



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**“IDENTIFICACIÓN DE LOS PARAMETROS DEL MODELO NO
LINEAL DEL SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS”**

AUTOR

JORGE MATÍAS ABEJARES MORALES

PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL EN
AUTOMATIZACIÓN

CONCEPCIÓN-CHILE

AÑO 2019



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**“IDENTIFICACIÓN DE LOS PARAMETROS DEL MODELO NO
LINEAL DEL SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS”**

AUTOR
JORGE MATÍAS ABEJARES MORALES

DOCENTE PATROCINANTE: DR. ANGEL ERNESTO RUBIO RODRÍGUEZ.
DOCENTE ADJUNTO: DR. JAIME ADDIN ROHTEN CARRASCO.

Dedicado a mis padres, ya que a pesar de las circunstancias nunca dejaron de creer en mí y darme su incondicional apoyo. Jorge y Margarita, muchas gracias.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia y especialmente a mis padres Jorge y Margarita por su paciencia, confianza, apoyo y consejos brindados en esta larga etapa. Nunca dejaron de estar conmigo dándome alguna palabra de aliento en los momentos más difíciles ayudándome a no decaer a pesar de la distancia. A mi hermano que con pocas palabras lograba decirme que me fuera bien, que le pusiera empeño y terminara luego. A mi polola Fernanda que me animó, dio fuerzas y me ayudo a darme cuenta de lo importante que es pedir ayuda cuando no se logran algunas metas.

Agradezco a mis amigos que, a pesar de no vernos muy seguido, siempre logramos tener una buena relación, nunca faltó la broma, el meme y una que otra anécdota del pasado nos hacía recordar lo inmaduro que éramos y nos permitió ver todo lo que hemos crecido hasta la fecha.

Al profesor Rubio siendo mi profesor guía, siempre me recibió de muy buena forma cuando acudí a él, logrando resolver las múltiples dudas que surgieron por el camino, por la paciencia y los consejos que me entregó en este largo proceso.

A la Escuela de Ingeniería Civil en Automatización, a los señores de pañol y en especial a Sandrita que siempre con su buen carácter y buen trato me brindó ayuda cuando lo necesité.

A los profesores de mecánica Daniel y Pita que me orientaron en el mundo de la mecánica de fluidos.

Finalmente agradezco a todo aquel que de alguna u otra forma se entrelazó conmigo en esta etapa, ya sea con una gran o mínima intervención logrando que mi paso por la universidad haya sido tal cual sucedió.

Este trabajo fue financiado por los proyectos: FAPE No. 135 (DGPE) y IenDU No. 100 (DGI) código DIUBB 167010 3/D.

RESUMEN

La realización de este proyecto surge frente a la labor que está siendo desarrollada por el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (DIEE) en colaboración con el Grupo de Automatización Robótica y Percepción de la Universidad Central “Marta Abreu” (GARP), la que corresponde a la incorporación al sistema de laboratorios a distancia (SLD) o Laboratorio remoto (LR), de una estación de trabajo con una maqueta de tanques acoplados marca Feedback modelo 33-230.

Este trabajo se centró principalmente en la obtención de los parámetros como los flujos de entrada dependientes de la tensión proporcionada desde la estación de trabajo y las constantes de proporcionalidad de las descargas y comunicación entre tanques, necesarios para lograr crear diferentes modelos analíticos no lineales de los subsistemas que la maqueta permite implementar.

Para obtener lo anteriormente mencionado fue necesaria en primera instancia la experimentación dadas en dos grandes grupos de experimentos: los necesarios para obtener los flujos de alimentación a cada uno de los tanques y los necesarios para logra identificar las constantes de proporcionalidad de descarga y comunicación de los tanques, tomando como referencia un balance de energía mecánica.

Una vez identificados los parámetros, se construyeron analíticamente los modelos no lineales de: un tanque que por sí solo, dos tanques en cascada, dos tanques comunicantes y por último un tanque ante perturbaciones. Todos ellos por medio de un balance de energía en cada uno de los subsistemas y tanques correspondientes.

Por último, se estudió más en profundidad el sistema de tanques acoplados, en donde se vio dicho fenómeno mediante ecuaciones y experimentación, y posteriormente se implementó la técnica de desacopladores, comprobando experimentalmente su funcionamiento validando el modelo identificado.

Este trabajo además será utilizado para asignaturas como “Identificación de Parámetros”, “Modelado de Sistemas”, “Control de Procesos”, “Control por Computador”, entre otras. Aportando al desarrollo de los estudiantes del departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica y particularmente a los de la carrera de “Ingeniería Civil en Automatización.”

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	3
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE ANEXOS.....	9
ABREVIACIONES	10
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. Planteamiento del problema.....	13
1.1.1. Objetivo General.....	13
1.1.2. Objetivos Específicos.....	13
1.2. Descripción capítulos	14
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE	16
2.1. Laboratorios remotos.....	16
2.2. Mecánica de Fluidos.....	18
2.3. Control de tanques y tanques acoplados.....	19
2.4. Modelos no lineales	22
CAPÍTULO 3 DESCRIPCIÓN MAQUETA Y PARTES QUE LA COMPONENTEN.....	23
3.1. Clasificación partes maqueta.....	23
3.2. Tramos	25
3.3. Bombas	26
3.4. Sensores	28
3.5. Tarjeta de adquisición de datos	29
CAPÍTULO 4 FLUJOS Y DESCARGA DE TANQUES	31

4.1. Flujos por bomba y por tramo (carga)	31
4.2. Descarga de cada tanque	38
4.2.1. Energía mecánica	39
4.2.2. Pérdidas irreversibles	41
4.2.2.1. Número de Reynolds	45
4.2.3. Experimentación	47
4.2.3.1. Descarga de los tanques	48
4.2.3.2. Comunicación entre tanques superiores	53
4.2.3.2.1. Tramo medio suministro	56
4.2.3.2.2. Tramos medios descargas T1T3 y T3T1	57
CAPÍTULO 5 MODELADO DE SISTEMAS	61
5.1. Modelo de la dinámica de un tanque por si solo	61
5.2. Modelo de la dinámica de dos tanques es cascada	68
5.3. Modelo de la dinámica de 2 tanques acoplados o comunicantes	73
CAPÍTULO 6 TANQUES ACOPLADOS Y DESACOPLADORES	80
6.1. Sistema Acoplado	80
6.2. Desacopladores	81
CONCLUSIONES	88
ANEXOS	90
BIBLIOGRAFÍA	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. "Nombre elementos de maqueta."	24
Tabla 3.2. "Accesorios y tuberías por tramos."	26
Tabla 3.3. "Especificaciones técnicas de bombas."	27
Tabla 3.4. "Especificaciones técnicas generales del sensor."	29
Tabla 4.1. "Flujos promedio de B1 en sus diferentes tramos."	33
Tabla 4.2. "Flujos promedio de B2 en sus diferentes tramos."	34
Tabla 4.3. "Descargas tranque T1."	51
Tabla 4.4. "Descarga tanque T2."	51
Tabla 4.5. "Descargas tanque T3."	51
Tabla 4.6. "Descarga tanque T4."	52
Tabla 4.7. "Valores descargas B."	55
Tabla 4.8. "Valores descargas A."	55
Tabla 5.1. "Estado de válvulas para análisis simple de un tanque."	62
Tabla 5.2. "Experimentos para tanque T1 desde B1 tramo medio, descarga B."	67
Tabla 5.3. "Constantes de funciones de transferencia a diferentes puntos de operación." ..	67
Tabla 5.4. "Estado de válvulas para análisis de dos tanques en cascada."	68
Tabla 5.5. "Estado de válvulas para análisis de dos comunicantes."	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. "Arquitectura de un Laboratorio Remoto."	17
Figura 2.2. "Maqueta de tanques acoplados, control PI."	21
Figura 2.3. "Maqueta de tanques acoplados, control predictivo distribuido óptimo."	21
Figura 3.1. "Distribución y clasificación de partes maqueta."	24
Figura 3.2. "Tramos corto y medio."	25
Figura 3.3. "Tramos largos."	26
Figura 3.4. "Bomba LVM 117."	27
Figura 3.5. "Esquema de conexión."	28
Figura 3.6. "Sensor de presión."	29
Figura 3.7. "Tarjeta de adquisición de datos Advantech PCI-1711"	30
Figura 4.1. "Distribución normal."	33
Figura 4.2. "Flujos de bombas con diferentes cargas."	35
Figura 4.3. "Flujos según bomba y tramo en maqueta."	37
Figura 4.4. "Flujo en Bombas 1 y 2 para el tramo corto junto a su ajuste de curva."	37
Figura 4.5. "Flujo en Bombas 1 y 2 para el tramo medio junto a su ajuste de curva."	38
Figura 4.6. "Flujo en Bombas 1 y 2 para el tramo largo junto a su ajuste de curva."	38
Figura 4.7. "Pérdida de presión en una tubería."	42
Figura 4.8. "Diagrama de Moody simplificado."	44
Figura 4.9. "Descarga A (con válvula)."	48
Figura 4.10. "Descarga B (sin válvula)."	49
Figura 4.11. "Constantes de proporcionalidad de flujo de salida de tanques independientes en maqueta."	53
Figura 4.12. "Esquema de tramos en comunicación entre tanque T1 y T3."	54
Figura 4.13. "Esquema de experimentos, descargas B."	54
Figura 4.14. "Esquema de experimentos, descargas A"	55
Figura 4.15. "Tramo medio suministro, balance de energía mecánica."	56
Figura 4.16. "Tramos medios descargas T1T3 y T3T1, balance de energía."	57
Figura 4.17. "Constante de proporcionalidad de flujos de salida para tanques acoplados en maqueta."	59

Figura 4.18. "Resumen de flujos y constantes de proporcionalidad."	60
Figura 5.1. "Esquema para análisis tanque simple."	62
Figura 5.2. "Representación no lineal en bloques de un tanque simple."	64
Figura 5.3. "Representación en bloques sistema de primer orden."	66
Figura 5.4. "Esquema para análisis de dos tanques en cascada."	68
Figura 5.5. "Representación no lineal en bloques de dos tanques en cascada."	70
Figura 5.6. "Representación en bloques tipo cascada."	71
Figura 5.7. "Representación en bloques sistema en cascada en forma típica."	72
Figura 5.8. "Esquema en bloques de sistema en cascada en punto de operación."	72
Figura 5.9. "Esquema para análisis de dos tanques comunicantes."	73
Figura 5.10. "Representación no lineal en bloques de tanques acoplados."	75
Figura 5.11. "Representación en bloques de dos tanques comunicantes."	78
Figura 5.12. "Representación en bloques sistema de tanques acoplados."	79
Figura 6.1. "Experimentos con y sin acople."	81
Figura 6.2. "Representación en bloques de modelo acoplado."	83
Figura 6.3. "Representación en bloques, implementación des acopladores."	84
Figura 6.4. "Representación de tanques acoplados en torno a un punto de operación con desacopladores incorporados."	85
Figura 6.5. "Sistema de tanques desacoplado."	85
Figura 6.6. "Tanques acoplados con incorporación de desacopladores."	86
Figura 6.7. "Tanques acoplados sin la incorporación de desacopladores."	87

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. "Voltaje desde estación y terminales de bombas."	90
Anexo 2. "Programa utilizado para la detección de los flujos en Matlab Simulink."	91
Anexo 3. "Experimentos para obtener flujos en bomba B1."	92
Anexo 4. "Experimentos para obtener flujos en bomba B2."	93
Anexo 5. "Programa realizado en Matlab Simulink necesario para obtener las constantes de proporcionalidad de las descargas de los tanques."	94
Anexo 6. "Resultados experimentales para obtener las constantes de proporcionalidad del tanque T1."	95
Anexo 7. "Resultados experimentales para obtener las constantes de proporcionalidad del tanque T3."	96
Anexo 8. "Resultados experimentales para obtener las constantes de proporcionalidad del tanque T2 y T4."	97
Anexo 9. "Resultados experimentales grupo de descargas A."	98
Anexo 10. "Resultados experimentales grupo de descargas B"	99

ABREVIACIONES

Mayúsculas

SLB: Sistema de laboratorio a distancia.

LT: Laboratorios tradicionales.

LR: Laboratorios remotos.

LV: Laboratorios virtuales.

B1 o B2: Bomba 1 o 2.

MV: Válvula manual desde 1 hasta 4 y en letras de A hasta G.

T: Tanque desde 1 hasta 4.

RT: Reductor tanque.

F: Flujo.

FB1_{tramo corto}: Flujo bomba 1 suministrando desde tramo corto.

FB1_{tramo medio}: Flujo bomba 1 suministrando desde tramo medio.

FB1_{tramo largo}: Flujo bomba 1 suministrando desde tramo largo.

FB2_{tramo corto}: Flujo bomba 2 suministrando desde tramo corto.

FB2_{tramo medio}: Flujo bomba 2 suministrando desde tramo medio.

FB2_{tramo largo}: Flujo bomba 2 suministrando desde tramo largo.

P: Presión manométrica.

G_e: Flujo másico de entrada.

G_s: Flujo másico de salida.

F_e: Flujo volumétrico de entrada.

F_s: Flujo volumétrico de salida.

P_{1,2}: Presión manométrica aplicada en diferentes puntos, (punto 1 o punto 2).

L: Largo en tuberías.

V_{prom}: Velocidad promedio totalmente desarrollada.

D: Diámetro.

Re: Numero de Reynolds.

K_{descarga tanque 1A}: Constante de proporcionalidad de flujo de la descarga A del tanque T1.

K_{descarga tanque 1B}: Constante de proporcionalidad de flujo de la descarga B del tanque T1.

K_{descarga tanque 2B}: Constante de proporcionalidad de flujo de la descarga B del tanque T2.

K_{descarga tanque 3A}: Constante de proporcionalidad de flujo de la descarga A del tanque T3.

K_{descarga tanque 3B}: Constante de proporcionalidad de flujo de la descarga B del tanque T3.

K_{descarga tanque 4B}: Constante de proporcionalidad de flujo de la descarga B del tanque T4.

$K_{descarga\ medio\ suministro}$: Constante de proporcionalidad de flujo de parte de la conexión entre tanque T1 y T3.

$K_{descarga\ medio\ descarga\ T1T3}$: Constante de proporcionalidad de flujo, parte comunicación entre tanque T1 y T3.

$K_{descarga\ medio\ descarga\ T3T1}$: Constante de proporcionalidad de flujo, parte comunicación entre tanque T1 y T3.

K_L : Coeficiente de pérdida de accesorios.

$V_{bomba\ 1,2\ tc,tm,tl}$ (s): Variación de voltaje de control o desde estación hacia bomba B1 o bomba B2 mediante tramo corto, medio o largo.

$H_{fluido1,3}$ (s): Variación de altura del fluido en tanque T1 o T3.

$K_{11,13,31,32}$: Ganancia estática, sus subíndices variaron dependiendo del bloque del que se estuviera hablando, ej.: el subíndice 11, se otorgó cuando la función de transferencia fue la resultante de la interacción del voltaje de control de la Bomba 1 y la altura del tanque T1.

$G_{11,13,31,32}$ (s): Funciones de transferencia para sistema de tanques acoplados, previa a modificación.

$H_{11,13,31,32}$ (s): Funciones de transferencia tras modificación.

Minúsculas

$f(x)$: Función dependiente de x.

x : Variable independiente.

c_1 : Constante 1.

c_2 : Constante 2.

$v_{estacion}$: Voltaje proporcionado desde la estación de trabajo.

$e_{mecanica}$: Energía mecánica.

$\Delta e_{mecanica}$: Delta o diferencia de energía mecánica.

m : Metros.

cm : Centímetros.

mm : Milímetros.

s : Segundos.

$z1$ o $z2$: Carga por elevación en diferentes puntos.

f : Factor de fricción.

a : Área transversal.

$a_{tuberia}$: Área transversal de tubería.

$a_{boquilla}$: Área transversal de boquilla.

g : Aceleración de gravedad.

ρ : Densidad.

- h_{bomba} : Energía mecánica expresada en altura [m] proporcionada por una bomba.
- $h_{turbina}$: Energía mecánica expresada en altura [m] consumida por una turbina.
- h_L : Pérdida en las cargas expresada en altura [m].
- α_1 o α_2 : Factor de corrección de velocidad aplicada en diferentes puntos, (punto 1 o 2).
- μ : Viscosidad absoluta.
- ν : Viscosidad cinemática.
- ε : Rugosidad en tuberías.
- ε/D : Rugosidad relativa en tuberías.
- $h_{L,menor}$: Pérdida de carga menor.
- $h_{L,mayor}$: Pérdida de carga mayor.
- $h_{L,total}$: Pérdida de carga total (suma de pérdidas menores y mayores).
- h_{fluido} : Altura del fluido dentro del tanque.
- $h_{descarga}$: Altura perteneciente a las descargas de los tanques.
- $h_{desde\ ref}$: Altura existente en un punto desde una referencia (desde la base del tanque de depósito).
- \log : Logaritmo base 10.
- $\tau_{11,12,31,32}$: Constante de tiempo propio de un sistema expresado en forma típica.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema.

El Sistema de Laboratorios a Distancia de la UBB, permite el acceso remoto y control en tiempo real de maquetas didácticas ubicadas en el laboratorio de Control Automático del DIEE. Actualmente está conectado al sistema de tanques acoplados Feedback 33-230. Esta maqueta permite, según sea la configuración de las válvulas manuales, acceder a diferentes sistemas dinámicos para probar diversas estrategias de desacople y control. Estas estrategias idealmente deberían ser probadas en simulación para lo cual se requiere el modelo no lineal del sistema según su configuración. Dicho modelo también permitiría la síntesis analítica de los controladores. El problema está en que el fabricante no da los parámetros de este modelo y, en particular las constantes de proporcionalidad del flujo en función de los niveles de líquido, son imprescindibles para modelar este sistema de forma no lineal. La identificación y posterior modelado del sistema, así como la comprobación de la validez del modelo para la síntesis de alguna estrategia de control son los objetivos de este trabajo. Todo lo anterior tributa en buena medida a lo que se hace en forma teórica en las asignaturas: Identificación de sistemas, Modelado de procesos, Control de procesos y Control por computador.

1.1.1. Objetivos Generales

- Identificar los parámetros del modelo no lineal de la maqueta de tanques acoplados.
- Validar el modelo propuesto.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar los coeficientes de los diferentes flujos proporcionados por las bombas.
- Identificar los coeficientes de proporcionalidad de los flujos de descarga asociados a los tanques.

- Detectar subsistemas y realizar modelos analíticos con los coeficientes identificados.
 - Sistema de un tanque independiente.
 - Sistema de dos tanques en cascada.
 - Sistema de tanques acoplados.
 - Sistema ante perturbaciones.
- Desarrollar desacopladores para el sistema de tanques acoplados.
- Validar la efectividad de los desacopladores en el sistema de tanques acoplados.

1.2. Descripción capítulos

El orden y estructura de los capítulos fueron dados de la siguiente manera:

Capítulo 1, “Introducción” se mencionó el planteamiento del problema, el objetivo general y los específicos además de los capítulos y su estructura y tema principal.

Capítulo 2, “Estado del arte”, se realizó una breve descripción de los laboratorios remotos y tradicionales, porque es importante incorporarlos a los métodos actuales de enseñanza en las universidades y específicamente en la formación de los ingenieros. Se describió brevemente la importancia de la mecánica de fluidos y algunas de sus aplicaciones. Se mencionó la utilización de otras maquetas de tanques, en donde se controló nivel con variadas estrategias y por último se presentó el concepto de modelos no lineales.

Capítulo 3, “Descripción de la maqueta y partes que la componen”, se realizó una breve descripción guiada con imágenes de la maqueta y las partes que la componen (tanques, válvulas, uniones, reductores, tuberías, entre otros.), nombrándolas para su uso futuro. Se clasificaron los diferentes tramos necesarios para poder suministrar con flujo cada uno de los tanques y por último se habló de los dispositivos necesarios para el funcionamiento y control de la maqueta (sensores, bombas, tarjeta de adquisición de datos).

Capítulo 4, “Flujos y descarga de tanques”, en este capítulo se identificaron las curvas correspondientes a los flujos proporcionados por las bombas B1 y B2 a través de los tramos corto, medio y largo mediante experimentación, esto nos indicó que para cada bomba y tramo específico hay una curva característica del flujo que suministro flujo para diferentes

valores de tensión. Se clasificaron e identificaron los diferentes tramos de descarga y comunicación entre tanques calculando la correspondiente constante de proporcionalidad por medio de un balance de energía mecánica entre puntos ubicados estratégicamente.

Capítulo 5, “Modelado de sistemas”, en este capítulo se clasificaron 4 subsistemas derivados de la maqueta en estudio, para cada uno de ellos se realizó un balance de energía permitiéndonos encontrar el modelo matemático que represento cada uno de estos subsistemas, estos al ser modelos no lineales, se linealizaron en torno al punto de operación y posteriormente se les aplico la transformada de Laplace con la finalidad de facilitar el análisis.

Capítulo 6, “Tanques acoplados y desacopladores”, en este capítulo se tomó el modelo de tanques acoplados obtenido del capítulo 5.3 y modificaron sus bloques para que ambas alturas de los tanques T1 y T3 dependieran única y exclusivamente de las entradas (tensión control en las bombas 1 y 2 o tensión desde la estación.) con la finalidad de aplicar la técnica de desacopladores. Dicha técnica tiene por función eliminar matemáticamente la totalidad o parte de la interacción que existe entre los tanques T1 y T3, se comprobó experimentalmente el uso de los desacopladores comparando las gráficas del sistema acoplado y desacoplado.

CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE

Un cambio constante en nuestra sociedad es la tecnología, ésta usada de manera creativa viene a solucionar todo tipo de problemas tanto domésticos como industriales. Los que mejor se logran adaptar a estos cambios constantes son las nuevas generaciones que lo reciben de manera casi inconsciente y poseen una habilidad innata para desenvolverse en ella. La educación tiende a quedarse en métodos más tradicionales al momento de enseñar y por eso se ve en la necesidad de innovar constantemente creando nuevos modelos educativos en donde la tecnología y la pedagogía forman uno solo denominado Tecnopedagogía. La incorporación de la tecnología a los métodos de enseñanza en la educación permite que el individuo pueda afrontar y solucionar problemas del futuro, además el aprendizaje debe estar enmarcado en una gestión y construcción de su propio conocimiento, se esta manera se incluyen variables al detalle del aula en si como lo son horarios flexibles, y una disposición de tiempo y espacio más favorable para la realización de prácticos y/o laboratorios. Esta incorporación a su vez ofrece una seria más amplia de herramientas didácticas revolucionando lo que actualmente se maneja además colocando al estudiante en el centro del proceso y dejando atrás el aula con sus límites físicos y horarios impuestos [1].

2.1. Laboratorios remotos

Dentro de los aspectos principales de la revolución que involucra incorporación de las tecnologías a la educación, esta quitar los límites físicos espaciales y los horarios impuestos tanto de las aulas como en los laboratorios, un laboratorio tradicional (LT) posee prácticas en un horario fijo y programado periódicamente donde el tiempo es limitado, son de un costo sumamente caro ya que involucra la utilización de nuevos espacios o la creación de un espacio nuevo, implementación de alto nivel (adquisición de equipos, software con sus respectivas licencias), bajo estas condiciones, la gran mayoría de los estudiantes no logra realizar con éxito todas o la gran mayoría de prácticas necesarias para el entendimiento total de las materias de una asignatura, esta dificultad hace que los estudiantes busquen otros lugares para continuar con los contenido, pero generalmente los laboratorios están ocupados en otras laborales como la investigación u otras asignaturas,

por otra parte otros espacios no cuentan con la instrumentaría básica necesaria para realizar experimentos. Los futuros profesionales especialmente los ingenieros deben incluir en su currículo acciones que fomenten tanto la observación, la experimentación, la evaluación y razonamiento para tomar nuevas decisiones. Por otra parte, tenemos el ahorro de recursos ya que con un laboratorio bien implementado se logra dar abasto a una gran cantidad de estudiantes y/o investigadores además permite que diferentes instituciones formen alianzas y logren compartir los recursos. Todo lo anterior mencionado nos impulsa a la incorporación como una alternativa en un comienzo para pasar a ser una prioridad, estamos hablando de los laboratorios remotos (LR) y laboratorios virtuales (LV) [1, 2].

Un LR es una herramienta compuesta de software y hardware, permite al estudiante tener una experiencia lo más parecida a la de un LT pero remotamente. El acceso de los LR se logra mediante internet o una red cableada y posee una arquitectura tal cual se muestra en la Figura 2.1.

