Fluidos, 2da.Ed., México, Limusa 1998.
8. [whhttps://es.slideshare.net/luislas/planos-en-planta-e-isometricos-11653979](https://es.slideshare.net/luislas/planos-en-planta-e-isometricos-11653979)
9. Ing. Antonio López Astete. Manual Autocad Bidimensional, 1er Ed. 2009
10. García R. Rodrigo. Desarrollo de un prototipo para la enseñanza de la Dinámica y control de procesos a nivel laboratorio, México, UNAM, 2007.
11. Petróleos Mexicanos. (2013). Sistema institucional de desarrollo de proyectos.
12. [https://prezi.com/vrp0ij\\_rkyef/teorema-de-toricelli/](https://prezi.com/vrp0ij_rkyef/teorema-de-toricelli/) Severino Ángeles Miguel Ángel
13. Alejandro Isaías Anaya Durand, Guillermo Israel Cauich Segovia, Oliver F Bárcenas. Evaluación de ecuaciones de factor de fricción explícito para tuberías. UNAM. Marzo 2014
14. David M. Himmemblau. Principios y cálculos básicos de la Ingeniería Química. Segunda edición. Compañía editorial Continental, S.A.1970
15. [https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2016/168367/TFG\\_FormicCompany\\_v02.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2016/168367/TFG_FormicCompany_v02.pdf)