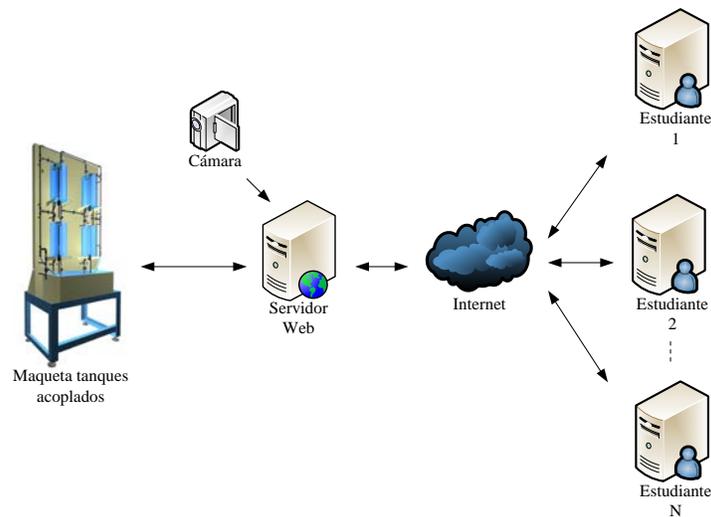


Figura 2.1. "Arquitectura de un Laboratorio Remoto."

Un LR es una aplicación basada en un entorno cliente -servidor, donde el cliente solicita un servicio o contacta a un servidor a través de distintos medios de comunicación. Donde:

- Cliente está confirmado principalmente por estudiantes y/o investigadores ubicados en un sitio remoto.

- Servidor (servidor de laboratorio y servidor web) consta de un equipo de cómputo o computador, software de acceso y dispositivos a manipular y/o maquetas que simulan procesos.
- Medios de comunicación principalmente Internet [2].

Como se mencionó anteriormente los LR ayudan a solucionar problemáticas principalmente industriales, es por eso que encontramos en los LR maquetas muchas veces creadas por las mismas instituciones y simplemente compradas, estas maquetas representan procesos que son cotidianos en el mundo industrial, podemos encontrar maquetas de Nivel, Temperatura, Velocidad, Posición, brazos robóticos y un largo etcétera, estas funcionan en conjunto a entornos de desarrollo vigentes en el mercado como lo son MATLAB, LABVIEW entre otros o en algunos casos algunos desarrollados por las mismas instituciones como el caso de LABNET desarrollada por la Universidad Europea de Madrid en el año 2006 [3].

2.2. Mecánica de Fluidos

La mecánica de fluidos es la ciencia que trata el comportamiento de los fluidos en reposo o en movimiento [4].

La mecánica de fluidos se remonta a la antigüedad con problemáticas de riego en los cultivos y suministro de agua a las ciudades. El griego Arquímedes (285-212 a.C.) nos habla de los principios de la Teoría de la mecánica de fluidos. Tras mucha depuración a lo largo del tiempo a mediados del siglo XX se atribuye la época dorada de las aplicaciones de la mecánica de fluidos que contribuyeron a la expansión de los sectores aeronáuticos, químico, recursos acuíferos e industrial.

El estudio del flujo en tuberías es de suma importancia ya que es la principal forma de transportar fluidos con diferentes fines como lo son el abastecimiento, generación de energía, entre otros. El flujo dentro de una tubería puede comportarse bajo un régimen laminar o turbulento, cada uno de los regímenes dependen básicamente de las propiedades de la tubería y las propiedades del fluido, el conocido Numero de Reynolds nos indica mediante un breve cálculo en que régimen estamos trabajando, y se obtiene conociendo las Fuerzas inerciales y las Fuerzas viscosas.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} \quad (2.1)$$

El conocimiento del número de Reynolds nos permite conocer el “Factor de Fricción” y en consecuencia las pérdidas ocasionadas en las tuberías por el tránsito del fluido, conocida como “Pérdidas en las Cargas (h_L)”, estas son diferentes dependiendo del régimen en el que se esté trabajando.

Un balance de energía mecánica aplicado a un flujo estacionario (flujo que no varía) e incompresible depende de la presión en el fluido, la velocidad y la elevación, además de las pérdidas en las cargas contenidos dentro de dos puntos de interés (2.2), este análisis es fundamental al momento de determinar si deseamos suministrar energía mecánica mediante una máquina y si deseamos extraer energía mecánica, bomba y turbina respectivamente [4-6].

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_{1promedio}^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_{2promedio}^2}{2g} + z_2 + h_L \quad (2.2)$$

La ecuación (2.2) representó la base para obtener los coeficientes de proporcionalidad en los flujos de salida e intermedios en los tanques.

2.3. Control de tanques y tanques acoplados

Tanto en los LR (siendo los investigadores del control automático los principales desarrolladores e impulsores de esta tecnología [3]) como los LT se incorporan maquetas de procesos con el fin de realizar control automático sobre ellas y en consecuencia capacitar a los estudiantes principalmente de ingeniería a desenvolverse en problema habituales que se encuentran en el ámbito industrial, estas maquetas logran la representación de procesos típicos y característicos tales como: nivel, temperatura, velocidad, posición entre otros. Donde se aplican diferentes estrategias de control.

Las maquetas de nivel y/o tanques acoplados pasan a ser una de las maquetas más usadas en las instituciones educativas, por lo recurrente que es el proceso en las empresas e industrias, por esto mismo es que hay una gran variedad de estrategias de control aplicadas sobre ellas, las que nos permiten para un mismo proceso presenciar estas diferentes

estrategias logrando dejar en evidencia las diferencias de una estrategia con otra, mostrando sus fuertes y debilidades.

A continuación, se mencionarán algunos ejemplos de maquetas y la estrategia de control aplicadas sobre ella:

Control de un tanque de nivel mediante un software diseñado por la Universidad Europea de Madrid para su propio laboratorio remoto, este software se llamó LABNET y permitía a sus usuarios realizar experimentos con diferentes valores de controladores, los controladores usados fueron 3, el primero PID teórico, el segundo un PID con filtrado de la derivada y el tercero un PID con Anti-Windup [3]

Control de un tanque de nivel utilizando el software MATLAB sobre su entorno de programación visual MATLAB SIMULINK, realizado por la Universidad del Bío-Bío en su laboratorio remoto. La identificación de los parámetros de la maqueta Feedback modelo 33-230 fueron realizados mediante la técnica de mínimos cuadrados. Las estrategias de control implementadas fueron un PI y un PI Adaptativo [7].

Control de tanques acoplados, utilizando el software LabVIEW para el registro de datos y para el análisis el software Matlab. La maqueta utilizada (Figura 2.2.) posee una válvula entre los tanques y gracias a esta se logró analizar el acople entre los tanques para diferentes valores de apertura 30% y 90%, para el primer caso el acople fue despreciable por lo tanto previa a una identificación del sistema se realizó un control PI para controlar la altura del tanque T1 con la Bomba 1 y para la altura del tanque T2 con la Bomba 2 por separado, para el segundo caso con la apertura al 90% se aplicó la misma estrategia de control y se mencionó que no es suficiente por lo tanto se planteó la intención de utilizar desacopladores, pero finalmente no se implementó [8]

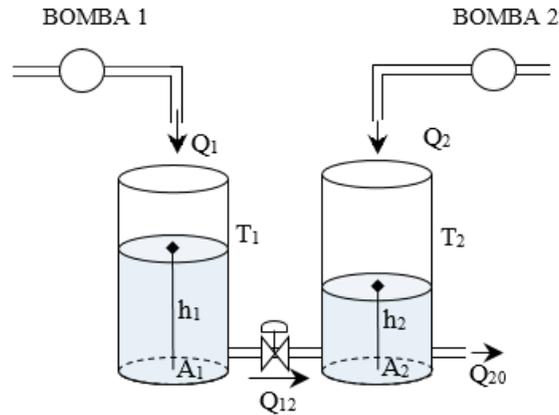


Figura 2.2. "Maqueta de tanques acoplados, control PI."

Control de tanques acoplados donde el software utilizado fue MATLAB. La maqueta posee una distribución como se muestra en la Figura 2.3. Esta consta de 4 tanques acoplados conectados con válvulas de tres vías las que conectadas de forma adecuada permite la aparición de diferentes subsistemas para el estudio. Este proceso no lineal multivariable fue controlado mediante un control predictivo distribuido óptimo [9].

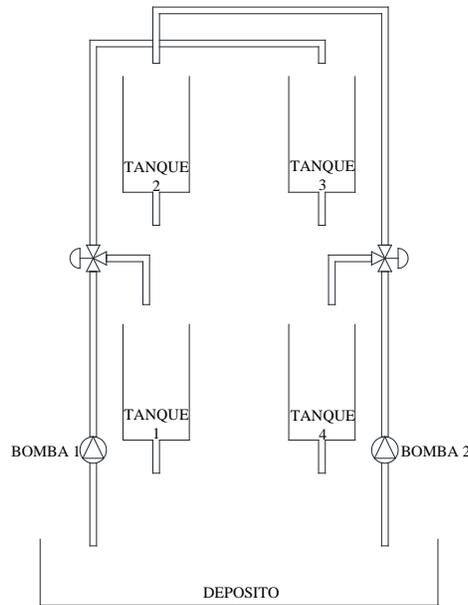


Figura 2.3. "Maqueta de tanques acoplados, control predictivo distribuido óptimo."

2.4. Modelos no lineales

Un sistema es no lineal si no se aplica el principio de superposición.

Muchas relaciones físicas se representan con frecuencia mediante ecuaciones lineales, pero en la mayor parte de los casos estas relaciones no son verdaderamente lineales. En la práctica, muchos sistemas electromecánicos, neumáticos, hidráulicos entre otros, involucran relaciones no lineales en sus variables. Incluso los sistemas lineales pasan a ser no lineales en algunas ocasiones, por ejemplo, cuando existe alguna zona muerta en el rango de funcionamiento, la saturación ante entradas muy grandes, entre otros.

Los sistemas que incorporan un tanque (sistema hidráulico) poseen relaciones no lineales que afectan directamente el flujo de salida del tanque, este flujo de salida puede ser suministrado a otro tanque o simplemente incorporado a un depósito, en ambos casos no pierde su condición no lineal representada a través de una raíz cuadrada que depende principalmente de la altura, gravedad, propiedades del fluido y propiedades estructurales de los tanques [10], [8].

CAPÍTULO 3 DESCRIPCIÓN MAQUETA Y PARTES QUE LA COMPONEN

La maqueta en estudio fue una de tanques acoplados modelo 33-230 compuesta de un armazón metálico, posee un gran depósito del fluido que contiene dos bombas sumergibles, estas a su vez proporcionan de flujo a los tanques ubicados más arriba. La comunicación entre los tanques se logra mediante tuberías, accesorios (codos, Tee y uniones) y válvulas manuales. La mayoría de las descargar de los tanques posee reductores. Toda la información entregada y proporcionada se trasmite mediante una tarjeta de adquisición de datos hacia una estación de trabajo.

Desde la estación se envía una tensión [V] la cual pasa por medio de la tarjeta de adquisición de datos, esta señal es amplificada y recibida por cada una de las bombas provocando que estas funcionen y en consecuencia proporcionen de un flujo específico dependiendo de la carga que se les presente, el flujo mencionado es recibido por los tanques. En cada tanque se encuentra un sensor de presión el cual nos permite conocer en todo instante de tiempo el nivel que este posee mediante una señal de tensión [V] que pasa por la tarjeta de adquisición de datos hasta llegar a la estación de trabajo.

La estructura de la maqueta posee 1.715 [m] de alto y 0.68 [m] de ancho.

3.1. Clasificación partes maqueta

La maqueta principalmente está compuesta por: sensores, bombas, válvulas, tanques, codos, uniones, tuberías, reductores. Su correcto uso nos permite estudiar diferentes sistemas según sea la conexión entre estos elementos, es por esto que surge la necesidad de nombrar cada una de las partes, para tener una mayor claridad de que parte específica se hace referencia y a que sistema pertenece. Figura 3.1.

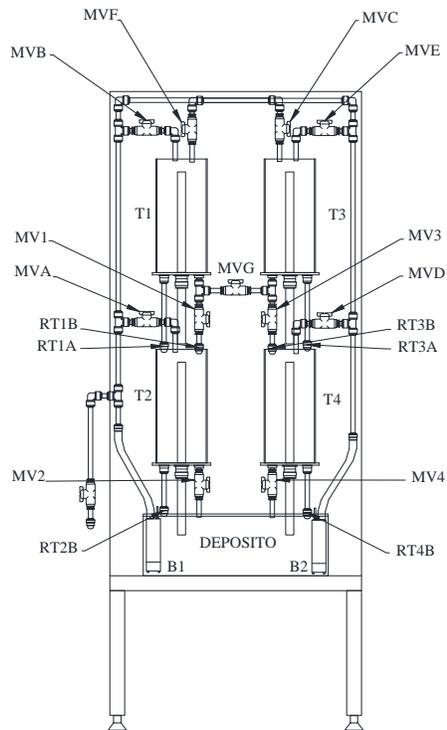


Figura 3.1. "Distribución y clasificación de partes maqueta."

Se dispone de 2 Bombas, 4 Tanques, 11 Válvulas manuales y 6 reductores, en la Tabla 3.1. se muestra el detalle.

Tabla 3.1. "Nombre elementos de maqueta."

Elemento	Nombres
Bomba	B1, B2.
Tanque	T1, T2, T3, T4.
Válvula	MV1, MV2, MV3, MV4, MVA, MVB, MVC, MVD, MVE, MVF, MVG.
Reductor	RT1A, RT1B, RT2B, RT3A, RT3B, RT4B.

Desde ahora en adelante se mencionarán cada una de las partes que componen la maqueta como se muestra en la Figura 3.1.

3.2. Tramos

La distribución de todas las partes de la maqueta gira en torno a las bombas (B1 y B2) ya que estos elementos son los actuadores de nuestros sistemas y gracias a ellas lograremos posteriormente controlar las variables de altura (h) en los tanques a valores deseados. Con cada una de las bombas se logra proporcionar de agua verde (fluido utilizado) a varios tanques de forma independiente, por lo tanto, a partir de cada bomba se identificaron diferentes tramos (conjunto de tuberías, uniones, codos, t y válvulas) en la Figura 3.2. se muestran los tramos corto y largo para ambas bombas.

Mediante el “tramo corto” se proporciona de agua verde a los tanques T2 y T4 desde B1 y B2 respectivamente. Por otro lado, mediante el “tramo medio” se proporciona de agua verde a los tanques T1 y T3 desde B1 y B2 respectivamente.

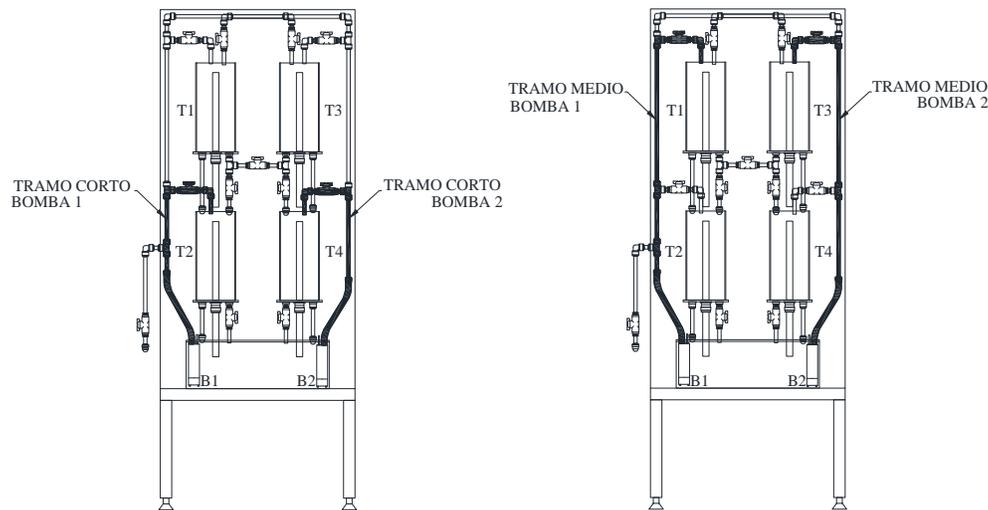


Figura 3.2. "Tramos corto y medio."

Por último, a través del “tramo largo” se proporciona flujo a los tanques T1 y T3 desde B2 y B1 respectivamente.

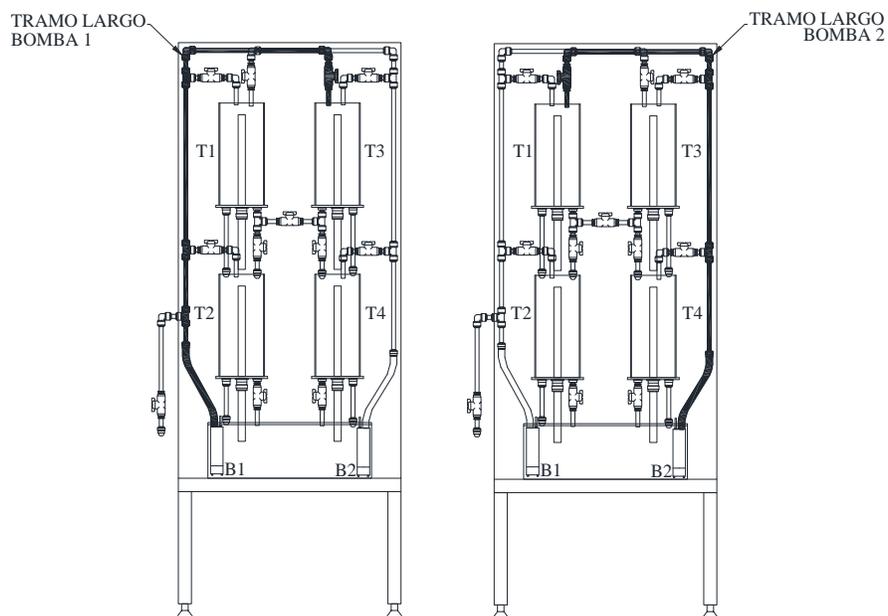


Figura 3.3. "Tramos largos."

Cada tramo se caracteriza por poseer una cierta cantidad de accesorios y un cierto largo de tuberías, estas diferentes características se detallan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. "Accesorios y tuberías por tramos."

Tramos	Cantidad por unidad				Cantidad en metros [cm]	
	Codos	Válvulas	Uniones	T	Tub. 8[mm] int.	Tub. 14[mm] int.
T. corto B1	1	1	1	2	24.4	34.5
T. corto B2	1	1	1	1	32.55	32.5
T. medio B1	1	1	1	3	69.6	34.5
T. medio B2	1	1	1	2	78	32.5
T. largo B1	2	1	1	3	108.4	34.5
T. largo B2	2	1	1	2	116.8	32.5

3.3. Bombas

Dos bombas sumergibles ubicadas en el depósito son las encargadas de proporcionar de agua verde a los tanques ubicados en la parte superior. Mediante una variación en la tensión de alimentación se logran obtener diferentes valores de flujos proporcionados a los tanques, por lo tanto, pasan a ser los actuadores de nuestro sistema. Pueden operar por separado y/o en conjunto.

Las bombas son de la marca “LVM” modelos “AMAZON LVM 117” Figura 3.4, cuyas especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 3.3.



Figura 3.4. "Bomba LVM 117."

Tabla 3.3. "Especificaciones técnicas de bombas."

Especificaciones	Valor y/o característica.
Voltaje	24[V]
Corriente	2.4[A]
Cabeza (altura máx. de columna de agua)	9.7[m]
Caudal	1080 [l/h], 18 [l/min], 300 [cm ³ /seg]
Presión	14[psi], 0.96[bar]
Líquido	Dulce, Salado, Diesel

*Información entregada por el fabricante.

Las especificaciones técnicas solo hacen referencia a un uso continuo y a un voltaje constante en su funcionamiento, por lo tanto, fue necesario identificar el comportamiento de las bombas frente a una variación en la tensión de alimentación y frente a diferentes cargas.

La señal de control desde la estación va desde 0 [V] a 5 [V], mientras que en los terminales esta señal se ve amplificada, Anexo 1.

3.4. Sensores

Cada uno de los tanques en su base posee una entrada para que ingrese un fluido, cada entrada de manera independiente da con un sensor de presión ubicado en la parte posterior de la estructura de la maqueta, este sensor nos indica en todo momento la presión que se encuentra en la base del tanque, permitiéndonos realizar una relación directa entre la presión en cada instante con la altura del agua en cada uno de los tanques.

El sensor es de la marca "HONEYWELL" de la serie "24PC" modelo "4EF6G", este dispositivo posee internamente un puente de 4 resistencias conectadas a una fuente de alimentación, cuando una presión es aplicada cambia la señal de salida por medio de una tensión, la medición se realiza con respecto a la presión atmosférica (manométrica), a medida que la presión aumenta el diferencial de voltaje de V_2-V_4 también aumenta y cuando la presión disminuye el diferencial también lo hace. Esquema Figura 3.5.

Posee 4 pines, funciona si compensación por temperatura.

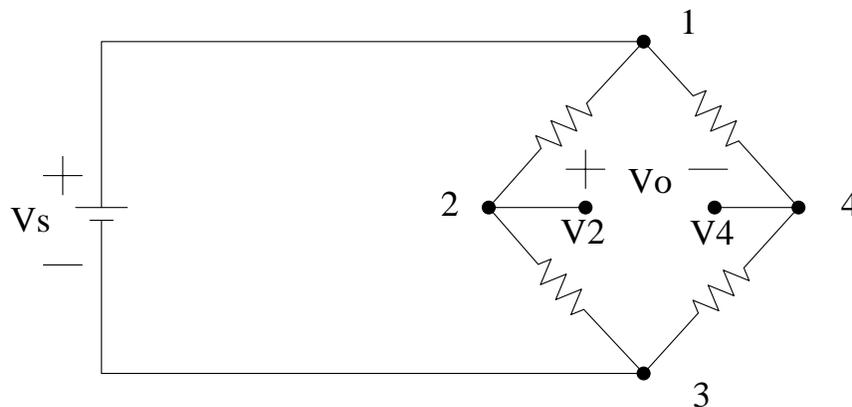


Figura 3.5. "Esquema de conexión."

Tabla 3.4. "Especificaciones técnicas generales del sensor."

Especificaciones	Valor
Tensión de alimentación	Hasta 12[V]
Corriente de operación	1[mA]
Tiempo de respuesta	1 [ms]
Rango de temperatura	-40°C a 85°C

*Información entregada por el fabricante.



Figura 3.6. "Sensor de presión."

*Importante: El sensor de la imagen es referencial ya que en aspecto es igual al utilizado pero sus especificaciones técnicas son diferentes.

3.5. Tarjeta de adquisición de datos

La adquisición de datos se logró mediante una tarjeta de adquisición de datos de la marca Advantech serie PCI-1711 U, esta permitió la comunicación entre la maqueta y la estación de trabajo.



Figura 3.7. "Tarjeta de adquisición de datos Advantech PCI-1711"

Cuenta principalmente con las siguientes características:

16 entradas análogas de 12 bits de resolución, con 5 diferentes lazos de tensión $\pm 10[V]$, $\pm 5[V]$, $\pm 2,5[V]$, $\pm 1,25[V]$ y $\pm 0,625[V]$.

2 salidas análogas de 12 bits de resolución, con 2 diferentes lazos de tensión $0[V]$ a $5[V]$ y de $0[V]$ a $10[V]$.

16 entradas digitales y 16 salidas digitales.

Para las bombas se ocuparon las 2 salidas analógicas con el lazo de tensión de $0[V]$ a $5[V]$, mientras que las 4 entradas analógicas para los sensores fueron ocupadas con el lazo de tensión de $\pm 5[V]$.

El conector es del tipo femenino de 68 pines SCSI.

*Información entregada por el fabricante.

CAPÍTULO 4 FLUJOS Y DESCARGA DE TANQUES

4.1. Flujos por bomba y por tramo (carga)

Para realizar control de nivel, se necesita ejecutar una variación en la tensión aplicada a cada bomba lo que tiene por consecuencia una variación en el flujo de salida y por ende una variación en el nivel del sistema en estudio. Para obtener cada uno de los flujos diferenciándolos por bomba y tramo se utilizó el método experimental, midiendo cada caso (gracias al sensor ubicado en el tanque de descarga de cada uno de los tramos). Gracias a estos experimentos se logró obtener la curva característica de cada bomba a diferentes valores de tensión y a diferentes tramos conectados.

Para obtener cada uno de los flujos se cerró de manera independiente las salidas del tanque de descarga de cada tramo, por ejemplo, para medir el flujo desde las bombas B1 y B2, conectadas al tramo corto, se cerraron las salidas de T2 y T4. Desde el entorno de programación visual Matlab Simulink (operando en tiempo real), se creó un programa en bloques que permitió proporcionar diferentes valores de tensión aplicados a las bombas, para así obtener las mediciones de cada uno de los sensores, Anexo 2.

Los experimentos duraron 60 [s] cada uno, en donde se suministró flujo a un tanque. De los 60 [s] 20 [s] se activó la bomba, el resto (40 [s]) ocuparon para que el líquido se estabilizara (con la bomba apagada). Durante los primeros 20 [s] se midieron las variaciones del volumen con respecto al tiempo (flujo), mientras que para los 40 [s] restantes se apagó la bomba haciendo que el flujo se volviera cero, por lo tanto, el volumen en el tanque se mantuvo constante (pero con un pequeño oleaje). Para que el oleaje no nos entregara una falsa medición se dejó constante el tiempo que dividía la expresión de volumen durante estos 40 [s] restantes, la información guardada en ese periodo de tiempo fue promediada para así obtener un valor de flujo promedio en todos y cada uno de los demás flujos medidos.

La señal de control proporcionada desde la estación de trabajo posee como valor mínimo 0 [V] y 5 [V] como valor máximo. Las cargas a las que las bombas fueron conectadas variaron entre los diferentes tramos identificados anteriormente (tramo corto, tramo medio

y tramo largo.). Cada una de las bombas dependiendo del tramo al que estuvieran conectadas necesitaron de una tensión mínima para lograr vencer las cargas y entregar flujo, por lo tanto, los experimentos comenzaron desde estos valores mínimos, continuando con el redondeo en 1.5 [V] o 2 [V] (dependiendo del tramo) para seguir con saltos de 0.5 [V] hasta llegar a los 5 [V] (valor máximo de la señal).

Para cada uno de los valores de tensión mencionados previamente se realizaron 10 experimentos en iguales condiciones con la finalidad de poseer un universo de muestras y observar que tanto variaron las mediciones proporcionadas por los sensores (previamente calibrados) en cada experimento. Para esto de cálculo la desviación estándar para una población infinita (4.1) para cada grupo de 10 mediciones de valores promedio de flujo, permitiéndonos mediante una “distribución normal” saber que tan variable fueron los valores medidos. La distribución normal nos dice que en $\bar{y} \pm \sigma$ se encuentran el 68,27% de las muestras, para $\bar{y} \pm 2\sigma$ el 95,45% y para $\bar{y} \pm 3\sigma$ el 99.73% de las muestras Figura 4.1. [11].

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.1)$$

Donde:

N = Numero de datos o elementos de la muestra.

i = Índice de la sumatoria 1, 2, 3, ..., n .

y_i = Valor del i – enésimo dato de la muestra.

\bar{y} = Media aritmética (promedio de los flujos).

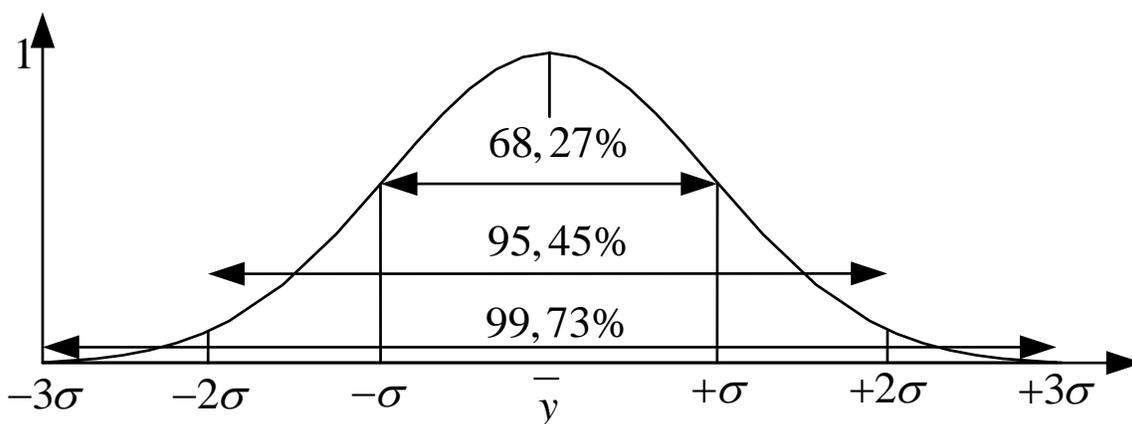


Figura 4.1. "Distribución normal."

En Tabla 4.1. y Tabla 4.2. se muestran los resultados obtenidos para cada cambio en la tensión de alimentación desde la estación de trabajo. Ninguna de las desviaciones supero la unidad y considerando las magnitudes de los flujos promedios se concluye que la variación en los diferentes experimentos realizado es casi despreciable.

Tablas completas en Anexo 3 y Anexo 4.

Tabla 4.1. "Flujos promedio de B1 en sus diferentes tramos."

Tramo	V. de estación [V]	Promedio [cm^3/seg]	Desviación E.
Corto	1,2	12,12142	0,3987
	1,5	35,64614	0,1409
	2	55,74856	0,3851
	2,5	76,03333	0,5332
	3	96,01582	0,5923
	3,5	113,46691	0,5043
	4	129,41461	0,2074
	4,5	144,94847	0,2645
	5	157,64524	0,1501
Medio	1,6	10,85532	0,1136
	2	35,67384	0,4241
	2,5	59,9729	0,4267
	3	80,90021	0,4171
	3,5	98,34005	0,1608
	4	113,57821	0,2711

	4,5	128,96358	0,4886
	5	141,42766	0,2441
Largo	1,7	15,54862	0,303
	2	33,34762	0,4775
	2,5	57,92456	0,7268
	3	77,07204	0,4762
	3,5	94,18657	0,4264
	4	109,52038	0,1509
	4,5	124,37448	0,2817
	5	136,35905	0,3696

Tabla 4.2. "Flujos promedio de B2 en sus diferentes tramos."

Tramo	V. de estación [V]	Promedio [cm^3/seg]	Desviación E.
Corto	1,2	17,14364	0,4847
	1,5	38,01749	0,44
	2	62,12562	0,2535
	2,5	82,80295	0,3025
	3	103,38546	0,2065
	3,5	121,54705	0,4511
	4	138,62482	0,381
	4,5	154,67959	0,6028
	5	166,6784	0,7445
Medio	1,6	15,12384	0,5217
	2	42,27914	0,3116
	2,5	67,00243	0,6985
	3	88,41189	0,3368
	3,5	106,73348	0,3759
	4	123,51807	0,4677
	4,5	139,69038	0,4689
	5	150,65223	0,9968
Largo	1,6	11,43911	0,3112
	2	38,53077	0,3747
	2,5	62,87293	0,3148
	3	82,93852	0,3952
	3,5	100,72411	0,2441
	4	117,2349	0,2479
	4,5	132,95885	0,4693
	5	144,00228	0,5175

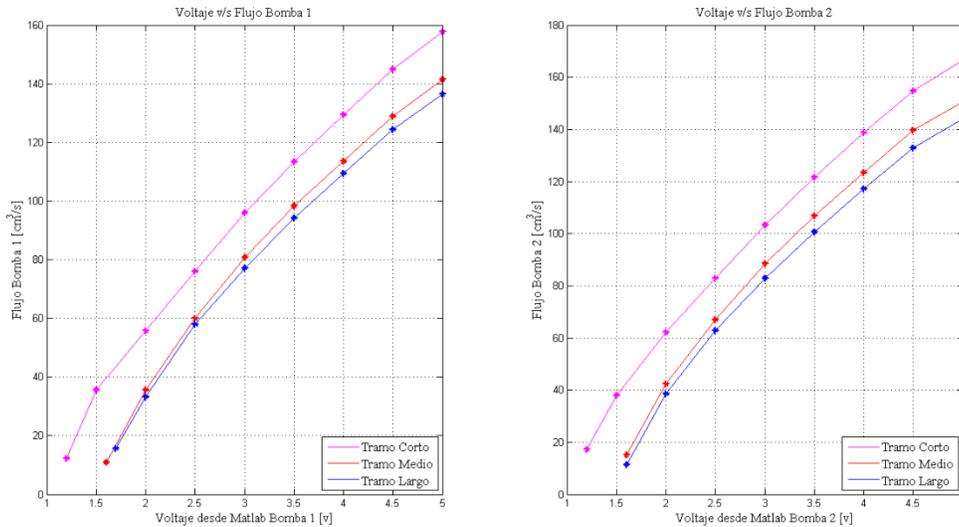


Figura 4.2. "Flujos de bombas con diferentes cargas."

Tras la tabulación y posteriores gráficas (Figura 4.2.) de los flujos medidos, fue necesario establecer qué relación existe entre los valores de tensión aplicados a las bombas y los flujos obtenidos, en otras palabras, la dinámica de las bombas expuestas a diferentes cargas. De las gráficas obtenidas se observó que estas tuvieron una tendencia muy similar al comportamiento que posee una función que incorpora la raíz cuadrada. Se ajustaron las curvas mediante la herramienta “ajuste de curvas” de Matlab (permite obtener una aproximación del 95%) y estableciendo como referencia la función (4.2) en la sección ecuación personalizada se obtuvieron 6 curvas características para las bombas con diferentes tramos de carga.

$$f(x) = c_1\sqrt{x} + c_2 \quad (4.2)$$

Donde:

x = variable independiente.

c_1 : Constante 1

c_2 : Constante 2

Bomba 1 tramo corto:

$$FB1_{tramocorto}(v_{estacion}) = 125,6\sqrt{v_{estacion}} - 122 \quad \text{para } 1,2 \leq v_{estacion} \leq 5 \quad (4.3)$$

Bomba 1 tramo medio:

$$FB1_{tramomedio}(v_{estacion}) = 133,3\sqrt{v_{estacion}} - 153,3 \quad \text{para } 1,6 \leq v_{estacion} \leq 5 \quad (4.4)$$

Bomba 1 tramo largo:

$$FB1_{tramolargo}(v_{estacion}) = 128,8\sqrt{v_{estacion}} - 148,5 \quad \text{para } 1,7 \leq v_{estacion} \leq 5 \quad (4.5)$$

Bomba 2 tramo corto:

$$FB2_{tramocorto}(v_{estacion}) = 130,9\sqrt{v_{estacion}} - 123,9 \quad \text{para } 1,2 \leq v_{estacion} \leq 5 \quad (4.6)$$

Bomba 2 tramo medio:

$$FB2_{tramomedio}(v_{estacion}) = 138,9\sqrt{v_{estacion}} - 155,3 \quad \text{para } 1,6 \leq v_{estacion} \leq 5 \quad (4.7)$$

Bomba 2 tramo largo:

$$FB2_{tramolargo}(v_{estacion}) = 135,3\sqrt{v_{estacion}} - 154,1 \quad \text{para } 1,6 \leq v_{estacion} \leq 5 \quad (4.8)$$

Donde:

$FB1$ = Flujo bomba 1

$FB2$ = Flujo Bomba 2

$v_{estacion}$ = Voltaje

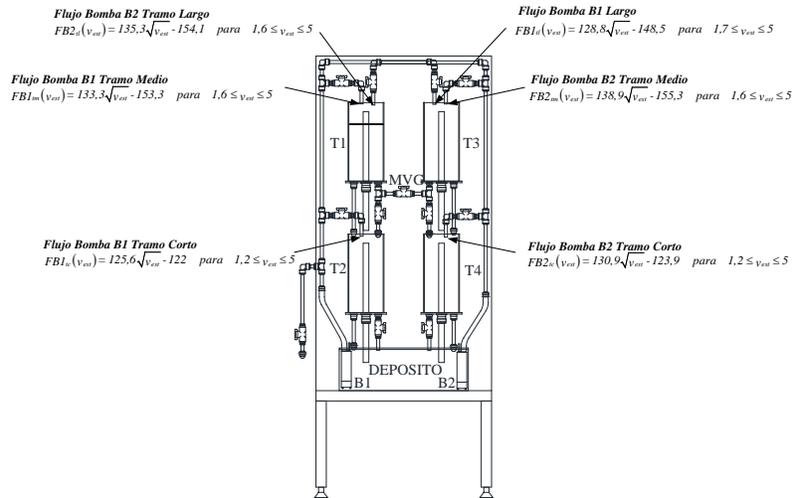


Figura 4.3. "Flujos según bomba y tramo en maqueta."

Ambas bombas conectadas a los diferentes tramos o cargas tuvieron una zona muerta, esto nos indica que para esos valores la tensión la (velocidad de rotación interna de la bomba) bomba no logró romper la carga a la que fue conectada, (4.3), (4.4), (4.5), (4.6), (4.7) y (4.8).

En Figura 4.4, Figura 4.5 y Figura 4.6 se muestran las curvas de flujo con respecto a la tensión entregada desde la estación obtenidas mediante experimentación en contraste con las obtenidas gracias a la interpolación del ajuste de curvas.

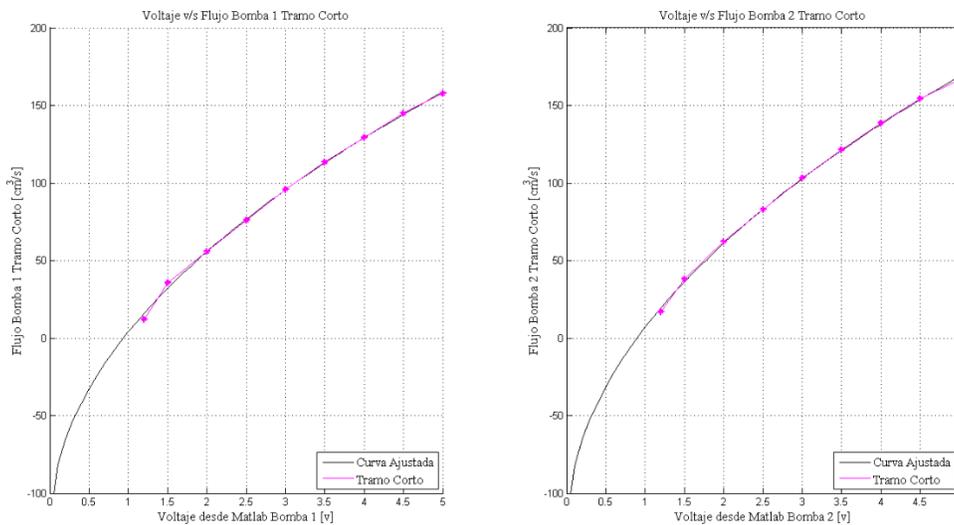


Figura 4.4. "Flujo en Bombas 1 y 2 para el tramo corto junto a su ajuste de curva."

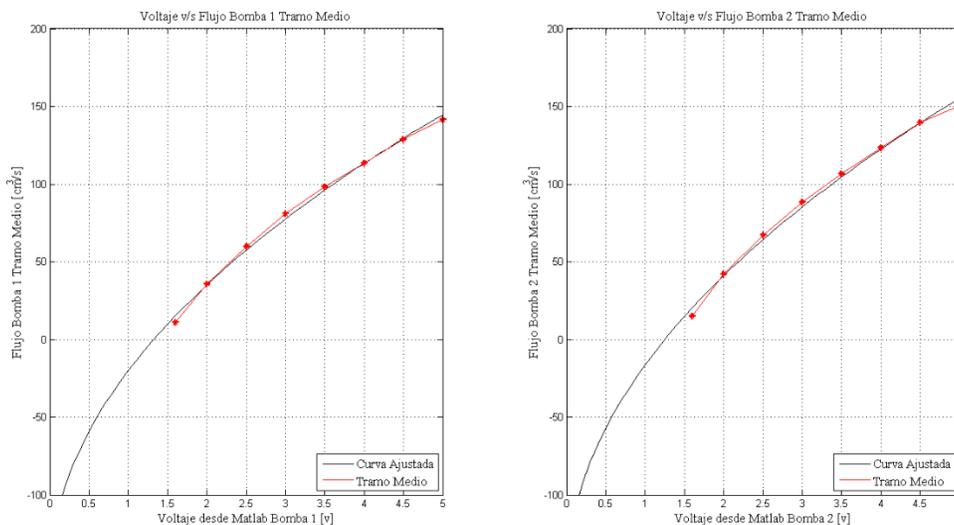


Figura 4.5. "Flujo en Bombas 1 y 2 para el tramo medio junto a su ajuste de curva."

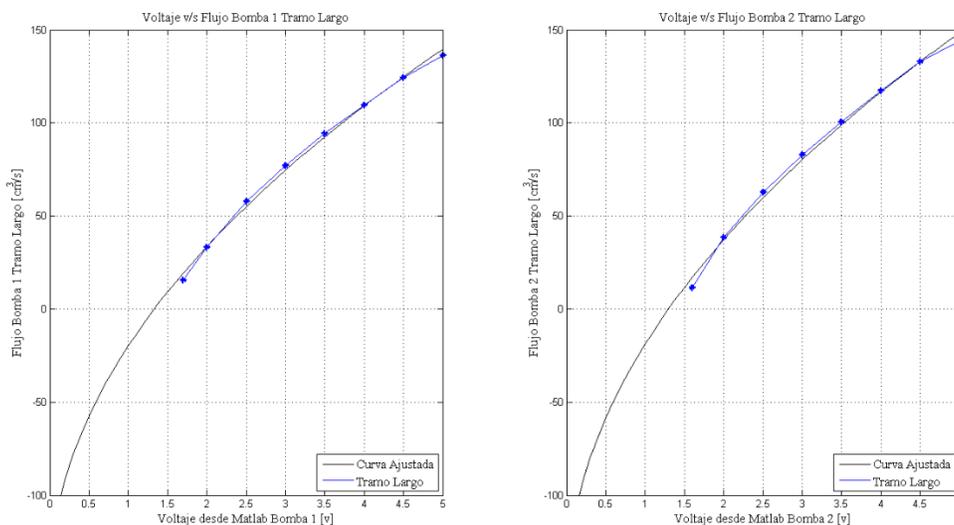


Figura 4.6. "Flujo en Bombas 1 y 2 para el tramo largo junto a su ajuste de curva."

4.2. Descarga de cada tanque

El flujo de entrada, el flujo de salida y las características de los tanques nos proporcionaron el comportamiento y dinámicas de cualquiera de los subsistemas que se estudiaron dentro de la maqueta de tanques acoplados.

En el subcapítulo anterior se obtuvieron experimentalmente los diferentes flujos de las bombas expuestas a diferentes cargas. En este capítulo se mostrará analíticamente en conjunto con experimentos como afectan las descargar y comunicación entre los tanques a los flujos que circulan por ellos y en consecuencia como afectan a cualquiera de los subsistemas que se deseen estudiar.

4.2.1. Energía mecánica.

Muchos de los sistemas de fluidos están diseñados para trasportar un fluido de un lugar a otro con un respectivo gasto, una velocidad y una diferencia de elevación especificados, durante este proceso se puede generar trabajo mecánico mediante una turbina o se puede consumir este tipo de trabajo en una bomba o un ventilador. En estos tipos de procesos no intervienen la transformación de energía nuclear, química o térmica en energía mecánica y en esencia operan a temperatura constante [4].

A su vez la energía mecánica se define como la forma de energía que se puede transformar completa y directamente a trabajo mecánico, por medio de algún dispositivo. Ejemplo: la turbina.

Las formas de energía mecánica más comunes son la cinética y la potencial además se puede encontrar la energía de flujo, por lo tanto, la energía mecánica de un fluido fluyente se expresa cómo (4.9) y en términos de energía por unidad de masa como en (4.10)

$$e_{mecánica} = \text{energía de flujo} + \text{energía cinética} + \text{energía potencial} \quad (4.9)$$

$$e_{mecánica} = \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \quad (4.10)$$

Donde:

$$P: \text{Presión del fluido} \left[kPa = \frac{kg}{m_s^2} \right].$$

$$V: \text{Velocidad del fluido} \left[\frac{m}{s} \right].$$

g : Aceleración de gravedad $\left[\frac{m}{s^2} \right]$.

z : Carga por elevación $[m]$.

ρ : Densidad del fluido $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$.

Un cambio en la energía mecánica para un fluido incompresible se expresa entre dos puntos (1 y 2), sin considerar ningún tipo de pérdidas.

$$\Delta e_{mecánica} = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (4.11)$$

La energía mecánica no cambia durante un flujo si su presión, velocidad y elevación permanecen constantes. Si se considera que no habrá ninguna pérdida, el cambio en la energía mecánica representa trabajo suministrado ($\Delta e_{mecánica} > 0$) o extraído ($\Delta e_{mecánica} < 0$).

La energía mecánica para un flujo estacionario e incompresible es en términos de cargas incorporando el uso de bombas, turbinas y pérdidas irreversibles entre dos puntos es la siguiente:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_{1promedio}^2}{2g} + z_1 + h_{bomba} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_{2promedio}^2}{2g} + z_2 + h_{turbina} + h_L \quad (4.12)$$

Donde:

α_1 : Factor de corrección de velocidad para punto 1.

α_2 : Factor de corrección de velocidad para punto 2.

$V_{1promedio}$: Velocidad promedio en punto 1.

$V_{2promedio}$: Velocidad promedio en punto 2.

h_{bomba} : Carga útil entregada al fluido por la bomba.

$h_{turbina}$: Carga extraída que la turbina saca del flujo.

h_L : Pérdida irreversible de carga entre los puntos 1 y 2, no incluyen las pérdidas de las bombas ni las turbinas, solo las de las tuberías.

Finalmente, para el análisis de las descargas de los tanques y conexiones entre ellos se descarta el uso de las bombas ya que de ellas sabemos el flujo en todo tiempo, no tenemos turbinas en el proceso, por lo tanto, solo quedan las pérdidas irreversibles ocasionadas por las cañerías.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_{1promedio}^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_{2promedio}^2}{2g} + z_2 + h_L \quad (4.13)$$

4.2.2. Pérdidas irreversibles

Las pérdidas irreversibles o pérdidas en las cargas son las ocasionadas por todos los componentes que se encuentren entre los 2 puntos que se desean estudiar sin considerar las bombas, turbinas, ventiladores u otras máquinas.

Estas pérdidas se ocasionan por efectos de la viscosidad μ [kg/m_s] propia de cada fluido.

Las pérdidas en las cargas se componen de dos grandes de pérdidas, las mayores (tuberías) y las menores (accesorios).

$$h_{Ltotal} = h_{L,mayor} + h_{L,menor} \quad (4.14)$$

Donde:

h_{Ltotal} : Pérdida de carga total, en metros.

$h_{L,mayor}$: Pérdida mayor, pérdida en las tuberías.

$h_{L,menor}$: Pérdida menor, pérdida en los accesorios.

Las pérdidas mayores se ocasionan en las tuberías de los sistemas donde transita flujo de un fluido, en primera instancia se estudian como pérdidas de presión entre dos extremos de una tubería (diferencia de presión en la carga ΔP_L), Figura 4.7.

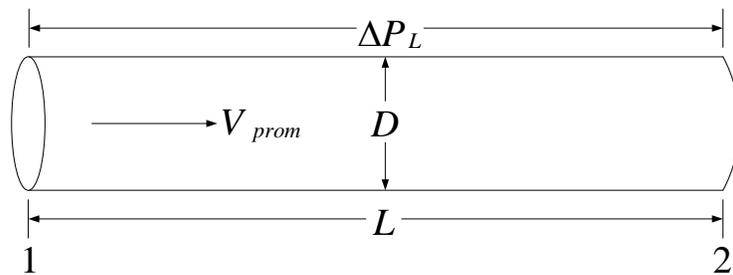


Figura 4.7. "Pérdida de presión en una tubería."

$$\Delta P_L = f \frac{L \rho V_{prom}^2}{D^5} \quad (4.15)$$

Donde:

f : Factor de fricción (adimensional).

L : Largo de la tubería [m]

ρ : Densidad del fluido $[kg/m^3]$.

V_{prom} : Velocidad promedio que transita por la tubería $[m/s]$.

D : Diámetro interno de la tubería [m].

Finalmente expresado en términos de altura de una columna de fluido equivalente se le conoce como pérdida de carga " h_L " para tuberías.

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{LV_{prom}^2}{D2g} \quad (4.16)$$

El factor de fricción “ f ” es un coeficiente adimensional que depende del tipo de fluido con el que se esté trabajando, este puede ser del régimen laminar (se caracteriza por poseer líneas de corriente suaves y movimiento sumamente ordenado) o turbulento (se caracteriza por fluctuaciones de velocidad y movimiento también desordenado). Para identificar a que régimen pertenece nuestro flujo de fluido, se debe conocer el Número de Reynolds.

El factor de fricción de flujo en tubería circular laminar totalmente desarrollado (con un perfil de velocidad desarrollado) solo depende del número de Reynolds.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (4.17)$$

El factor de fricción de flujo en tubería turbulento totalmente desarrollado depende del número de Reynolds y de la rugosidad relativa (ε/D) que es la razón de la altura media de rugosidad de la tubería al diámetro de la tubería, ε corresponde a la rugosidad [mm] y D diámetro interno de las tuberías. [m].

La relación no se puede obtener a partir de un análisis teórico, por lo tanto, los resultados disponibles fueron obtenidos a partir de experimentos cuidadosamente realizados en superficies que se hacían rugosas de manera artificial. De estos experimentos mediante ajuste de curvas se obtuvo la ecuación de Colebrook.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (4.18)$$

Lewis F. Moody creó el famoso diagrama de Moddy que relaciona el factor de fricción con el número de Reynolds y la rugosidad relativa, este diagrama es el más aceptado en la actualidad a pesar de sus incertidumbres (tamaño de la rugosidad, error experimental, ajuste de curva, etc.), en la Figura 4.8. se logra observar una versión simplificada del diagrama.

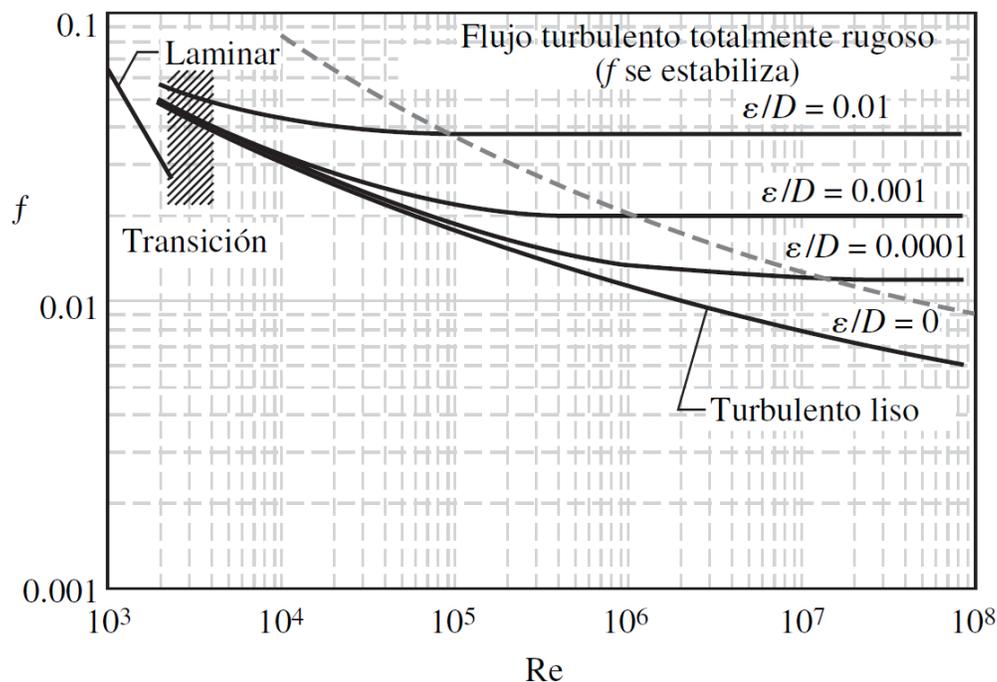


Figura 4.8. "Diagrama de Moody simplificado."

Las pérdidas menores son ocasionadas por los denominados accesorios (uniones, válvulas, flexiones, codos, ramificaciones conexiones en Tee, entradas, salidas, ensanchamientos y contracciones de los tubos), que interrumpen el suave flujo de fluido ocasionando dichas pérdidas.

Las pérdidas menores también surgen inicialmente por una pérdida de presión entre los extremos del accesorio.

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = K_L \frac{V^2}{2g} \quad (4.19)$$

El coeficiente K_L (medida en metros) depende principalmente de la geometría del accesorio y del número de Reynolds igual como el factor de fricción, aunque usualmente se supone que es independiente del número de Reynolds ya que en la práctica para flujos con números de Reynolds grandes los coeficientes tienden a ser independientes del número del Reynolds (Diagrama de Moody.)

Las pérdidas de carga total (4.14) compuesta por las cargas mayores (tuberías) y menores (accesorio) en términos generales:

$$h_L = \sum_i f_i \frac{L_i V_i^2}{D_i 2g} + \sum_j K_{L,j} \frac{V_j^2}{2g} \quad (4.20)$$

Donde:

i: Representa cada tramo de tubería con diámetro constante.

j: Representa cada accesorio que provoca una pérdida.

En nuestro caso, solo se maneja un diámetro de tuberías, por lo tanto la ecuación de pérdidas totales en las cargas se expresa como (4.21).

$$h_L = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{V^2}{2g} \quad (4.21)$$

4.2.2.1. Número de Reynolds

La transición de flujo laminar a turbulento depende de la geometría, la rugosidad de la superficie, la velocidad del flujo, la temperatura de la superficie y el tipo de fluido, entre otros factores. Luego de mucha experimentación Osborne Reynolds, descubrió que el régimen depende principalmente de las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en el fluido.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} \quad (4.22)$$

$$Re = \frac{V_{prom} D}{\nu} \quad (4.23)$$

Donde:

V_{prom} : Velocidad promedio del fluido.

D : Diámetro interno de la tubería.

ν : Viscosidad cinemática $\frac{\mu}{\rho} = \text{viscosidad absoluta o dinamica} / \text{densidad} \left[\frac{m^2}{s} \right]$

Como se mencionó anteriormente, el régimen en el que nos encontremos dependerá del resultado del cálculo del Número de Reynolds.

Flujo laminar:

$$Re \leq 2300$$

Flujo transicional:

$$2300 \leq Re \leq 4000$$

Flujo turbulento:

$$Re \geq 4000$$

El flujo más bajo medido y utilizado en los experimentos para la obtención de las constantes de proporcionalidad pertenecientes a los flujos de salida fue el proporcionado por la bomba B1 mediante el tramo corto al tanque T2, con este flujo se alcanzó una altura de $6[cm]$ en dicho tanque, el flujo utilizado en los experimentos fue agua verde, con propiedades muy similares al agua destilada. El cálculo del número de Reynolds viene dado por la ecuación (4.23), las condiciones y características necesarias fueron:

La velocidad promedio V_{prom} viene dada por flujo $0,00001982 \left[\frac{m^3}{s} \right]$ dividido el área interna de las tuberías $0,00005026 \left[m^2 \right]$, el diámetro interno de las tuberías corresponde a $0,008[m]$, la viscosidad cinemática del agua destilada se obtiene al dividir la viscosidad absoluta o dinámica (a presión atmosférica y a la temperatura de $20^\circ C$) $0,000001002 \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]$ por la densidad bajo las mismas condiciones $998,2 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$.

Finalmente, el número de Reynols para el flujo utilizado más bajo, considerando las características mencionadas corresponde a $Re = 3142,8307$ lo que nos indica que estamos trabajando con fluido en transición a turbulentos.

4.2.3. Experimentación

Por medio de experimentación se obtuvo el flujo de salida de cada uno de los tanques dependientes de la altura del fluido, las pérdidas en las cargas y el flujo de entrada.

Los experimentos fueron realizados en dos grandes grupos, primero los que consideran de manera independiente cada una de las descargas de cada tanque y segundo los que consideran la descarga de los tanques superiores T1 y T3 considerando la comunicación entre estos.

Para el primer grupo “descarga de los tanques.”, se consideró los tanques superiores con dos descargas cada uno y los inferiores solo con una descarga. Por cada una de las descargas en cada tanque se realizó una serie de 4 experimentos cada uno a un valor diferente de flujo suministrado por alguna de las bombas. La finalidad de cada uno de los experimentos fue proporcionar al tanque en cuestión un cierto valor de flujo, considerando solo una de las descargas a la vez, este flujo proporcionado se mantuvo constante hasta que se logró una altura constante en el tanque (estado estable), a lo largo del tiempo. Cada experimento duro un total de 4000 [s] para asegurar que la altura se estabilizara (programa creado en Matlab Simulink Anexo 5). La altura se midió en todo instante y nos estregó la información necesaria para lograr realizar el balance de energía mencionado en este mismo capítulo. La altura no es aleatoria, es el resultado de la geometría de la maqueta y sus pérdidas por fricción, propias en cada una de las descargas.

Para el segundo grupo “comunicación entre tanques superiores.”, los experimentos duraron la misma cantidad de tiempo, pero el flujo fue proporcionado a un tanque, en este las descargas fueron bloqueadas y solo de dejo la comunicación con el tanque de al lado, en éste se abrió una de las descargas, la finalidad de este segundo grupo de experimentos fue obtener las alturas de los tanques comunicados para deducir las pérdidas ocasionadas en el

tramo que comunica ambos tanques, para este grupo se utilizó la información obtenida por los experimentos del primer grupo.

4.2.3.1. Descarga de los tanques

Cada uno de los tanques posee dos descargas, la descarga que incluye una válvula se conocerá desde ahora como descarga A, mientras que la descarga que no posee válvula se conocerá como descarga B. Para los tanques 1 y 3 se realizó 4 experimentos en ambas descargas por separado, mientras que para los tanques 2 y 4 se realizó 4 experimentos solo en la descarga B.

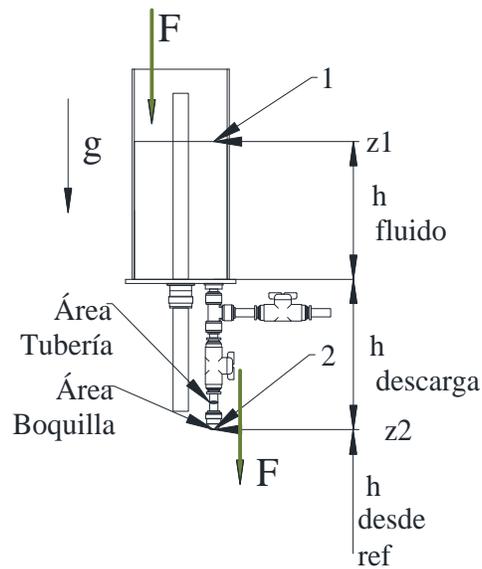


Figura 4.9. "Descarga A (con válvula)."

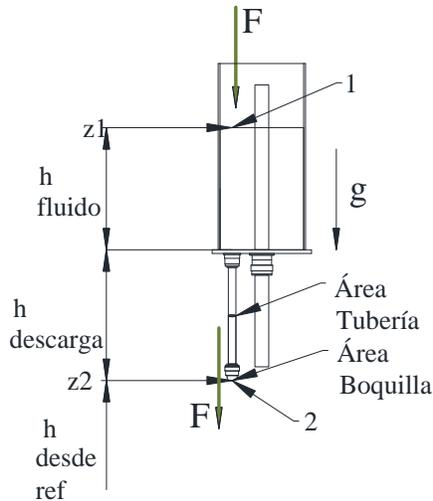


Figura 4.10. "Descarga B (sin válvula)."

Para la descarga A, se realizó el siguiente balance de energía mecánica (4.13) en torno a los puntos 1 y 2 de la Figura 4.9.

El punto 1 se encuentra a presión atmosférica (nanométrica=0) y su velocidad no cambia por lo tanto ambas son 0, con respecto al punto 2 se encuentra a presión atmosférica, el resto de los elementos del balance si están presentes, por lo tanto, el balance queda:

$$z_1 = a_2 \frac{V_{2promedio}^2}{2g} + z_2 + h_L \quad (4.24)$$

La pérdida de carga h_L esta compuesta por una pérdida mayor (tuberías) y pérdidas menores (accesorios). Las pérdidas menores se dividen en dos grupos los que están a la misma velocidad promedio que las tuberías y las que están a otra velocidad promedio como es el caso de la "boquilla."

$$h_L = \frac{fLV_{prom}^2}{2gD} + \frac{\sum K_L V_{prom}^2}{2g} + \frac{K_L V_{prom}^2}{2g} \quad (4.25)$$

El experimento se llevó a cabo con un flujo constante.

$$V_{prom} = \frac{F}{a} \quad (4.26)$$

Donde:

F : Flujo estacionario.

a : Área trasversal, dependerá de la sección de la que se haga referencia.

Reemplazando (4.25) en (4.24) y en términos de flujo.

$$h_{\text{fluido}} + h_{\text{descarga}} + h_{\text{desde ref}} = \frac{F^2 \alpha_2}{2g a_{\text{boquilla}}^2} + h_{\text{desde ref}} + \frac{F^2 fL}{2g D a_{\text{tuberia}}^2} + \frac{F^2 \sum K_L}{2g a_{\text{tuberia}}^2} + \frac{F^2 K_L}{2g a_{\text{boquilla}}^2} \quad (4.27)$$

$$h_{\text{fluido}} + h_{\text{descarga}} = F^2 \left(\frac{\alpha_2}{2g a_{\text{boquilla}}^2} + \frac{fL}{2g D a_{\text{tuberia}}^2} + \frac{\sum K_L}{2g a_{\text{tuberia}}^2} + \frac{K_L}{2g a_{\text{boquilla}}^2} \right) \quad (4.28)$$

$$F = \left(\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\alpha_2}{2g a_{\text{boquilla}}^2} + \frac{fL}{2g D a_{\text{tuberia}}^2} + \frac{\sum K_L}{2g a_{\text{tuberia}}^2} + \frac{K_L}{2g a_{\text{boquilla}}^2} \right)}} \right) \sqrt{h_{\text{fluido}} + h_{\text{descarga}}} \quad (4.29)$$

$$F = K_{\text{descarga}} \sqrt{h_{\text{fluido}} + h_{\text{descarga}}} \quad (4.30)$$

Finalmente el flujo de salida de cualquiera de las descargas de los tanques posee la forma dada en (4.30).

Los experimentos obtenidos se muestran en las siguientes tablas.

Las descargas asociadas al tanque T1 fueron estudiadas considerando el flujo de la bomba B2 desde el tramo largo (tabla original Anexo 6).

Tabla 4.3. "Descargas tranque T1."

Desc.	Tensión [V]	Flujo [cm^3/s]	h fluido. [cm]	h descarga [cm]	K [$cm^3/s/\sqrt{cm}$]
A	1,7	22,3096	11,5	21,8	3,8661
	1,716	23,1378	15		3,8142
	1,732	23,9622	17		3,8469
	1,75	24,8851	20,5		3,8262
B	1,75	24,8851	10,25	21,4	4,4234
	1,766	25,7014	14		4,3197
	1,782	26,5141	17		4,2787
	1,8	27,4240	19		4,3146

La descarga asociada al tanque T2 fue estudiada considerando el flujo de la bomba B1 desde el tramo corto (tabla original Anexo 8).

Tabla 4.4. "Descarga tanque T2."

Desc.	Tensión [V]	Flujo [cm^3/s]	h fluido. [cm]	h descarga [cm]	K [$cm^3/s/\sqrt{cm}$]
B	1,275	19,8224	6	14,4	4,3887
	1,3	21,2060	8		4,4806
	1,325	22,5765	17		4,0289
	1,4	26,6119	23		4,3515

Las descargas asociadas al tanque T3 fueron estudiadas considerando el flujo de la bomba B1 desde el tramo largo (tabla original Anexo 7).

Tabla 4.5. "Descargas tanque T3."

Desc.	Tensión [V]	Flujo [cm^3/s]	h fluido [cm]	h descarga [cm]	K [$cm^3/s/\sqrt{cm}$]
A	1,8	24,3033	6	21,9	4,6011
	1,816	25,0696	12		4,3057
	1,832	25,8326	20		3,9908
	1,85	26,6869	22		4,0278
B	1,8	24,3033	10,5	21	4,3302
	1,816	25,0696	15		4,1783
	1,832	25,8326	22		3,9394
	1,85	26,6869	20		4,1678

La descarga asociada al tanque T4 fue estudiada considerando el flujo de la bomba B2 desde el tramo corto (tabla original Anexo 8).

Tabla 4.6. "Descarga tanque T4."

Desc.	Tensión [V]	Flujo [cm^3/s]	h fluido [cm]	h descarga [cm]	K [$cm^3/s/\sqrt{cm}$]
B	1,26	23,0349	10	15	4,6070
	1,275	23,9069	10		4,7814
	1,29	24,7738	13,5		4,6406
	1,32	26,4927	25		4,1889

Las constantes $K_{descarga}$ de cada una de las descargas se obtuvieron promediando los 4 valores obtenidos en tablas:

$$K_{descarga\ tanque\ 1A} = 3,8383 \left[\frac{cm^3/s}{\sqrt{cm}} \right] \quad (4.31)$$

$$K_{descarga\ tanque\ 1B} = 4,3341 \left[\frac{cm^3/s}{\sqrt{cm}} \right] \quad (4.32)$$

$$K_{descarga\ tanque\ 2B} = 4,3124 \left[\frac{cm^3/s}{\sqrt{cm}} \right] \quad (4.33)$$

$$K_{descarga\ tanque\ 3A} = 4,2314 \left[\frac{cm^3/s}{\sqrt{cm}} \right] \quad (4.34)$$

$$K_{descarga\ tanque\ 3B} = 4,1539 \left[\frac{cm^3/s}{\sqrt{cm}} \right] \quad (4.35)$$

$$K_{descarga\ tanque\ 4B} = 4,5544 \left[\frac{cm^3/s}{\sqrt{cm}} \right] \quad (4.36)$$

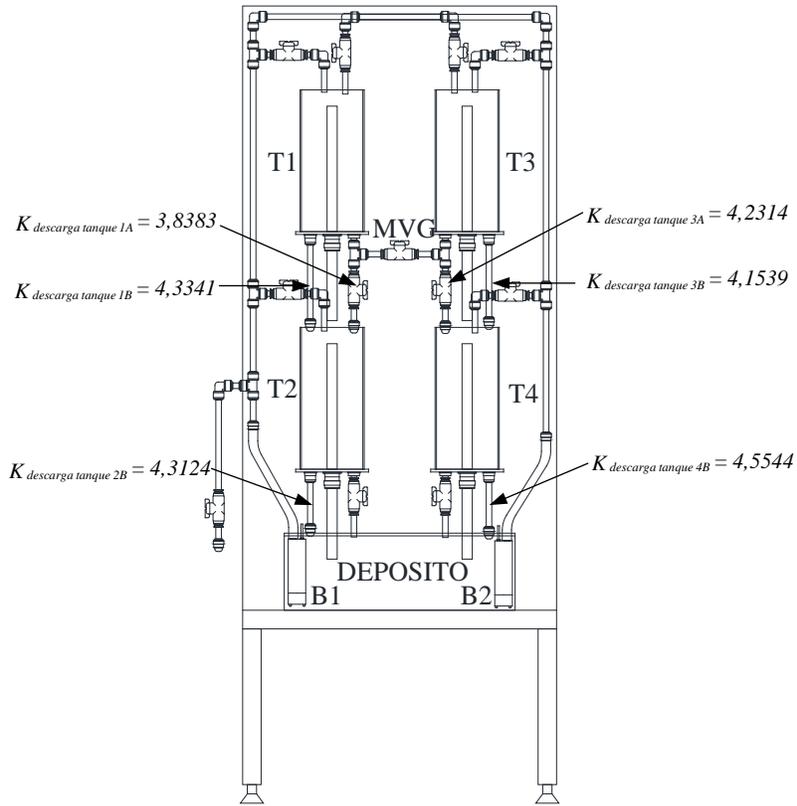


Figura 4.11. "Constantes de proporcionalidad de flujo de salida de tanques independientes en maqueta."

4.2.3.2. Comunicación entre tanques superiores

La comunicación entre los tanques T1 y T3 es interesante estudiar, ya que gracias a esta se puede comprender la influencia en el nivel de un tanque considerando la presión proporcionada por el tanque vecino, para esto también es necesario conocer cómo afectan estos tramos al flujo que transita en ella. La comunicación existe cuando la válvula MVG está abierta.

El circuito completo de comunicación entre los tanques T1 y T3 fue separado en tramos para su mejor comprensión.

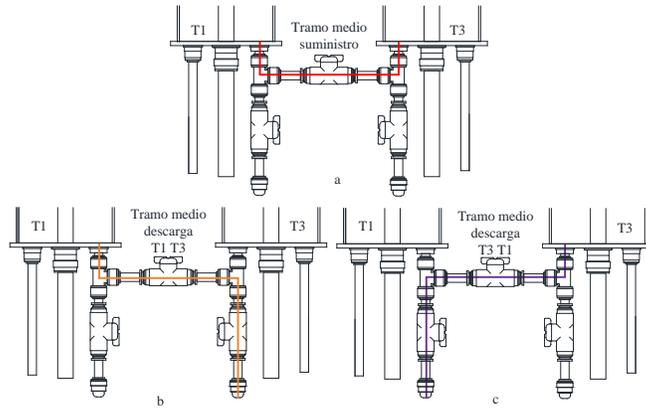


Figura 4.12. "Esquema de tramos en comunicación entre tanque T1 y T3."

Figura 4.12. a) Tramo medio suministro, Tramo descarga T1 T3, Tramo medio descarga T3 T1.

Para conocer el comportamiento del flujo en cada uno de los tramos se realizaron dos grandes grupos de experimentos. Los experimentos donde el flujo salió por las descargas B Figura 4.13. y los que el flujo salió por una de las descargas A Figura 4.14.

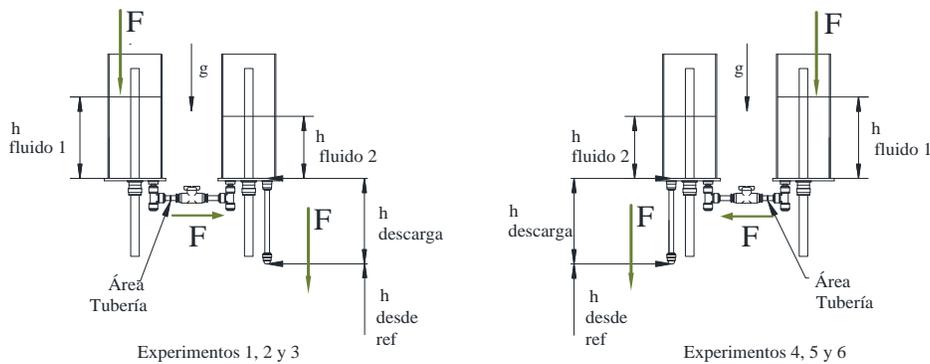


Figura 4.13. "Esquema de experimentos, descargas B."

Se realizó una tanda de experimentos con la configuración que se muestra en la Figura 4.13. donde, para los experimentos 1, 2 y 3, el flujo ingreso por medio de la bomba B1 tramo medio en el tanque T1 con ambas salidas cerradas, el flujo siguió por el "tramo medio suministro" hasta llegar al tanque T3, en este tanque solo permaneció la descarga B abierta, los experimentos 4, 5 y 6 siguieron la misma lógica pero el flujo fue suministrado por la bomba B2 tramo medio ingresando por el tanque T2 y saliendo finalmente por la descarga B del tanque T1.

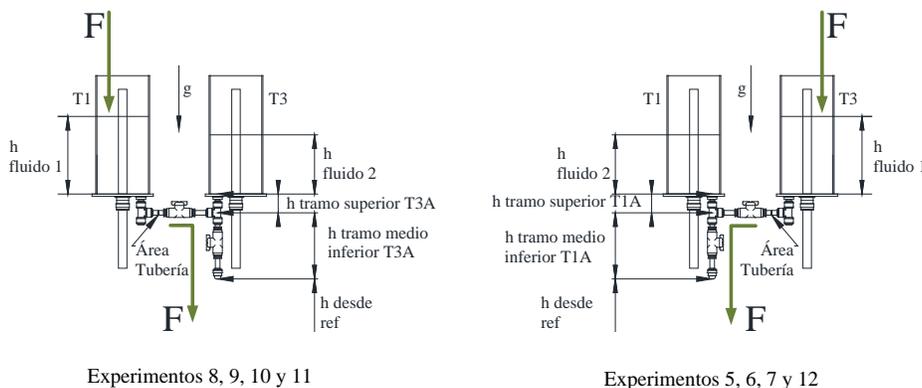


Figura 4.14. "Esquema de experimentos, descargas A"

La última tanda de experimentos fue realizada con la configuración de la Figura 4.14. en donde los primeras 4 experimentos 8, 9, 10 y 11 (el orden de los experimentos no tiene ninguna relación con la tanda de experimentos anteriores, los de las descargas B.) se suministró flujo desde la bomba B1 al tanque T1 con ambas salidas cerradas, el flujo paso por el “tramo medio suministro” hasta llegar al tanque T3 donde solo estuvo abierta la descarga A de dicho tanque, por donde el flujo salió. Para los experimentos 5, 6, 7 y 12 se mantuvo la misma lógica, pero esta vez el flujo fue proporcionado por la bomba B2 tramo medio al tanque T3 y el flujo salió por la descarga A del tanque T1.

Las relaciones de flujo respecto a las alturas obtenidas y referidas a cada uno de los tramos antes descritos fueron obtenidas a partir de los experimentos “descargas A” y “descargas B” Figura 4.14 y Figura 4.13 respectivamente.

Valores tras experimentos “descargas B” (tabla completa Anexo 10):

Tabla 4.7. "Valores descargas B."

E.	Tensión [V]	Flujo [cm^3/s]	h fluido 1 [cm]	h fluido 2 [cm]
1	1,716	21,3179	9	4,5
2	1,732	22,1301	11,5	6,75
3	1,75	23,0393	15	10
4	1,716	26,6537	18,5	13,25
5	1,7	25,8034	10	6
6	1,732	27,5000	17,25	12,25

Valores tras experimentos “descargas A” (tabla completa Anexo 9):

Tabla 4.8. "Valores descargas A."

E.	Tensión [V]	Flujo [cm^3/s]	h fluido 1 [cm]	h fluido 2 [cm]
8	1,732	22,1301	8	4,3
9	1,75	23,0393	10,5	6,5
10	1,766	23,8436	12	8
11	1,782	24,6443	17	12,65
5	1,7	25,8034	8	5,15
6	1,716	26,6537	17	13,25
7	1,732	27,5000	25,2	21
12	1,724	27,0773	17,75	14,4

4.2.3.2.1. Tramo medio suministro

El balance aquí planteado se basó en los experimentos del grupo de “descargas B”.

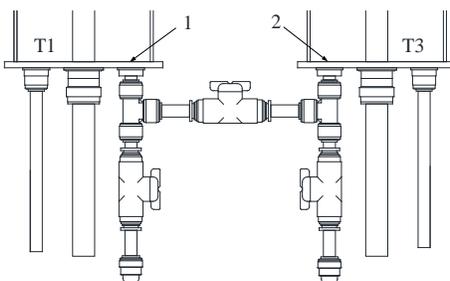


Figura 4.15. "Tramo medio suministro, balance de energía mecánica."

El balance de energía mecánica entre los puntos 1 y 2 se presenta a continuación, donde la carga por elevación y la carga por velocidad son iguales por lo tanto se eliminan. Estos puntos fueron válidos para los primeros 3 experimentos, para los siguientes 3, el punto 1 paso a ser punto 2 y el 2 paso a ser 1.

$$\frac{P_1}{\rho g} = \frac{P_2}{\rho g} + f \frac{LV_{2prom}^2}{2gD} + \frac{\sum K_L V_{2prom}^2}{2g} \quad (4.37)$$

Reemplazando con los valores planteados en la Figura 4.13. se obtuvo.

$$h_{fluido 1} = h_{fluido 2} + F^2 \left(\frac{fL}{2gD a_{tuberia}^2} + \frac{K_L}{2g a_{tuberia}^2} \right) \quad (4.38)$$

$$F = K_{\text{tramo medio suministro}} \sqrt{h_{\text{flujo1}} - h_{\text{flujo2}}} \quad (4.39)$$

Se observó una clara diferencia entre los primeros 3 experimentos de los últimos 3 para la constante $K_{\text{tramo medio suministro}}$, esta diferencia se atribuyó al error del ajuste en las curvas de los flujos. Se promedió los valores obtenidos en la Tabla 4.7. logrando:

$$K_{\text{tramo medio suministro}} = 11,2233 \left[\frac{\text{cm}^3/\text{s}}{\sqrt{\text{cm}}} \right] \quad (4.40)$$

4.2.3.2.2. Tramos medios descargas T1T3 y T3T1

El balance aquí planteado se basó en los experimentos del grupo de “descarga A”.

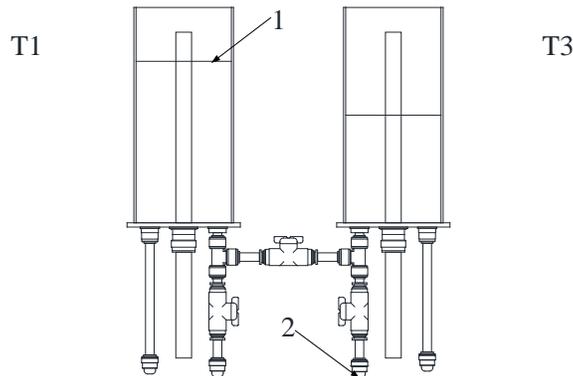


Figura 4.16. "Tramos medios descargas T1T3 y T3T1, balance de energía."

El balance de energía mecánica entre los puntos 1 y 2 se presenta a continuación, donde la carga por presión y velocidad fueron igualadas a 0 en el punto 1, mientras que para el punto 2 la carga por presión fue igualada a 0, es resto de las cargas en el balance existió. La

ubicación de los puntos 1 y 2 fueron válidos para los 4 primeros experimentos, en el resto se cambió el 1 por el 2 y el 2 por el 1.

$$z_1 = a_2 \frac{V_{2prom}^2}{2g} + z_1 + f \frac{LV_{1prom}^2}{2gD} + \frac{\sum K_L V_{1prom}^2}{2g} + \frac{K_L V_{2prom}^2}{2g} \quad (4.41)$$

Reemplazando con los valores planteados en la Figura 4.14. se obtuvo.

$$h_{desde\ ref} + h_{tramo\ inferior\ TA} + h_{tramo\ superior\ TA} + h_{fluido\ 1} = h_{desde\ ref} + F^2 \left(\frac{a_2}{2g a_{tuberia}^2} + \frac{fL}{2gD a_{tuberia}^2} + \frac{\sum K_L}{2g a_{tuberia}^2} + \frac{K_L}{2g a_{boquilla}^2} \right) \quad (4.42)$$

Para los primeros 4 experimentos:

$$F = K_{tramo\ medio\ descarga\ TIT3} \sqrt{h_{tramo\ inferior\ T3A} + h_{tramo\ superior\ T1A} + h_{fluido\ 1}} \quad (4.43)$$

Donde $h_{tramo\ superior\ T1A} = 4,85 [m]$, $h_{tramo\ inferior\ T3A} = 17,05 [m]$, los valores de $h_{fluido\ 1}$ dados por la Tabla 4.8. Nos permitieron encontrar 4 valores para $K_{tramo\ medio\ descarga\ TIT3}$, promediando estos:

$$K_{tramo\ medio\ descarga\ TIT3} = 4,0353 \left[\frac{cm^3/s}{\sqrt{cm}} \right] \quad (4.44)$$

Para los segundos 4 experimentos:

$$F = K_{tramo\ medio\ descarga\ T3T1} \sqrt{h_{tramo\ inferior\ T1A} + h_{tramo\ superior\ T3A} + h_{fluido\ 1}} \quad (4.45)$$

Donde $h_{tramo\ superior\ T3A} = 4,85 [m]$, $h_{tramo\ inferior\ T1A} = 16,95 [m]$ se mantuvieron constantes y los valores de $h_{fluido\ 1}$ dados por la Tabla 4.8. Nos permitieron encontrar 4 valores para $K_{tramo\ medio\ descarga\ T3T1}$, el promedio fue:

$$K_{\text{tramo medio descarga T3T1}} = 4,3307 \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{s} \sqrt{\text{cm}}} \right] \quad (4.46)$$

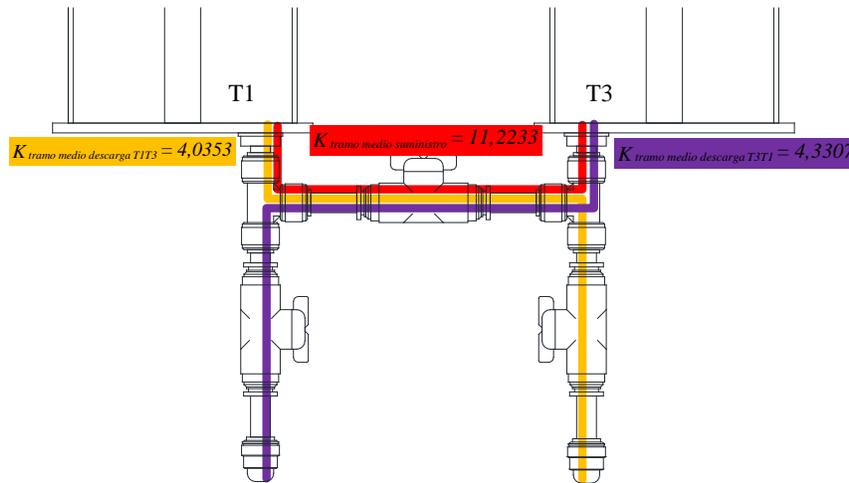
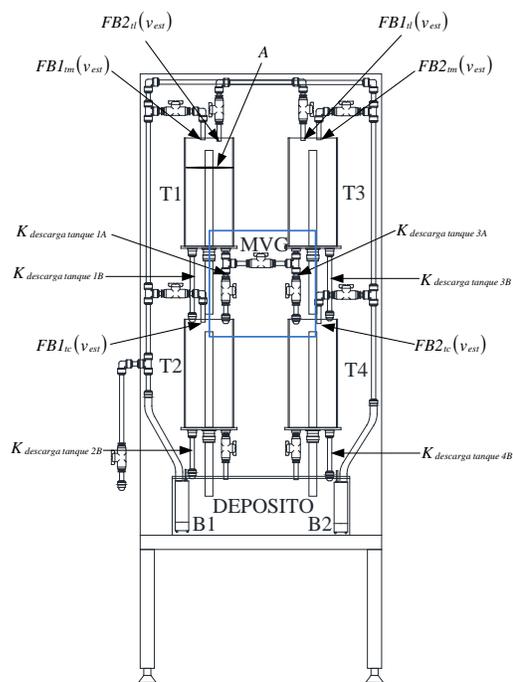


Figura 4.17. "Constante de proporcionalidad de flujos de salida para tanques acoplados en maqueta."



Flujos Bomba B1 $\left[\frac{cm^3}{s} \right]$

Tramo Corto

$$FB1_{dc}(v_{est}) = 125,6\sqrt{v_{est}} - 122 \quad \text{para } 1,2 \leq v_{est} \leq 5$$

Tramo Medio

$$FB1_{m}(v_{est}) = 133,3\sqrt{v_{est}} - 153,3 \quad \text{para } 1,6 \leq v_{est} \leq 5$$

Tramo Largo

$$FB1_{d}(v_{est}) = 128,8\sqrt{v_{est}} - 148,5 \quad \text{para } 1,7 \leq v_{est} \leq 5$$

Flujos Bomba B2 $\left[\frac{cm^3}{s} \right]$

Tramo Corto

$$FB2_{dc}(v_{est}) = 130,9\sqrt{v_{est}} - 123,9 \quad \text{para } 1,2 \leq v_{est} \leq 5$$

Tramo Medio

$$FB2_{m}(v_{est}) = 138,9\sqrt{v_{est}} - 155,3 \quad \text{para } 1,6 \leq v_{est} \leq 5$$

Tramo Largo

$$FB2_{d}(v_{est}) = 135,3\sqrt{v_{est}} - 154,1 \quad \text{para } 1,6 \leq v_{est} \leq 5$$

Constantes de proporcionalidad flujos de salida $\left[\frac{cm^3/s}{\sqrt{cm}} \right]$

Tanque T1

$$K_{descarga\ tanque\ 1A} = 3,8383$$

$$K_{descarga\ tanque\ 1B} = 4,3341$$

$$K_{descarga\ tanque\ 2B} = 4,3124$$

Tanque T3

$$K_{descarga\ tanque\ 3A} = 4,2314$$

$$K_{descarga\ tanque\ 3B} = 4,1539$$

$$K_{descarga\ tanque\ 4B} = 4,5544$$

Tanque T2

Tanque T4

Constantes de proporcionalidad flujos intermedios $\left[\frac{cm^3/s}{\sqrt{cm}} \right]$

$$K_{tramo\ medio\ descarga\ T1T3} = 4,0353$$

$$K_{tramo\ medio\ descarga\ T3T1} = 4,3307$$

$$K_{tramo\ medio\ suministro} = 11,2238$$

Área tanques $\left[cm^2 \right]$

$$A = 129,59061$$

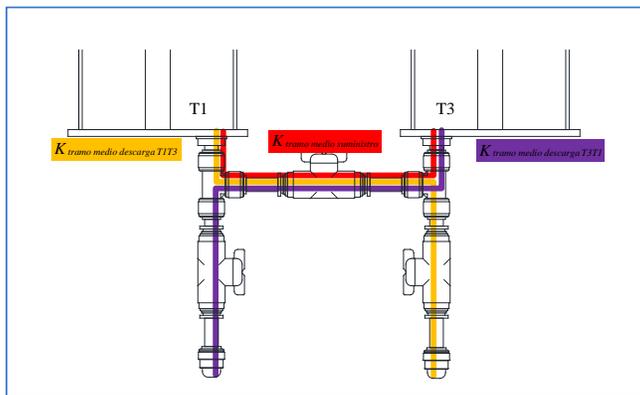


Figura 4.18. "Resumen de flujos y constantes de proporcionalidad."

CAPÍTULO 5 MODELADO DE SISTEMAS

El modelado de sistemas nos permite obtener un conjunto de ecuaciones que describen el comportamiento de un sistema ante diferentes estímulos (Modelo Matemático.)

El método de modelado utilizado fue el analítico, este método proporciona una relación funcional entre la entrada y la salida del proceso, por lo tanto, si conocemos las características de la entrada es posible encontrar la variable de salida. Los modelos surgen a partir de las leyes de la física y química, específicamente conservación de la masa y la energía (lo que se ocupó en este trabajo) [12].

En este capítulo se modelaron 4 subsistemas identificados en la maqueta, siendo estos 4 los más clásicos para el estudio del control y sistemas. Los modelos obtenidos fueron complementados con valores obtenidos experimentalmente.

5.1. Modelo de la dinámica de un tanque por sí solo

Para analizar un tanque por sí solo, se necesitó seleccionar el tanque además de la bomba que suministró el fluido a dicho tanque. En esta ocasión se escogió el tanque T1 suministrado de flujo por medio de la bomba B2 a través del tramo largo, la configuración necesaria se aprecia en la Tabla 5.1. en ella además se encuentran otras maneras en las que se puede realizar el mismo análisis con otros tanques y bomba B2.

Tabla 5.1. "Estado de válvulas para análisis simple de un tanque."

Configuración	Abierta	Cerrada
T1 con B1, tramo medio.	MVB.	MV1, MV2, MV3, MV4, MVA, MVC, MVD, MVE, MVF, MVG.
T1 con B2, tramo largo.	MVF.	MV1, MV2, MV3, MV4, MVA, MVB, MVC, MVD, MVE, MVG.
T3 con B1, tramo largo.	MVC.	MV1, MV2, MV3, MV4, MVA, MVB, MVD, MVE, MVF, MVG.
T3 con B2, tramo medio.	MVE.	MV1, MV2, MV3, MV4, MVA, MVB, MVC, MVD, MVF, MVG.
T2 con B1, tramo corto.	MVA.	MV1, MV2, MV3, MV4, MVB, MVC, MVD, MVE, MVF, MVG.
T4 con B2, tramo corto.	MVD.	MV1, MV2, MV3, MV4, MVA, MVB, MVC, MVE, MVF, MVG.

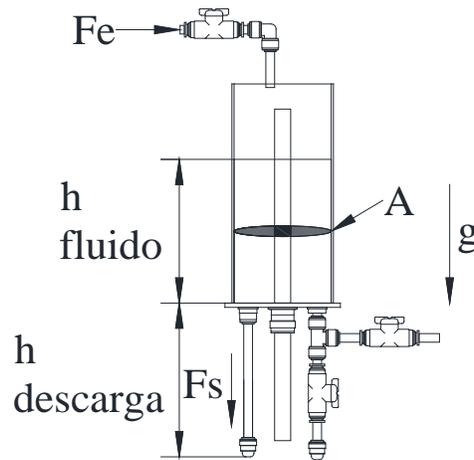


Figura 5.1. "Esquema para análisis tanque simple."

El modelo analítico partió desde un balance de masa aplicado al esquema de la Figura 5.1.

$$G_e(t) - G_s(t) = \frac{d}{dt}(\text{masa acumulada}) \quad (5.1)$$

$$\rho F_e(t) - \rho F_s(t) = \frac{d}{dt}(\rho A h_{\text{fluido}}(t)) \quad (5.2)$$

Dónde:

$G_e(t)$: Flujo másico de entrada.

$G_s(t)$: Flujo másico de salida.

ρ : Densidad de la masa.

$F_e(t)$: Flujo volumétrico de entrada.

$F_s(t)$: Flujo volumétrico de salida.

A : Área transversal del tanque T1.

h_{fluido} : Altura del fluido en tanque T1.

h_{descarga} : Altura de tramo de descarga B tanque T1.

Simplificamos a ambos lados la densidad ya que es misma en todos los casos y nos queda:

$$F_e(t) - F_s(t) = \frac{d}{dt}(A h_{\text{fluido}}(t)) \quad (5.3)$$

$$F_e(t) - F_s(t) = A \frac{d}{dt}(h_{\text{fluido}}(t)) \quad (5.4)$$

evaluadas en el punto de operación)[13]. Al evaluar en torno al punto de operación las variaciones en el tiempo se hacen 0, esto nos permite conocer primer término de la serie, la altura del flujo en estado estable (5.9):

$$y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2) + \left[\frac{\partial f}{\partial x_1} (x_1 - \bar{x}_1) + \frac{\partial f}{\partial x_2} (x_2 - \bar{x}_2) \right] \quad (5.8)$$

$$\bar{h}_{fluido} = \frac{(135,3\sqrt{\bar{v}_{bomba\ 2\ tl}} - 154,1)^2}{K_{descarga\ tanque\ 1B}^2} - h_{descarga} \quad (5.9)$$

$$\frac{d}{dt} h_{fluido}(t) - \bar{h}_{fluido} = \frac{135,3}{2A\sqrt{\bar{v}_{bomba\ 2\ tl}}} (v_{bomba\ 2\ tl}(t) - \bar{v}_{bomba\ 2\ tl}) - \frac{K_{descarga\ tanque\ 1B}}{2A\sqrt{\bar{h}_{fluido} + h_{descarga}}} (h_{fluido}(t) - \bar{h}_{fluido}) \quad (5.10)$$

La ecuación linealizada es válida en el punto de operación y en las cercanías de este, en otras palabras, en pequeñas variaciones en la altura $\Delta h(t)_{fluido} = h_{fluido}(t) - \bar{h}_{fluido}$ y en el voltaje $\Delta v_{bomba\ 2\ tl}(t) = v_{bomba\ 2\ tl}(t) - \bar{v}_{bomba\ 2\ tl}$.

$$\Delta \dot{h}_{fluido}(t) = \frac{135,3}{2A\sqrt{\bar{v}_{bomba\ 2\ tl}}} \Delta v_{bomba\ 2\ tl}(t) - \frac{K_{descarga\ tanque\ 1B}}{2A\sqrt{\bar{h}_{fluido} + h_{descarga}}} \Delta h_{fluido}(t) \quad (5.11)$$

La transformada de Laplace corresponde a una simplificación de las ecuaciones diferenciales lineales de un sistema [12], esta herramienta debe aplicarse en torno a el punto de operación.

$$s\Delta H_{fluido}(s) = \frac{135,3}{2A\sqrt{\bar{v}_{bomba\ 2\ tl}}} \Delta V_{bomba\ 2\ tl}(s) - \frac{K_{descarga\ tanque\ 1B}}{2A\sqrt{\bar{h}_{fluido} + h_{descarga}}} \Delta H_{fluido}(s) \quad (5.12)$$

$$\frac{\Delta H_{fluido}(s)}{\Delta V_{bomba\ 2\ tl}(s)} = \frac{\frac{135,3}{2A\sqrt{\bar{v}_{bomba\ 2\ tl}}}}{\left(s + \frac{K_{descarga\ tanque\ 1B}}{2A\sqrt{\bar{h}_{fluido} + h_{descarga}}} \right)} \quad (5.13)$$

En forma típica:

$$H_{\text{fluido}}(s) = \frac{K}{\tau s + 1} V_{\text{bomba 2 tl}}(s) \quad (5.14)$$

Donde:

$$K = \frac{135,3 \sqrt{h_{\text{fluido}} + h_{\text{descarga}}}}{K_{\text{descarga tanque 1 B}} \sqrt{v_{\text{bomba 2 tl}}}} \quad (5.15)$$

$$\tau = \frac{2A \sqrt{h_{\text{fluido}} + h_{\text{descarga}}}}{K_{\text{descarga tanque 1 B}}} \quad (5.16)$$

Que en diagrama de bloques queda:

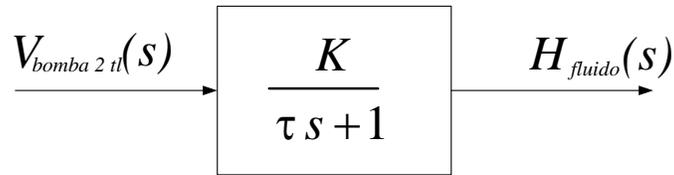


Figura 5.3. "Representación en bloques sistema de primer orden."

De los experimentos obtenidos en el capítulo 4, ocuparemos los referentes al tanque T1 descarga B, suministrado desde la bomba B2 tramo largo, cada uno de los experimentos corresponde un diferente punto de operación. La función de transferencia se sometió a casos.

Área transversal del tanque: 129,59061 [cm²]

Altura de la descarga tanque T1 B: 21,4 [cm]

Tabla 5.2. "Experimentos para tanque T1 desde B1 tramo medio, descarga B."

P.O.	Tensión [v]	$h_{\text{fluido}} [cm]$	$K_{\text{descarga tanque 1 B}} \left[\frac{cm^3/s}{\sqrt{cm}} \right]$
1	1,75	10,25	4,4234
2	1,766	14	4,3197
3	1,782	17	4,2787
4	1,8	19	4,3146

Por medio de los resultados obtenidos en la Tabla 5.2, se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 5.3. "Constantes de funciones de transferencia a diferentes puntos de operación."

P.O.	$K \left[\frac{cm}{v} \right]$	$\tau [s]$
1	130.0796	329,6356
2	140,2330	356,9863
3	146,7904	375,3680
4	148,5633	381,8156

Se observó que para el análisis de cualquier tanque por sí solo, nos entregara una función de transferencia de primer orden, en nuestro caso logramos 4 puntos de operación por lo tanto una función de transferencia por punto de operación.

K corresponde a la ganancia y τ corresponde a la constante de tiempo, ambos valores propios de la función de transferencia en cada uno de los puntos.

5.2. Modelo de la dinámica de dos tanques es cascada.

Para realizar el análisis y obtener el modelo de dos tanques en cascada se escogió la bomba B2, ésta suministro de flujo al tanque T1 que descargo directamente al tanque T2 por medio de la descarga 1B (sin válvula), mientras el tanque T2 descargo por la descarga 2B (sin válvula). En la Tabla 5.4 se muestran más configuraciones para poder realizar el mismo con otros tanques y con la bomba B1.

Tabla 5.4. "Estado de válvulas para análisis de dos tanques en cascada."

Configuración	Abierta	Cerrada
T1 con B1, tramo medio.	MVB	MV1, MV2, MV3, MV4, MVA, MVC, MVD, MVE, MVF, MVG.
T1 con B2, tramo largo.	MVF	MV1, MV2, MV3, MV4, MVA, MVB, MVC, MVD, MVE, MVG.
T3 con B1, tramo largo.	MVC	MV1, MV2, MV3, MV4, MVA, MVB, MVD, MVE, MVF, MVG.
T3 con B2, tramo medio.	MVE	MV1, MV2, MV3, MV4, MVA, MVB, MVC, MVD, MVF, MVG.

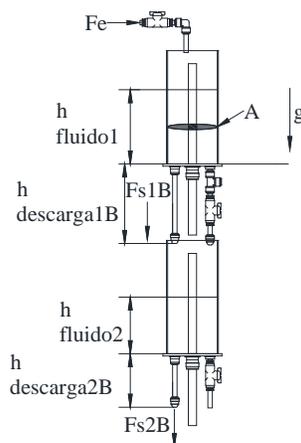


Figura 5.4. "Esquema para análisis de dos tanques en cascada."

Se comenzó con el análisis del tanque T1 y su respectivo balance de masa. El flujo de entrada F_e suministrado por la bomba B2 mediante el tramo largo y el flujo de salida F_{s1B} para la descarga B del tanque T1 con su respectiva constante de proporcionalidad $K_{descarga\ tanque\ 1B}$, en consecuencia se obtuvo el modelo no lineal del tanque T1.

$$\frac{d}{dt}h_{fluido1}(t) = \frac{135,3\sqrt{v_{bomba\ 2\ tl}(t)} - 154,1}{A} - \frac{K_{descarga\ tanque\ 1B}\sqrt{h_{fluido1}(t) + h_{descarga\ 1B}}}{A} \quad (5.17)$$

En torno a un punto de operación, no existe variación de la altura $h_{fluido1}$ por lo tanto:

$$0 = 135,3\sqrt{v_{bomba\ 2\ tl}} - 154,1 - K_{descarga\ tanque\ 1B}\sqrt{\bar{h}_{fluido1} + h_{descarga\ 1B}} \quad (5.18)$$

Por medio de la ecuación (5.18) se logró obtener la altura del tanque T1 en el punto de operación $\bar{h}_{fluido1}$:

$$\bar{h}_{fluido1} = \frac{(135,3\sqrt{v_{bomba\ 2\ tl}} - 154,1)^2}{K_{descarga\ tanque\ 1B}^2} - h_{descarga\ 1B} \quad (5.19)$$

Linealizando en torno al punto de operación y considerando las pequeñas variaciones:

$$\Delta\dot{h}_{fluido1}(t) = \frac{135,3}{2A\sqrt{v_{bomba\ 2\ tl}}} \Delta v_{bomba\ 2\ tl}(t) - \frac{K_{descarga\ tanque\ 1B}}{2A\sqrt{\bar{h}_{fluido1} + h_{descarga\ 1B}}} \Delta h_{fluido1}(t) \quad (5.20)$$

Aplicando la transformada de Laplace y despejando la altura del tanque T1 se obtuvo:

$$H_{fluido1}(s) = \frac{K_1}{\tau_1 s + 1} V_{bomba\ 2\ tl}(s) \quad (5.21)$$

Donde:

$$K_1 = \frac{135,3\sqrt{\bar{h}_{fluido1} + h_{descarga\ 1B}}}{K_{descarga\ tanque\ 1B}\sqrt{v_{bomba\ 2\ tl}}} \quad (5.22)$$

$$\tau_1 = \frac{2A\sqrt{\bar{h}_{fluido 1} + h_{descarga 1B}}}{K_{descarga tanque 1B}} \quad (5.23)$$

Se continuó realizando el balance de energía para el tanque T2, considerando como flujo de entrada hacia dicho tanque F_{s1B} , como flujo de salida F_{s2B} correspondiente a la descarga B del tanque T2 con su respectiva constante de proporcionalidad $K_{descarga tanque 2B}$ para obtener el modelo no lineal del tanque T2.

$$\frac{d}{dt} h_{fluido 2}(t) = \frac{K_{descarga tanque 1B}\sqrt{h_{fluido 1}(t) + h_{descarga 1B}}}{A} - \frac{K_{descarga tanque 2B}\sqrt{h_{fluido 2}(t) + h_{descarga 2B}}}{A} \quad (5.24)$$

Al combinar los modelos no lineales de (5.17) y (5.24) logró representar mediante bloques un único modelo no lineal para dos tanques en cascada.

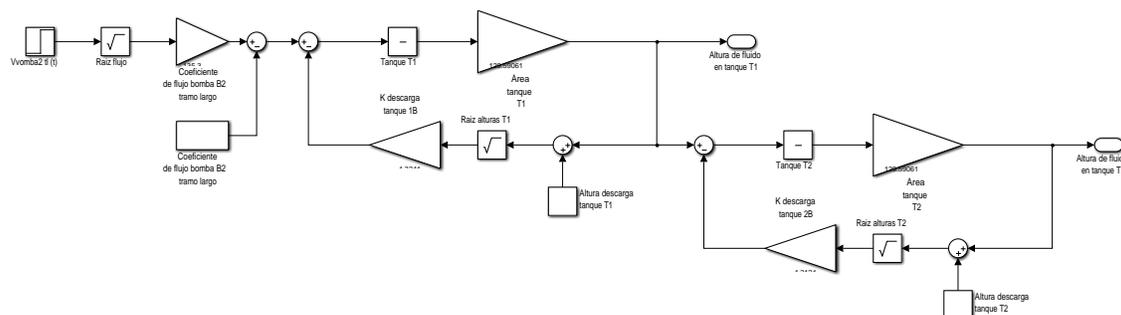


Figura 5.5. "Representación no lineal en bloques de dos tanques en cascada."

En torno a un punto de operación, no existe variación de la altura $h_{fluido 2}$ por lo tanto:

$$0 = K_{descarga tanque 1B}\sqrt{\bar{h}_{fluido 1} + h_{descarga 1B}} - K_{descarga tanque 2B}\sqrt{\bar{h}_{fluido 2} + h_{descarga 2B}} \quad (5.25)$$

De la ecuación (5.25) se logró obtener la altura del tanque T2 $\bar{h}_{fluido 2}$, esta depende de la altura del tanque T1 $\bar{h}_{fluido 1}$:

$$\bar{h}_{fluido 2} = \frac{\left(K_{descarga tanque 1B}\sqrt{\bar{h}_{fluido 1} + h_{descarga 1B}}\right)^2}{K_{descarga tanque 2B}^2} - h_{descarga 2B} \quad (5.26)$$

Linealizando en torno al punto de operación y considerando las pequeñas variaciones:

$$\Delta \dot{h}_{fluido\ 2}(t) = \frac{K_{descarga\ tanque\ 1B}}{2A\sqrt{\bar{h}_{fluido\ 1} + h_{descarga\ 1B}}} \Delta h_{fluido\ 1}(t) - \frac{K_{descarga\ tanque\ 2B}}{2A\sqrt{\bar{h}_{fluido\ 2} + h_{descarga\ 2B}}} \Delta h_{fluido\ 2}(t) \quad (5.27)$$

Aplicando la transformada de Laplace y despejando la altura del tanque T2 se obtuvo:

$$H_{fluido\ 2}(s) = \frac{K_2}{\tau_2 s + 1} H_{fluido\ 1}(s) \quad (5.28)$$

Donde:

$$K_2 = \frac{K_{descarga\ tanque\ 1B} \sqrt{\bar{h}_{fluido\ 2} + h_{descarga\ 2B}}}{K_{descarga\ tanque\ 2B} \sqrt{\bar{h}_{fluido\ 1} + h_{descarga\ 1B}}} \quad (5.29)$$

$$\tau_2 = \frac{2A\sqrt{\bar{h}_{fluido\ 2} + h_{descarga\ 2B}}}{K_{descarga\ tanque\ 2B}} \quad (5.30)$$

Reemplazando (5.21) en (5.30) se obtuvo un modelo de un sistema de segundo orden (modelo de primer orden en serio con otro de primer orden):

$$H_{fluido\ 2}(s) = \frac{K_2}{\tau_2 s + 1} \frac{K_1}{\tau_1 s + 1} V_{bomba\ 2\ tl}(s) \quad (5.31)$$

Que en diagrama de bloques queda:

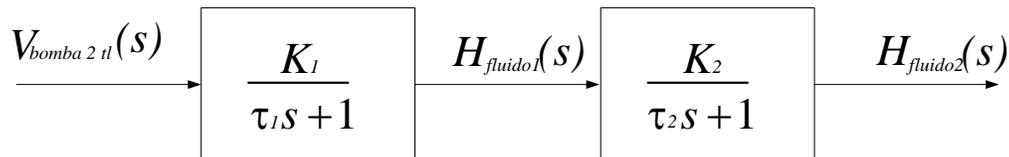


Figura 5.6. "Representación en bloques tipo cascada."

$$\frac{H_{fluido2}(s)}{V_{bomba2tl}(s)} = \frac{K_{12}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (5.32)$$

Donde:

$$K_{12} = K_1 K_2 \quad (5.33)$$

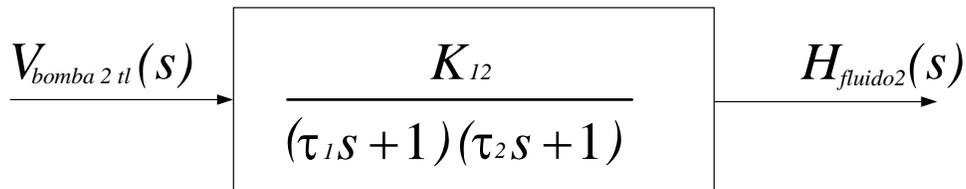


Figura 5.7. "Representación en bloques sistema en cascada en forma típica."

Por medio de las ecuaciones obtenidas del balance de energía mecánica se puede obtener uno o varios puntos de operación, experimentalmente se obtuvo uno y las alturas resultantes fueron $\bar{h}_{fluido1} = 9[cm]$ y $\bar{h}_{fluido2} = 13[cm]$ a partir de una tensión de control desde la bomba B2 por medio del tramo largo de $\bar{v}_{bomba2tl} = 1.732[V]$, por lo tanto el modelo en torno a este punto de operación fue el siguiente: $K_1 = 131,6437[cm/V]$, $K_2 = 0,9479[cm/V]$, $\tau_1 = 331,8791[s]$, $\tau_2 = 314,6008[s]$.

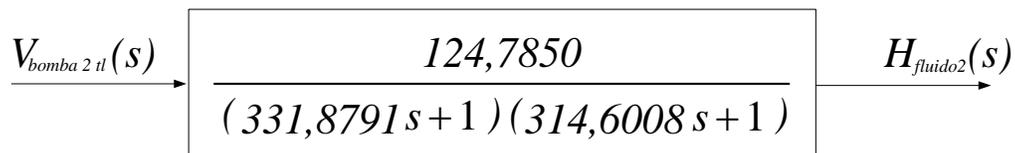


Figura 5.8. "Esquema en bloques de sistema en cascada en punto de operación."

5.3. Modelo de la dinámica de 2 tanques acoplados o comunicantes

Para realizar el análisis del modelo de dos tanques comunicantes fue necesario estudiar la altura del flujo en los dos tanques superiores T1 y T3 considerando la comunicación que existe sobre ellos, además ambas bombas suministraron flujo, la bomba B1 por medio del tramo medio directamente al tanque T1 mientras que la bomba B2 por medio del tramo medio directamente al tanque T3, ambos tanques superiores tuvieron solo las descargas B abiertas. En la Tabla 5.5. se logra detalla otro tipo de configuración para obtener un análisis similar al propuesto.

Tabla 5.5. "Estado de válvulas para análisis de dos comunicantes."

Configuración	Abierta	Cerrada
T1 con B1, T3 con B2 ambas tramo medio.	MVB, MVE, MVG.	MV1, MV2, MV3, MV4, MVA, MVC, MVD, MVF.
T1 con B2, T3 con B1 ambas tramo largo.	MVC, MVF, MVG.	MV1, MV2, MV3, MV4, MVA, MVB, MVD, MVE.

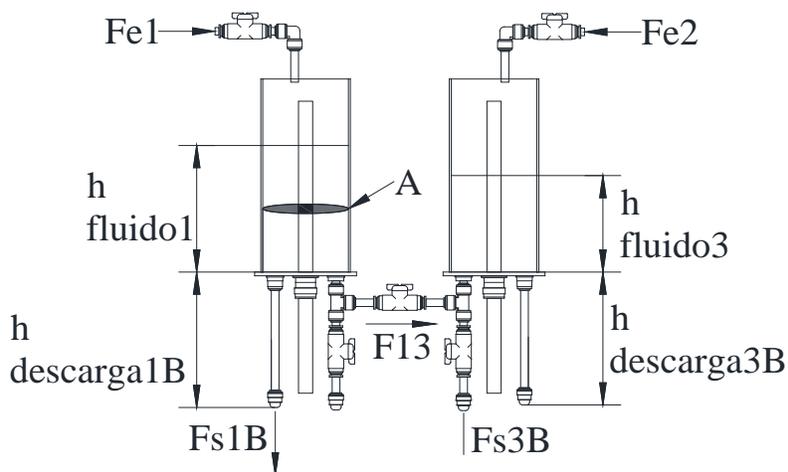


Figura 5.9. "Esquema para análisis de dos tanques comunicantes."

El balance de energía se aplicó a los tanques T1 y T3, se suministró el flujo $F_{e1}(v(t)_{bomba\ 1\ tm})$ directamente al tanque T1 permaneciendo la descarga B abierta y el flujo $F_{e2}(v(t)_{bomba\ 2\ tm})$ directamente al tanque T3 permaneciendo la descarga B abierta, entre los tanque T1 y T3 existe el flujo F_{13} , este flujo depende de las alturas en los tanques ya mencionados y de la constante de proporcionalidad $K_{tramo\ medio\ suministro}$, obteniendo los modelos no lineales en torno al tanque T1 y T3:

Para el tanque T1:

$$\frac{d}{dt}h_{fluido\ 1}(t) = \frac{133,3\sqrt{v_{bomba\ 1\ tm}(t)} - 153,3}{A} - \frac{K_{descarga\ tanque\ 1B}\sqrt{h_{fluido\ 1}(t) + h_{descarga\ 1B}}}{A} - \frac{K_{tramo\ medio\ suministro}\sqrt{h_{fluido\ 1}(t) - h_{fluido\ 3}(t)}}{A} \quad (5.34)$$

Para el tanque T3:

$$\frac{d}{dt}h_{fluido\ 3}(t) = \frac{138,9\sqrt{v_{bomba\ 2\ tm}(t)} - 155,3}{A} + \frac{K_{tramo\ medio\ suministro}\sqrt{h_{fluido\ 1}(t) - h_{fluido\ 3}(t)}}{A} - \frac{K_{descarga\ tanque\ 3B}\sqrt{h_{fluido\ 3}(t) + h_{descarga\ 3B}}}{A} \quad (5.35)$$

Por medio de (5.34) y (5.35) se logró obtener el modelo no lineal en bloques de los tanques acoplados, Figura 5.10.

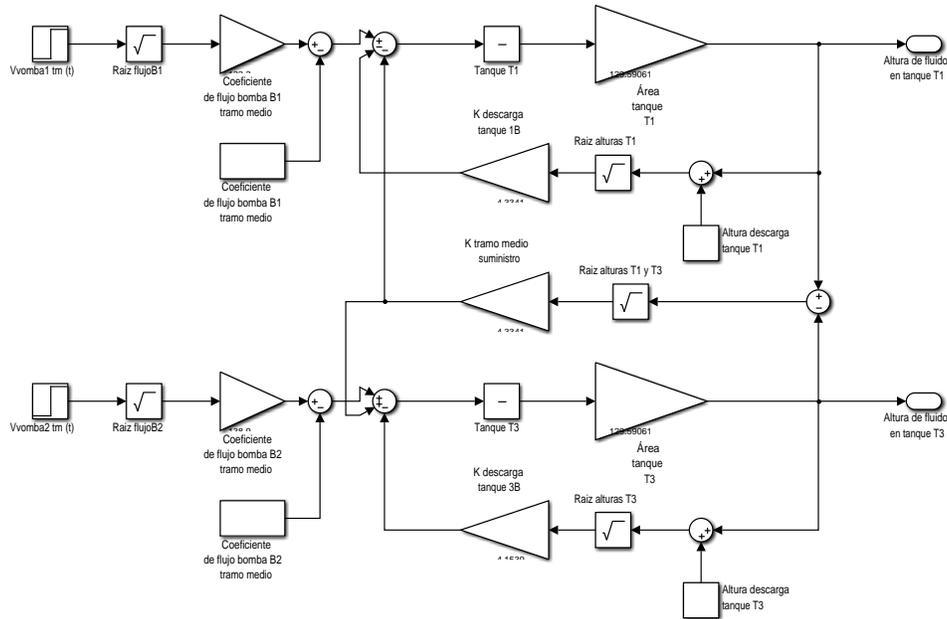


Figura 5.10. "Representación no lineal en bloques de tanques acoplados."

En torno a un punto de operación, no existe variación de la altura tanque para $h_{flujo1}(t)$ y $h_{flujo2}(t)$ por lo tanto:

Para el tanque T1:

$$0 = 133,3\sqrt{\bar{v}_{bomba\ 1\ tm}} - 153,3 - K_{descarga\ tanque\ 1B}\sqrt{\bar{h}_{flujo\ 1} + h_{descarga\ 1B}} - K_{tramo\ medio\ suministro}\sqrt{\bar{h}_{flujo\ 1} - \bar{h}_{flujo\ 3}} \quad (5.36)$$

Para el tanque T3:

$$0 = 138,9\sqrt{\bar{v}_{bomba\ 2\ tm}} - 155,3 + K_{tramo\ medio\ suministro}\sqrt{\bar{h}_{flujo\ 1} - \bar{h}_{flujo\ 3}} - K_{descarga\ tanque\ 3B}\sqrt{\bar{h}_{flujo\ 3} + h_{descarga\ 3B}} \quad (5.37)$$

Por medio de las ecuaciones (5.36), (5.37) y mediante el software Matlab se obtuvo el punto de operación dando como entrada las siguientes tensiones de control a las bombas $\bar{v}_{bomba\ 1\ tm} = 1.8[V]$ y $\bar{v}_{bomba\ 2\ tm} = 1.625[V]$. Se obtuvo como altura en el tanque T1 $\bar{h}_{flujo\ 1} = 9.8618[cm]$ y como la altura en el tanque T3 $\bar{h}_{flujo\ 3} = 9.8482[cm]$.

Linealizando en torno al punto de operación y considerando las pequeñas variaciones:

Para tanque T1:

$$\Delta \dot{h}_{\text{fluido 1}}(t) = \frac{133,3}{2A\sqrt{v_{\text{bomba 1 tm}}}} \Delta v_{\text{bomba 1 tm}}(t) - \left(\frac{K_{\text{descarga tanque 1B}}}{2A\sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} + h_{\text{descarga 1B}}}} + \frac{K_{\text{tramo medio suministro}}}{2A\sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} - \bar{h}_{\text{fluido 3}}}} \right) \Delta h_{\text{fluido 1}}(t) + \frac{K_{\text{tramo medio suministro}}}{2A\sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} - \bar{h}_{\text{fluido 3}}}} \Delta h_{\text{fluido 3}}(t) \quad (5.38)$$

Para tanque T3:

$$\Delta \dot{h}_{\text{fluido 3}}(t) = \frac{138,9}{2A\sqrt{v_{\text{bomba 2 tm}}}} \Delta v_{\text{bomba 2 tm}}(t) + \frac{K_{\text{tramo medio suministro}}}{2A\sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} - \bar{h}_{\text{fluido 3}}}} \Delta h_{\text{fluido 1}}(t) - \left(\frac{K_{\text{descarga tanque 3B}}}{2A\sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 3}} + h_{\text{descarga 3B}}}} + \frac{K_{\text{tramo medio suministro}}}{2A\sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} - \bar{h}_{\text{fluido 3}}}} \right) \Delta h_{\text{fluido 3}}(t) \quad (5.39)$$

Aplicando la transformada de Laplace y despejando la altura de los tanques se obtuvo:

Para tanque T1:

$$H_{\text{fluido 1}}(s) = \frac{K_{11}}{\tau_{11}s + 1} V_{\text{bomba 1 tm}}(s) + \frac{K_{13}}{\tau_{13}s + 1} H_{\text{fluido 3}}(s) \quad (5.40)$$

Donde:

$$K_{11} = \frac{133,3\sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} + h_{\text{descarga 1B}}}\sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} - \bar{h}_{\text{fluido 3}}}}{\sqrt{v_{\text{bomba 1 tm}}}\left(K_{\text{descarga tanque 1B}}\sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} - \bar{h}_{\text{fluido 3}}} + K_{\text{tramo medio suministro}}\sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} + h_{\text{descarga 1B}}}\right)} \quad (5.41)$$

$$\tau_{11} = \frac{2A\sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} + h_{\text{descarga 1B}}}\sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} - \bar{h}_{\text{fluido 3}}}}{K_{\text{descarga tanque 1B}}\sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} - \bar{h}_{\text{fluido 3}}} + K_{\text{tramo medio suministro}}\sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} + h_{\text{descarga 1B}}}} \quad (5.42)$$

$$K_{13} = \frac{K_{\text{tramo medio suministro}} \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} + h_{\text{descarga 1B}}}}{K_{\text{descarga tanque 1B}} \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} - \bar{h}_{\text{fluido 3}}} + K_{\text{tramo medio suministro}} \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} + h_{\text{descarga 1B}}}} \quad (5.43)$$

$$\tau_{13} = \frac{2A \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} + h_{\text{descarga 1B}}} \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} - \bar{h}_{\text{fluido 3}}}}{K_{\text{descarga tanque 1B}} \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} - \bar{h}_{\text{fluido 3}}} + K_{\text{tramo medio suministro}} \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} + h_{\text{descarga 1B}}}} \quad (5.44)$$

Para tanque T3:

$$H_{\text{fluido 3}}(s) = \frac{K_{32}}{\tau_{32}s + 1} V_{\text{bomba 2 m}}(s) + \frac{K_{31}}{\tau_{31}s + 1} H_{\text{fluido 1}}(s) \quad (5.45)$$

Donde:

$$K_{32} = \frac{138,9 \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 3}} + h_{\text{descarga 3B}}} \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} - \bar{h}_{\text{fluido 3}}}}{\sqrt{V_{\text{bomba 2 m}}}} \left(K_{\text{descarga tanque 3B}} \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} - \bar{h}_{\text{fluido 3}}} + K_{\text{tramo medio suministro}} \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 3}} + h_{\text{descarga 3B}}} \right) \quad (5.46)$$

$$\tau_{32} = \frac{2A \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 3}} + h_{\text{descarga 3B}}} \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} - \bar{h}_{\text{fluido 3}}}}{K_{\text{descarga tanque 3B}} \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} - \bar{h}_{\text{fluido 3}}} + K_{\text{tramo medio suministro}} \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 3}} + h_{\text{descarga 3B}}}} \quad (5.47)$$

$$K_{31} = \frac{K_{\text{tramo medio suministro}} \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 3}} + h_{\text{descarga 3B}}}}{K_{\text{descarga tanque 3B}} \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} - \bar{h}_{\text{fluido 3}}} + K_{\text{tramo medio suministro}} \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 3}} + h_{\text{descarga 3B}}}} \quad (5.48)$$

$$\tau_{31} = \frac{2A \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 3}} + h_{\text{descarga 3B}}} \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} - \bar{h}_{\text{fluido 3}}}}{K_{\text{descarga tanque 3B}} \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 1}} - \bar{h}_{\text{fluido 3}}} + K_{\text{tramo medio suministro}} \sqrt{\bar{h}_{\text{fluido 3}} + h_{\text{descarga 3B}}}} \quad (5.49)$$

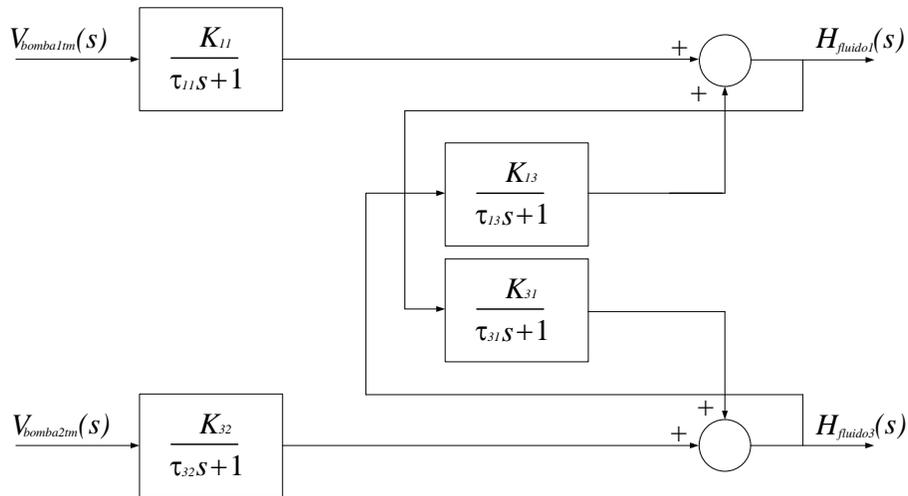


Figura 5.11. "Representación en bloques de dos tanques comunicantes."

Gracias a los coeficientes de la maqueta obtenidos de los balances de energía mecánica y por medio del punto de operación obtenido mediante el uso de Matlab, se logró obtener un modelo de los tanques acoplados en torno a dicho punto de operación, para lograrlo se consideraron los siguientes datos:

Constantes de proporcionalidad de las descargas de los tanques:

$$K_{descarga\ tanque\ 1B} = 4.3341 \left[\frac{cm^3/s}{\sqrt{cm}} \right]$$

$$K_{descarga\ tanque\ 3B} = 4.1539 \left[\frac{cm^3/s}{\sqrt{cm}} \right]$$

$$K_{tramo\ medio\ suministro} = 11.2233 \left[\frac{cm^3/s}{\sqrt{cm}} \right]$$

Alturas en tanques y de sus respectivos tramos de descarga:

$$\bar{h}_{fluido\ 1} = 9.8618 [cm]$$

$$\bar{h}_{fluido\ 3} = 9.8482 [cm]$$

$$h_{descarga\ 1B} = 21.4 [cm]$$

$$h_{descarga\ 3B} = 21 [cm]$$

Voltajes de control en bombas y área transversal de los tanques:

$$V_{bomba\ 1\ tm} = 1.8[V]$$

$$V_{bomba\ 2\ tm} = 1.625[V]$$

$$A = 129.59061[cm^2]$$

Representación en bloques del sistema de tanques acoplados:

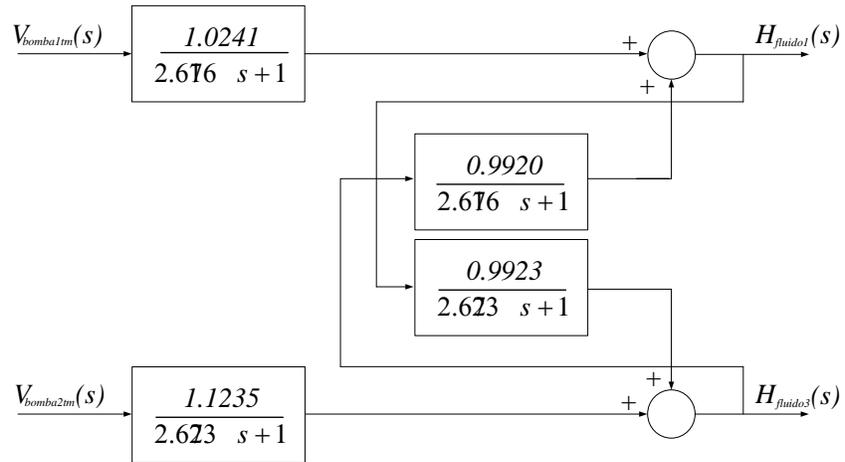


Figura 5.12. "Representación en bloques sistema de tanques acoplados."

CAPÍTULO 6 TANQUES ACOPLADOS Y DESACOPLADORES

La finalidad de obtener los modelos analíticos de los subsistemas proporcionados por la maqueta es la de controlar una o varias variables que se encuentran en dichos modelos, siendo las alturas de los tanques las variables de interés.

Una vez obtenido el modelo de los tanques acoplados fue necesario realizar una técnica de desacopladores [14] para “desacoplar matemáticamente el sistema” y este se comportará como dos tanques independientes, condición mínima para aplicar control de manera adecuada al sistema.

6.1. Sistema Acoplado

Tras mucha experimentación en lazo abierto y simulación de los tanques acoplados se logró observar algunas limitaciones de la maqueta además de lo sensible que puede llegar a, ya que, para variaciones muy pequeñas en la tensión aplicada desde la estación de trabajo, las alturas obtenidas en los tanques fueron muy importantes incluso hasta llegar al desborde de los tanques, toda la experimentación realizada en torno a un punto de operación y en lazo abierto.

A continuación, se muestran 3 experimentos, cada uno duró 4000 [s], ambas bombas suministraron flujo, la bomba B1 directamente al tanque T1 a través del tramo medio y la bomba B2 directamente al tanque T3 a través del tramo medio, cada uno de los tanques solo descargó por las descargas B, entre los segundos 0[s] y 2000[s] la válvula MVG se mantuvo cerrada por lo tanto el comportamiento de las alturas en los tanques fue la de dos tanques independientes, luego desde el segundo 2000[s] hasta el 4000[s] se abrió la válvula MVG permitiendo la existencia del acople.

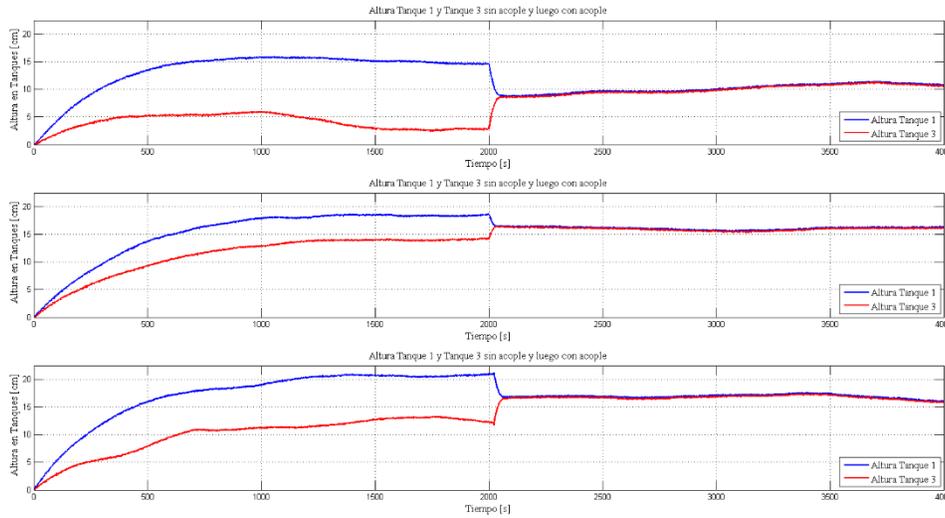


Figura 6.1. "Experimentos con y sin acople."

En la Figura 6.1, se realizaron tres experimentos todos sometidos a voltajes constantes aplicados a las bombas, para el experimento 1 se proporcionó desde la estación 1.8 [V] y 1.725 [V] a las bombas B1 y B2 respectivamente ambas en tramo medio, para el experimento 2 se proporcionó 1.825 [V] y 1.75 [V] a las bombas B1 y B2, por ultimo para el experimento 3 se proporcionó 1.835 [V] y 1.745 [V] a las bombas B1 y B2.

Por medio de los experimentos y en complemento con simulaciones, se logró apreciar que para tiempos inferiores a los 2000 [s] las alturas en lazo abierto eran muy diferentes entre ellas y a partir del segundo 2000 [s] estas alturas muy rápidamente convergieron en un punto, esta convergencia se mantuvo incluso en las pequeñas variaciones de altura en los estanques propias del sistema.

6.2. Desacopladores

Modelo analítico de los tanques T1 y T3 acoplados obtenidos de las ecuaciones (5.40) y (5.45) se observó claramente que la altura del tanque T1 ($H_{fluido 1}(s)$) se ve afectada por la tensión de control de la bomba 1 ($V_{bomba 1 m}(s)$) y la altura del tanque T3 ($H_{fluido 3}(s)$), por otro lado la altura del tanque T3 ($H_{fluido 3}(s)$) se ve afectada por la tensión de control de la

bomba B2 ($V_{bomba\ 2\ tm}(s)$) y la altura del tanque T1 ($H_{fluido\ 1}(s)$), para lograr configurar nuestros desacopladores de manera más adecuada debemos dejar las alturas de los tanques T1 y T3 solo en función de las tensiones de control de las bombas B1 y B2 para esto:

$$H_{fluido\ 1}(s) = G_{11}(s)V_{bomba\ 1\ tm}(s) + G_{13}(s)H_{fluido\ 3}(s) \quad (6.1)$$

$$H_{fluido\ 3}(s) = G_{32}(s)V_{bomba\ 2\ tm}(s) + G_{31}(s)H_{fluido\ 1}(s) \quad (6.2)$$

Donde provenientes del capítulo anterior:

$$G_{11}(s) = \frac{K_{11}}{\tau_{11}s + 1} \quad (6.3)$$

$$G_{13}(s) = \frac{K_{13}}{\tau_{13}s + 1} \quad (6.4)$$

$$G_{32}(s) = \frac{K_{32}}{\tau_{32}s + 1} \quad (6.5)$$

$$G_{31}(s) = \frac{K_{31}}{\tau_{31}s + 1} \quad (6.6)$$

Reemplazando (6.2) en (6.1) y luego (6.1) en (6.2) se obtuvo:

$$H_{fluido\ 1}(s) = H_{11}(s)V_{bomba\ 1\ tm}(s) + H_{12}(s)V_{bomba\ 2\ tm}(s) \quad (6.7)$$

$$H_{fluido\ 3}(s) = H_{31}(s)V_{bomba\ 1\ tm}(s) + H_{32}(s)V_{bomba\ 2\ tm}(s) \quad (6.8)$$

Donde:

$$H_{11}(s) = \frac{G_{11}}{1 - G_{13}G_{31}}(s) \quad (6.9)$$

$$H_{12}(s) = \frac{G_{13}G_{32}}{1 - G_{13}G_{31}}(s) \quad (6.10)$$

$$H_{31}(s) = \frac{G_{11}G_{31}}{1 - G_{13}G_{31}}(s) \quad (6.11)$$

$$H_{32}(s) = \frac{G_{32}}{1 - G_{13}G_{31}} \quad (6.12)$$

Gracias al arreglo algebraico realizado previamente las alturas de los tanques T1 y T3 ambas por separado solo se ven afectadas por las bombas B1 y B2 (6.7) y (6.8) Figura 6.2., esto nos permite visualizar más claramente el acople que en las ecuaciones (6.1) y (6.2) [14].

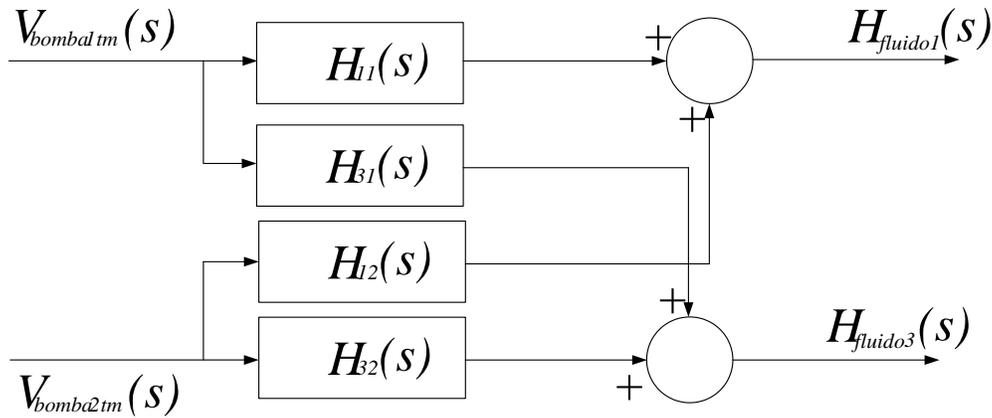


Figura 6.2. "Representación en bloques de modelo acoplado."

Al realizar una variación en $V_{bomba\ 2\ tm}(s)$ se espera un cambio en $H_{fluido\ 3}(s)$ y a la vez se espera que $H_{fluido\ 1}(s)$ permanezca inalterada (sistema sin acople), en la práctica logramos ver que esto no es posible tal cual se aprecia en Figura 6.2. para evitar cambios en $H_{fluido\ 1}(s)$, se debe cumplir que:

$$H_{11}(s)V_{bomba\ 1\ tm}(s) + H_{12}(s)V_{bomba\ 2\ tm}(s) = 0 \quad (6.13)$$

Despejando $V_{bomba\ 1\ tm}(s)$:

$$V_{bomba\ 1\ tm}(s) = -\frac{H_{12}}{H_{11}}(s)V_{bomba\ 2\ tm}(s) \quad (6.14)$$

Por otra parte, se deseamos que $H_{fluido\ 3}(s)$ se vea inalterada ante un cambio o variación en $V_{bomba\ 1\ m}(s)$ se debe cumplir:

$$H_{31}(s)V_{bomba\ 1\ m}(s) + H_{32}(s)V_{bomba\ 2\ m}(s) = 0 \quad (6.15)$$

Despejando $V_{bomba\ 2\ m}(s)$:

$$V_{bomba\ 2\ m}(s) = -\frac{H_{31}(s)}{H_{32}(s)}V_{bomba\ 1\ m}(s) \quad (6.16)$$

Las ecuaciones (6.14) y (6.16) deben anteponerse al acople y estas vienen a ser nuestros desacopladores a nuestro sistema de tanques acoplados, por lo tanto el sistema codificado y con implementación de desacopladores se muestra en la Figura 6.3.

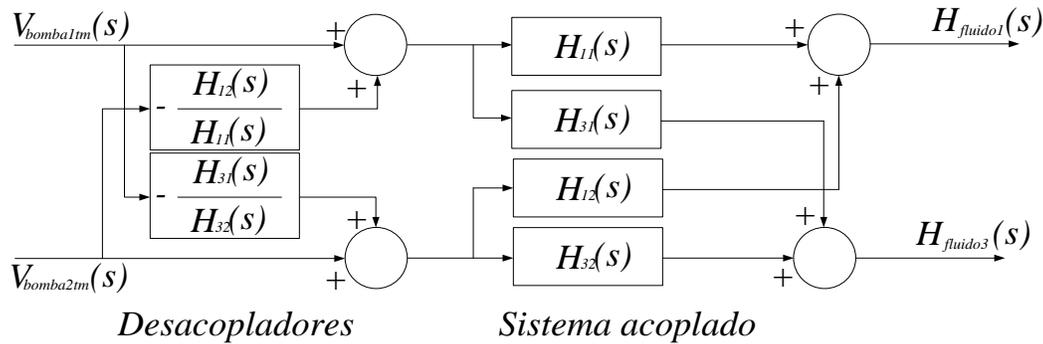


Figura 6.3. "Representación en bloques, implementación des acopladores."

Una vez aplicado los desacopladores se observó claramente que la altura del tanque T1 depende solamente del flujo proporcionado por la bomba B1, mientras que la altura del tanque T3 depende solamente del flujo proporcionado por la bomba B2:

$$H_{fluido\ 1}(s) = \left(H_{11}(s) - \frac{H_{31}H_{12}(s)}{H_{32}} \right) V_{bomba\ 1\ m}(s) \quad (6.17)$$

$$H_{fluido\ 3}(s) = \left(H_{32}(s) - \frac{H_{31}H_{12}(s)}{H_{11}} \right) V_{bomba\ 2\ m}(s) \quad (6.18)$$

El modelo de tanques acoplados en torno al punto de operación obtenido en el capítulo 5.3, escrito en base a la estructura de la Figura 6.3 e incorporando los respectivos desacopladores obtenidos en (6.14) y (6.16):

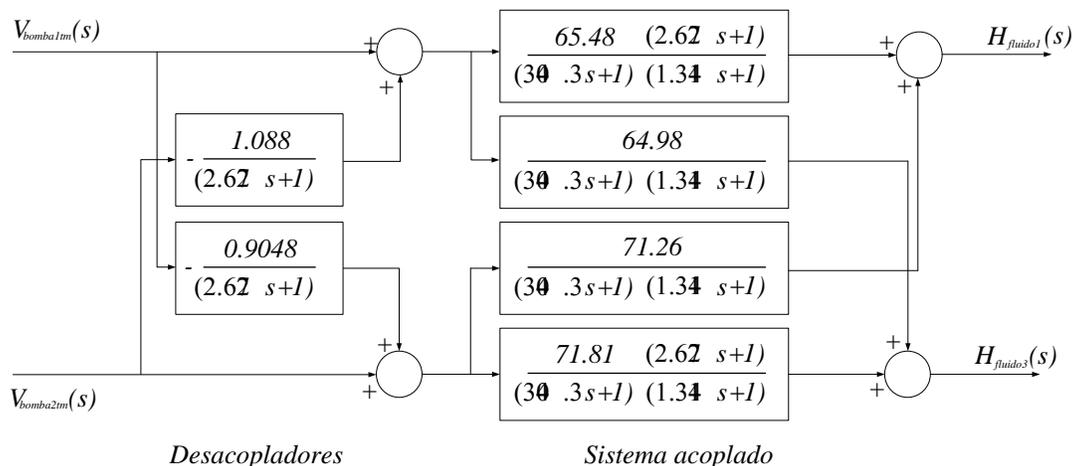


Figura 6.4. "Representación de tanques acoplados en torno a un punto de operación con desacopladores incorporados."

Por medio de la implementación de los desacopladores y en torno al punto de operación, finalmente se logró obtener dos funciones de transferencia para las alturas de los tanques T1 y T3, donde cada altura depende única y exclusivamente de la tensión de control de las bombas B1 y B2 respectivamente.

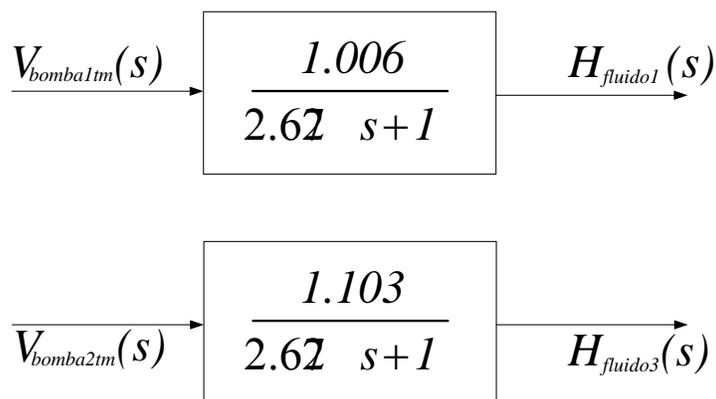


Figura 6.5. "Sistema de tanques desacoplado."

Se idearon experimentos con la finalidad de ver el comportamiento del sistema de tanques acoplados ante un paso a la entrada previo a los desacopladores y otro sin incorporar desacopladores, para el primer caso este paso fue de $0.1[V]$ aplicado desde la estación de trabajo solo a la bomba B1, ambas bombas originalmente estuvieron operando en régimen estacionario a una tensión constante de $1.7[V]$ desde la estación, en el segundo $2000[V]$ ocurrió el paso previamente descrito.

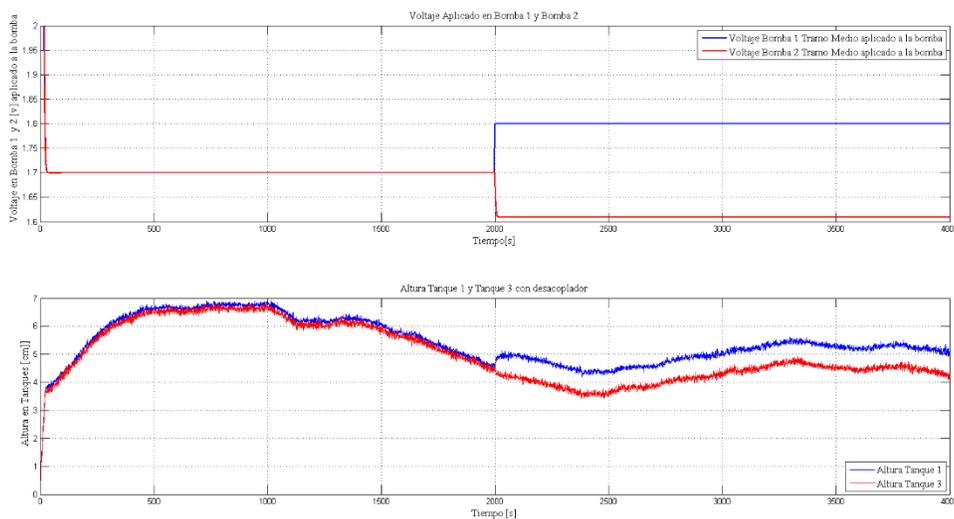


Figura 6.6. "Tanques acoplados con incorporación de desacopladores."

Justo al momento de aplicar el paso desde la estación a la bomba B1 el desacoplador que va conectado a la bomba 2 hizo caer la tensión que estaba aplicada a la bombas B2 hasta un valor de $1.6095[V]$, esta acción del desacoplador hizo que se mantuviera inalterable la dinámica en la altura del Tanque T3 mientras que solo la altura del tanque T1 experimento un cambio en su dinámica. Claramente el uso de los desacopladores fue exitoso, pero lamentablemente en lazo abierto las variaciones efectivas fueron de valores muy bajos, esto para que los tanques en estado estable no se desbordaran ni para que su nivel no logre despegarse del fondo de dichos tanques.

Al replicar la misma variación de tensión aplicado desde la estación de trabajo a la bomba B1 pero sin la incorporación de los desacopladores, no se compenso negativamente el cambio en la tensión aplicada a la bomba B2 por lo tanto esta siguió operando con las mismas condiciones. Se apreció que, frente a una variación tan pequeña en una de las entradas, ambas alturas en los tanques subieron considerablemente y ambas convergiendo casi a la misma altura bordeando los $16[cm]$ (los tanques como máximo permiten una altura de $25[cm]$.)

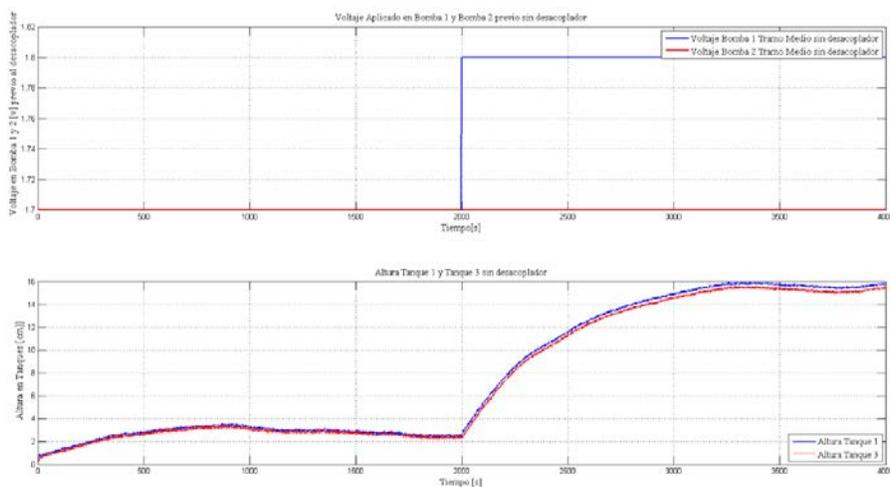


Figura 6.7. "Tanques acoplados sin la incorporación de desacopladores."

CONCLUSIONES

Las curvas de flujo para cada bomba y tramos identificados dependen de la tensión proporcionada desde la estación de trabajo, su dinámica corresponde a la de una raíz cuadrada multiplicada por un coeficiente de proporcionalidad, tal cual se observa en la bibliografía consultada. Esto aporta un componente no lineal a los sistemas estudiados.

Los flujos proporcionados dependientes de la bomba y el tramo poseen una zona muerta para valores bajos de tensión, esto se debe a que bajo esas tensiones pequeñas el flujo impulsado por bomba no es suficiente para superar la carga por elevación, ni las pérdidas en las cargas proporcionadas por la estructura de la maqueta.

Por medio de un balance de energía mecánica entre dos puntos combinado con experimentación es posible encontrar las ecuaciones de flujos de salida y comunicación en los tanques, estas ecuaciones involucran una constante de proporcionalidad y una raíz cuadrada que aporta otra componente no lineal a los sistemas estudiados. Las constantes de proporcionalidad dependen directamente de las propiedades del fluido y las características de la maqueta (tuberías, accesorios, válvulas etc.). La raíz cuadrada para el caso de las descargas depende de la altura del fluido en el tanque estudiado sumada a la longitud de la descarga, mientras que la raíz involucrada en el conducto de comunicación depende de la diferencia entre las alturas de los tanques en estudio.

Por medio de un balance de masa y los flujos de entrada y salida identificados es posible obtener modelos no lineales de los subsistemas provenientes de la maqueta de tanques acoplados. Estos modelos fueron linealizados mediante el uso de la serie de Taylor en torno a un punto de operación por lo tanto funcionan correctamente en las cercanías de dicho punto.

El modelo de tanques acoplados es el más complejo. En él se aplicó la técnica de desacopladores, pero no fue posible desacoplar completamente ya que por medio de experimentos en laso abierto y en estado estable se concluyó que el sistema es muy sensible a pequeñas variaciones de tensión proporcionados desde la estación de trabajo. Es posible aplicar desacopladores y ser funcional, pero solo es aplicable para diferencias muy

pequeñas respecto de la altura de los tanques, el modelo obtenido fue validado ya que el desacoplador se obtiene por medio del modelo obtenido logrando un buen desempeño considerando las restricciones mencionadas previamente.

Por medio de experimentación y simulación con observó que las alturas en los tanques acoplados siempre se mantienen muy similares, prácticamente iguales a pesar de que los flujos de entrada fueran diferentes e incluso en la ausencia de uno de los flujos.

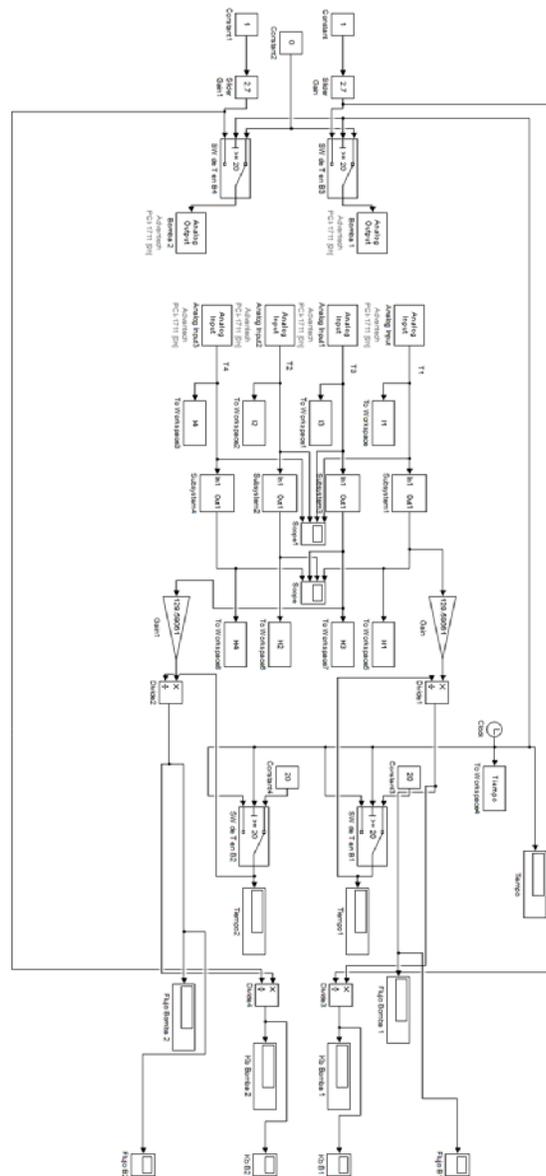
ANEXOS

Anexo 1. "Voltaje desde estación y terminales de bombas."

Voltaje desde estación [V]	Voltaje en terminales de bomba [V]	
	Bomba 1	Bomba 2
0	1,518	1,513
0,1	1,517	1,513
0,2	1,517	1,513
0,3	1,523	1,514
0,4	2	1,95
0,5	2,48	2,44
0,6	2,99	2,94
0,7	3,47	3,42
0,8	3,96	3,91
0,9	4,43	4,39
1	4,92	4,87
1,1	5,4	5,34
1,2	5,87	5,82
1,3	6,34	6,29
1,4	6,8	6,77
1,5	7,3	7,25
1,6	7,78	7,72
1,7	8,25	8,2
1,8	8,72	8,68
1,9	9,2	9,15
2	9,66	9,62
2,1	10,14	10,1
2,2	10,61	10,56
2,3	11,08	11,04
2,4	11,55	11,51
2,5	12,02	11,99
2,6	12,51	12,46
2,7	12,98	12,94
2,8	13,46	13,42
2,9	13,94	13,9
3	14,42	14,38
3,1	14,9	14,86
3,2	15,37	15,33
3,3	15,85	15,81
3,4	16,32	16,29
3,5	16,8	16,77
3,6	17,29	17,24
3,7	17,77	17,72
3,8	18,24	18,2
3,9	18,72	18,68

4	19,2	19,16
4,1	19,68	19,64
4,2	20,16	20,12
4,3	20,64	20,6
4,4	21,11	21,07
4,5	21,59	21,55
4,6	22,06	22,03
4,7	22,54	22,51
4,8	23,02	22,99
4,9	23,5	23,47
5	23,97	23,95

Anexo 2. "Programa utilizado para la detección de los flujos en Matlab Simulink."



Anexo 3. "Experimentos para obtener flujos en bomba B1."

Hay que considerar que el nivel del tanque de depósito fue de 3[cm] desde arriba hacia abajo además los experimentos se realizaron con ambas bombas funcionando simultáneamente.

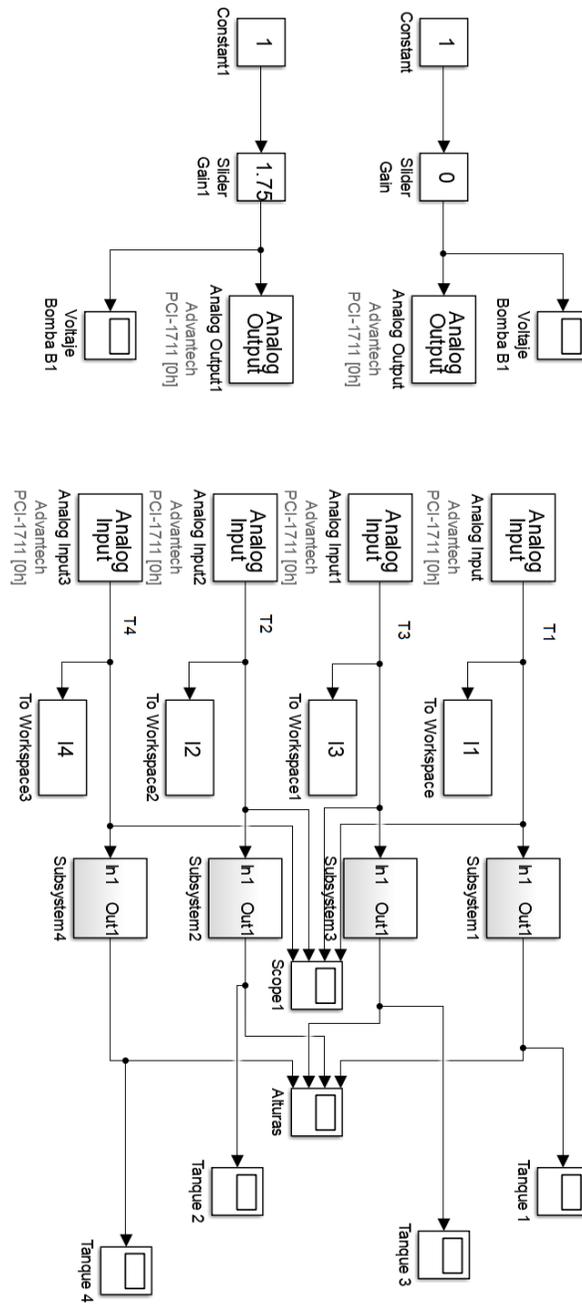
Bomba 1												
T. Corto												
V. [V]	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	Promedio D. Est.	
F. [cm³/s]	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	Promedio D. Est.	
1,2	11,4934	11,9017	12,2175	11,9372	11,9441	11,8527	12,0243	12,4992	12,8749	12,4692	12,12142	0,3987
1,5	35,5481	35,7611	35,6165	35,6544	35,5084	35,5008	35,4749	35,7159	35,7914	35,8899	35,64614	0,1409
2	54,9359	55,3064	55,6669	55,5655	55,9523	55,9228	55,9154	56,1869	55,979	56,0545	55,74856	0,3851
2,5	75,4608	74,8766	75,6672	76,0628	76,2964	76,334	76,4306	76,3292	76,3249	76,5508	76,03333	0,5332
3	94,5126	95,5435	96,0996	96,1021	96,1219	96,1962	96,2513	96,4588	96,5116	96,3606	96,01582	0,5923
3,5	112,5594	112,607	113,25	113,49	113,794	113,791	113,919	113,85	113,673	113,737	113,46691	0,5043
4	129,7263	129,232	129,436	129,672	129,485	129,56	129,441	129,075	129,255	129,264	129,41461	0,2074
4,5	145,3592	144,67	144,602	144,867	144,869	144,783	144,943	144,89	145,114	145,387	144,94847	0,2645
5	157,783	157,697	157,461	157,521	157,776	157,462	157,54	157,57	157,856	157,786	157,64524	0,1501
T. Medio												
F. [cm³/s]	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	Promedio D. Est.	
1,6	10,6689	10,7788	10,8642	10,9015	10,9378	10,8676	10,6947	10,8451	10,9881	11,0065	10,85532	0,1136
2	34,5901	35,6548	35,9115	35,7618	35,5073	35,5278	35,7961	35,9467	36,0175	36,0248	35,67384	0,4241
2,5	59,4574	59,3171	59,6331	59,86	60,2133	60,1633	59,807	60,2347	60,416	60,6271	59,9729	0,4267
3	79,8793	81,2178	81,1581	81,3003	80,8753	80,5843	81,0169	80,7948	81,105	81,0703	80,90021	0,4171
3,5	97,9271	98,4928	98,4169	98,3548	98,4636	98,4492	98,3296	98,2693	98,3376	98,3596	98,34005	0,1608
4	114,0205	113,256	113,161	113,575	113,55	113,387	113,46	113,772	113,789	113,812	113,57821	0,2711
4,5	130,0162	128,421	128,377	128,951	128,904	128,599	128,764	129,111	129,393	129,1	128,96358	0,4886
5	141,5527	140,978	141,277	141,6	141,399	141,281	141,261	141,422	141,705	141,801	141,42766	0,2441
T. Largo												
F. [cm³/s]	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	Promedio D. Est.	
1,7	15,8737	15,7503	15,7027	15,412	15,6332	15,8029	15,7915	15,1511	14,9802	15,3886	15,54862	0,303
2	32,1324	33,1794	33,3037	33,1374	33,4454	33,6293	33,7195	33,732	33,6034	33,5937	33,34762	0,4775
2,5	55,8946	57,9332	58,0189	58,1701	58,1227	58,1158	58,03	58,3	58,3882	58,2721	57,92456	0,7268
3	75,7949	76,8896	77,1935	77,2287	77,1019	77,2766	77,171	77,2333	77,3091	77,5218	77,07204	0,4762
3,5	93,011	94,4418	94,2467	94,2914	94,2944	94,3151	94,4401	94,4555	94,1136	94,2561	94,18657	0,4264
4	109,4367	109,433	109,874	109,619	109,555	109,365	109,457	109,611	109,413	109,44	109,52038	0,1509
4,5	123,9986	123,939	124,43	124,224	124,368	124,258	124,444	124,576	124,679	124,828	124,37448	0,2817
5	135,8964	135,699	136,02	136,551	136,479	136,517	136,527	136,54	136,434	136,927	136,35905	0,3696

Anexo 4. "Experimentos para obtener flujos en bomba B2."

Hay que considerar que el nivel del tanque de depósito fue de 3[cm] desde arriba hacia abajo además los experimentos se realizaron con ambas bombas funcionando simultáneamente.

Bomba 2												
V. [V]	T. Corto										Promedio D. Est.	
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10		
1,2	16,8543	16,4632	16,4626	16,8482	17,1413	17,105	17,6926	17,527	17,7445	17,5977	17,14364	0,4847
1,5	37,1542	37,5965	37,7669	37,9915	37,9697	38,0754	38,2276	38,3581	38,3048	38,7302	38,01749	0,44
2	62,6393	62,4431	62,2336	61,9375	61,927	61,9647	61,9625	61,9794	62,2424	61,9267	62,12562	0,2335
2,5	83,5493	82,7909	83,0332	82,821	82,7872	82,5121	82,5589	82,6754	82,7063	82,5952	82,80295	0,3025
3	103,0298	103,025	103,272	103,433	103,569	103,524	103,523	103,432	103,529	103,518	103,38546	0,2065
3,5	121,7576	120,605	120,996	121,39	121,643	121,717	122,136	121,881	121,525	121,82	121,54705	0,4511
4	139,6218	138,596	138,672	138,612	138,421	138,631	138,495	138,431	138,605	138,164	138,62482	0,381
4,5	156,3441	154,441	154,43	154,417	154,273	154,326	154,592	154,725	154,571	154,678	154,67959	0,6028
5	168,4205	166,685	166,415	166,124	166,6	166,382	166,478	167,047	167,04	165,594	166,6784	0,7445
T. Medio												
F. [cm^3/s]												
1,6	14,2036	14,2416	14,8666	15,1275	15,2966	15,6125	15,5025	15,437	15,4972	15,4533	15,12384	0,5217
2	43,0424	42,1955	42,1192	42,3097	41,8355	42,2475	42,0699	42,2868	42,2785	42,4064	42,27914	0,3116
2,5	68,8032	66,2826	66,5254	66,726	66,6491	66,7605	66,8944	66,8931	67,2186	67,2714	67,00243	0,6985
3	89,0975	88,6103	88,5886	88,4198	88,2721	88,3181	88,2838	88,1635	87,816	88,5492	88,41189	0,3368
3,5	107,7452	106,744	106,864	106,623	106,65	106,681	106,459	106,541	106,507	106,522	106,73348	0,3759
4	124,7715	123,252	123,554	123,462	123,216	123,13	123,305	123,386	123,463	123,641	123,51807	0,4677
4,5	140,9786	139,318	139,43	139,533	139,502	139,522	139,658	139,587	139,767	139,609	139,69038	0,4689
5	153,0134	150,292	150,232	150,727	150,42	150,608	151,502	150,531	149,741	149,456	150,65223	0,9968
T. Largo												
F. [cm^3/s]												
1,6	11,0257	11,9402	11,7057	11,5656	11,3293	11,3222	11,0925	11,1821	11,4026	11,8252	11,43911	0,3112
2	37,8489	38,5208	38,5035	38,1638	38,1617	38,6399	38,6992	38,8747	39,0491	38,8461	38,53077	0,3747
2,5	62,0551	62,8465	62,719	63,1823	62,9573	62,9005	63,0244	63,0224	63,087	62,9348	62,87293	0,3148
3	82,1209	82,9073	83,6091	82,9678	82,7143	83,259	83,1829	82,9109	83,028	82,685	82,93852	0,3052
3,5	100,0945	100,853	100,891	100,819	100,66	100,854	100,941	100,629	100,812	100,688	100,72411	0,2441
4	116,6812	117,247	117,389	117,3	117,197	117,36	117,227	116,969	117,481	117,5	117,2349	0,2479
4,5	132,3535	133,087	133,154	133,339	132,373	133,411	133,327	132,175	133,093	133,277	132,95885	0,4693
5	144,9306	144,41	144,385	144,175	143,908	143,865	143,356	143,964	143,138	143,893	144,00228	0,5175

Anexo 5. "Programa realizado en Matlab Simulink necesario para obtener las constantes de proporcionalidad de las descargas de los tanques."



Anexo 6. "Resultados experimentales para obtener las constantes de proporcionalidad del tanque T1."

Tanque I										
Des. A (con válvula)										
Experimento	T. [V]	B.	Tramo	F. [cm³/s]	Altura fl.[cm]	Altura des. [cm]	Altura t. [cm]	K [[cm³/s]/[cm^{1/2}]]		
2	1,7	2	Largo	22,3096	11,5	21,8	33,3	3,8661		
3	1,716	2	Largo	23,1378	15	21,8	36,8	3,8142		
4	1,732	2	Largo	23,9622	17	21,8	38,8	3,8469		
1	1,75	2	Largo	24,8851	20,5	21,8	42,3	3,8262		
Des. B (sin válvula)										
Promedio 3,8383										
Experimento	T. [V]	B.	Tramo	F. [cm³/s]	Altura fl.[cm]	Altura des. [cm]	Altura t. [cm]	K [[cm³/s]/[cm^{1/2}]]		
2	1,75	2	Largo	24,8851	10,25	21,4	31,65	4,4234		
3	1,766	2	Largo	25,7014	14	21,4	35,4	4,3197		
4	1,782	2	Largo	26,5141	17	21,4	38,4	4,2787		
1	1,8	2	Largo	27,4240	19	21,4	40,4	4,3146		
Promedio 4,3341										

Anexo 7. "Resultados experimentales para obtener las constantes de proporcionalidad del tanque T3."

Tanque 3										
<i>Des. A (con válvula)</i>										
<i>Experimento</i>	<i>T. [V]</i>	<i>B.</i>	<i>Tramo</i>	<i>F. [cm³/s]</i>	<i>Altura fl.[cm]</i>	<i>Altura des. [cm]</i>	<i>Altura t. [cm]</i>	<i>K [[cm³/s]/[cm^{1/2}]]</i>		
2	1,8	1	Largo	24,3033	6	21,9	21,9	27,9	4,6011	
3	1,816	1	Largo	25,0696	12	21,9	21,9	33,9	4,3057	
4	1,832	1	Largo	25,8326	20	21,9	21,9	41,9	3,9908	
1	1,85	1	Largo	26,6869	22	21,9	21,9	43,9	4,0278	
<i>Des. B (sin válvula)</i>										
<i>Experimento</i>	<i>T. [V]</i>	<i>B.</i>	<i>Tramo</i>	<i>F. [cm³/s]</i>	<i>Altura fl.[cm]</i>	<i>Altura des. [cm]</i>	<i>Altura t. [cm]</i>	<i>K [[cm³/s]/[cm^{1/2}]]</i>		
2	1,8	1	Largo	24,3033	10,5	21	21	31,5	4,3302	
3	1,816	1	Largo	25,0696	15	21	21	36	4,1783	
4	1,832	1	Largo	25,8326	22	21	21	43	3,9394	
1	1,85	1	Largo	26,6869	20	21	21	41	4,1678	
<i>Promedio</i>									4,2314	
<i>Promedio</i>									4,1539	

Anexo 8. "Resultados experimentales para obtener las constantes de proporcionalidad del tanque T2 y T4."

Tanque 2										
<i>Desc. B (sin válvula)</i>										
<i>Experimento</i>	<i>T. [V]</i>	<i>B.</i>	<i>Tramo</i>	<i>F. [cm³/s]</i>	<i>Altura fl.[cm]</i>	<i>Altura des. [cm]</i>	<i>Altura t. [cm]</i>	<i>K [[cm³/s]/[cm^{1/2}]]</i>		
4	1,275	1	Corto	19,8224	6	14,4	20,4	4,3887		
2	1,3	1	Corto	21,2060	8	14,4	22,4	4,4806		
3	1,325	1	Corto	22,5765	17	14,4	31,4	4,0289		
1	1,4	1	Corto	26,6119	23	14,4	37,4	4,3515		
Tanque 4								Promedio	4,3124	
<i>Des. B (sin válvula)</i>										
<i>Experimento</i>	<i>T. [V]</i>	<i>B.</i>	<i>Tramo</i>	<i>F. [cm³/s]</i>	<i>Altura fl.[cm]</i>	<i>Altura des. [cm]</i>	<i>Altura t. [cm]</i>	<i>K [[cm³/s]/[cm^{1/2}]]</i>		
3	1,26	2	Corto	23,0349	10	15	25	4,6070		
2	1,275	2	Corto	23,9069	10	15	25	4,7814		
4	1,29	2	Corto	24,7738	13,5	15	28,5	4,6406		
1	1,32	2	Corto	26,4927	25	15	40	4,1889		
Promedio								4,5544		

Anexo 9. "Resultados experimentales grupo de descargas A."

<i>Tramo medio comunicación grupo descargas A</i>												
<i>E.</i>	<i>T. [V]</i>	<i>B.</i>	<i>Tramo</i>	<i>F. [cm³/s]</i>	<i>AL [cm]</i>	<i>T1</i>	<i>AL [cm]</i>	<i>T3</i>	<i>AL. int.</i>	<i>AL. T. medio</i>	<i>K tr. med. T1T3</i>	<i>K tr. med. T3T1</i>
8	1,732	1	Medio	22,1301	8		4,3		4,85	17,05	4,0471	-
9	1,75	1	Medio	23,0393	10,5		6,5		4,85	17,05	4,0476	-
10	1,766	1	Medio	23,8436	12		8		4,85	17,05	4,0952	-
11	1,782	1	Medio	24,6443	17		12,65		4,85	17,05	3,9513	-
5	1,7	2	Medio	25,8034	5,15		8		4,85	16,95	-	4,7268
6	1,716	2	Medio	26,6537	13,25		17		4,85	16,95	-	4,2790
7	1,732	2	Medio	27,5000	21		25,2		4,85	16,95	-	4,0113
12	1,724	2	Medio	27,0773	14,4		17,75		4,85	16,95	-	4,3056
<i>Promedio</i>											<i>4,0353</i>	<i>4,3307</i>

Anexo 10. "Resultados experimentales grupo de descargas B"

Tramo medio comunicación descargas B

<i>Ex.</i>	<i>T. [V]</i>	<i>B.</i>	<i>Tramo</i>	<i>F. [cm³/s]</i>	<i>A. [cm]</i>	<i>T1</i>	<i>A. [cm]</i>	<i>T3</i>	<i>A. des. 3B[cm]</i>	<i>A. des. 1B[cm]</i>	<i>K t medio: [(cm³/s)/(cm^{-1/2})]</i>
1	1,716	1	Medio	21,3179	9		4,5		21	-	10,0494
2	1,732	1	Medio	22,1301	11,5		6,75		21	-	10,1540
3	1,75	1	Medio	23,0393	15		10		21	-	10,3035
4	1,716	2	Medio	26,6537	13,25		18,5		-	21,4	11,6326
5	1,7	2	Medio	25,8034	6		10		-	21,4	12,9017
6	1,732	2	Medio	27,5000	12,25		17,25		-	21,4	12,2984
<i>Promedio</i>											<i>11,2233</i>

BIBLIOGRAFÍA

1. Musa, R.Z., *Laboratorios Remotos. Análisis, Características y su desarrollo como Alternativa a la Práctica en la Facultad de Ingeniería.*, in *Magazine Inge-CUC*. 2010.
2. Musa, R.Z., *Laboratorios Remotos: Actualidad y Tendencias Futuras*, in *Scientia et Technica Año XVII*. 2012. p. 113-118.
3. Aliane, N., *Experiencia de Uso de un Laboratorio Remoto de Control*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, 2010. **7**(1): p. 85-90.
4. Yunus A. Cengel, J.M.C., *Macánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones*. 2006: McGraw-Hill Interamericana. 997.
5. Giles, R.V., *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica*. Schaum Publishing Company. 273.
6. Mataix, C., *Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas*. 2 ed., Madrid: Ediciones del Castillo S.S. 660.
7. Marcos Andreu, D.Z., Jaime Rohten, Ernesto Rubio, Iván Santana, Vladimir Esparza, Pedro Melín, *Parameter Identification and Adaptive PI Control using SLD-UBB*, in *2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)*. 2018, IEEE: Concepción, Chile.
8. Katherine Pérez, H.V., Cristian Castro, Jesús Chacón, Luis de la Torre, *Coupled tanks laboratory for teaching multivariable control concepts*, in *2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)*. 2018, IEEE: Concepción, Chile.
9. Felipe D. J. Sorcia-Vázquez, C.D.G.-B., Guillermo Valencia-Palomo, Gerardo Guerrero-Ramirez, Manuel Adam-Medina, Ricardo Escobar-Jimenez, *Control Predictivo Distribuido Óptimo Aplicado al Control de Nivel de un Proceso de Cuatro Tanques Acoplados.*, in *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*. 2015. p. 365-375.

10. Agustin, P.C., S.M. Jose, and C.M.d. Mar, *Development of an open experimentation tool based on JavaScript for the control of a four-tank plant*. Computer Applications in Engineering Education, 2018. **26**(2): p. 228-238.
11. Spiegel, M.R., *Estadística*. 2 ed. 1997: Mc Graw Hill. 572.
12. Figueroa, L.F., *Sistemas de Control de Procesos*. Vol. 1. 1994. 70.
13. Ogata, K., *Ingeniería de Control Moderno* 5ed. 2010: Pearson Education S.A. 904.
14. Carl A. Smith, A.B.C., *Principles and Practice of Automatic Process Control*. 2 ed. 1997: John Wiley & Sons, Inc. 768.